

國立交通大學
機械工程學系碩士班
碩士論文



沒水式超音波對於向列型液晶聲光效應的影響

Influence of Immersion Ultrasound on Acousto-optic
Response of Nematic Liquid Crystals

研究生：嚴承侯

指導教授：尹慶中 博士

中華民國九十七年七月

沒水式超音波對於向列型液晶聲光效應的影響
Influence of Immersion Ultrasound on Acousto-optic
Response of Nematic Liquid Crystals

研究生：嚴承侯

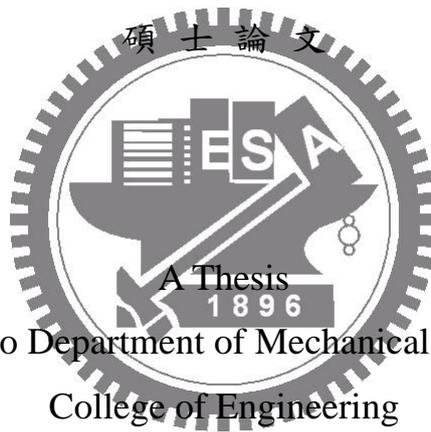
Student : Cheng-Hou Yen

指導教授：尹慶中 博士

Advisor : Dr. Ching-Chung Yin

國立交通大學

機械工程學系碩士班



Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

July 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年七月

沒水式超音波對於向列型液晶聲光效應的影響

研究生：嚴承侯

指導教授：尹慶中 博士

國立交通大學機械工程學系碩士班

摘 要

向列型液晶為單光軸晶體，具有雙折射效應的光學性質，除了電場、磁場之外，還可以藉聲場改變液晶分子排列的平衡狀態。本研究將液晶盒沒入水槽內，探討向列型液晶受到斜束超音波照射產生的聲光效應。夾於兩片玻璃之間的液晶層假設為具有單一黏滯係數的牛頓流體，並以等向性固體近似。數值分析係以全域矩陣法推導液晶盒的反射係數與聲場能量分布，解釋聲導波操控不同尺寸液晶盒內向列型液晶分子排列的能力。沒水式超音波以不同入射角照射液晶盒，在特定頻率下於試片中產生特定模式的聲導波，實驗結果顯示液晶盒受到多重模式聲導波的影響，液晶分子會發生重排。數值模擬顯示液晶盒中央的液晶層聲場能量主要源於對稱聲導波，對稱聲導波扮演重排液晶分子的重要推手角色。低頻聲導波對於較薄液晶盒之液晶分子重排的影響比試片較厚者大。在目前的沒水式超音波實驗架構下，不易觀察出高頻聲導波改變液晶分子排列的效果。

關鍵字：向列型液晶、分子重排、聲導波、反射係數、聲場能量分布

Influence of Immersion Ultrasound on Acousto-optic Response of Nematic Liquid Crystals

Student: Cheng-Hou Yen

Advisor: Dr. Ching-Chung Yin

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Nematic liquid crystals (NLC) are optically uniaxial, birefringent materials. Besides electric and magnetic fields, the orientations could be altered from the equilibrium states by acoustic fields. This thesis investigates the acousto-optic effect of liquid crystal cells (LLC) which are immersed in water tank and insonified by obliquely incident acoustic beam. The liquid crystal material sandwiched between two glass plates is regarded as a Newtonian fluid and modeled to be an isotropic hypothetical solid with a single viscosity. Numerical analysis based on the global matrix formulation is performed to determine the reflection coefficients and acoustic energy distribution in the LLC. Experimental results show that the realignment of NLC molecules is due to multi-modal guided acoustic waves excited in LLC by changing the angle of incidence and driving frequency. Numerical simulations indicate that most acoustic energy in the middle liquid layer is contributed by the symmetric guided modes. The symmetric modes play significant role on the acoustic realignment of NLC. In addition, low frequency acoustic guided waves have stronger influence on reorientation of the NLC molecules in a thin cell than that in a thick one. Unfortunately, it is not distinguishable the effect of high frequency guided waves on acoustic realignment of the NLC molecules under the present experimental setup of immersion ultrasound.

Keywords: nematic liquid crystals, realignment of molecules, acoustic guided waves, reflection coefficient, acoustic energy distribution.

誌謝

在此獻上滿心的感謝於指導教授 尹慶中博士，感謝老師兩年的栽培與指教，無論當下及未來都能體會老師的用心，我一定會謹記「思考」兩字。感謝馬劍清老師、何旭川老師及蕭國模老師能夠於炙熱的酷暑中，撥冗擔任承侯的口試委員，給予建議與指教，使論文能夠更完整的呈現。感謝泰和學長、多聞學長、世明學長、雨青學長、世華學長在承侯遭遇研究上的瓶頸時，能給予適時的指導，還有感謝學長們在這兩年中，於生活上陪伴承侯的點點滴滴，所有的相處時間都是難能可貴的，承侯珍惜與學長們相處的每一刻、每一秒。感謝同學蔡汶志、潘權文一同在修課與研究上的協助，雖然常常有辛苦的感覺，但這些付出是有價值的，也唯有這辛苦的感覺能夠讓我們更加成長與認識，願我們永遠都能記住這份感覺。感謝學弟妹，鐘重光、黃康哲、張逸涵、吳昱瑾、賴佑年、蔡慶芳，在這短暫相處中有著許多指教與分享，實驗室裡的新生命力也因你們油然而生，相信這份新生命力能一直傳遞下去。感謝所有支持承侯的淡江童軍團夥伴與大同教會弟兄姐妹們，這一切也唯有最真的心能體會。最後，承侯要把這份心情與感動獻給最愛的父母親，以及親愛的弟弟，因為你們的用心與陪伴讓承侯有無比的動力完成碩士學業，我愛你們！短短兩年碩士生涯即將劃下句點，但這卻是一個新的開始，準備迎接新的挑戰，加油！

目錄

	頁次
中文摘要	i
英文摘要	ii
致謝	iii
目錄	iv
表目錄	vi
圖目錄	vii
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 文獻回顧	2
1.3 內容簡介	4
第二章 液晶理論	5
2.1 液晶簡介	5
2.1.1 液晶的分類	5
2.1.2 秩序參數	6
2.1.3 液晶的物理特性	7
2.2 液晶聲光理論	7
2.2.1 連續彈性體形變理論	7
2.2.2 光學理論	8
2.3 液晶試片聲導波波傳理論	9
2.3.1 液晶試片反射係數	9
2.3.2 液晶試片能量分布	15
第三章 實驗架構與量測	17
3.1 實驗平台設計	17



3.1.1 液晶試片的準備	17
3.1.2 沒水式聲光實驗	17
3.1.3 洩漏蘭姆波實驗	19
3.2 實驗的初始條件	19
3.3 實驗訊號量測	20
第四章 實驗結果與模擬分析討論	21
4.1 沒水式聲光實驗結果比較	21
4.1.1 影響液晶排列的導波模態	21
4.1.2 液晶試片的歷時曲線比較	22
4.2 理論模擬分析	24
4.2.1 液晶試片反射係數模擬分析	24
4.2.2 液晶試片能量曲線模擬分析	24
4.3 洩漏蘭姆波實驗結果與討論	26
第五章 結論與展望	28
5.1 結論	28
5.1.1 實驗結果分析	28
5.1.2 反射係數曲線與能量曲線在液晶試片的模擬分析	29
5.2 未來展望	29
參考文獻	31
附表	33
附圖	42
簡歷	80



表目錄

表 1 數值計算採用的材料常數	33
表 2 ENC 空液晶試片玻璃性質	34
表 3 液晶試片尺寸	35
表 4 向列型液晶 5CB 的材料參數	36
表 5 超音波換能器規格	37
表 6 光接收器 New Focus 1801 的規格	38
表 7 液晶試片於 S_0 與 S_1 模態的穿透光強度歷時曲線實驗結果	39
表 8 液晶層厚度改變的能量頻譜峰值頻率對應表	40
表 9 反射係數、能量頻譜及聲光實驗所對應的聲導波模態頻率	41



圖目錄

圖 2.1	(a)向列型、(b)層列型及(c)膽固醇型液晶示意圖	42
圖 2.2	向列型液晶分子示意圖	43
圖 2.3	液晶的(a)展曲、(b)扭曲及(c)彎曲示意圖	44
圖 2.4	理想流體中的液晶試片受平面聲波照射示意圖	45
圖 2.5	液晶試片內超音波能量傳遞剖面示意圖	46
圖 3.1	光譜分析儀實體照片	47
圖 3.2	UV 燈實體照片	48
圖 3.3	加熱板實體照片	49
圖 3.4	EHC 液晶試片製作完成的照片	49
圖 3.5	沒水式聲光實驗示意圖、照片	50
圖 3.6	液晶試片(a)立體圖(b)剖面圖	52
圖 3.7	超音波換能器聲場強度分佈示意圖	53
圖 3.8	洩漏蘭姆波實驗示意圖、照片	54
圖 4.1	1100/50/1100 μm 液晶試片反射係數(虛線)與 能量曲線(實線), 超音波入射角為(a) 20°(b) 21°	56
圖 4.2	1100/50/1100 μm 液晶試片反射係數(虛線)與 能量曲線(實線), 超音波入射角為(a) 22°(b) 23°	57
圖 4.3	1100/50/1100 μm 液晶試片反射係數(虛線)與 能量曲線(實線), 超音波入射角為(a) 24°(b) 25°	58
圖 4.4	穿透光強度穩態實驗值與模擬的液晶試片 聲導波頻散曲線比較, 試片分別為 (a)1100/50/1100 μm (b)600/65/600 μm	59
圖 4.5	1100/50/1100 μm 液晶試片受不同超音波入射角 (a) 20°~22°(b) 24°~25°照射的穩態穿透光強度頻譜	60

圖 4.6	1100/50/1100 μm 液晶試片 A_0 模態的穩態穿透光強度 頻譜, 超音波入射角為(a) $46^\circ \sim 48^\circ$ (b) $49^\circ \sim 50^\circ$	61
圖 4.7	1100/50/1100 μm 液晶試片受不同驅動電壓激發之 超音波以 20° 入射角照射的穩態穿透光強度頻譜	62
圖 4.8	1100/50/1100 μm 液晶試片的 S_1 模態穿透光強度 歷時曲線, (a) $20^\circ \sim 22^\circ$ 、(b) $23^\circ \sim 25^\circ$ 對應的導波模態頻率	63
圖 4.9	600/65/600 μm 液晶試片的 S_0 模態穿透光強度 歷時曲線, (a) $20^\circ \sim 22^\circ$ 、(b) $23^\circ \sim 25^\circ$ 對應的導波模態頻率	64
圖 4.10	1100/50/1100 μm 液晶試片的 S_0 模態穿透光強度 歷時曲線, (a) $20^\circ \sim 22^\circ$ 、(b) $23^\circ \sim 25^\circ$ 對應的導波模態頻率	65
圖 4.11	600/65/600 μm 液晶試片的 S_1 模態穿透光強度 歷時曲線, (a) $20^\circ \sim 22^\circ$ 、(b) $23^\circ \sim 25^\circ$ 對應的導波模態頻率	66
圖 4.12	液晶試片的穿透光未穩態歷時曲線 (a) 1100/50/1100 μm S_0 導波模態-入射角 22° -0.92MHz (b) 600/65/600 μm S_1 導波模態-入射角 20° -4.52MHz	67
圖 4.13	600/65/600 μm 液晶試片的穿透光未穩態歷時曲線 (a) S_1 導波模態-入射角 22° -5.12MHz (b) S_1 導波模態-入射角 24° -5.4MHz	68
圖 4.14	600/65/600 μm 液晶試片的導波模態 S_1 -入射角 25° -5.8MHz 穿透光未穩態歷時曲線	69
圖 4.15	入射角 16° 所對應的相速度在 1100/50/1100 μm 液晶試片頻散曲線的分佈	69

圖 4.16	1100/50/1100 μm 液晶試片受不同入射角照射的 反射係數(a) 16°、17°(b) 18°、19°	70
圖 4.17	1100/50/1100 μm 液晶試片受不同入射角照射的 反射係數(a) 20°、21°(b) 22°、23°	71
圖 4.18	1100/50/1100 μm 液晶試片受不同入射角照射的 反射係數(a) 24°、25°(b) 26°、27°	72
圖 4.19	液晶試片玻璃厚度對於能量頻譜的影響 (a) 600~800 μm (b) 900~1100 μm	73
圖 4.20	液晶層厚度對於液晶層能量頻譜的影響 (a) 50~56 μm (b) 59~65 μm	74
圖 4.21	超音波入射角 20°對不同厚度液晶試片的穿透光穩態響應	75
圖 4.22	超音波入射角 20°對不同厚度液晶試片的液晶層能量頻譜	75
圖 4.23	超音波以入射角(a) 20°(b) 21°照射 600/65/600 μm 液晶試片 的穿透光強度與洩漏蘭姆波反射振幅頻譜	76
圖 4.24	超音波以入射角(a) 22°(b) 23°照射 600/65/600 μm 液晶試片 的穿透光強度與洩漏蘭姆波反射振幅頻譜	77
圖 4.25	超音波以入射角(a) 24°(b) 25°照射 600/65/600 μm 液晶試片 的穿透光強度與洩漏蘭姆波反射振幅頻譜	78
圖 4.26	超音波以入射角(a) 20°~22°(b) 20°~22°照射 600/65/600 μm 液晶試片 的洩漏蘭姆波反射振幅頻譜	79

第一章緒論

1.1 研究背景

液晶的發現可追溯到 1888 年，奧地利植物學家 F.Reinitzer 在實驗時，發現一種膽固醇的安息香酸或乙酸的酯化物，加熱到熔點時，會融成為混濁的液體，繼續加熱至某一溫度，其混濁的液體會突然變成清澈透明，此溫度稱為清亮點。隔年，德國的物理學家 O. Lehmann 以偏光顯微鏡觀察，施加一溫度梯度於此液體上，會開始轉動，此現象又稱「Lehmann rotation」，因具有與光學晶體類似的雙折射效應，故命名為液晶。

液晶的發展歷程已經一百多年了，隨著科技日新月異的進步，液晶對人類生活有卓越的貢獻。液晶具備一定比例的分子配向和流動性，在光學上具有光的異向性與誘電性，受到電場、磁場等外場作用，分子排列會發生重排的趨勢，造成液晶材料明暗對比的改變。六十年代末期，動態色散現象的發現使得液晶在顯示器方面有所突破，液晶顯示器本身並不發光，與其它類型的顯示器不同，而是借助外界光源達到顯示的目的。擁有質量輕、體積小、低功率等特色，符合環保概念。

機械力對於液晶排列影響的研究還不是很成熟，液晶具有黏滯性流體及結晶般固體的雙重特性，又稱做第四態物質，不容易掌握其微觀的變化。以目前的理論與技術，已初步發現聲場與液晶排列之間有耦合關係存在，可以實際應用於光穿透性、高聲光效應等相關的研究。過去已有多位學者針對這個主題做過探討。甚至對於材料的非破壞檢測都有應用的潛力，例如醫學檢測或水中聲納探測等，都是指日可待的應用。

1.2 文獻回顧

電磁場操控液晶的排列在商業運轉上已有卓越的表現，以聲場控制液晶排列的研究迄今已將近四十年，進展遲緩，卻仍持續有研究論文問世。若以所採用的實驗裝置分類，可分成三類。共振實驗裝置的研究可追溯至 1972 年，Bertolotti *et al* [1]以厚度模式(thickness mode)的超音波駐波改變向列型液晶分子排列，實驗結果顯示脈衝訊號的作用時間越長，穿透光強度持續變化的時間也會增長。1976 年，Sripaipan *et al* [2]以接觸式超音波換能器黏置於向列型液晶試片的背面，試片的背面為反射鏡，光線穿透液晶兩次，觀察反射光強度，探討聲光效應。液晶受到壓力波作用，在液晶試片內產生駐波，駐波反節線(anti-node line)位置的液晶分子排列改變，造成光穿透率增加。1977 年，Dion 與 Jacob [3]提出超音波的異向性衰減，產生的力矩引起液晶分子轉動之假說，分子傾向於使能量損失最小而轉動。於 1978 年，Dion [4]以不可逆過程熵為最小值的觀點，驗證此假說。

1977 年，Letcher *et al* [5]首先採用沒水式超音波斜射向列型液晶試片的實驗架構，改變超音波換能器與試片的距離、環境溫度及超音波強度，液晶試片會呈現不同的亮紋圖案。並指出固定超音波強度，光通過液晶試片的穿透率會隨著溫度增加而快速上升。1980 年，Candau *et al* [6]從聲流(acoustic streaming)的觀點探討聲光效應，並簡化液晶為非黏性流體，因速度梯度引起液晶分子轉動。

2002 年，Selinger *et al* [7]提出以彈性連續理論及自由能為基礎的流體動力模型，藉光軸-密度之間的耦合關係，將聲光效應予以量化，並懷疑 Dion 所提出的力矩密度假說。2003 年，Greanya *et al* [8]將 Selinger *et al* [7]的實驗做更進一步的探討，敘述液晶層厚度對聲光效應的影響及到達穩態響應的時間。2004 年，Malanoski *et al* [9]延續

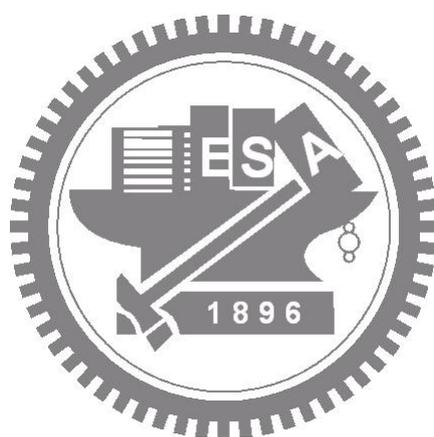
Selinger *et al* [7]的理論做進一步的探討，由邊界條件的改變推導液晶分子重新排列後的光穿透率。2005年，Greanya *et al* [10]著手於向列型液晶之動態響應實驗，應用超音波在液晶層產生駐波，使液晶分子產生轉動，並推導透光強度與超音波作用時間關係。

1999年 Moritake *et al* [11]以指叉換能器(interdigital transducer, IDT)激發表面聲波(surface acoustic wave, SAW)的方式，觀察對於 glass/liquid crystal/glass 試片的影響。隔年，Inoue *et al* [12]將向列型液晶簡化為等向性流體，以數值方法分析聲導波在 glass/liquid crystal/glass 的波傳特性，並由實驗量測液晶透光度的明暗週期，計算縱波在液晶中傳遞的波長。2005年，Toda *et al* [13]延續 Inoue *et al* [12]的實驗架構，理論模擬則將液晶層假設為非等向性流體。

2007年，蘇裕為[14]以沒水式超音波換能器激發 0.2~7.0MHz 的縱波，斜束入射沒於水槽的液晶試片，調整超音波強度、入射角等參數，以光接收器量測穿透液晶試片之光強度，經由透光強度的改變，間接觀察液晶分子受到超音波照射而重排。實驗結果得知，各入射角度所產生的聲導波共振頻率處，會使液晶分子排列改變，尤其 S_0 、 S_1 模態導致的液晶分子排列改變甚為明顯，但 A_0 模態較不明顯。2007年，施文斌[15]將液晶簡化為具單一黏滯係數的等向性流體，推導玻璃/液晶/玻璃之三明治結構的聲導波波傳，數值模擬聲導波相速度頻散曲線及各模態的位移、應力與應變分布，推估液晶分子排列所受的影響。數值結果發現 A_0 、 S_0 與 S_1 模態之聲導波在液體層具有明顯壓力梯度，能夠影響液晶分子的排列。

1.3 內容簡介

本研究模擬液晶試片的反射係數與超音波能量分布，探討兩種不同尺寸的液晶試片受聲導波影響液晶排列的機制，並配合沒水式超音波實驗量測。全文共分五章，第二章簡述液晶的種類與光學的特性，推導液晶試片的反射係數與超音波能量分布，第三章敘述實驗量測。第四章討論聲導波對液晶試片的影響，並比較聲導波對兩種不同尺寸液晶試片的影響程度。第五章為結論與未來工作展望。



第二章 液晶聲光理論

本章主要介紹液晶的光學性質與液晶試片的反射係數與超音波能量分布，液晶本身所擁有固態結晶的材料異向性，為了降低其複雜性，將液晶簡化為具黏滯係數的等向性液體，本研究以水為等向性液體進行模擬，液晶試片所包含的材料參數如表 1 所列，並利用純量勢函數與向量勢函數推導反射係數與聲導波在液晶層的能量分布。

2.1 液晶簡介

不同的溫度及壓力條件下，物質有固體、液體、氣體三種不同的狀態，一般稱為固相、液相、氣相。固體具有一定的形狀，微觀下的分子晶格排列是井然有序的，可承受外力而產生一定比例的變形。液體具有高流動性，無法承受較大的剪力，分子的排列在局部區域與另一局部區域是不一樣的，所以形狀受外界因素影響。氣體的分子排列沒有規則，其運動更是劇烈。

由固態升溫轉變成液態的過程時，分子規則的排列逐漸開始被破壞，達至一定的溫度區間時，分子會因不同的溫度區段而形成不同排列，溫度區間的起點稱為熔點，終點稱為清亮點。最先形成的分子排列會有層狀結構，接著此層狀結構會被破壞，但分子的取向仍然保持一規律的排列。此時的物質不但擁有固相的晶體異向性，又存在著液相的高流動性，也就是所謂的液晶相，溫度超過清亮點就會成為等向性的液相。因為液晶相介於固相與液相之間，所以液晶相也稱為中間相，液晶也被稱為中間物。

2.1.1 液晶的分類

依照分子的排列構造，液晶可分成向列型、層列型、膽固醇型三

類，是 1992 年法國的 G. Friedel [16] 所分類。如圖 2.1 所示，向列型分子的長軸保持平行，黏度小於層列型，各分子於長軸方向較易於流動，最常應用於顯示器上。層列型為層狀構造，分子排列與層面垂直或夾一傾角，各層分子平行排列，層與層之間的距離是一定的，有序性比向列型高，存在的溫度範圍比向列型低。層列型液晶最接近固態，保持著類似晶格的結構，可以產生一暫態偶極而形成鐵電性，具商業化利用價值。膽固醇型是將向列型參雜一化學元素，形成類似膽固醇的衍生物，各層分子的長軸方向與鄰接層分子有微小的偏向，整體形成螺旋構造，各層分子的排列與向列型一樣沿同一方向排列，膽固醇型的特色就是具有旋光性，可進行選擇性反射。

2.1.2 秩序參數

向列型液晶的分子排列比高溫時的同性分子要顯得有序，為了定量有序性的程度，必須定義一秩序參數。微觀下，把液晶簡化為一長棒狀分子，以單位向量 \mathbf{a} 表示其長軸，假設液晶性質軸對稱於長軸，將所有長棒分子平均方位設為 \mathbf{n} ，取適當的座標系統如圖 2.2 所示，定義秩序參數(order parameter) S 為

$$S = \frac{1}{2} \langle 3 \cos^2 \theta - 1 \rangle \quad (2.1)$$

上式的 θ 為 \mathbf{a} 與 \mathbf{n} 的夾角，符號 $\langle \rangle$ 代表對空間的平均。當 $\theta = 0$ 或 π 時，向列型液晶的平均方位是豎立的狀態，故 $S = 1$ 。當 $\theta = \pi/2$ 時，向列型液晶的平均方位是躺平的狀態，得 $S = -1/2$ 。如果液晶分子的排列方位是隨機分佈，則排列與 θ 沒有關係，即 $S = 0$ 。

2.1.3 液晶的物理特性

液晶的分子排列方向有一定的規則，液晶的許多物理常數都是異向性。向列型液晶是單光軸液晶，光軸與分子長軸重合，與光軸相垂直的平面上之物理特性具等向性的。液晶的異向性物理量都只具有兩個獨立分量，一個分量是與光軸平行的分量，另一個分量是與光軸垂直，以折射率而言，入射光垂直光軸入射且偏振方向平行於光軸所觀察到的折色率為 n_e ，沿光軸入射且偏振方向垂直於光軸所觀察到的折色率為 n_o 。

2.2 液晶聲光理論

聲光效應是一種聲波與電磁波之間的耦合效應，本研究以向列型液晶為研究對象，聲壓影響液晶的形變，液晶的光軸產生轉向。光軸的偏轉產生雙折射效應，以下分別對液晶的形變和光學理論做描述。

2.2.1 連續彈性體形變理論

液晶分子的大小僅數個奈米，在忽略個別液晶分子的情況下，可把液晶視做連續介質。在外場的作用下，可以改變液晶分子的排列方向，取消外場後，經由分子間的互相作用，會逐漸恢復到原本排列方向。當液晶各處的平均排列偏離原本的平衡狀態，改變成新的平衡態，則稱液晶發生變形。彈性體遭受外力時，其內部會產生反抗形變的恢復力，液晶同樣可以類比成此物理現象。如圖 2.3 所示，液晶的變形分為三種類型：展曲(splay)、扭曲(twist)及彎曲(bend)，這三種狀態的彈性常數分別設為 k_{11} 、 k_{22} 、 k_{33} 。相較於一般彈性體，液晶的彈性常數很小，所以液晶分子的排列容易受電場、磁場、應力場等影響而改變。

2.2.2 光學理論

本研究的實驗以氦氖雷射為光源，經過一偏極片使其成為線偏光，再沿向列型液晶的光軸方向入射，超音波斜束照射液晶試片，部分聲波折射進入試片，形成沿著試片波傳的聲導波影響液晶排列，使氦氖雷射的入射方向與向列型液晶的光軸夾一角度，因為向列型液晶的雙折射效應而造成相位延遲，使得入射光束的偏極狀態發生改變。向列型液晶具有晶體異向性的特性，藉由 Helmholtz 方程式來描述異向性晶體的光穿透行為，未來期望能夠經由實驗參數或假設一初始條件，經由 Helmholtz 方程式推算出光穿透向列型液晶的行為，進一步計算向列型液晶經過聲導波影響所產生的轉角。以下將介紹 Helmholtz 方程式並推導單光軸晶體的折射率橢球方程式，Helmholtz 方程式表示為：

$$\mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{E}) - (\mathbf{k} \cdot \mathbf{k})\mathbf{E} + k_0^2 \boldsymbol{\varepsilon}_r \mathbf{E} = 0 \quad (2.2)$$

其中 \mathbf{k} 為波傳向量、 \mathbf{E} 為電場、 k_0 為真空中的波數、 $\boldsymbol{\varepsilon}_r$ 為相對介電常

數，已知 $\boldsymbol{\varepsilon}_r = \boldsymbol{\varepsilon}_0 \begin{bmatrix} n_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_z^2 \end{bmatrix}$ ， $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ 為真空中介電常數， $\hat{\mathbf{e}}_x$ 、 $\hat{\mathbf{e}}_y$ 、 $\hat{\mathbf{e}}_z$ 為互

相獨立的主軸方向，將 $\mathbf{k} = k_x \hat{\mathbf{e}}_x + k_y \hat{\mathbf{e}}_y + k_z \hat{\mathbf{e}}_z$ 、 $\mathbf{E} = E_x \hat{\mathbf{e}}_x + E_y \hat{\mathbf{e}}_y + E_z \hat{\mathbf{e}}_z$ 代

入(2.2)式，可將(2.2)式化簡成一齊次方程式為

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{N} = 0 \quad (2.3)$$

其中，

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} k_0^2 n_x^2 - k^2 + k_x^2 & k_x k_y & k_x k_z \\ k_y k_x & k_0^2 n_y^2 - k^2 + k_y^2 & k_y k_z \\ k_z k_x & k_z k_y & k_0^2 n_z^2 - k^2 + k_z^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{N} = \{E_x \quad E_y \quad E_z\}^T$$

(2.3)式必須滿足非零解的充分條件如下：

$$\det(\mathbf{M}) = 0 \quad (2.4)$$

將(2.4)式展開，可得 \mathbf{k} 分量所構成的座標空間曲面表示式：

$$(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) \left(\frac{k_x^2}{n_y^2 \cdot n_z^2} + \frac{k_y^2}{n_x^2 \cdot n_z^2} + \frac{k_z^2}{n_x^2 \cdot n_y^2} \right) - k_0^2 \left(\frac{k_x^2 + k_y^2}{n_z^2} + \frac{k_y^2 + k_z^2}{n_x^2} + \frac{k_z^2 + k_x^2}{n_y^2} \right) + k_0^4 = 0 \quad (2.5)$$

其中的 n_x 、 n_y 、 n_z 分別為晶體三個主軸方向上的折射率。

向列型液晶為單光軸晶體，選擇適當的座標系統， $n_x = n_y = n_o$ 、

$n_z = n_e$ ，代入(2.5)式，可化簡成

$$\left(\frac{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}{n_o^2} - k_0^2 \right) \left(\frac{k_x^2 + k_y^2}{n_e^2} + \frac{k_z^2}{n_o^2} - k_0^2 \right) = 0 \quad (2.6)$$

(2.6)式可計算出通過單光軸晶體的光波傳方向。

2.3 液晶試片聲導波波傳理論

本論文所探討液晶試片上下兩層為玻璃，中間為液晶，利用全域矩陣法推導玻璃/液晶/玻璃三明治結構的反射係數與能量分布，此方法以上傳波與下傳波的觀念建立各層介質中的波傳應力與位移關係。

2.3.1 液晶試片反射係數

考慮液晶試片浸沒於理想流體裡，受到一平面聲波傾斜照射，試片的示意圖及參考座標系如圖 2.4 所示。座標原點設於試片底層的下界面，座標軸 x_2 垂直試片的平面，各界面的座標設為 y_0 、 y_1 、 y_2 、 y_3 ，並假設 x_3 方向為無限長，視為二維波傳問題。

忽略體力的作用下，線彈性體之運動方程式與本構方程式為

$$\rho \ddot{u}_i = \sigma_{ij,j} \quad (2.7)$$

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} u_{k,l} \quad (2.8)$$

將各層位移向量以純量勢函數 Φ 與向量勢函數 Ψ 表示如下

$$u_m = \frac{\partial \Phi_m}{\partial x_1} - \frac{\partial \Psi_m}{\partial x_2} \quad (2.9a)$$

$$v_m = \frac{\partial \Phi_m}{\partial x_2} + \frac{\partial \Psi_m}{\partial x_1} \quad (2.9b)$$

將(2.9a)式與(2.9b)式代入(2.8)式，應力分量表示如下

$$\sigma_{12}^m = 2\mu_m \frac{\partial^2 \Phi_m}{\partial x_1 \partial x_2} + \mu_m \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \right) \Psi_m \quad (2.10a)$$

$$\begin{aligned} &= \mu_m \left(2 \frac{\partial^2 \Phi_m}{\partial x_1 \partial x_2} + 2 \frac{\partial^2 \Psi_m}{\partial x_1^2} + k_{2m}^2 \Psi_m \right) \\ \sigma_{22}^m &= (\lambda_m \nabla^2 + 2\mu_m \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}) \Phi_m + 2\mu_m \frac{\partial^2 \Psi_m}{\partial x_1 \partial x_2} \quad (2.10b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= -\mu_m (k_{2m}^2 \Phi_m + 2 \frac{\partial^2 \Phi_m}{\partial x_1^2} - 2 \frac{\partial^2 \Psi_m}{\partial x_1 \partial x_2}) \\ \sigma_{11}^m &= (\lambda_m \nabla^2 + 2\mu_m \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}) \Phi_m - 2\mu_m \frac{\partial^2 \Psi_m}{\partial x_1 \partial x_2} \quad (2.10c) \end{aligned}$$

假設試片的各層介質為等向性材料，第 m 層介質存在一個時諧波(plane harmonic wave)，其波向量(wave vector)具有 x_1 分量 k ，藉助純量勢函數 Φ_m 與向量勢函數 Ψ_m 推導介質內的彈性波波傳。勢函數解的形式為

$$\Phi_m(x_1, x_2) = \{C_{1m}^+ e^{i\eta_m(x_2 - y_{m-1})} + C_{1m}^- e^{i\eta_m(y_m - x_2)}\} \exp i(kx_1 - \omega t) \quad (2.11a)$$

$$\Psi_m(x_1, x_2) = \{C_{2m}^+ e^{i\nu_m(x_2 - y_{m-1})} + C_{2m}^- e^{i\nu_m(y_m - x_2)}\} \exp i(kx_1 - \omega t) \quad (2.11b)$$

此處， $k = (\omega/c_0)\sin\theta$ 為 x_1 方向之波數(wave number)， c_0 是平面波在理想流體內的波速， θ 是入射角， ω 為角頻率， C_{1m}^+ 代表壓力波在第 m 層之上傳波的待定係數， C_{1m}^- 代表壓力波在第 m 層之下傳波的待定係數， C_{2m}^+ 代表剪力波在第 m 層之上傳波的待定數， C_{2m}^- 代表剪力波在第 m 層之下傳的待定系數， η_m 與 ν_m 為壓力波與剪力波在 x_2 方向之波數，分別定義為

$$\eta_m = \begin{cases} \sqrt{k_{1m}^2 - k^2}, & |k| \leq k_{1m} \\ i\sqrt{k^2 - k_{1m}^2}, & k_{1m} < |k| \end{cases} \quad (2.12a)$$

$$\nu_m = \begin{cases} \sqrt{k_{2m}^2 - k^2}, & |k| \leq k_{2m} \\ i\sqrt{k^2 - k_{2m}^2}, & k_{2m} < |k| \end{cases} \quad (2.12b)$$

其中， k_{1m} 代表壓力波在第 m 層的波數， k_{2m} 代表剪力波在第 m 層的波數。

假設存在於液晶試片上下方的理想流體之純量勢函數 Φ 與向量勢函數 Ψ 為

$$\Phi_{bottom}(x_1, x_2) = \{e^{i\eta_0(x_2 - y_0)} + Re^{i\eta_0(y_0 - x_2)}\} \exp i(kx_1 - \omega t), \quad (2.13a)$$

$$\Psi_{bottom}(x_1, x_2) = 0, \quad x_2 < y_0 \quad (2.13b)$$

$$\Phi_{top}(x_1, x_2) = Te^{i\eta_0(x_2 - H)} \exp i(kx_1 - \omega t), \quad (2.14a)$$

$$\Psi_{top}(x_1, x_2) = 0, \quad x_2 > H \quad (2.14b)$$

此處， R 與 T 分別表示反射係數與穿透係數， H 表示液晶試片的總厚度。將(2.11)式代入(2.9a)式、(2.9b)式與(2.10a)式、(2.10b)，整理獲得各層的位移向量與應力分量，以矩陣形式表示為

$$\begin{Bmatrix} u_m \\ v_m \end{Bmatrix} = [\mathbf{Q}_1^+(m) \quad \mathbf{Q}_1^-(m)] \begin{Bmatrix} C_{1m}^+ e^{i\eta_m(x_2-y_{m-1})} \\ C_{2m}^+ e^{iv_m(x_2-y_{m-1})} \\ C_{1m}^- e^{i\eta_m(y_{m-1}-x_2)} \\ C_{2m}^- e^{iv_m(y_{m-1}-x_2)} \end{Bmatrix} \exp i(kx_1 - \omega t) \quad (2.15a)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{12}^m \\ \sigma_{22}^m \end{Bmatrix} = [\mathbf{Q}_2^+(m) \quad \mathbf{Q}_2^-(m)] \begin{Bmatrix} C_{1m}^+ e^{i\eta_m(x_2-y_{m-1})} \\ C_{2m}^+ e^{iv_m(x_2-y_{m-1})} \\ C_{1m}^- e^{i\eta_m(y_{m-1}-x_2)} \\ C_{2m}^- e^{iv_m(y_{m-1}-x_2)} \end{Bmatrix} \exp i(kx_1 - \omega t) \quad (2.15b)$$

其中，

$$\mathbf{Q}_1^+(m) = \begin{bmatrix} ik & -iv_m \\ i\eta_m & ik \end{bmatrix} \quad \mathbf{Q}_2^+(m) = \begin{bmatrix} -2\mu_m\eta_mk & -\mu_m(2k^2 - k_{2m}^2) \\ \mu_m(2k^2 - k_{2m}^2) & -2\mu_mv_mk \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q}_1^-(m) = \begin{bmatrix} ik & -iv_m \\ i\eta_m & ik \end{bmatrix} \quad \mathbf{Q}_2^-(m) = \begin{bmatrix} -2\mu_m\eta_mk & -\mu_m(2k^2 - k_{2m}^2) \\ \mu_m(2k^2 - k_{2m}^2) & -2\mu_mv_mk \end{bmatrix}$$

當 $m=2$ 時，位於液體層在 x_2 方向的波數可參考施文斌[15]定義為

$$\eta_2 = \sqrt{k_{12}^2 - k^2} = \sqrt{\frac{\omega^2 \rho_2}{c'_{11}} - k^2}, \quad c'_{11} = \kappa - (4/3)i\omega\mu_f \quad (2.16a)$$

$$v_2 = \sqrt{k_{22}^2 - k^2} = \sqrt{\frac{\omega^2 \rho_2}{\mu_2} - k^2}, \quad \mu_2 = -i\omega\mu_f \quad (2.16b)$$

其中， ρ_2 為液體層密度(density)，

κ 為液體之容積模數(bulk modulus)，

μ_f 為液體黏滯係數(viscosity)。

定義一位移與曳力構成的狀態向量(state vector)函數為

$$\mathbf{S}_m(x_2) = \{\mathbf{U}_m(x_2) \quad \mathbf{t}_m(x_2)\}^T \quad (2.17)$$

其中，

$$\mathbf{U}_m(x_2) = \{u_m(x_2) \quad v_m(x_2)\}^T \quad (2.18a)$$

$$\mathbf{t}_m(x_2) = \{\sigma_{12}^m(x_2) \quad \sigma_{22}^m(x_2)\}^T \quad (2.18b)$$

第 m ($= 1, 2, 3$) 層的上下界面條件與邊界條件必須滿足位移與曳力連續，即

$$\mathbf{S}_{bottom} = \mathbf{S}_1 \quad (2.19a)$$

$$\mathbf{S}_1 = \mathbf{S}_2 \quad (2.19b)$$

$$\mathbf{S}_2 = \mathbf{S}_3 \quad (2.19c)$$

$$\mathbf{S}_3 = \mathbf{S}_{top} \quad (2.19d)$$

其中，分別在 $x_2 = y_0$ 及 $x_2 = H$ 的狀態向量為

$$\mathbf{S}_{bottom} = \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_{bottom} \\ \mathbf{t}_{bottom} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{u_b \quad i\eta_0(1+R)\}^T \\ \{0 \quad -\rho_0\omega^2(1+R)\}^T \end{Bmatrix}$$

$$\mathbf{S}_{top} = \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_{top} \\ \mathbf{t}_{top} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{u_t \quad i\eta_0 T\}^T \\ \{0 \quad -\rho_0\omega^2 T\}^T \end{Bmatrix}$$

其中， u_b 、 u_t 分別為試片底部及頂部理想流體與固體試片之間的切線滑移(slip)。探討超音波照射液晶試片的反射係數及各層介質的上下傳波待定係數，聯立界面連續條件與邊界條件，建立全域矩陣方程式如下

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{C} = \mathbf{F} \quad (2.20)$$

其中，

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1^-(0) & -\mathbf{Q}_1^+(1) & -\mathbf{Q}_1^-(1)\mathbf{D}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{Q}_2^-(0) & -\mathbf{Q}_2^+(1) & -\mathbf{Q}_2^-(1)\mathbf{D}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Q}_1^+(1)\mathbf{D}_1 & \mathbf{Q}_1^-(1) & -\mathbf{Q}_1^+(2) & -\mathbf{Q}_1^-(2)\mathbf{D}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Q}_2^+(1)\mathbf{D}_1 & \mathbf{Q}_2^-(1) & -\mathbf{Q}_2^+(2) & -\mathbf{Q}_2^-(2)\mathbf{D}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_1^+(2)\mathbf{D}_2 & \mathbf{Q}_1^-(2) & -\mathbf{Q}_1^+(3) & -\mathbf{Q}_1^-(3)\mathbf{D}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_2^+(2)\mathbf{D}_2 & \mathbf{Q}_2^-(2) & -\mathbf{Q}_2^+(3) & -\mathbf{Q}_2^-(3)\mathbf{D}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_1^+(3)\mathbf{D}_3 & \mathbf{Q}_1^-(3) & -\mathbf{Q}_1^+(4) \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_2^+(3)\mathbf{D}_3 & \mathbf{Q}_2^-(3) & -\mathbf{Q}_2^+(4) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \{\mathbf{C}_0^-, \mathbf{C}_1^+, \mathbf{C}_1^-, \mathbf{C}_2^+, \mathbf{C}_2^-, \mathbf{C}_3^+, \mathbf{C}_3^-, \mathbf{C}_4^+\}^T$$

$$\mathbf{F} = \{\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0}\}^T$$

其中，所有的子矩陣均為 2×2 的矩陣，所有的向量都有兩個分量，子矩陣的表示式如下

$$\mathbf{Q}_1^+(m) = \begin{bmatrix} ik & -iv_m \\ i\eta_m & ik \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_2^+(m) = \begin{bmatrix} -2\mu_m\eta_mk & -\mu_m(2k^2 - k_{2m}^2) \\ \mu_m(2k^2 - k_{2m}^2) & -2\mu_mv_mk \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q}_1^-(m) = \begin{bmatrix} ik & iv_m \\ -i\eta_m & ik \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_2^-(m) = \begin{bmatrix} 2\mu_m\eta_mk & -\mu_m(2k^2 - k_{2m}^2) \\ \mu_m(2k^2 - k_{2m}^2) & 2\mu_mv_mk \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_m^+ = \begin{Bmatrix} C_{1m}^+ \\ C_{2m}^+ \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{C}_m^- = \begin{Bmatrix} C_{1m}^- \\ C_{2m}^- \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{D}_m = \begin{bmatrix} e^{i\eta_m h_m} & 0 \\ 0 & e^{iv_m h_m} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q}_1^-(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i\eta_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_2^-(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\rho_0\omega^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_0^- = \begin{Bmatrix} u_b \\ R \end{Bmatrix},$$

$$\mathbf{Q}_1^+(4) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i\eta_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_2^+(4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\rho_0\omega^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_4^+ = \begin{Bmatrix} u_t \\ T \end{Bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ -i\eta_0 \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{F}_2 = \begin{Bmatrix} 0 \\ \rho_0\omega^2 \end{Bmatrix}$$

此處， η_0 為理想流體內 x_2 方向的波數， ρ_0 為理想流體的密度。利用克拉瑪法則解(2.20)式，可求得反射係數 R ，將不同頻率下所求出的反射係數繪成反射係數頻譜。

2.3.2 液晶試片能量分布

液晶試片在不同導波模態作用下，產生不同的形變，造成液晶層內的壓力梯度不同，改變液晶分子的排列狀態。本節推導超音波能量在各層介質的分布，參考圖 2.5 所示，考慮液晶試片內超音波通過 x_2x_3 平面的能量，其中 x_3 方向取 1 單位長度。彈性波通過參考面的能量可表示為

$$E_T = \frac{1}{T} \int_0^T \left(- \int_S \sigma_{ij} n_j \dot{u}_i ds \right) dt \quad (2.21)$$

其中 T 為週期， S 代表作用面， σ_{ij} 為應力分量， n_j 為參考面的法向量， \dot{u}_i 為質點速度。考慮一個法向量為 $\mathbf{n} = \mathbf{e}_1$ 的鉛垂面，即 $n_j = \delta_{j1}$ ，令質點位移為

$$u_i = \text{Re}(U_i e^{-i\omega t}) \quad (2.22a)$$

可求得質點速度為

$$\dot{u}_i = \text{Re}(-i\omega U_i e^{-i\omega t}) \quad (2.22b)$$

表面曳力分量為

$$\sigma_{ij} n_j = \sigma_{i1} = \text{Re}(S_{i1} e^{-i\omega t}) \quad (2.22c)$$

把(2.22b)式與(2.22c)式以複數形式展開，進一步計算可得

$$\dot{u}_i = \omega \{ U_I \cos(\omega t) - U_R \sin(\omega t) \} \quad (2.23a)$$

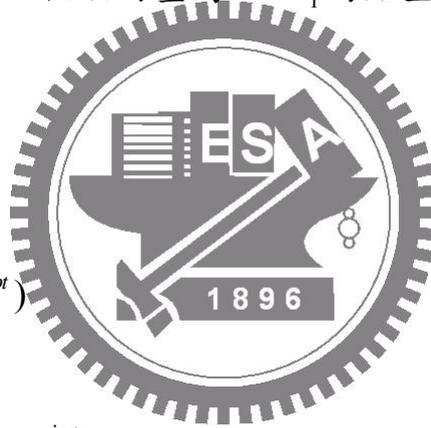
$$\sigma_{i1} = S_R \cos(\omega t) + S_I \sin(\omega t) \quad (2.23b)$$

把(2.23a)式與(2.23b)式代入(2.21)式可得

$$E_T = -\frac{\omega}{2} \int \text{Im}(U_i S_{i1}^*) dx_2 \quad (2.24)$$

其中， $\text{Im}(U_i S_{i1}^*) = U_I S_R - U_R S_I$

假設通過 x_2x_3 截面的總能量是沿 x_1 方向與 x_2 方向波傳的彈性波所造成，並利用勢函數 Φ_m 與 Ψ_m 表示位移與應力，將(2.11)式代入(2.9a)



式、(2.9b)式與(2.10a)式、(2.10c)式可得

$$\begin{Bmatrix} u_m \\ v_m \end{Bmatrix} = [\mathbf{A}(m) \quad \mathbf{B}(m)] \begin{Bmatrix} C_{1m}^+ e^{i\eta_m(x_2 - y_{m-1})} \\ C_{2m}^+ e^{iv_m(x_2 - y_{m-1})} \\ C_{1m}^- e^{i\eta_m(y_{m-1} - x_2)} \\ C_{2m}^- e^{iv_m(y_{m-1} - x_2)} \end{Bmatrix} \exp i(kx_1 - \omega t) \quad (2.25a)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11}^m \\ \sigma_{12}^m \end{Bmatrix} = [\mathbf{G}(m) \quad \mathbf{H}(m)] \begin{Bmatrix} C_{1m}^+ e^{i\eta_m(x_2 - y_{m-1})} \\ C_{2m}^+ e^{iv_m(x_2 - y_{m-1})} \\ C_{1m}^- e^{i\eta_m(y_{m-1} - x_2)} \\ C_{2m}^- e^{iv_m(y_{m-1} - x_2)} \end{Bmatrix} \exp i(kx_1 - \omega t) \quad (2.25b)$$

其中，

$$\mathbf{A}(m) = \begin{bmatrix} ik & -iv_m \\ i\eta_m & ik \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}(m) = \begin{bmatrix} ik & iv_m \\ -i\eta_m & ik \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G}(m) = \begin{bmatrix} \mu_m(2k^2 - k_{2m}^2) & 2\mu_m v_m k \\ -2\mu_m \eta_m k & -\mu_m(2k^2 - k_{2m}^2) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}(m) = \begin{bmatrix} \mu_m(2k^2 - k_{2m}^2) & -2\mu_m v_m k \\ 2\mu_m \eta_m k & -\mu_m(2k^2 - k_{2m}^2) \end{bmatrix}$$

計算出不同 x_2 位置的位移與應力，代入(2.24)式，可得不同頻率下的各層介質能量分布。

第三章 實驗架構與量測

本研究採用類似 Letcher *et al* [5]的實驗架構，進行量測向列型液晶試片的聲光效應。將液晶試片設置於壓克力水槽內，以沒水式超音波換能器激發壓力波，斜束入射於液晶試片，觀察穿透試片的氦氖雷射光強度變化，討論液晶之聲光效應。

3.1 實驗平台設計

3.1.1 液晶試片的準備

本研究採用日商 EHC 公司製作的空液晶盒填充液晶，空試片的玻璃性質如表 2 所列。蘇裕為[14]採用的液晶試片與 EHC 液晶盒的差異在於幾何尺寸的不同，如表 3 所列。為了確定空液晶試片液晶層的間隙，以光譜分析儀量測其間隙厚度，實驗儀器如圖 3.1 所示。採用 NOA65 的 UV 膠將非灌口的兩側封住，再以 UV 燈烘焗十分鐘。為了避免紫外光傷及眼睛，可利用鋁箔紙擋住紫外光，如圖 3.2 所示。待 UV 膠硬化之後，把空試片置放於加熱板上加熱至 60°C ，如圖 3.3 所示。再以毛細棒沾適量液晶準備灌入試片，灌完液晶後，關掉加熱板，使液晶試片的溫度隨著室溫下降至清亮點之下，液晶將產生較佳的垂直配向排列。液晶填充完畢之後，將另外兩側灌口以 UV 膠封邊，再以 AB 膠進行四邊的補強，製作完成的液晶試片如圖 3.4 所示。最後，以偏光顯微鏡檢察液晶排列是否良好。

3.1.2 沒水式聲光實驗

本研究實驗架構如圖 3.5 所示。實驗系統架設於光學桌上，在兩個正交的偏光板之間設置一個容積為 $42\times 40\times 20\text{cm}$ 的壓克力水槽，液晶試片浸沒於水槽中，以沒水式超音波換能器激發壓力波，斜射於液

晶試片。液晶試片內的液晶材料為大立高分子工業股份有限公司生產的正型向列型液晶 5CB，兩側覆蓋玻璃，如圖 3.6 所示。向列型液晶 5CB 的材料參數如表 4 所列。5CB 液晶材料的向列型排列狀態會受環境溫度影響，因此在水中加設一溫度控制器，將溫度控制於 30°C。使用波長 632.8nm 的氬氖雷射為光源，經透鏡聚焦於光接收器(New Focus Model 1801, 125-MHz)，量測穿透液晶試片的光強度變化。

激發超音波換能器的正弦波訊號由函數產生器(Aglient 33250A function generator)產生，電壓振幅為 80 mV_{pp}，以功率放大器(ENI model 325LA)將訊號增益 50dB。驅動電壓選定 80~100 mV_{pp} 是為了避免燒壞換能器。

實驗採用三個 Panametrics 公司的沒水式超音波換能器，中心頻率分別為 1、2.25、5MHz，換能器具有寬頻特性(videoscan type)，激發訊號在中心頻率會產生最大的超音波振幅。超音波聲場強度在近場範圍內分布不均勻，如圖 3.7 所示。軸向距離超過近場距離 N(near field distance)的區域才呈現均勻的高斯聲場分佈，換能器前方距離 N 處的聲場，具有最大之強度，呈現高斯分佈。距離增加，高斯分佈的最大值會慢慢降低，表 5 所列為使用的三種超音波換能器之規格及近場距離。

超音波換能器裝設於水槽上方的移動平台，使換能器可進行 x、y、 θ 三種自由度的調整，換能器及液晶試片的距離等於近場距離 N，避免聲場強度的不均勻，導致觀察錯誤。水槽內的水為 RO 逆滲透水，進行實驗前需先將水槽內的氣泡趕走，避免不必要的雜訊。並於水槽內的液晶試片上方架設數位相機，將影像傳輸至個人電腦上，方便觀測換能器與液晶試片之間的距離及角度，減少人為的裝設誤差，提高實驗的再現性。氬氖雷射垂直入射液晶試片的面積為一有限的區域，

所以只能確定有限區域的液晶排列受聲導波影響。

3.1.3 洩漏蘭姆波實驗

洩漏蘭姆波實驗採用兩個相同中心頻率的超音波換能器，以一個發射、一個接收的方式進行實驗，發射端經由函數產生器產生 80mV_{pp} 的正弦訊號，經功率放大器增益 50dB ，實驗示意圖如圖 3.8 所示。超音波經水傳遞至液晶試片，產生幾何反射波和洩漏蘭姆波，再由接收端接收兩者的干涉訊號。接收的訊號經前級放大後，以數位示波器擷取。為了減少人為誤差，個人電腦透過 GPIB 介面卡連接函數產生器與數位示波器，並以 LabVIEW 進行實驗控制。

實驗架構類似沒水式聲光實驗，水槽上方架設兩個超音波換能器，兩者均可進行三個自由度 θ 、 x 、 y 的位移調整，其中一個可以分厘卡進行 y 方向的微調，找出偵測洩漏蘭姆波訊號的最佳位置。採用 Panametrics 1MHz 的沒水式超音波換能器進行掃頻，實驗進行前需將入射角調整等於反射角，並以超音波換能器的近場距離極限為換能器與液晶試片的間距。

3.2 實驗的初始條件

氦氖雷射光路準直的校正包括鉛直仰角及水平轉角的校正。前者先在氦氖雷射的正前方放置一平面鏡，確定平面鏡沒有任何鉛直傾角與水平轉角，調整氦氖雷射光路的傾角，使雷射光點自平面鏡反射至雷射射出口的水平位置，但是盡量不要使雷射反射回出射口，以免造成氦氖雷射內部的損傷。

接著進行轉角校正，在氦氖雷射的正前方架設一移動平台，移動路徑與雷射準直路徑平行。在移動平台上架設一屏幕，使雷射在屏幕

上呈現光點。接著使平台前後移動，觀察光點在屏幕上的位置，利用相似三角形估算氦氖雷射光路的轉角偏移量。當光點在屏幕上幾乎都保持同一個位置時，氦氖雷射光路即為準直。

液晶試片的環境溫度影響液晶的透光性。實驗時，將初始水溫調至攝氏 30 度左右，之後利用溫控棒加溫，將水槽溫度維持在 30 度左右。

每次實驗前，先將氦氖雷射開啟三十分鐘以上，使光強度穩定。水槽內注入水後，靜置三十分鐘，避免水中微小顆粒的布朗運動會造成光的散射，使光通過偏光鏡時，發生漏光而影響光的穿透率。溫控棒的位置要離光路遠一點，因為溫控棒附近的水受熱時，會令周遭的微小顆粒產生較劇烈的擾動，影響光的穿透率。此外，當透光強度明顯超出初始強度時，停止控溫，透光強度會慢慢下降至初始強度。

3.3 實驗訊號量測

全部實驗都以 LabVIEW 圖形化程式操控，指令經 GBIP 介面卡，傳至函數產生器產生正弦波函數，激發超音波換能器產生連續縱波。再以 NI-DAQ 訊號擷取卡(PCI-6036E)擷取光接收器所接收的透光強度訊號，光接收器的規格如表 6 所示。

為避免超音波換能器連續激發造成過熱，須留意換能器每次激發的時間不宜持續過久。每一次量測之後，預留約 30~40 秒之緩衝時間，使換能器冷卻下來，才進行下一次的超音波激發。洩漏蘭姆波實驗與聲光實驗都需要掃頻，所費時間較長，都是以 LabVIEW 程式操控，前者是採用高頻的數位示波器擷取超音波訊號，後者則以低頻的 DAQ 卡擷取光強度訊號。

第四章 實驗結果與模擬分析討論

4.1 沒水式聲光實驗結果比較

沒水式聲光實驗將液晶試片沒入水槽內，試片內的液晶層受到超音波照射，部分聲波折射進入試片，形成沿著試片波傳的聲導波。聲導波在試片厚度方向的共振模態使得分子排列改變，調整超音波換能器的驅動電壓、掃頻範圍及入射角會影響穿透液晶試片的光強度變化。實驗以一部光接收器 News Focus 1801 擷取穿透光強度的暫態響應，取樣時間設為 0.25 秒，每一操作條件下，擷取 80 點數據，繪出穿透光強度的歷時曲線(time-history)。再將所擷取的最後 16 點數據平均，獲得接近穩態或已達穩態之平均穿透光強度。為了瞭解聲導波對液晶試片的影響程度，給予適當的頻率掃瞄範圍，觀察穿透光強度的變化。實驗共採用 3 枚超音波換能器，中心頻率分別為 1、2.25 及 5MHz，各換能器的頻率掃瞄範圍分別為 0.2~2.0 MHz、1.5~4.0 MHz 及 4.0~7.0 MHz，掃瞄的頻率間隔為 0.02 MHz，驅動電壓經 50dB 增益後，固定為 $25.28 V_{pp}$ ，超音波的入射角自 20° 至 25° ，每 1° 量測一次，比較兩種液晶層厚度的試片反應。

4.1.1 影響液晶排列的導波模態

平面聲波照射液晶試片的反射係數與入射角度、頻率、試片幾何尺寸及材料性質相關，反射係數的絕對值小於或等於 1。在特定頻率下，反射係數會趨於局部極小值，代表入射聲場的能量大部分折射進入試片，形成聲導波，僅有極少量或沒有能量反射。

反射係數絕對值的極小值發生頻率稱為液晶試片內聲導波的模態頻率，反對稱聲導波在試片厚度中央的液晶層之正向應力趨近於

零，液晶層又不能承受較大的剪應力。在模態頻率下，試片厚度中央的液晶層只有對稱聲導波的能量會增加。

針對 1100/50/1100 μm 的液晶試片進行聲光效應實驗與數值模擬。首先探討模擬部份，以入射角 $20^\circ\sim 25^\circ$ 的反射係數與能量分布頻譜能說明上述現象。如圖 4.1~4.3 所示，能量分布頻譜的峰值對應對稱聲導波的模態頻率。實驗部分，沒水式超音波以 $20^\circ\sim 25^\circ$ 入射角照射液晶試片，試片內產生的聲導波相速度為 $4406.17\sim 3565.87\text{m/s}$ 。若掃頻範圍介於 1.5~4.0 MHz，與自由聲導波頻散曲線比較，試片內的聲導波應該屬於 S_1 、 A_1 模態，如圖 4.4a 所示。然而，在上述頻率範圍內的聲光效應實驗結果僅出現一個峰值，如圖 4.5 所示，因此可以推斷此模態為對稱模態 S_1 。

為了確定反對稱模態對於液晶層的影響有限，根據頻散曲線，在 A_0 模態發生的頻率下，進行聲光效應實驗，以入射角 $46^\circ\sim 50^\circ$ ，對應的聲導波相速度為 $2094.98\sim 1967.25\text{m/s}$ 和掃頻範圍為 0.1~1.0 MHz 進行實驗，參考圖 4.6 所示，實驗結果顯示穿透光強度幾乎沒有明顯的改變。

入射角 $20^\circ\sim 25^\circ$ 範圍內，所對應的 S_2 模態必須以較大的電壓驅動才會有穿透光強度的改變，如圖 4.7 所示。因為高頻時的訊號衰減比較顯著，提高驅動電壓才能激發 S_2 模態。

4.1.2 液晶試片的歷時曲線比較

以光接收器擷取液晶試片穿透光強度的暫態響應，以時間為橫軸，穿透光強度為縱軸，繪製出歷時曲線。本文比較兩種不同厚度尺寸的液晶試片之 S_0 與 S_1 模態的穿透光強度歷時曲線，歸納出反應時間

與反應梯度，作為未來商業應用的參考。

如圖 4.8 所示，1100/50/1100 μm 液晶試片在 S_1 模態下的透光改變程度較大。另一方面，參考圖 4.9 所示，600/65/600 μm 液晶試片在 S_0 模態下的透光改變程度較大。兩個試片各模態的反應時間雖然會隨著角度增加而有縮短的趨勢，但是透光的改變量卻有明顯的下降，也就是說隨著入射角度的增加，聲導波的模態頻率遠離探頭的中心頻率。超音波傳遞至液晶層的能量逐漸遞減，這可能與沒水式超音波換能器本身的頻率響應特性相關，中心頻率所應的振幅強度最大，兩側逐漸減弱。

如圖 4.4 所示，在此範圍，這兩種試片的自由聲導波頻散曲線呈陡斜走勢。在 $20^\circ\sim 25^\circ$ 區間，1100/50/1100 μm 液晶試片的 S_1 模態相速度走勢比 600/65/600 μm 液晶試片的 S_0 模態平緩，亦即前者的模態頻率與中心頻率的差距較後者大，故入射之超音波強度變化較為劇烈，影響液晶排列的程度也會隨之變弱，此現象可經由透光強度的歷時曲線清楚觀察到。

1100/50/1100 μm 液晶試片的 S_0 模態與 600/65/600 μm 液晶試片的 S_1 模態影響透光強度的改變很小，由歷時曲線觀察到透光強度的變化，如圖 4.10、4.11 所示。在某些頻率下，透光強度無法在 20 秒的超音波作用時間內達到穩態，因此採用曲線擬合的方法處理透光強度歷時曲線尚未達到穩態的數據，如圖 4.12~4.14 所示。

將上述兩種液晶試片在入射角 $20^\circ\sim 25^\circ$ 所產生 S_0 、 S_1 導波模態歷時曲線的各项參數列於表 7，600/65/600 μm 液晶試片的 S_1 模態是以 25.28 V_{pp} 的交流電壓驅動 5 MHz 的超音波換能器，高頻超音波的衰減較為顯著，以致聲導波影響液晶排列的效果更差，透光強度不易達到穩定的狀態。

4.2 理論模擬分析

超音波入射液晶試片產生聲導波，造成液晶分子的排列改變，利用反射係數與能量分布頻譜可得知聲導波模態發生的頻率，本章以改變超音波入射角、液晶試片中液晶層或玻璃的厚度，進行模擬分析及比較，模擬分析的液晶材料性質假設類似水，在分析及實驗上會有些許的誤差。

4.2.1 液晶試片反射係數模擬分析

以 1100/50/1100 μm 液晶試片作為對象，計算入射角為 $16^\circ\sim 27^\circ$ 的反射係數。隨著入射角度的增加，反射係數的極小值會往高頻移動，如圖 4.16~4.18 所示。此現象與施文斌[15]計算的自由聲導波相速度頻散曲線趨勢相同。入射角為 16° 的反射係數極小值沒有對應到 S_0 、 A_1 模態，依據司乃耳定律，計算出聲導波相速度為 5467.33 m/s ，與 S_0 、 A_1 模態的頻散曲線沒有交點，如圖 4.15 所示。

由圖 4.16~4.18 可發現下列兩點：

- (1) 0.8 MHz 附近的 S_0 模態頻散曲線很陡峭，入射角 $17^\circ\sim 27^\circ$ 的反射係數極小值發生在 S_0 的模態頻率，模態頻率的偏移幅度很小。
- (2) 隨著入射角度增加， S_1 、 S_2 、 S_3 、 A_1 、 A_2 、 A_3 模態的相速度頻散曲線趨於平緩，在這些模態頻率處，在反射係數具有極小值，隨著入射角度增加，模態頻率大幅增加。

4.2.2 液晶試片能量頻譜模擬分析

由沒水式聲光實驗得知入射角 20° 時，穿透光強度的變化量最大，所以模擬分析以入射角 20° 為主。為了探討本實驗兩種不同厚度

液晶試片，造成液晶層能量分布的不同，分別模擬兩種狀況，其一為固定液晶層厚度與改變玻璃的厚度，其二為固定玻璃厚度與改變液晶層的厚度。

(一)固定液體層厚度，改變玻璃厚度模擬分析：

以液晶試片的玻璃厚度為模擬參數，範圍 600~1100 μm ，並固定液晶層厚度為 50 μm ，模擬液晶層的能量頻譜結果如圖 4.19 所示，觀察到此範圍的玻璃厚度增加，會使能量頻譜的峰值往低頻偏移，符合施文斌[15]模擬的頻散曲線結果。

(二)固定玻璃厚度，改變液晶層厚度模擬分析：

以液晶試片的液晶層厚度為模擬參數，範圍為 50~65 μm ，並固定玻璃厚度為 1100 μm ，液晶層厚度增加時，能量頻譜的峰值也會往低頻偏移，模擬液晶層的能量頻譜結果如圖 4.20 所示，與施文斌[15]模擬的頻散曲線結果一致。由於能量頻譜的偏移量太小不易觀察，將不同液晶層厚度的能量頻譜峰值對應的頻率列於表 8。

由(一)、(二)可預測 1100/50/1100 μm 的液晶試片改變厚度為 600/65/600 μm 的液晶試片，影響能量分布改變的主因是玻璃的厚度參數改變，所以推斷玻璃的厚度改變量對於液晶層能量局部極大值的頻率偏移量影響較大。

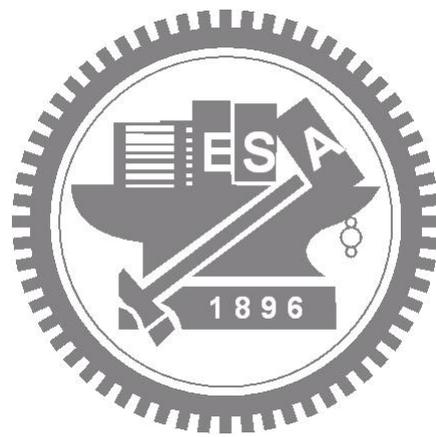
兩液晶試片以入射角 20°所共同對應的導波模態為 S_0 模態，所以取 0.2~2.0 MHz 的聲光效應實驗與能量頻譜做比較，如圖 4.21、圖 4.22 所示。能量頻譜的計算是基於平面聲波的假設，能量值沒有經過正規化(normalization)，所以無法由能量頻譜斷定不同的液晶試片的能量分布，只能確定玻璃厚度與液晶層厚度的改變對導波模態的頻率有所影響，為了更加明確說明此一現象，整理入射角 20°~25°的反射係數與能量頻譜的模擬，再配合沒水式聲光實驗的數據，如表 9 所列，可

知 1100/50/1100 μm 的液晶試片之導波模態頻率要比 600/65/600 μm 的液晶試片低。

4.3 洩漏蘭姆波實驗結果與討論

本研究曾以洩漏蘭姆波實驗驗證沒水式聲光實驗，解釋量測的穿透光強度峰值之發生頻率就是聲導波的模態頻率，液晶試片之聲導波在試片厚度方向的模態影響液晶分子排列。洩漏蘭姆波是一種偵測材料特性與缺陷的非破壞檢測(NDE)技術，過去在纖維補強複材層板上的應用成效顯著。入射聲束可採用一特定頻率的連續脈衝訊號(tone-burst signals)，或單一頻率的連續波(CW)。聲導波會在特定的模態頻率下發生於試片中，若平板試片周圍環境為液體的條件下，平行於試片波傳的聲導波，部分能量會由上下邊界洩漏於液體，故稱為洩漏蘭姆波。如圖 4.23~4.25 所示，在聲導波模態頻率處，因為部分能量耦合至液晶試片產生聲導波。反射訊號的振幅頻譜會有明顯的下降。反射振幅頻譜凹陷點對應的頻率即為使液晶發生排列改變的導波模態頻率，與沒水式聲光實驗的穿透光強度變化的頻率相符合，充分解釋聲導波影響液晶試片內的液晶排列，使穿透光強度發生變化。圖 4.23~4.25 中，兩實驗量測頻譜的導波模態頻率有一點偏差，因為洩漏蘭姆波實驗於水中進行，受到周圍流體的耦合效應，且沒水式聲光實驗與洩漏蘭姆波實驗並非於連續的時空環境下進行實驗，以致於液晶層內的聲導波模態頻率發生偏差。如圖 4.26 所示，隨著入射角度的增加，反射振幅頻譜凹陷點對應的頻率會往高頻移動，與沒水式聲光實驗所觀察到的導波模態頻率有相同的趨勢。洩漏蘭姆波實驗也可以時間脈衝做為激發訊號，反射訊號可以清楚分辨幾何反射訊號及洩漏蘭姆波訊號。然而時間訊號轉換至頻率域，會因取樣點數限制，使

頻率解析度降低。採用掃頻方式進行實驗，可以獲得較高的解析度。



第五章 結論與未來展望

5.1 結論

5.1.1 實驗結果分析

本研究以沒水式超音波斜束入射液晶試片，實驗量測發現超音波對於液晶的聲光效應有下列影響：

- (1) S_0 導波模態對於 600/65/600 μm 液晶試片的聲光效應影響較大。
- (2) 超音波的高頻衰減特性顯著，使用中心頻率 5MHz 以上的超音波探頭，必須提高驅動電壓達 28.44 V_{pp} 以上，才能在液晶試片中，激振出來影響液晶聲光效應的聲導波。
- (3) 超音波入射角在 $20^\circ \sim 25^\circ$ 範圍內，以相同的交流電壓驅動超音波換能器，在 1100/50/1100 μm 液晶試片內產生具有影響聲光效應的 S_1 導波之頻率低於 5MHz，600/65/600 μm 液晶試片的 S_1 導波模態則發生在 5MHz 附近。 S_1 導波模態對於 1100/50/1100 μm 液晶試片的聲光效應影響較大。
- (4) 入射角 $20^\circ \sim 25^\circ$ 對應的 S_0 、 S_1 導波模態，影響液晶試片的穿透光強度歷時曲線之反應時間大約為 1~4 秒左右，隨著入射角度的增加，反應時間有逐漸縮短的趨勢。
- (5) 比較洩漏蘭波實驗與液晶試片的聲光效應量測，驗證兩者有密切關聯。當入射超音波的頻率趨近液晶試片聲導波模態頻率時，大部分的超音波入射能量進入液晶試片，形成聲導波，造成液晶層的壓力變化，影響液晶分子排列改變，以致穿透光強度變化。

5.1.2 液晶試片的反射係數與能量分析

本研究的數值分析結果顯示，液晶試片的平面聲波反射係數與液晶層能量頻譜有下列特性：

- (1) 反對稱模態在能量頻譜上沒有明顯的效果，與本研究的實驗結果能夠相符。
- (2) 增加液晶盒的玻璃厚度與液晶層厚度，都會使反射係數極小值與能量頻譜峰值往低頻偏移。

5.2 未來展望

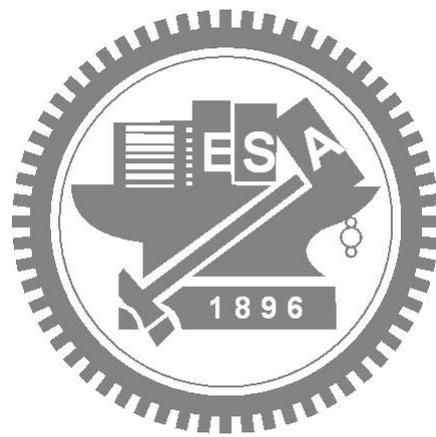
以指叉電極結合液晶試片產生固體/流體界面的 Scholte wave，也會影響液晶分子的排列，Scholte wave 是一種界面聲波，超音波能量主要分布於固體/液體之交會區，更具有操控液晶分子排列的潛力。

利用偏光顯微鏡直接觀察液晶的聲光效應，可以避免繁瑣的實驗架設，不需量測氬氬雷射穿透液晶試片的光強度，推斷液晶排列的狀況。液晶試片的玻璃尺寸大小，可能造成聲導波自試片邊緣反射，影響液晶分子的排列。將來可選用或製作較大尺寸的液晶盒，做為液晶試片。

本文以未正規化的能量頻譜研判對稱模態聲導波對於液晶排列的影響，雖有不周嚴之處，卻不影響結論。沒水式超音波換器的遠場聲壓有高斯分布的特性，未來可以假設一高斯分布的聲束取代平面聲波入射液晶試片，可以定量計算液晶層內聲導波能量。本研究以等向性黏滯性液體模擬對異向性黏滯特性的液晶，之後可進一步探討完整的液晶材料常數，建立聲導波與液晶耦合的數學模型。

氬氬雷射垂直入射液晶試片的面積為一個有限區域，只能確定該區域的液晶排列受聲導波影響，未來可以將氬氬雷射擴束入射液晶試

片，使氦氖雷射入射液晶的範圍變大，以說明聲導波對液晶排列影響的均勻性。



參考文獻

- [1] M. Bertolotti, S. Martellucci, F. Scudieri, and D. Sette (1972), “Acoustic modulation of light by nematic liquid crystals,” *Appl. Phys. Lett.*, **21**(2), 74-75.
- [2] C. Sripaipan, C. F. Hayes, and G. T. Fang (1977), “Ultrasonically induced optical effect in a nematic liquid crystal,” *Phys. Rev. A*, **15**(3), 1297-1303.
- [3] J. L. Dion and A. D. Jacob (1977), “A new hypothesis on ultrasonic interaction with a nematic liquid crystal,” *Appl. Phys. Lett.*, **31**(8), 490-493.
- [4] J. L. Dion (1979), “The orienting action of ultrasound on liquid crystals related to the theorem of minimum entropy production,” *J. Appl. Phys.*, **50**(4), 2965-2966.
- [5] S. Letcher, J. Lebrun, and S. Candau (1978), “Acoustic-optic effect in nematic liquid crystals,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **63**(1), 55-59.
- [6] S. Candau, A. Ferre, A. Peters, and G. Waton (1980), “Acoustical streaming in a film of nematic liquid crystal,” *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **61**, 7-30.
- [7] J. V. Selinger, M. S. Spector, V. A. Greanya, B. T. Weslowski, D. K. Shenoy, and R. Shashidhar (2002), “Acoustic realignment of nematic liquid crystals,” *Phys. Rev. E*, **66**, 051708.
- [8] V. A. Greanya, M. S. Spector, J. V. Selinger, B. T. Weslowski, and R. Shashidhar (2003), “Acousto-optic response of nematic liquid crystals,” *J. Appl. Phys.*, **94**(12), 7571-7575.
- [9] A. P. Malanoski, V. A. Greanya, B. T. Weslowski, M. S. Spector, J. V. Selinger, and R. Shashidhar (2004), “Theory of the acoustic realignment of nematic liquid crystals,” *Phys. Rev. E*, **69**, 021705.
- [10] V. A. Greanya, A. P. Malanoski, B. T. Weslowski, M. S. Spector, and

- J. V. Selinger (2005), "Dynamics of the acousto-optic effect in a nematic liquid crystal," *Liquid Crystals*, **32**(7), 933-941.
- [11]H. Moritake, T. Seike, and K. Toda (1999), "Acoustooptic effects of nematic liquid crystals induced by elastic wave propagating in glass substrate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, 3076-3079.
- [12]M. Inoue, H. Moritake, and K. Toda (2000), "Periodic property of domain in nematic liquid crystal induced by elastic wave," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39**, 3125-3129.
- [13]K. Toda, M. Inoue, H. Moritake, and K. Yoshino (2005), "Analysis of acoustic streaming in nematic liquid-crystal cell," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, 316-323.
- [14]蘇裕為 (2007), 聲導波對於向列型液晶排列的影響, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 新竹市, 台灣。
- [15]施文斌 (2007), 向列型液晶三明治結構的聲導波波傳, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 新竹市, 台灣。
- [16]G. Friedel (1922), *Ann.Physique*, **18**, 273.

表 1 數值計算採用的材料常數

材料	密度(kg/m^3)	彈性常數(GPa)		
	ρ	c_{11}	c_{12}	c_{44}
玻璃	2520	80.828	21.228	29.8
水	1000	2.25	2.25	0

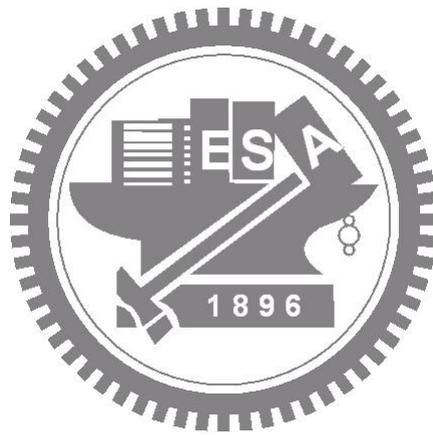


表 2 EHC 空液晶試片玻璃性質

試片	鈉鈣玻璃
性質	
化學組成 (%)	74 SiO ₂ , 13 Na ₂ O, 10.5 CaO, 1.3 Al ₂ O ₃ , 0.3 K ₂ O, 0.2 SO ₃ , 0.2 MgO, 0.01 TiO ₂ , 0.04 Fe ₂ O ₃
玻璃轉換溫度 (°C)	573
熱膨脹係數 (ppm/K)	9
密度 (g/cm ³)	2.52
折射率	1.518
楊氏模數 (GPa)	72
剪力模數 (GPa)	29.8
熔點 (°C)	1040

表 3 液晶試片尺寸

液晶試片編號	厚度方向尺寸 (mm)		幾何尺寸 (mm)	
EHC	玻璃厚度	1.1	長	25
	液晶層厚度	0.05	寬	18
	玻璃厚度	1.1	高	2.25
蘇裕為製作	玻璃厚度	0.6	長	38
	液晶層厚度	0.065	寬	28
	玻璃厚度	0.6	高	1.265



表 4 向列型液晶 5CB 的材料參數

熔點 /°C		24
清亮點 /°C		35.5
黏度 /cP (25°C)	η_1	129.6
	η_2	22.9
	η_3	37.4
折射係數 (20°C, 632.8nm)	n_e	1.706
	n_o	1.530
介電常數 (25°C)	$\Delta\epsilon$	0.175
	ϵ_{\parallel}	19.7
	ϵ_{\perp}	6.4
彈性係數 /dyne(22°C)	K_{11}	6.4×10^{-7}
	K_{33}	10.0×10^{-7}

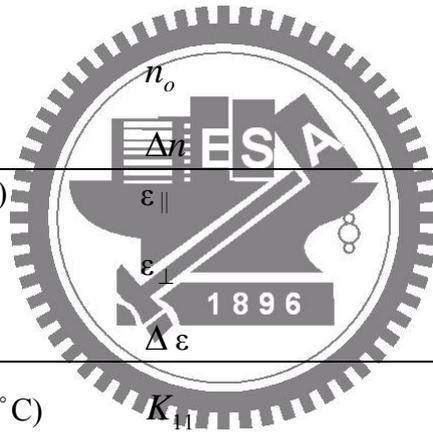


表 5 超音波換能器規格

Frequency (MHz)	Element Diameter (inch)	Near field distances (inch)
1.0	0.50	1.043
2.25	0.50	2.374
5	0.50	5.287

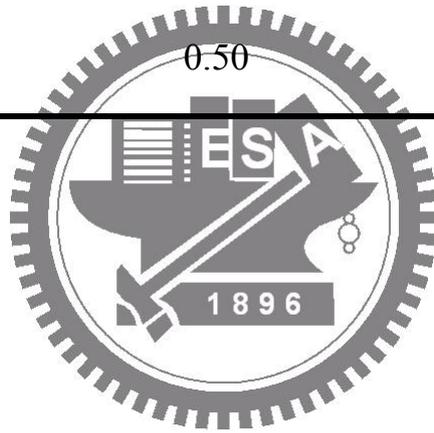


表 6 光接收器 New Focus 1801 的規格

Description	Specification
Wavelength Range	300-1050 nm
Coupling	DC or AC
3-dB Bandwidth (DC versions)	DC-125 MHz (typical)
3-dB Bandwidth (AC versions)	25 kHz-125MHz (typical)
DC Bias Monitor Bandwidth (AC versions only)	DC-50 kHz (typical)
Risetime	3 ns (typical)
Transimpedance Gain (AC-coupled version)	40 V/mA (AC) 1 V/mA (DC)
Transimpedance Gain (DC-coupled version)	40 V/mA
Output Impedance	50 Ω
Minimum NEP*	3.3 pW/ \sqrt{Hz}
CW Saturation Power	120 μ W @ 950 nm
Maximum Pulse Power	5 mW
Detector Material/Type	Silicon / PIN
Detector Diameter	0.8 mm
Power Requirements	\pm 15V DC; 250 mA
Optical Input	Free space (FS)
RF Output	SMA
DC Bias Monitor output (AC-coupled units only)	SMB

表 7 液晶試片 S_0 與 S_1 模態的穿透光強度歷時曲線實驗結果

液晶試片	1100/50/1100 μm										600/65/600 μm									
	入射角 (degree)	導波 模態 頻率 (MHz)	穿透光強度 (μW)	$\Delta_{10\% \sim 90\%}$ (μW)	反應 時間 (s)	反應 梯度 ($\mu\text{W/s}$)	入射角 (degree)	導波 模態 頻率 (MHz)	穿透光強度 (μW)	$\Delta_{10\% \sim 90\%}$ (μW)	反應 時間 (s)	反應 梯度 ($\mu\text{W/s}$)								
S_0	20	0.740	10.616	13.065	2.449	1.118	20	1.100	19.251	105.383	86.132	2.639	32.638							
	21	0.740	9.830	14.488	4.658	2.257	21	1.100	13.279	41.641	28.362	3.054	9.287							
	22	0.920	9.268	10.389	1.121	unstable	22	1.100	12.019	22.817	10.798	1.803	5.990							
	23	0.780	10.518	14.796	4.278	1.896	23	1.100	14.083	43.147	29.064	1.863	15.600							
	24	0.800	10.114	13.242	3.128	1.022	24	1.180	12.527	30.908	18.381	2.075	8.858							
	25	0.800	12.025	19.667	7.642	4.318	25	1.180	13.969	30.047	16.078	2.005	8.019							
S_1	20	2.640	22.285	111.925	89.64	2.881	20	4.520	17.216	19.185	1.969	unstable	NA							
	21	2.740	15.047	59.920	44.873	4.072	21	4.660	15.878	18.747	2.869	1.538	1.865							
	22	2.740	12.091	34.513	22.422	2.942	22	5.120	17.014	20.086	3.072	unstable	NA							
	23	2.840	11.556	21.924	10.368	2.236	23	5.180	16.930	20.055	3.125	1.377	2.269							
	24	2.860	13.267	19.566	6.299	2.068	24	5.400	16.525	17.365	0.84	unstable	NA							
	25	2.900	9.597	10.362	0.765	1.320	25	5.800	15.569	16.687	1.118	unstable	NA							

表 8 液晶層厚度改變對應液晶層能量頻譜峰值表

液晶層厚度 (μm)	50	53	56	59	62	65
導波模態	能量曲線峰值所對應的導波模態頻率 (MHz)					
S_0	0.773	0.760	0.746	0.734	0.722	0.711
S_1	2.719	2.703	2.688	2.674	2.661	2.649
S_2	5.073	5.062	5.052	5.043	5.035	5.027
	能量曲線峰值所對應的功率 (MJ/s)					
S_0	98.24	96.19	94.02	91.76	89.46	87.13
S_1	4463.83	4294.53	4133.12	3979.88	3834.71	3697.40
S_2	19185.6	18358.1	17601.2	16910.0	16279.2	15704.9

表 9 反射係數、能量頻譜及聲光實驗所對應的聲導波模態頻率

液晶試片		1100 μ m/50 μ m/1100 μ m			600 μ m/65 μ m/600 μ m		
入射角 (degree)	導波 模態 類型	反射係數 曲線對應 的導波模 態頻率 (MHz)	能量曲 線對應 的導波 模態頻 率 (MHz)	沒水式聲 光實驗的 導波模態 頻率 (MHz)	反射係數 曲線對應 的導波模 態頻率 (MHz)	能量曲 線對應 的導波 模態頻 率 (MHz)	沒水式聲 光實驗的 導波模態 頻率 (MHz)
20	S_0	0.756	0.773	0.740	1.008	1.040	1.100
	S_1	2.691	2.719	2.640	4.508	4.626	4.520
	S_2	5.021	5.073	4.920	NA	NA	NA
	A_1	2.376	NA	NA	4.360	NA	NA
	A_2	4.901	NA	NA	NA	NA	NA
21	S_0	0.769	0.787	0.740	1.020	1.053	1.100
	S_1	2.788	2.818	2.740	4.644	4.774	4.660
	S_2	5.316	5.376	NA	NA	NA	NA
	A_1	2.448	NA	NA	4.492	NA	NA
	A_2	5.200	NA	NA	NA	NA	NA
22	S_0	0.783	0.803	0.920	1.032	1.067	1.100
	S_1	2.903	2.935	2.740	4.796	4.941	5.120
	S_2	5.695	5.764	NA	NA	NA	NA
	A_1	2.525	NA	NA	4.635	NA	NA
	A_2	5.583	NA	NA	NA	NA	NA
23	S_0	0.799	0.821	0.780	1.047	1.085	1.100
	S_1	3.047	3.083	2.840	4.977	5.143	5.180
	S_2	6.223	6.307	NA	NA	NA	NA
	A_1	2.615	NA	NA	4.802	NA	NA
	A_2	6.120	NA	NA	NA	NA	NA
24	S_0	0.818	0.844	0.800	1.063	1.104	1.180
	S_1	3.241	3.281	2.860	5.203	5.398	5.400
	S_2	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	A_1	2.725	NA	NA	5.006	NA	NA
	A_2	NA	NA	NA	NA	NA	NA
25	S_0	0.842	0.872	0.800	1.082	1.127	1.180
	S_1	3.522	3.568	2.900	5.502	5.739	5.800
	S_2	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	A_1	2.864	NA	NA	5.265	NA	NA
	A_2	NA	NA	NA	NA	NA	NA

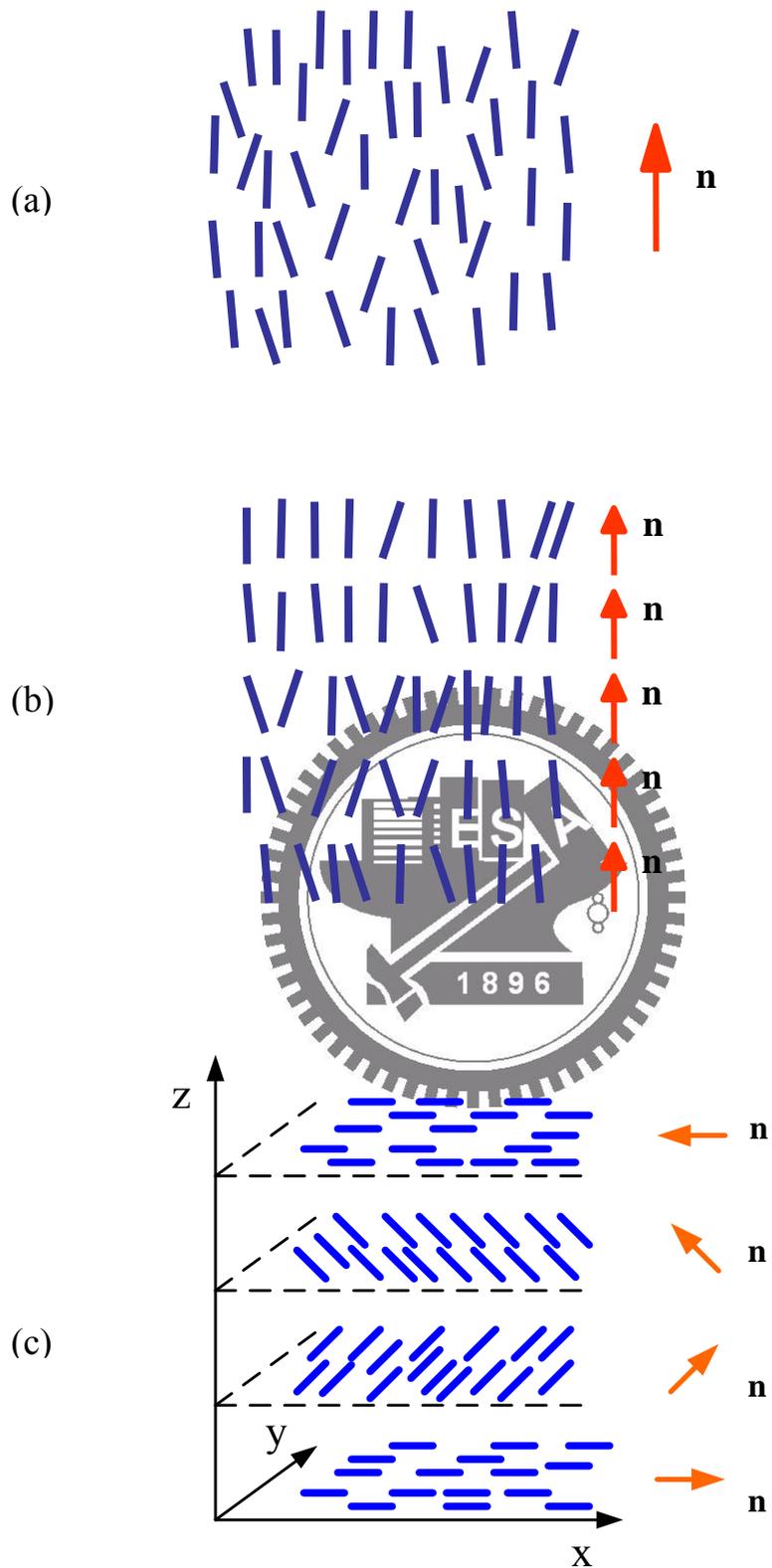


圖 2.1 (a)向列型、(b)層列型及(c)膽固醇型液晶示意圖

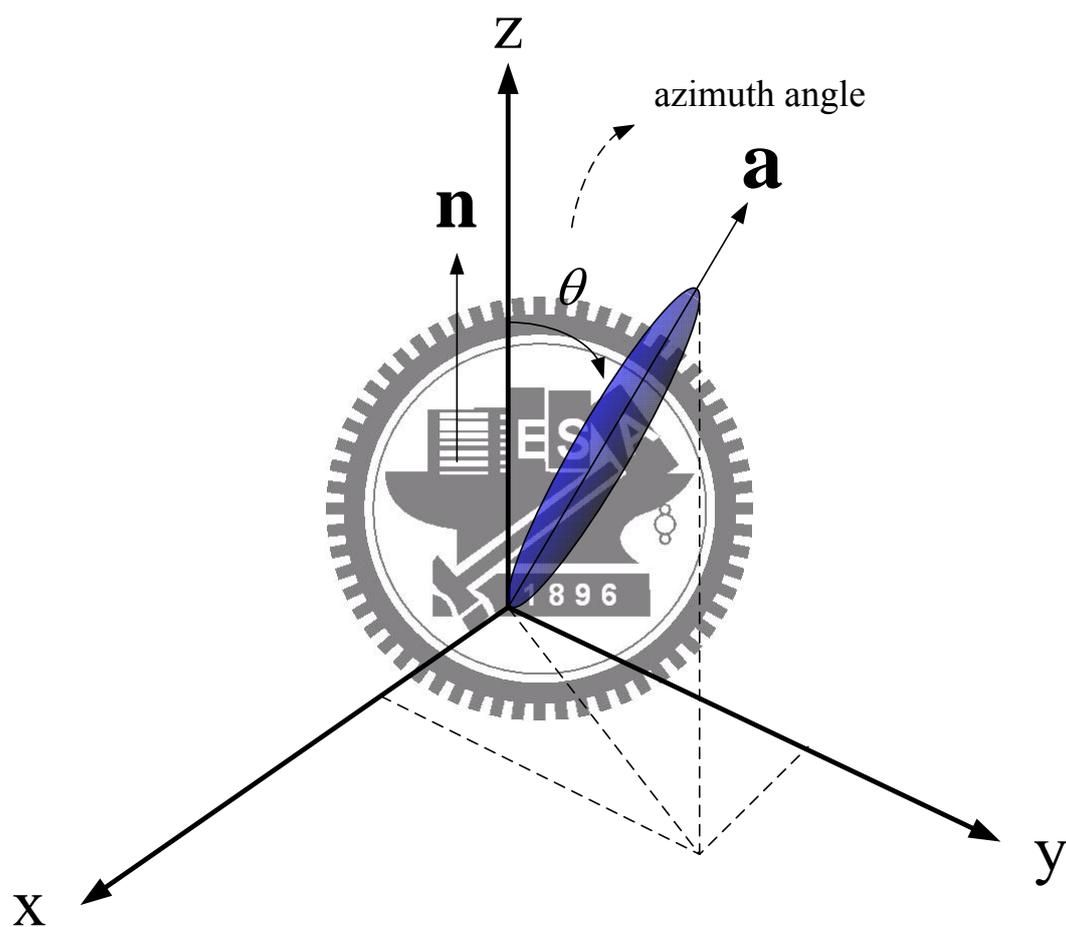


圖 2.2 向列型液晶分子示意圖

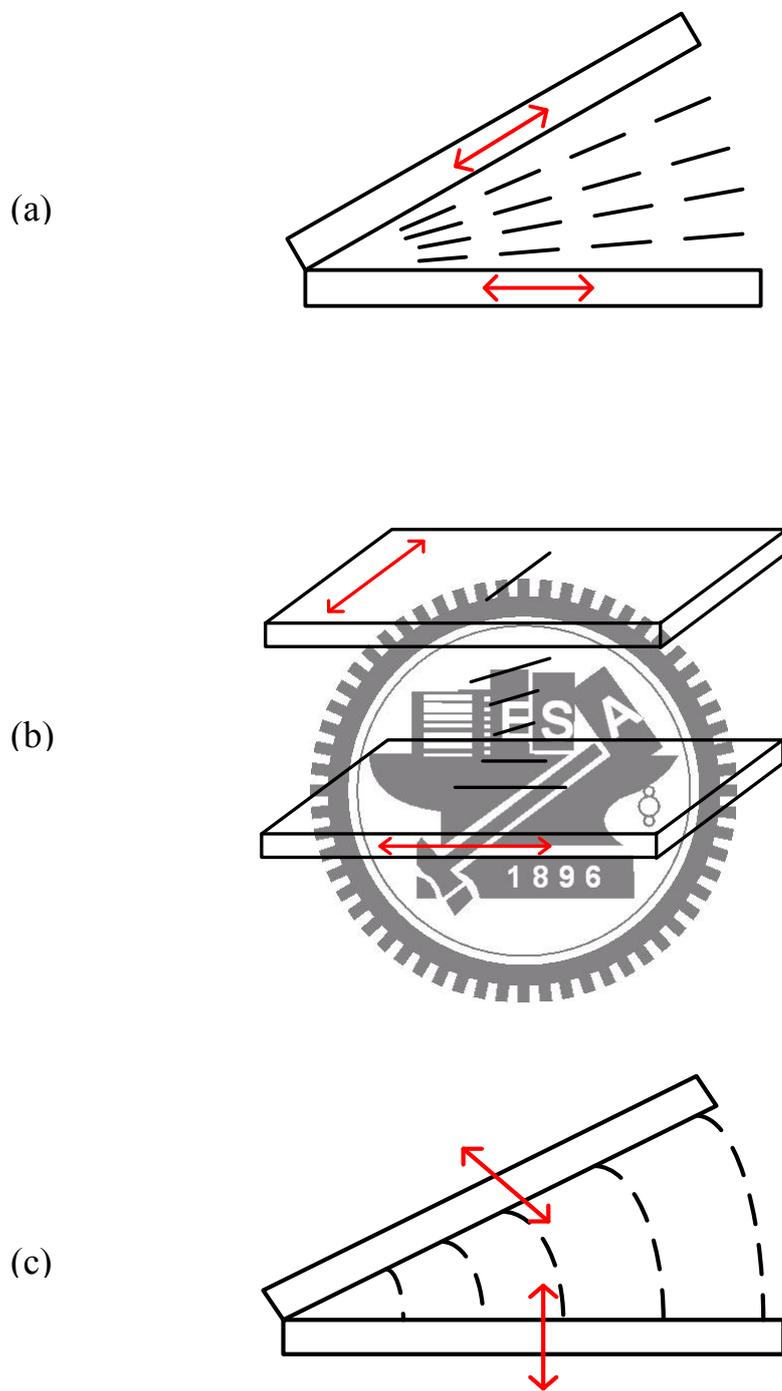


圖 2.3 液晶的(a)展曲、(b)扭曲及(c)彎曲示意圖

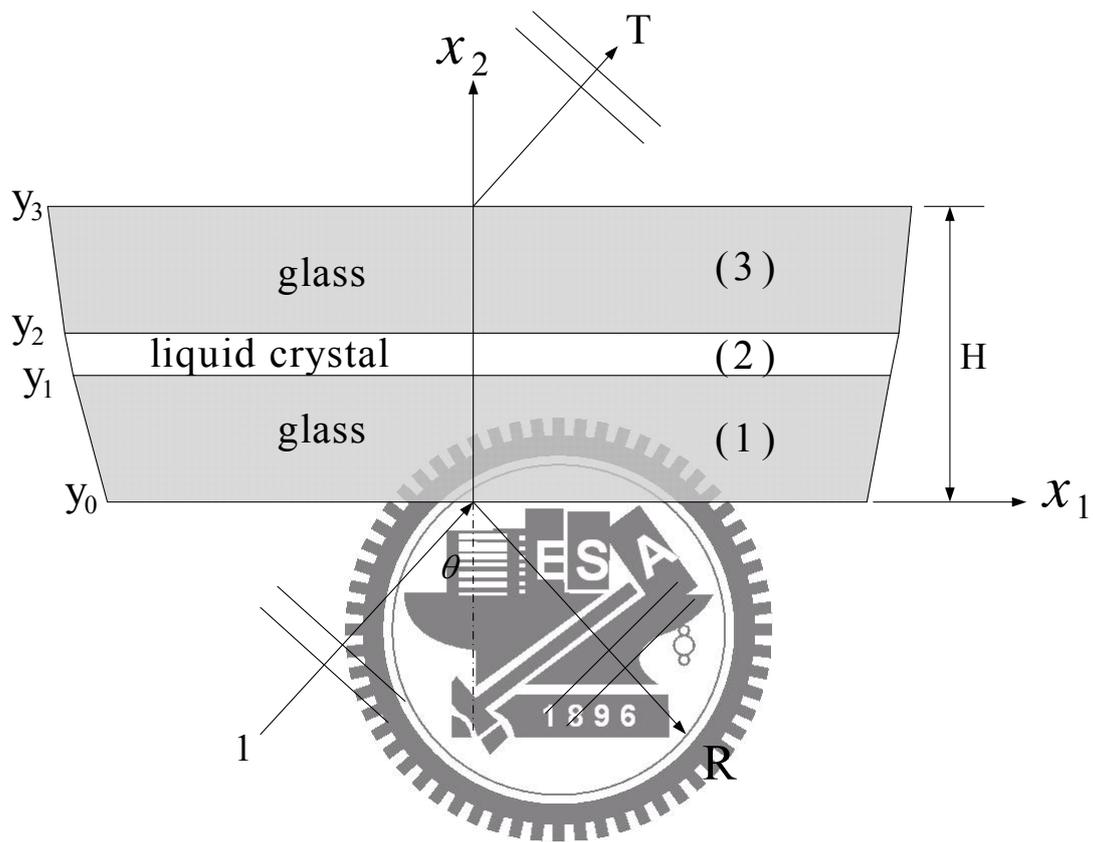


圖 2.4 理想流體中的液晶試片受平面聲波照射示意圖

(括弧內的數字代表層的編號)

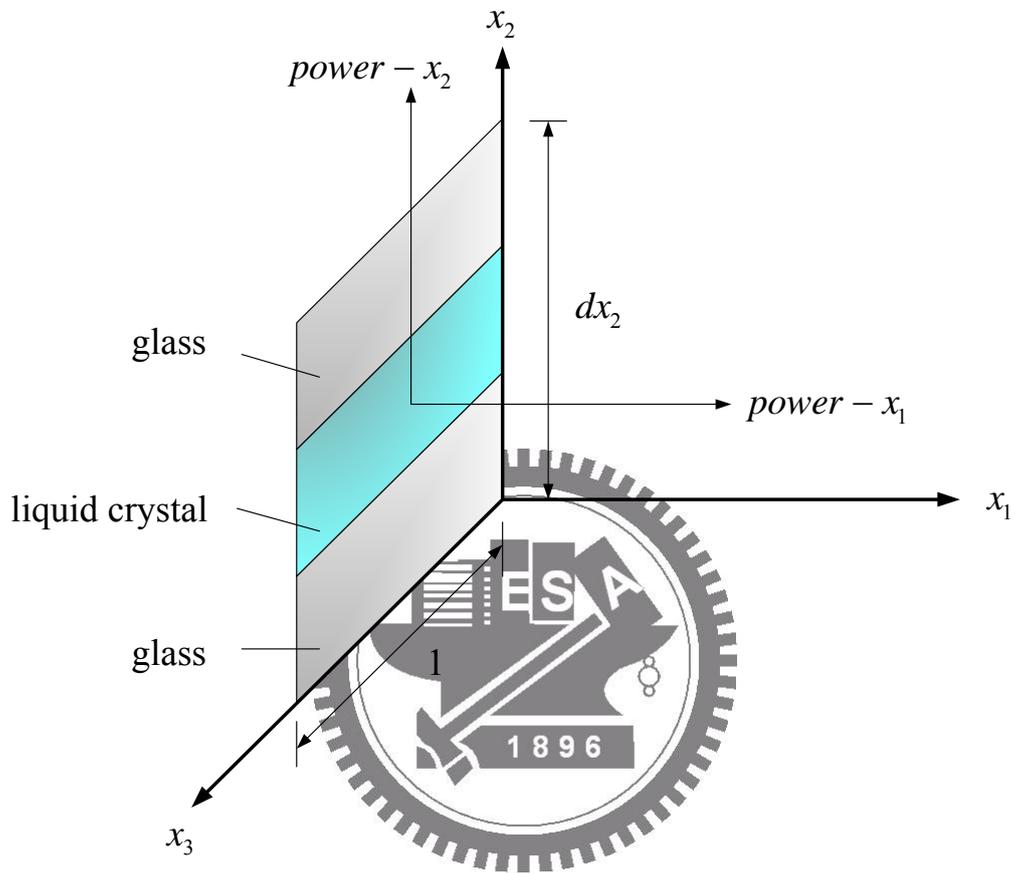
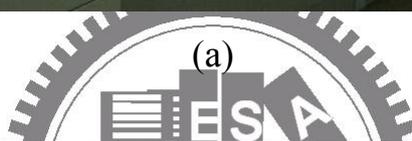


圖 2.5 液晶試片超音波能量傳遞剖面示意圖



(b)

圖 3.1 光譜分析儀(a)實體照片及(b)液晶試片放置處



(a)



(b)



(c)

圖 3.2 UV 燈實體照片



圖 3.3 加熱板實體照片



圖 3.4 EHC 液晶試片製作完成的照片

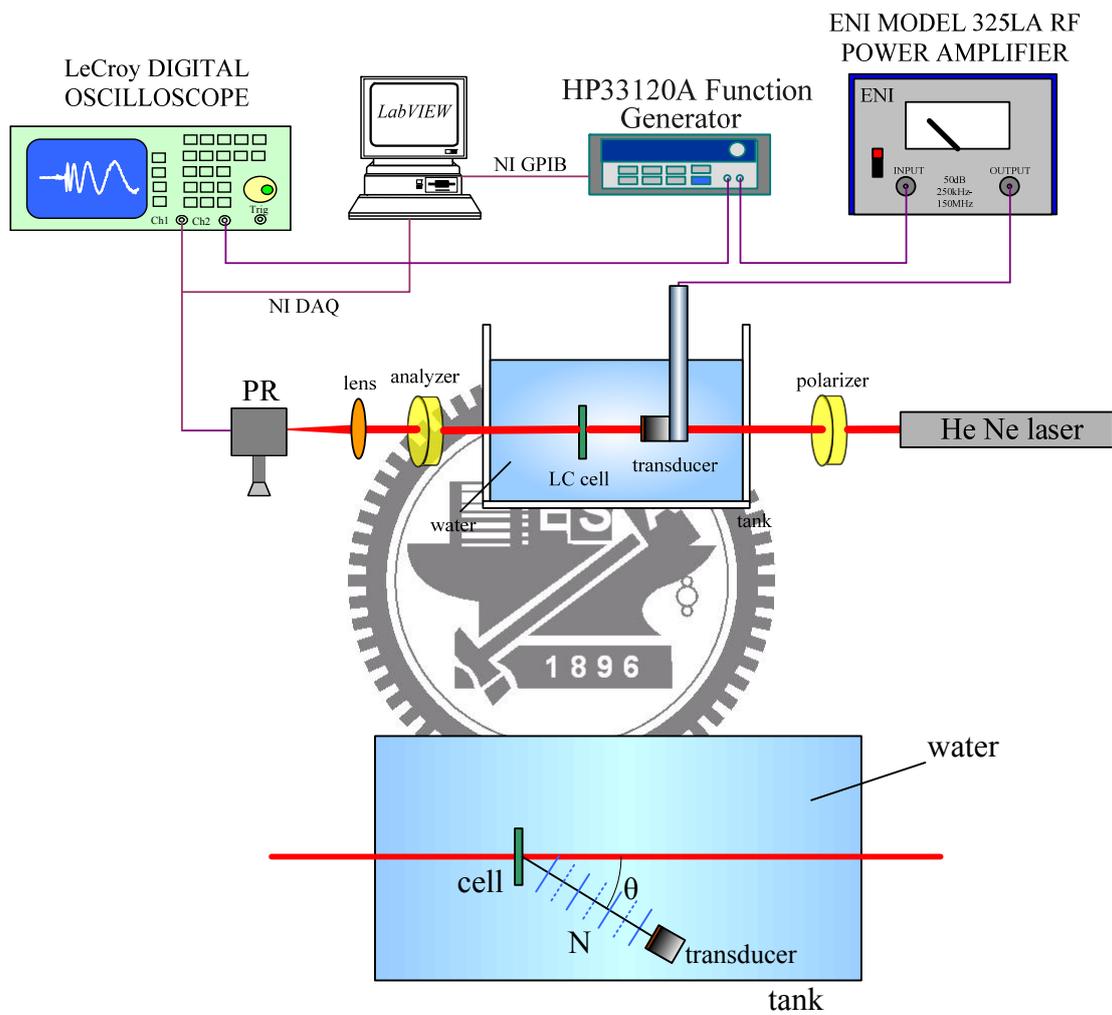


圖 3.5a 沒水式聲光實驗示意圖

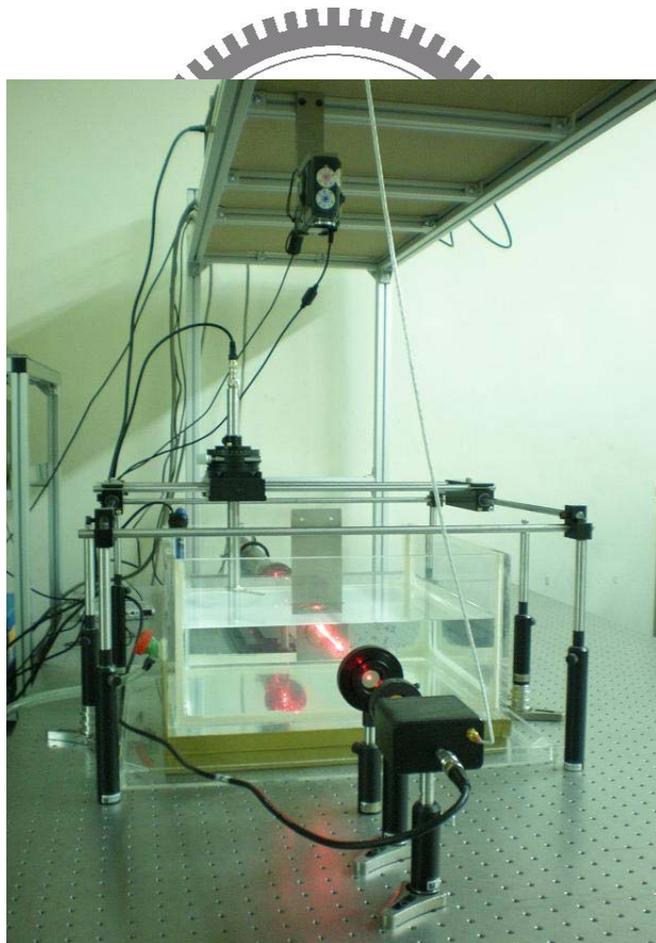
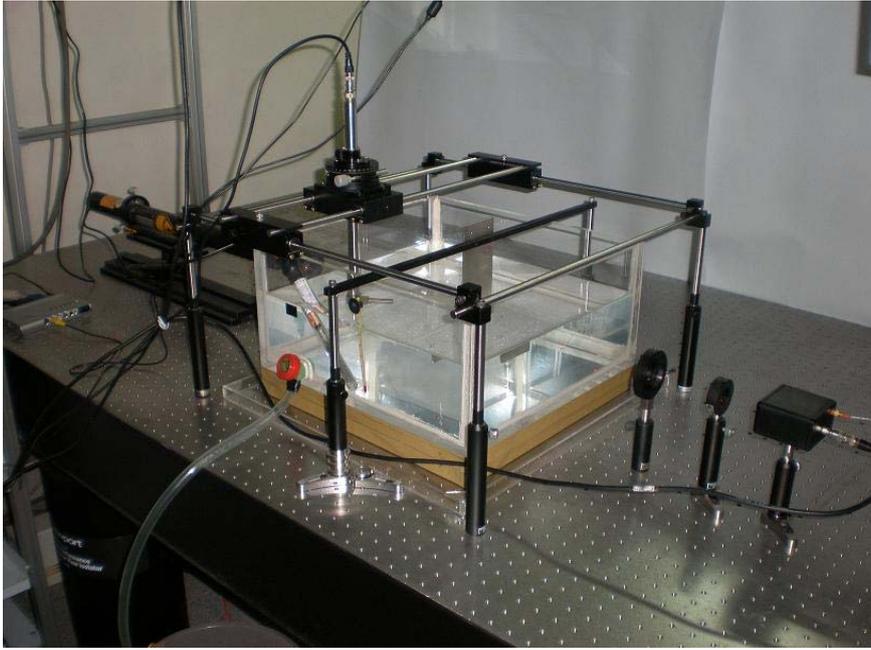
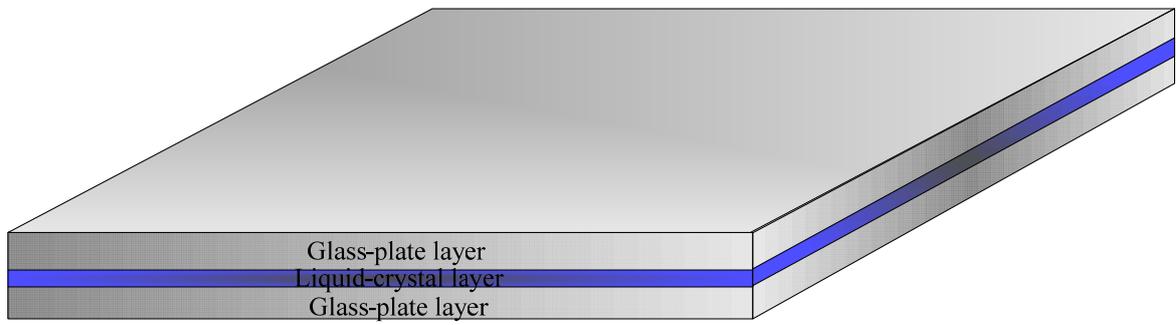
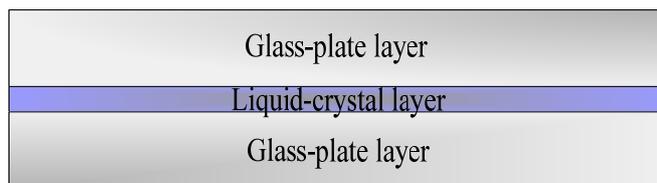


圖 3.5b 沒水式聲光實驗照片



(a)



(b)

圖 3.6 液晶試片(a)立體圖(b)剖面圖

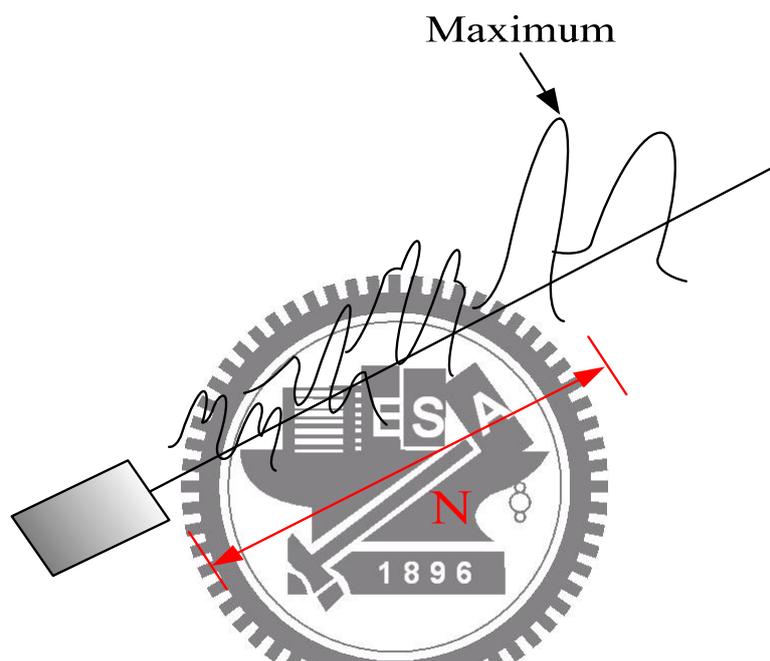


圖 3.7 超音波換能器聲場強度分佈示意圖

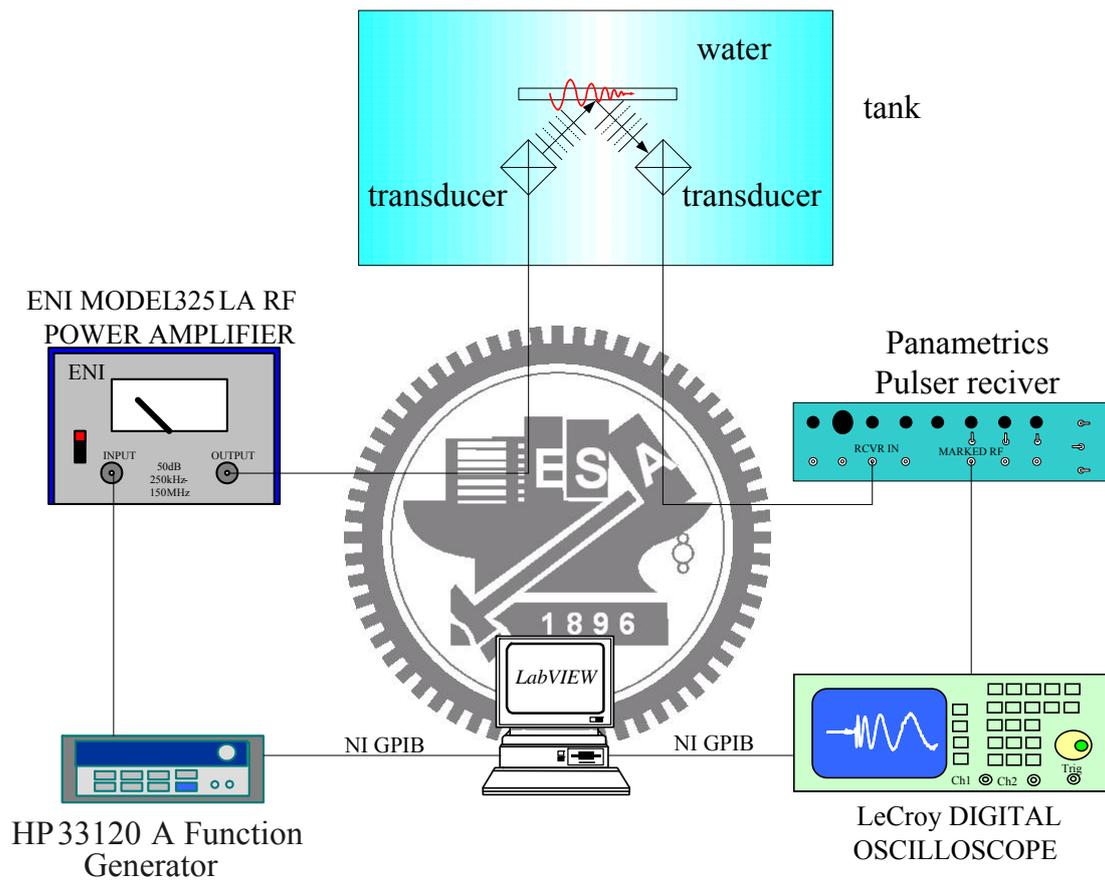


圖 3.8a 洩漏蘭姆波實驗示意圖

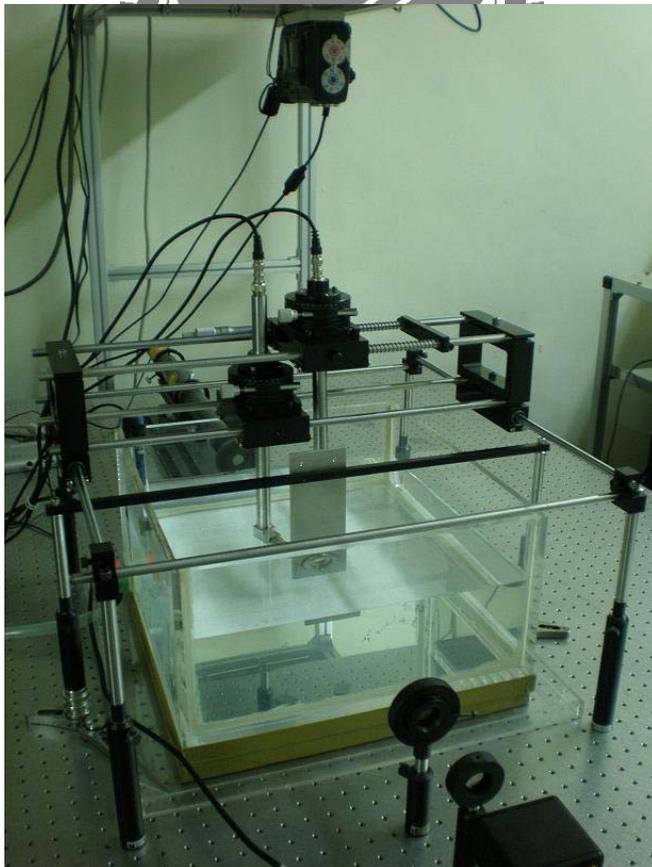
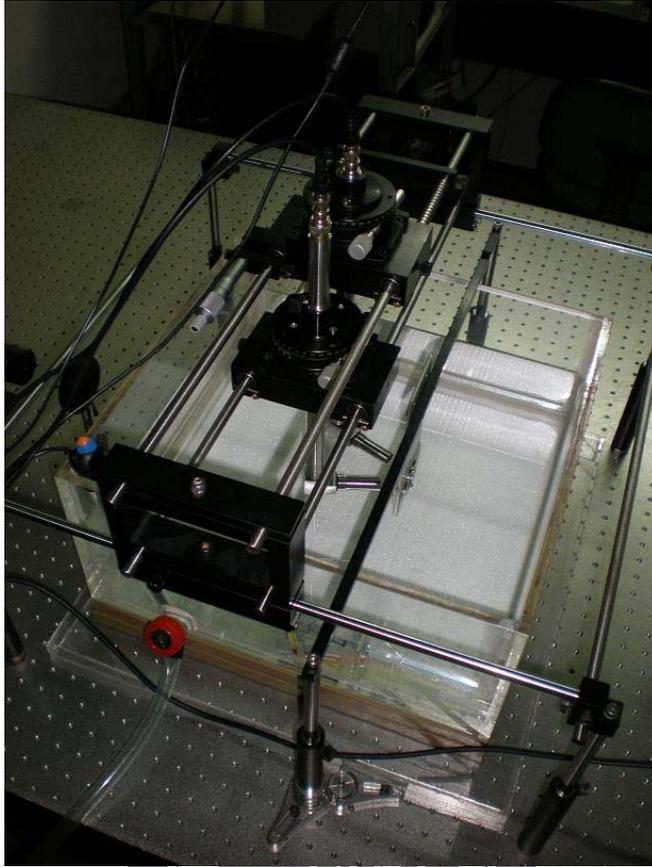


圖 3.8b 洩漏蘭姆波實驗照片

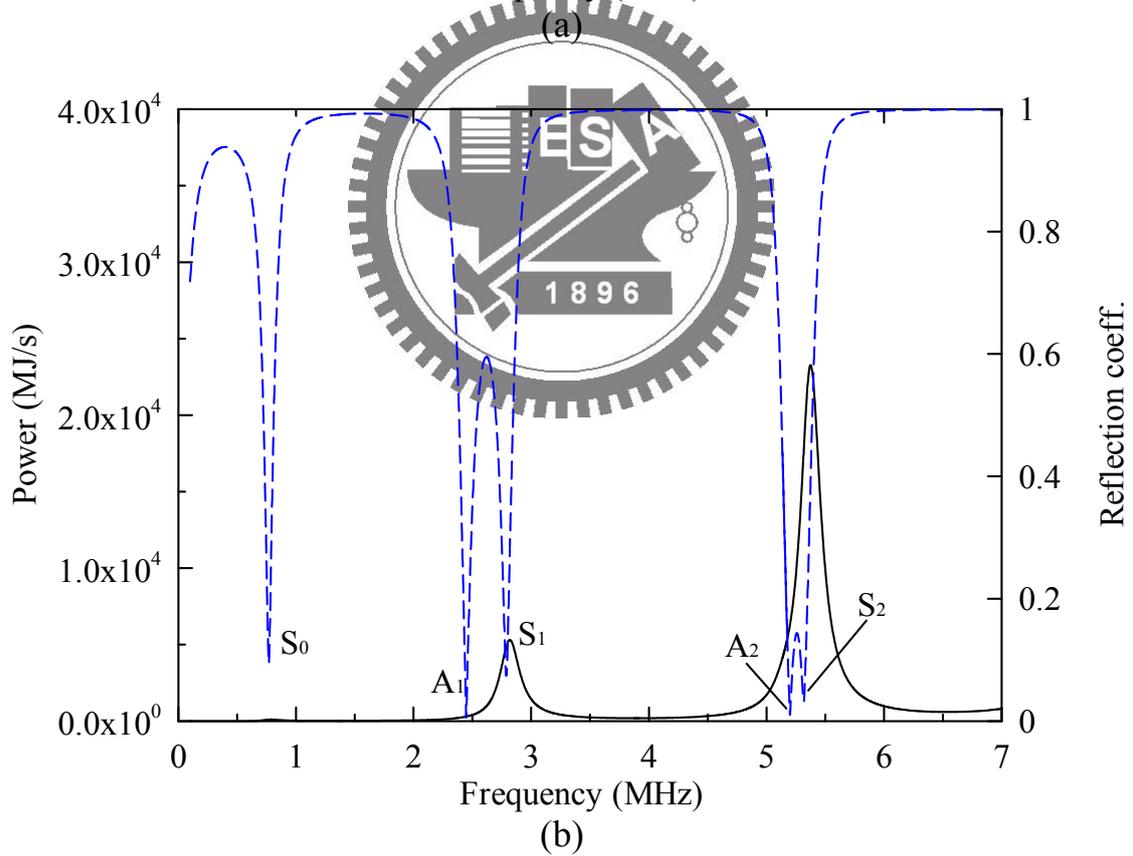
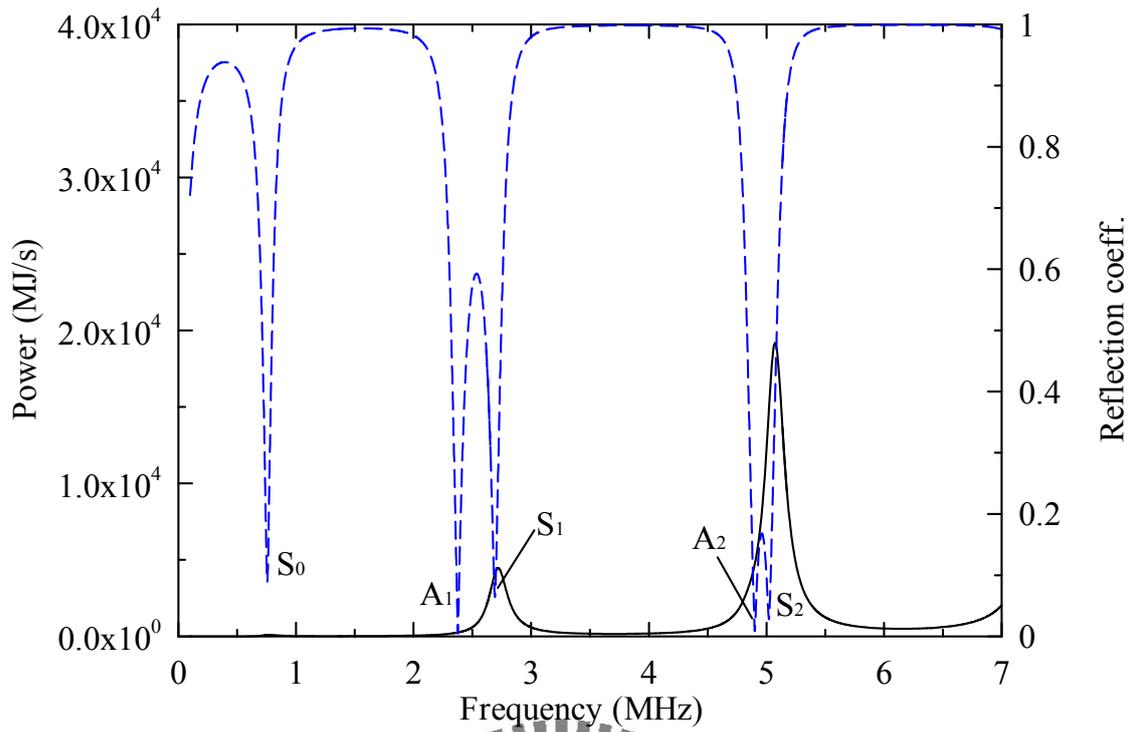
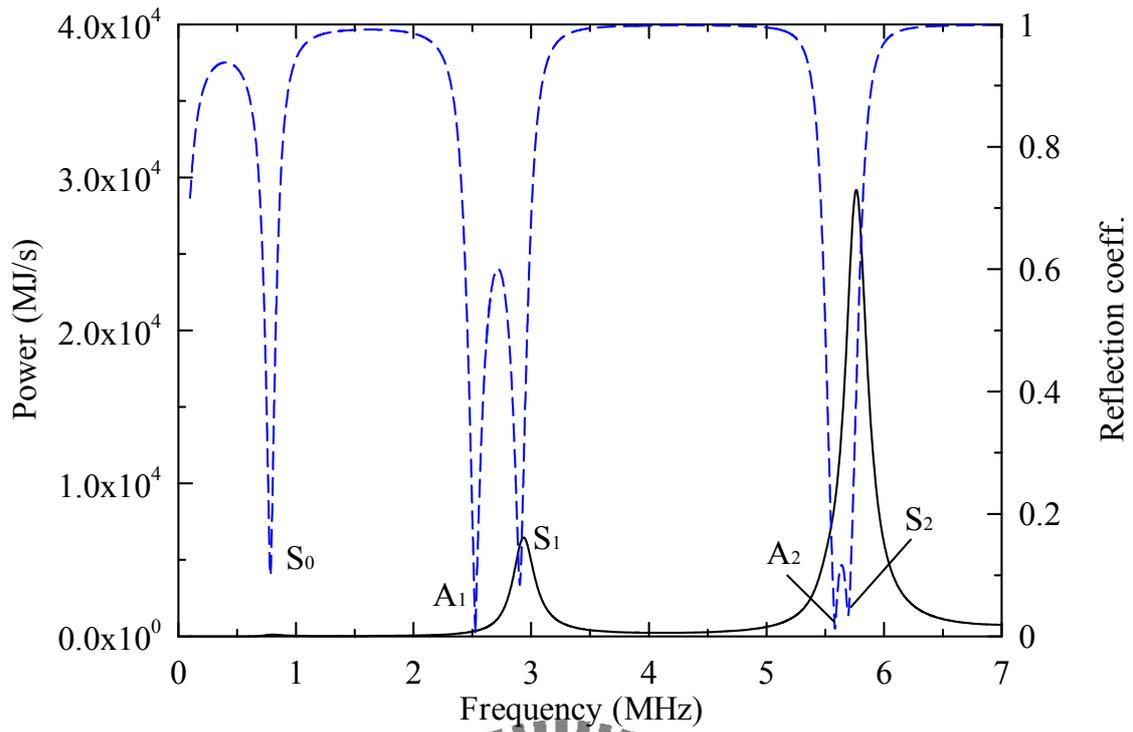
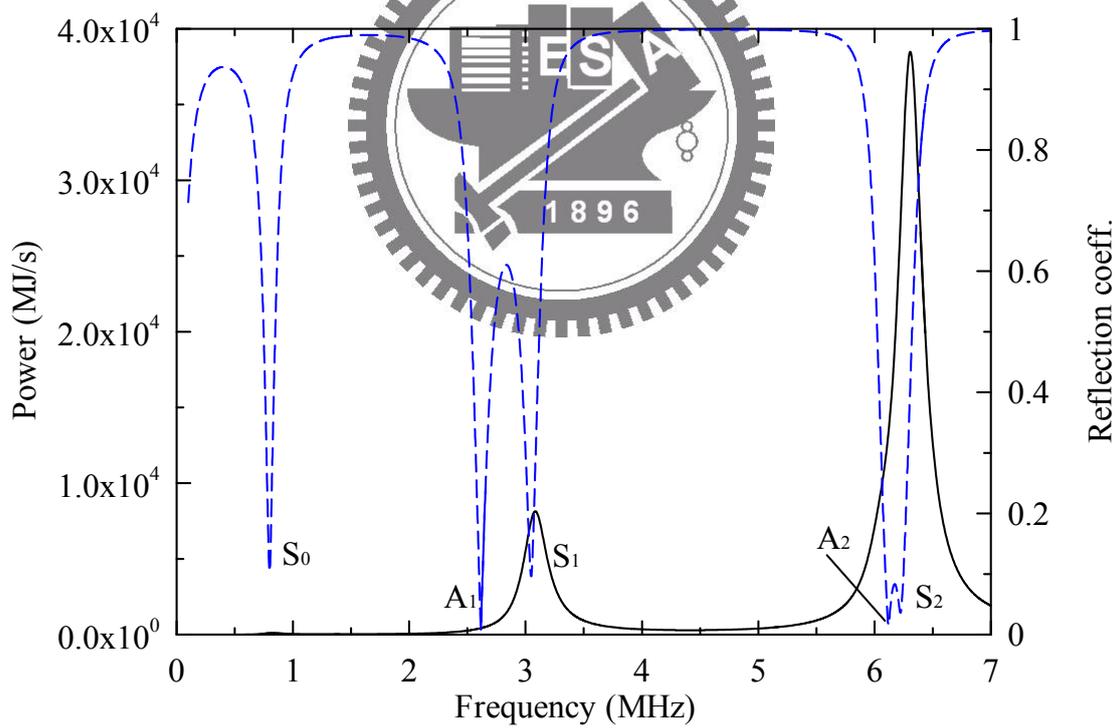


圖 4.1 1100/50/1100 μm 液晶試片反射係數(虛線)與能量曲線(實線)，
超音波入射角為(a) 20°(b) 21°。

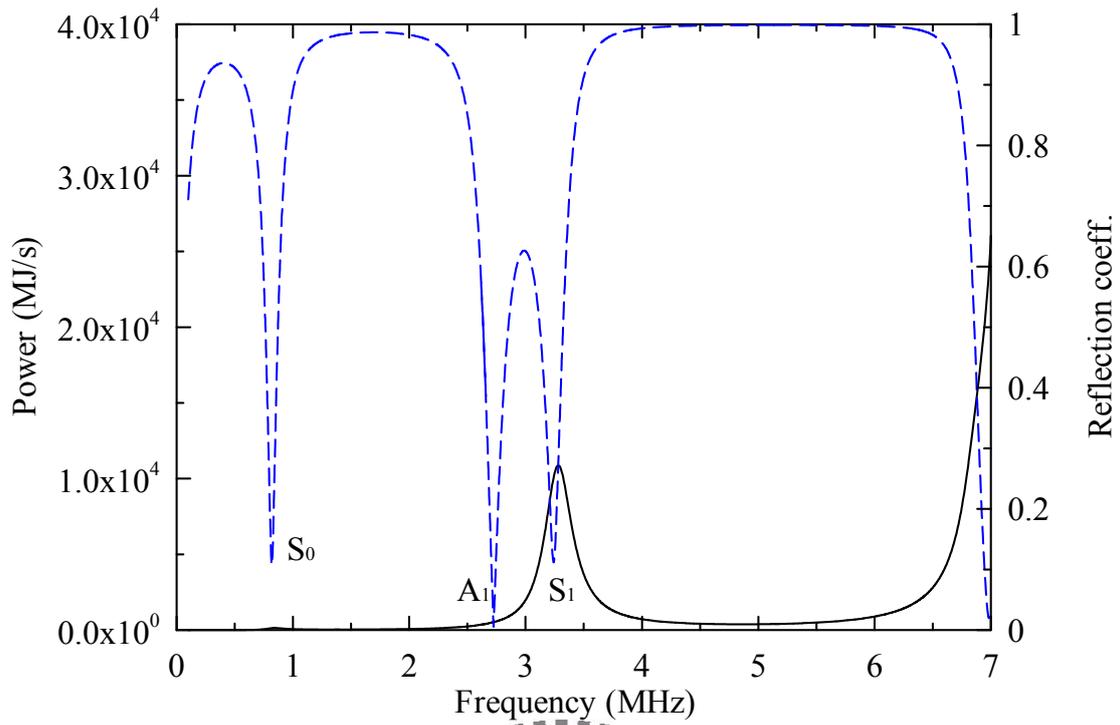


(a)

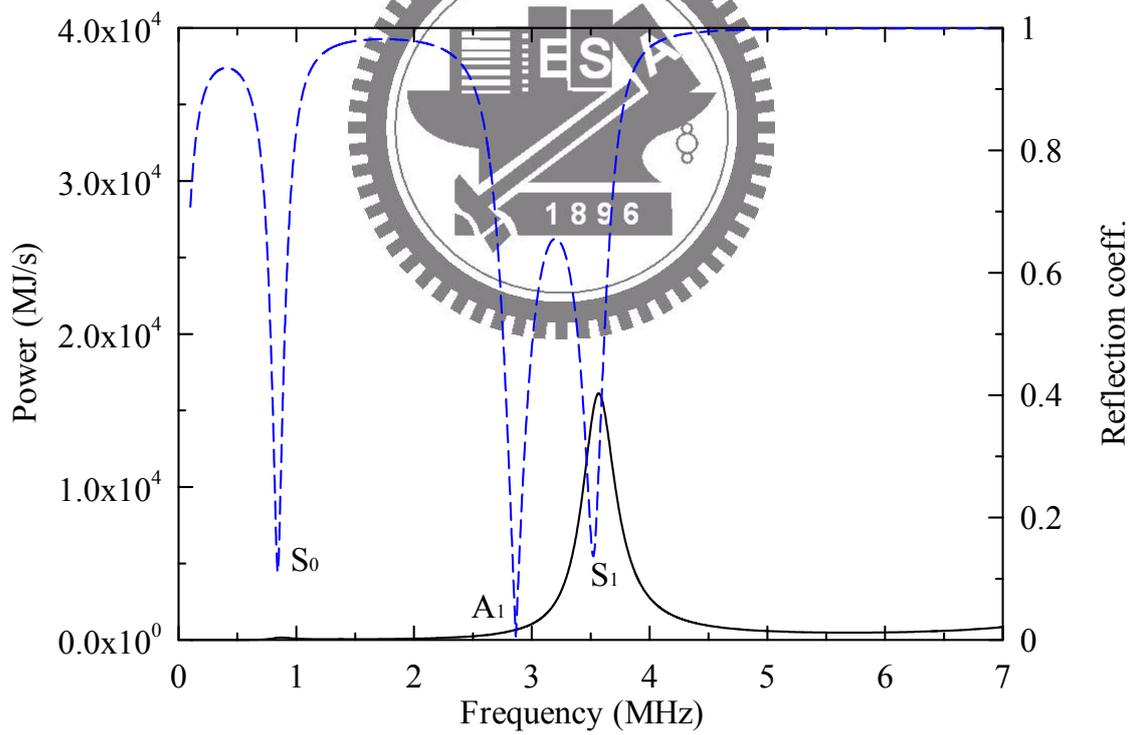


(b)

圖 4.2 100/50/1100 μm 液晶試片反射係數(虛線)與能量曲線(實線)，
超音波入射角為(a) 22°(b) 23°。



(a)



(b)

圖 4.3 100/50/1100 μm 液晶試片反射係數(虛線)與能量曲線(實線)，
超音波入射角為(a) 24°(b) 25°。

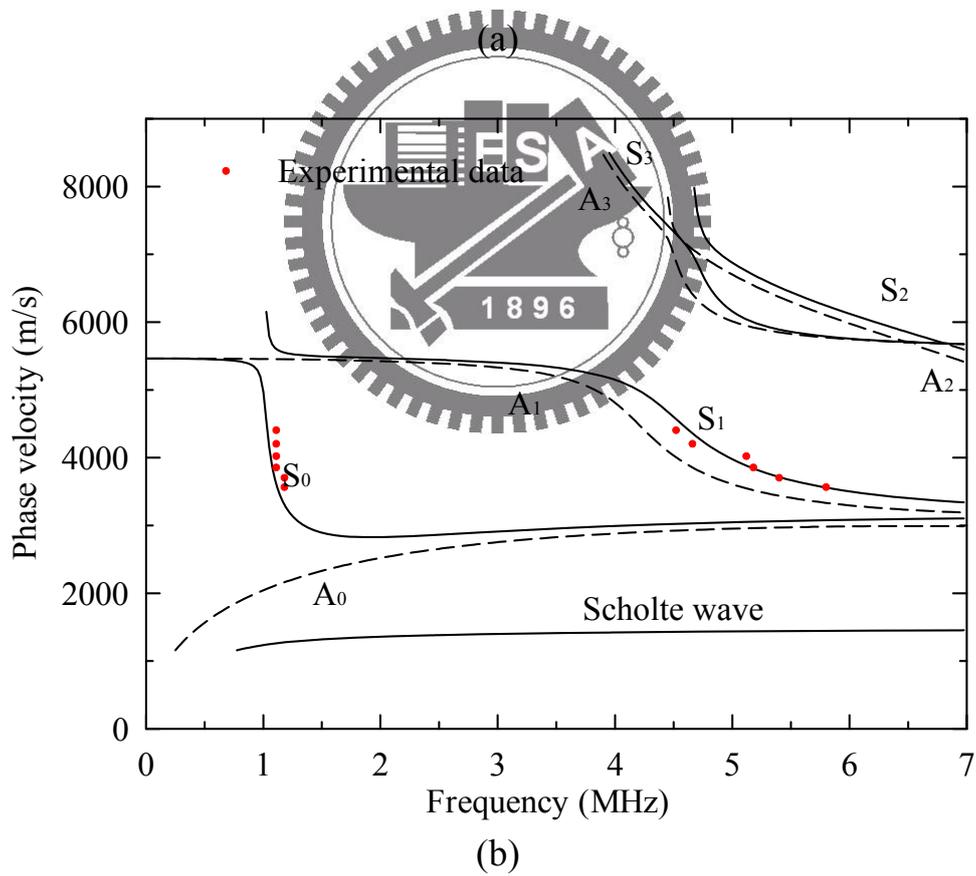
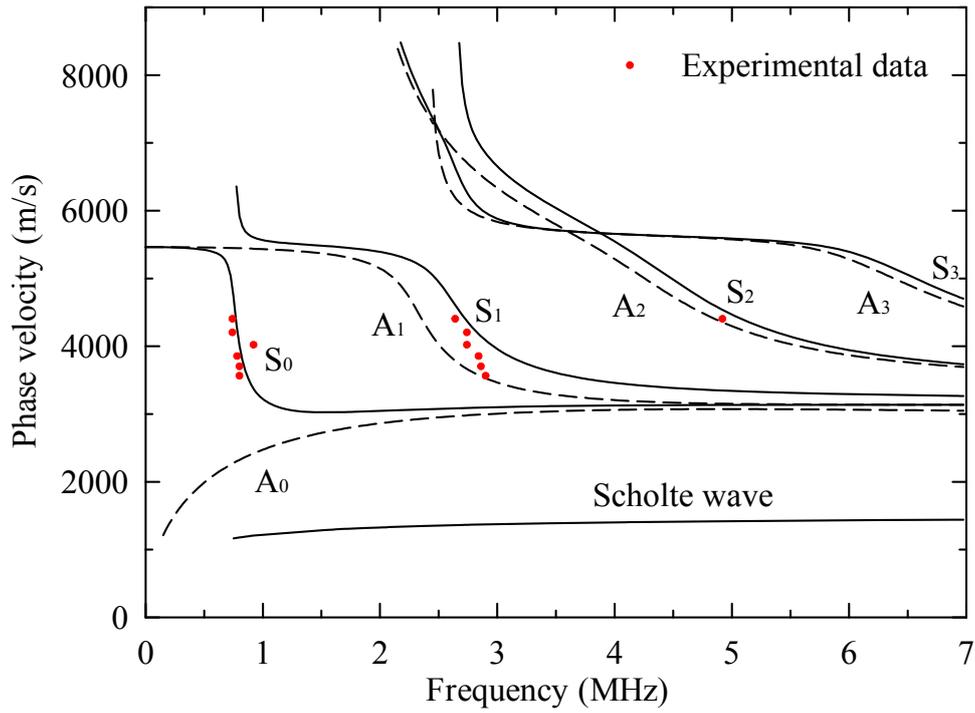
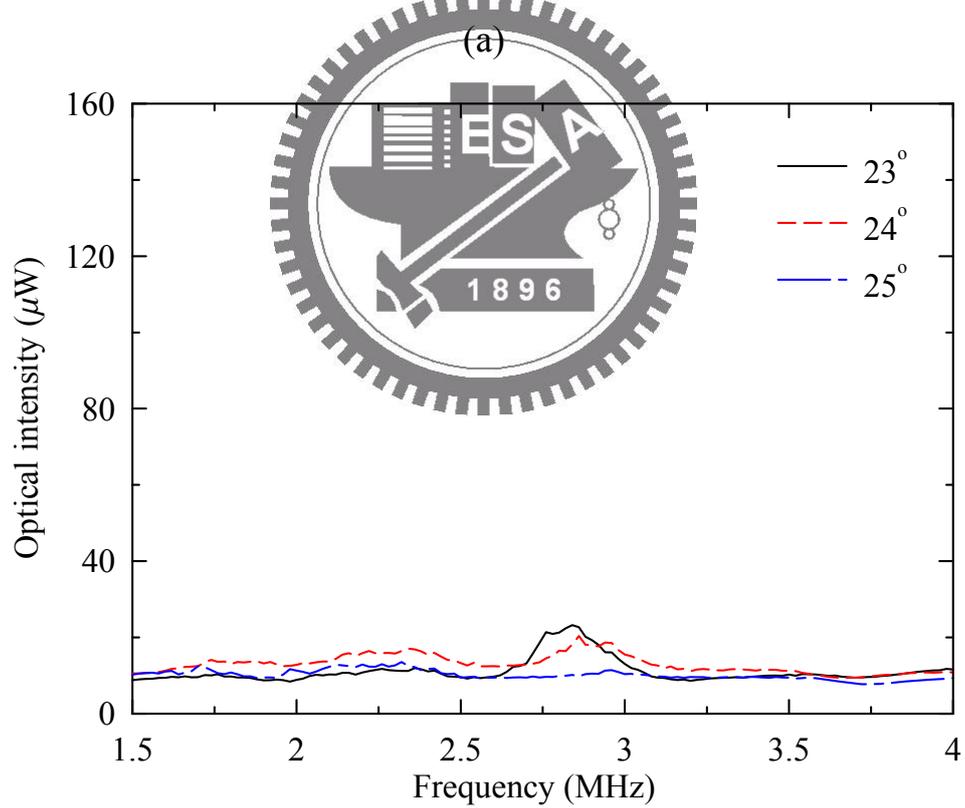
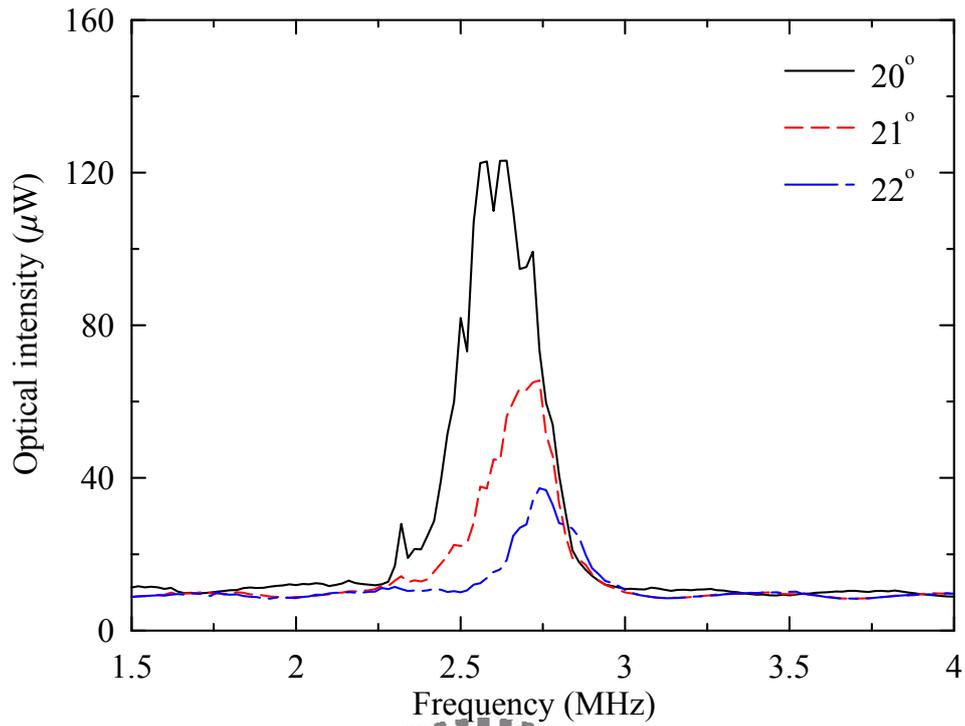


圖 4.4 穿透光強度穩態實驗值與模擬的液晶試片聲導波頻散曲線比較，

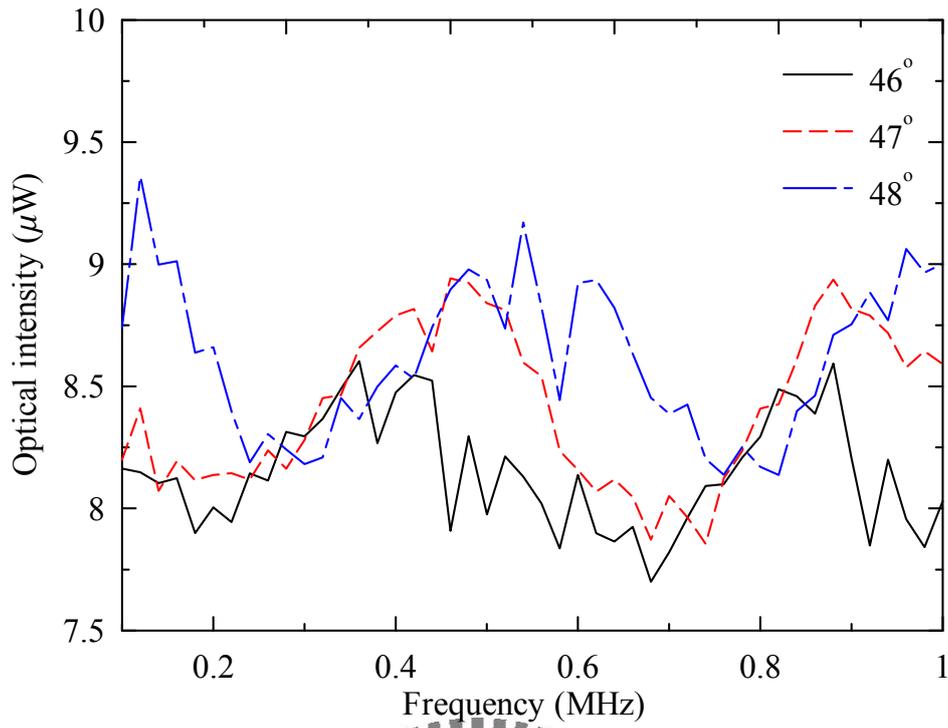
實線為對稱模態，虛線為反對稱模態，試片分別為

(a) 1100/50/1100 μm (b) 600/65/600 μm

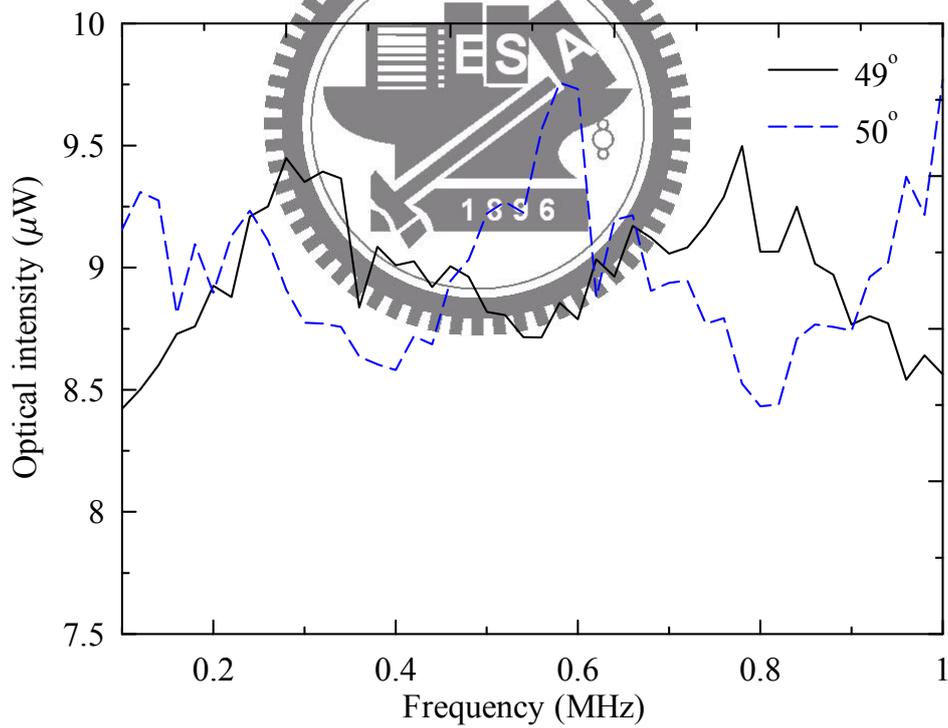


(b)

圖 4.5 1100/50/1100 μm 液晶試片受不同超音波入射角
 (a) $20^\circ\sim 22^\circ$ (b) $24^\circ\sim 25^\circ$ 照射的穩態穿透光強度頻譜。



(a)



(b)

圖 4.6 1100/50/1100 μm 液晶試片 A_0 模式的穩態穿透光強度頻譜，
 超音波入射角為(a) $46^\circ \sim 48^\circ$ (b) $49^\circ \sim 50^\circ$ 。

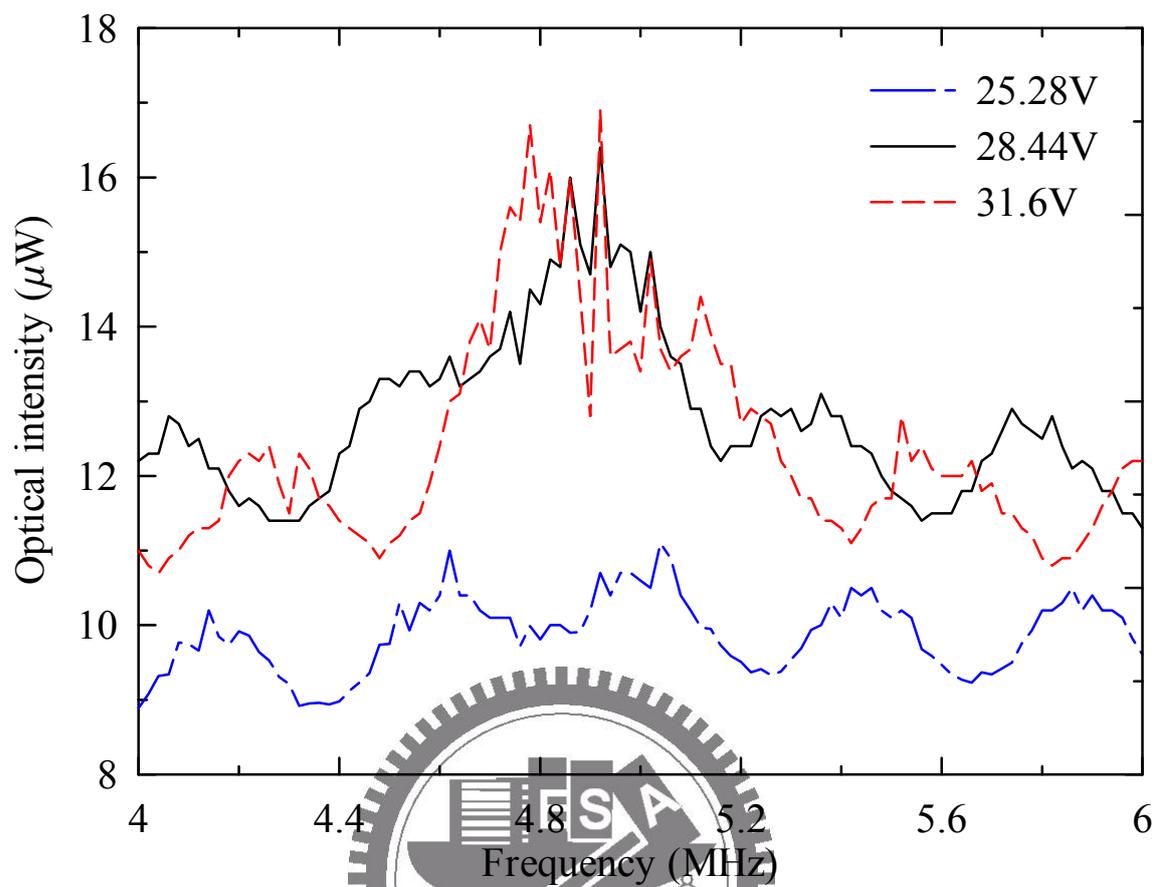
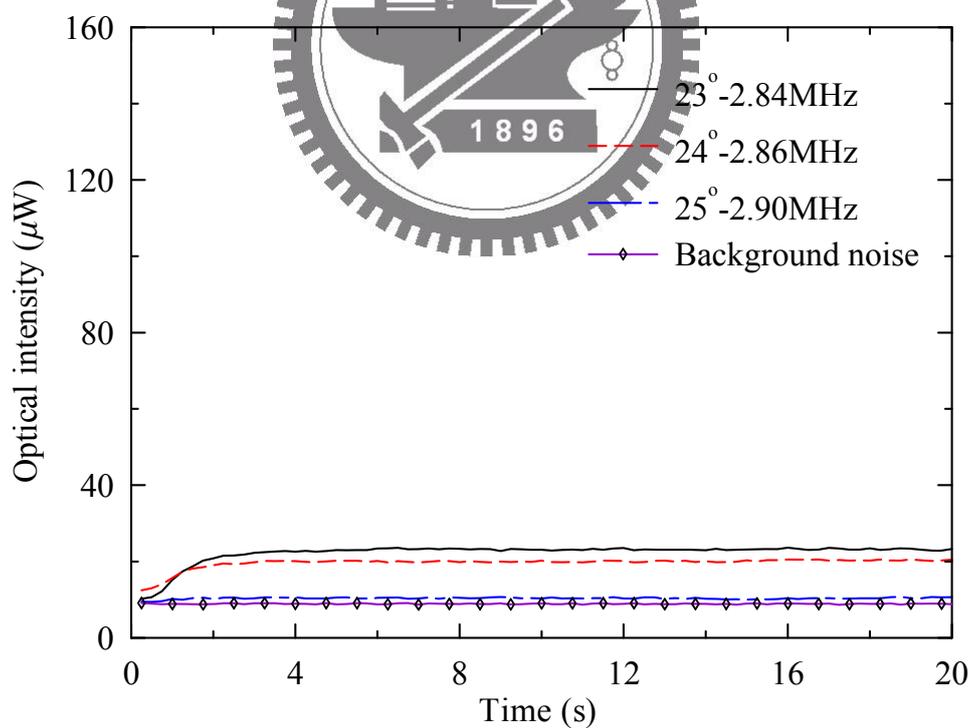
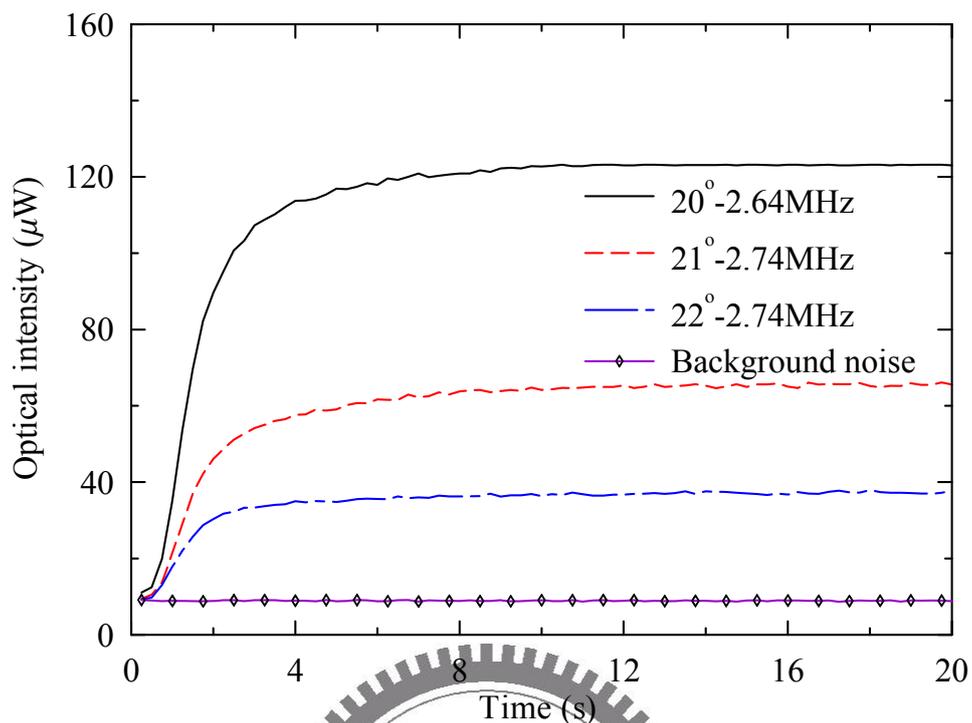


圖 4.7 1100/50/1100 μm 液晶試片受不同驅動電壓激發之超音波

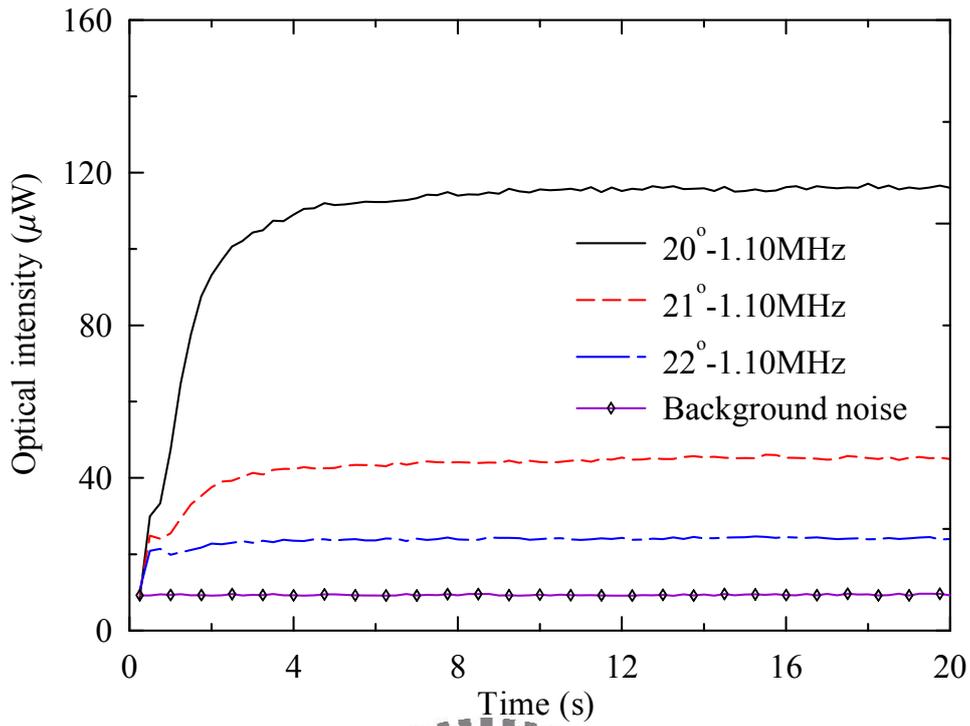
以 20° 入射角照射的穩態穿透光強度頻譜。



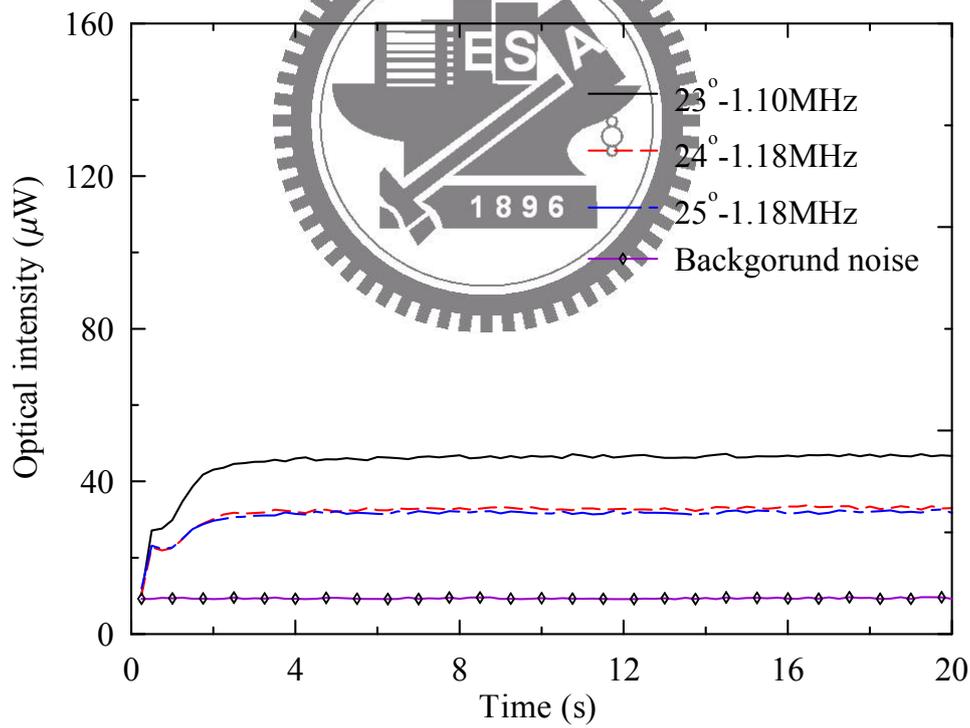
(b)

圖 4.8 $1100/50/1100\ \mu\text{m}$ 液晶試片的 S_1 模態穿透光強度歷時曲線，

(a) $20^\circ\sim 22^\circ$ 、(b) $23^\circ\sim 25^\circ$ 對應的導波模態頻率。



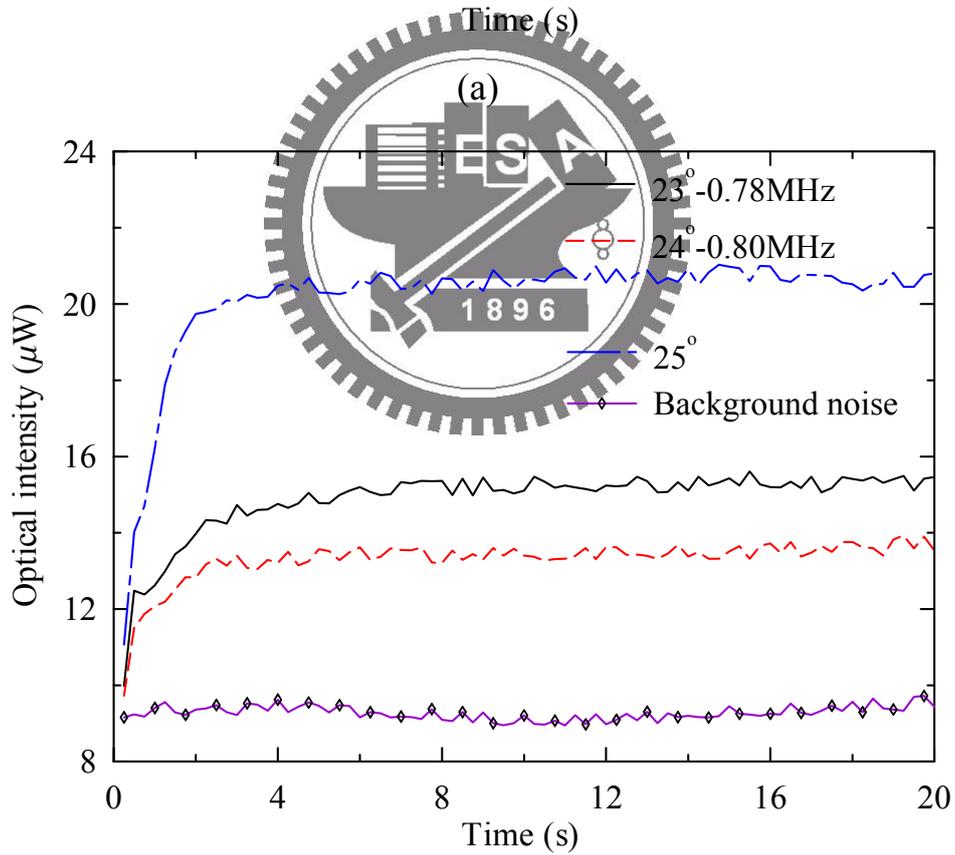
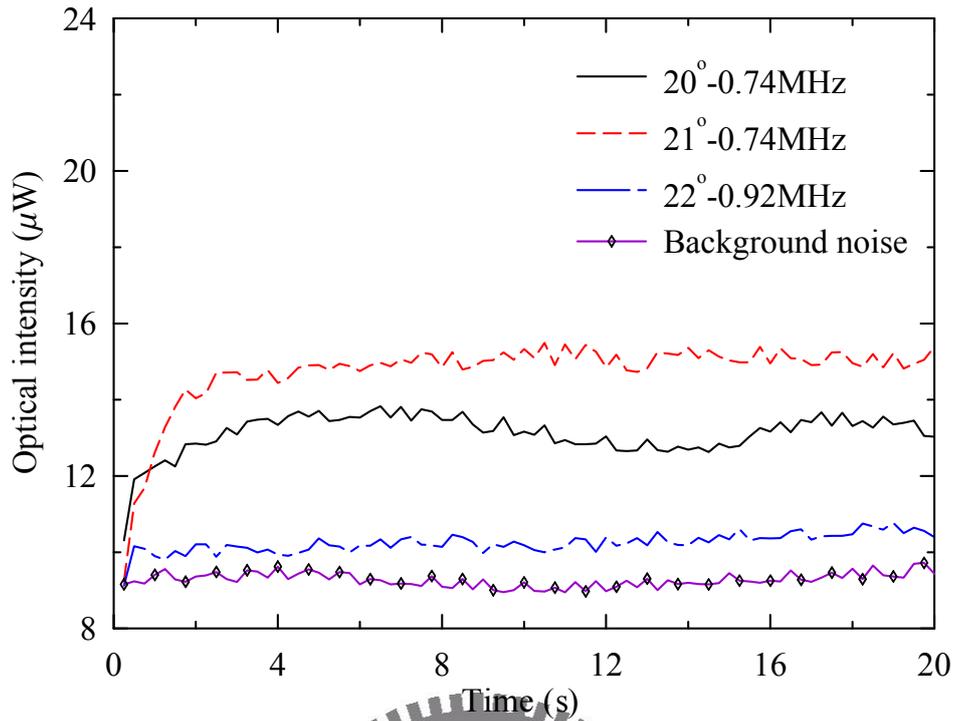
(a)



(b)

圖 4.9 $600/65/600\mu\text{m}$ 液晶試片的 S_0 模態穿透光強度歷時曲線，

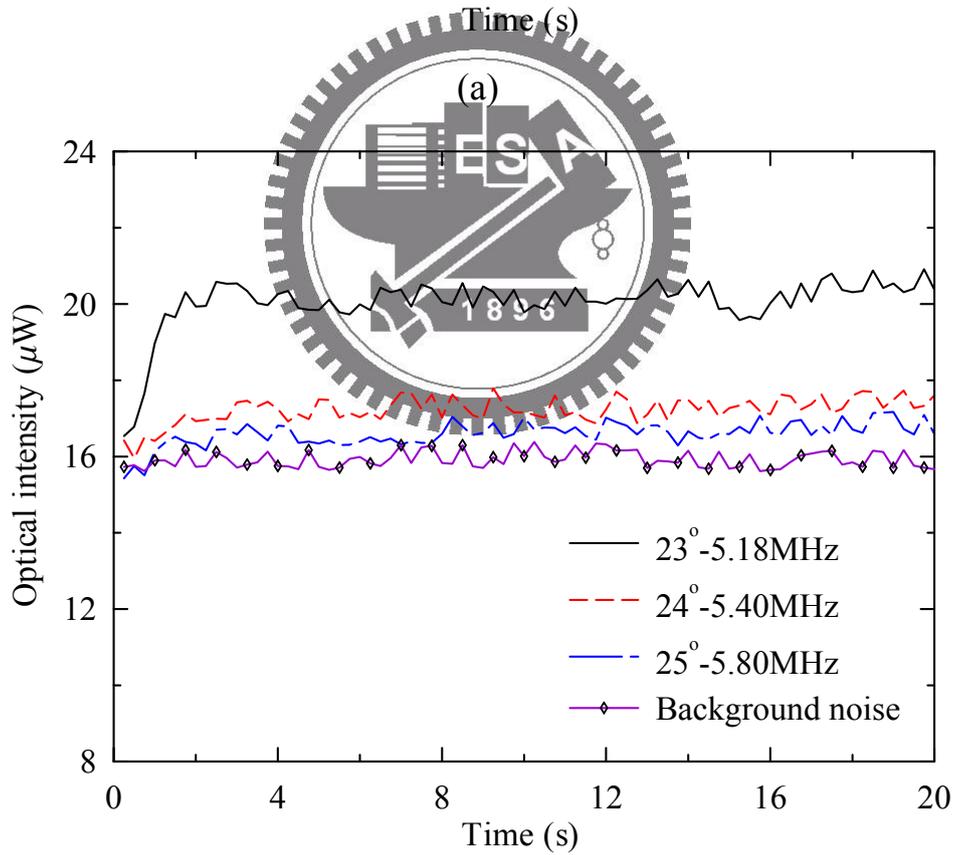
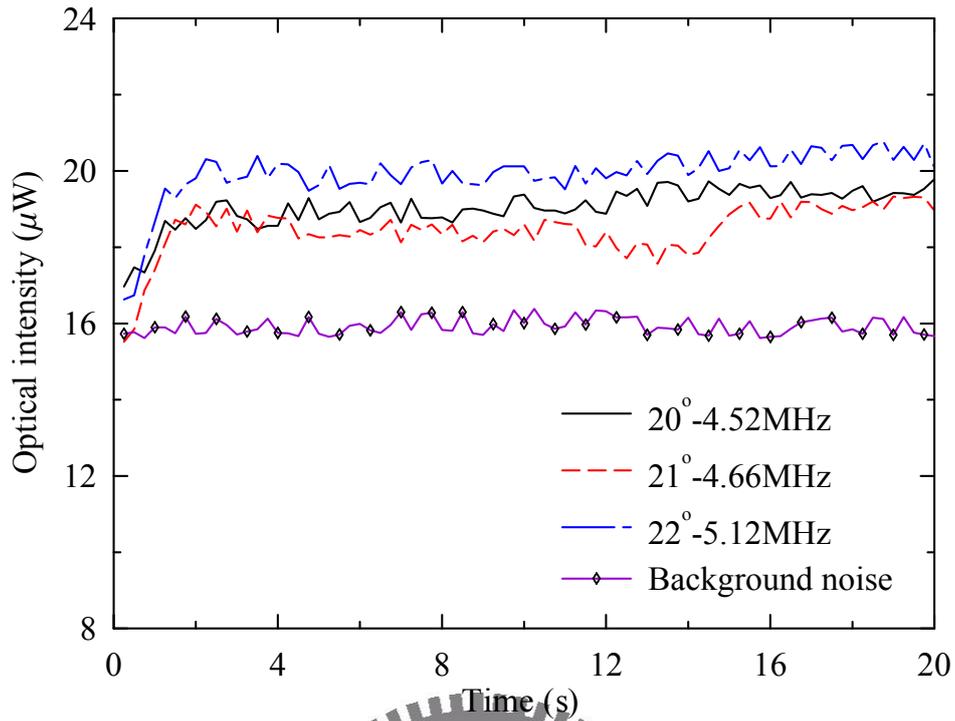
(a) $20^\circ\sim 22^\circ$ 、(b) $23^\circ\sim 25^\circ$ 對應的導波模態頻率。



(b)

圖 4.10 1100/50/1100 μm 液晶試片的 S_0 模態穿透光強度歷時曲線，

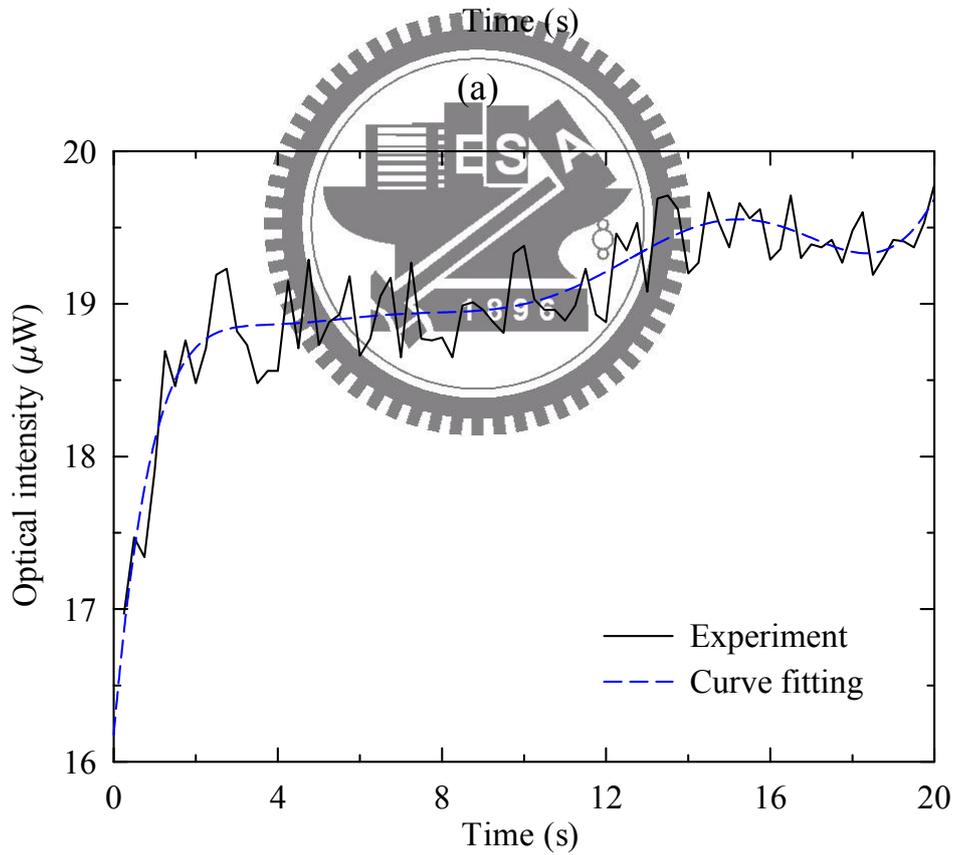
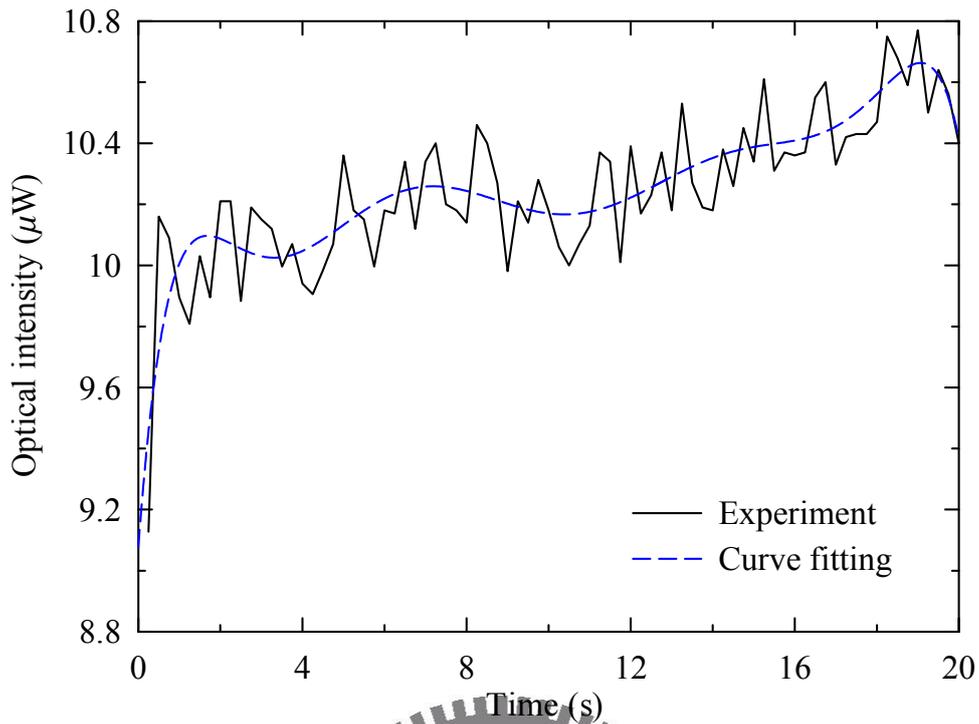
(a) $20^\circ \sim 22^\circ$ 、(b) $23^\circ \sim 25^\circ$ 對應的導波模態頻率。



(b)

圖 4.11 $600/65/600\mu\text{m}$ 液晶試片的 S_1 模態穿透光強度歷時曲線，

(a) $20^\circ \sim 22^\circ$ 、(b) $23^\circ \sim 25^\circ$ 對應的導波模態頻率。



(b)

圖 4.12 液晶試片的穿透光未穩態歷時曲線。

(a) 1100/50/1100 μm - S_0 導波模態-入射角 22° -0.92MHz

(b) 600/65/600 μm - S_1 導波模態-入射角 20° -4.52MHz

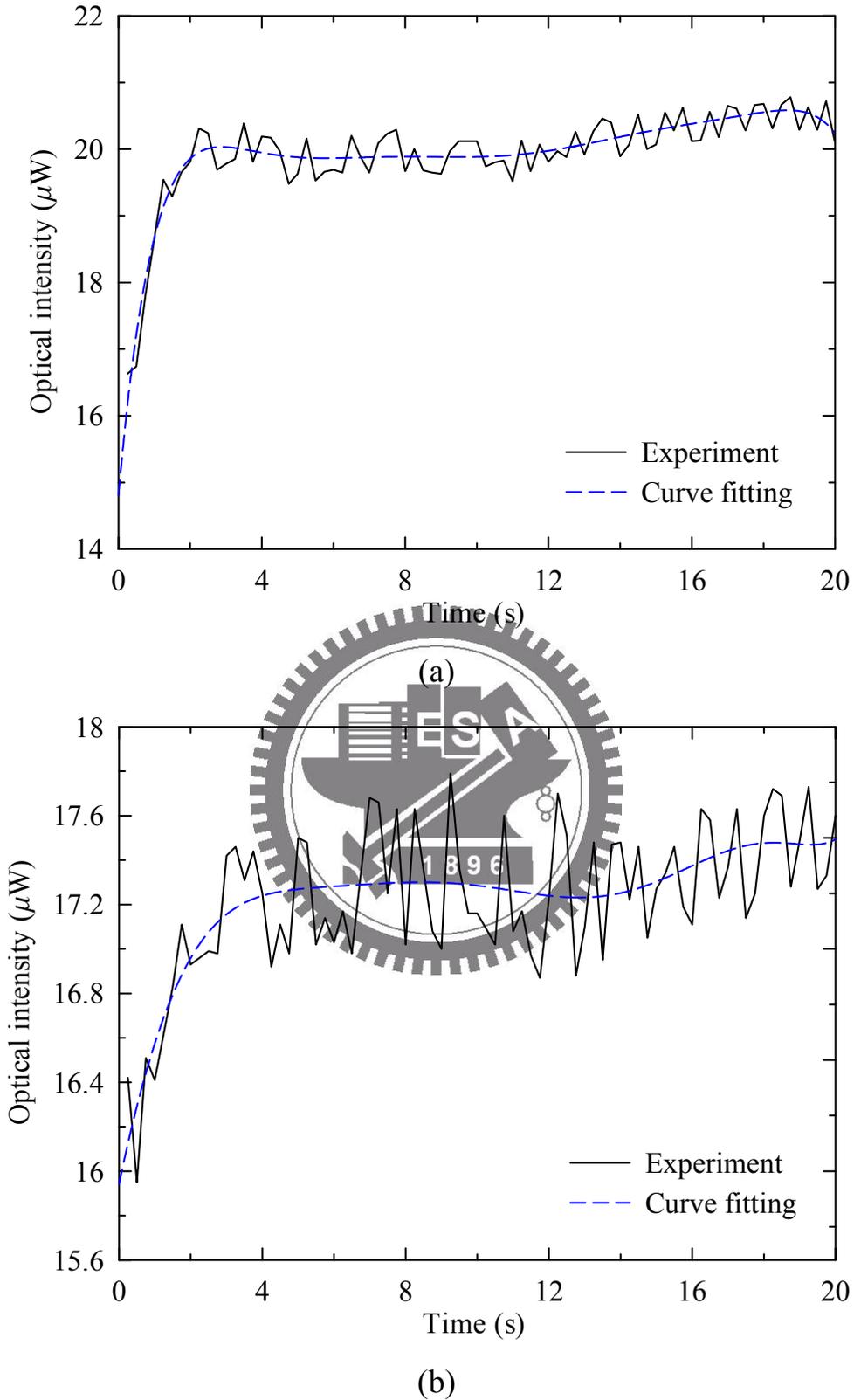


圖 4.13 600/65/600 μm 液晶試片的穿透光未穩態歷時曲線。

(a) S_1 導波模態-入射角 22° -5.12MHz (b) S_1 導波模態-入射角 24° -5.4MHz

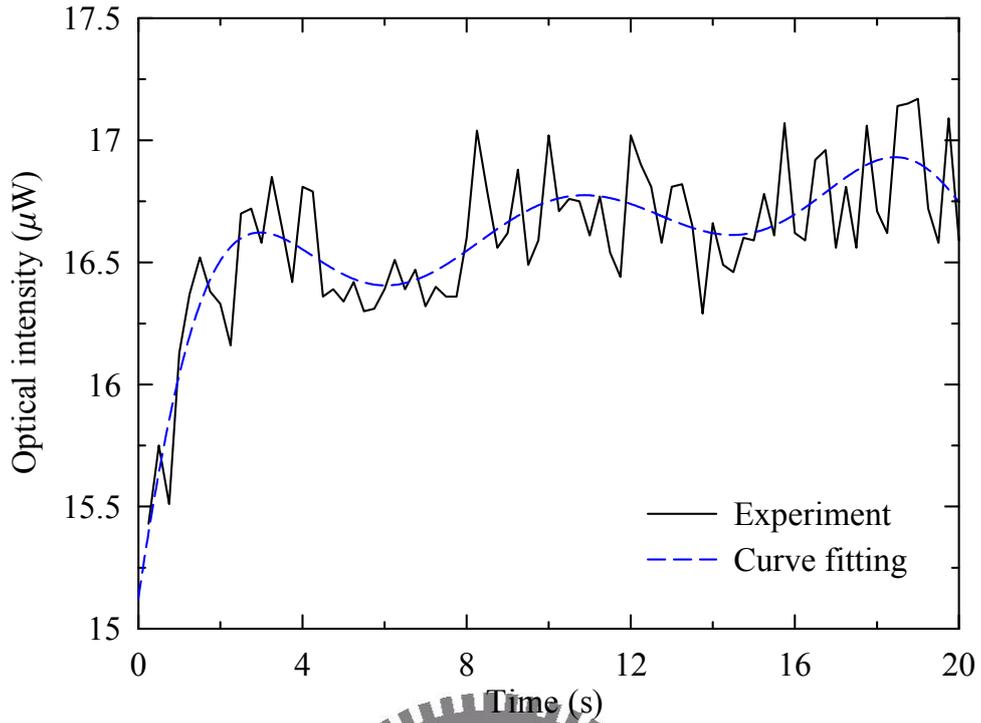


圖 4.14 600/65/600 μm 液晶試片的 S_1 導波模態-入射角 25° -5.8MHz 穿透光未穩態歷時曲線。

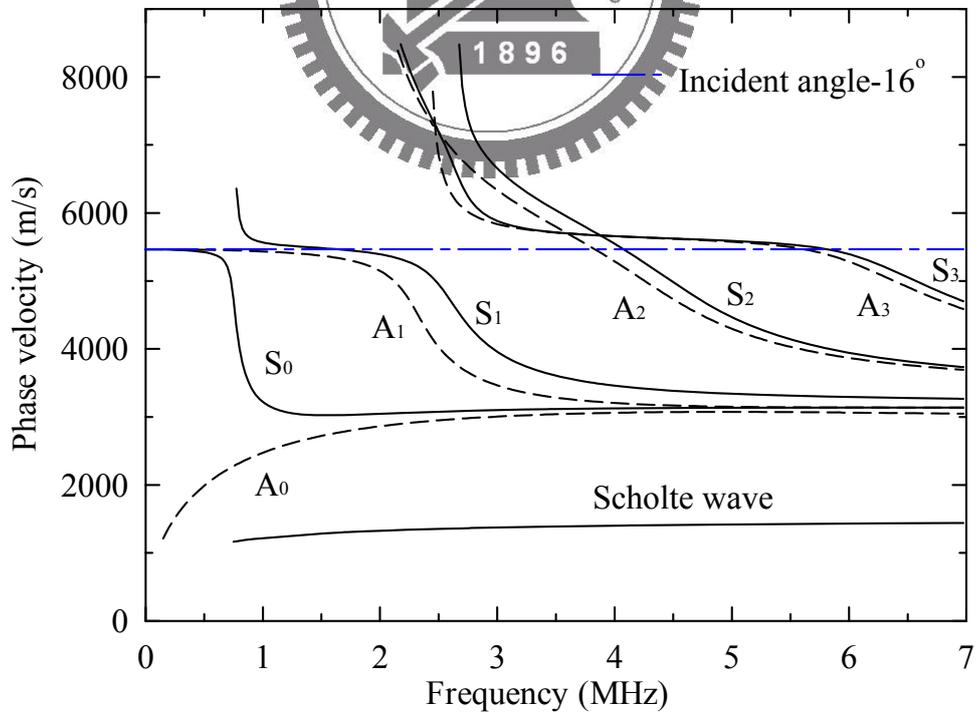
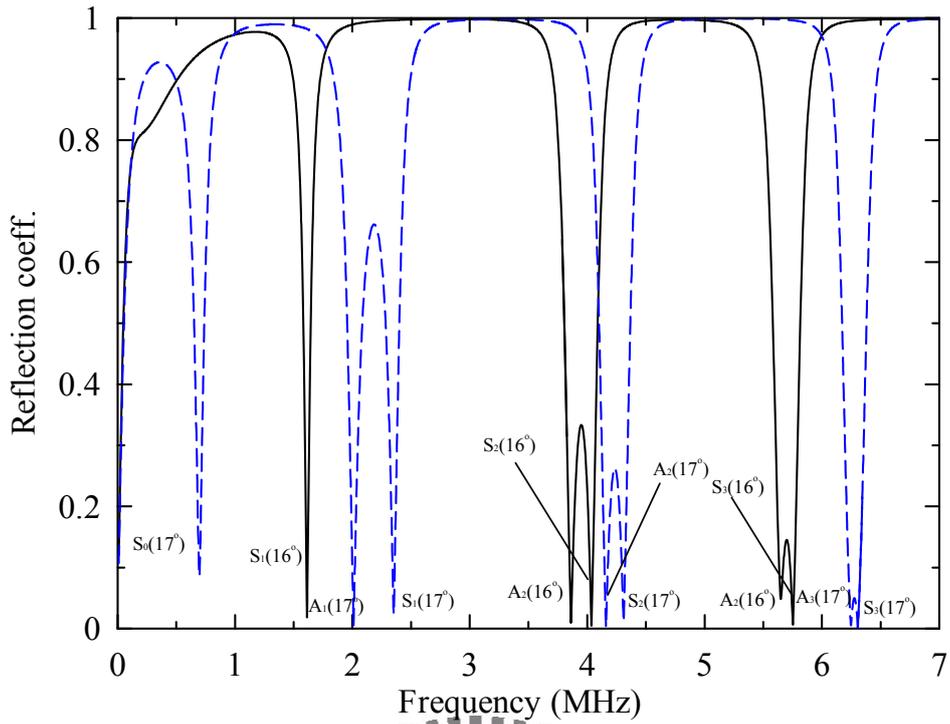
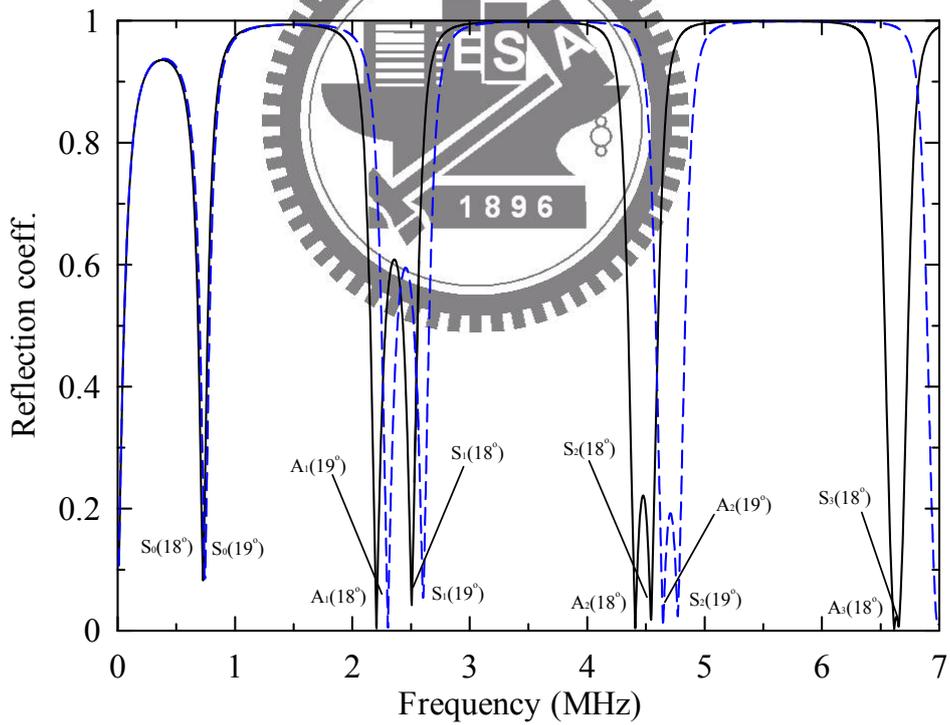


圖 4.15 入射角 16° 所對應的相速度在 1100/50/1100 μm 液晶試片頻散曲線的分布



(a)

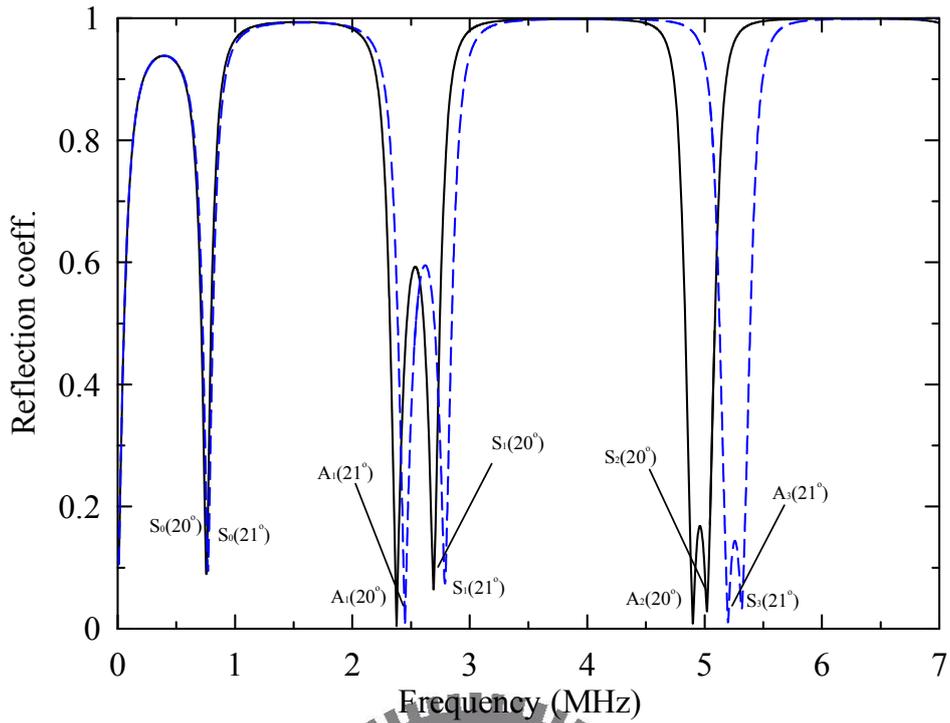


(b)

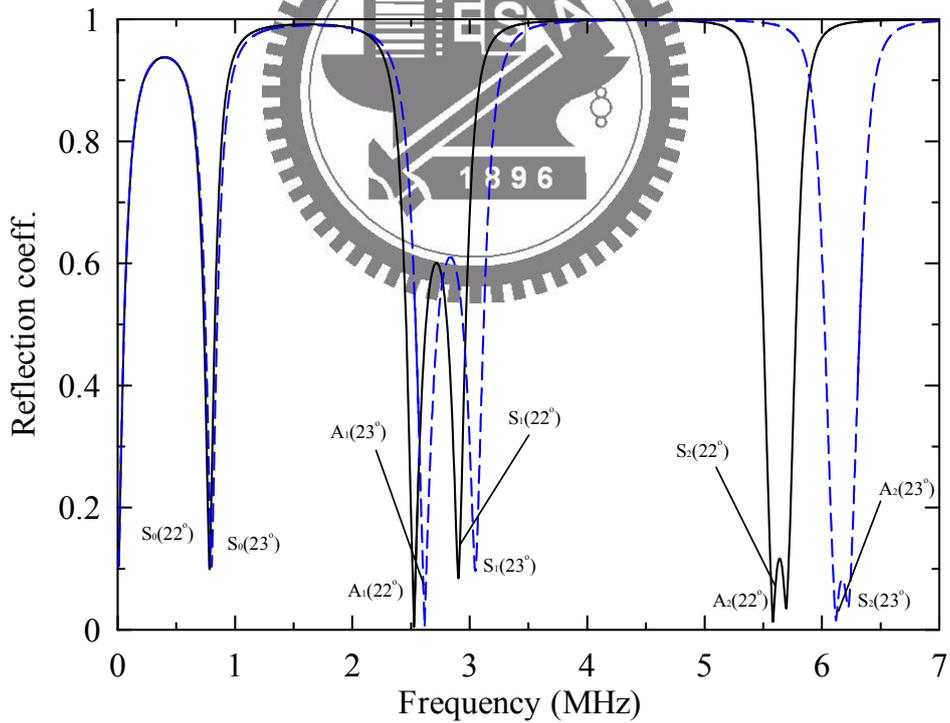
圖 4.16 1100/50/1100 μm 液晶試片受不同入射角

(a) 16° (實線)、 17° (虛線) (b) 18° (實線)、 19° (虛線) 照射的反射係數。

(圖中 S：對稱模態，A：反對稱模態，括號裡的度數代表入射角)



(a)

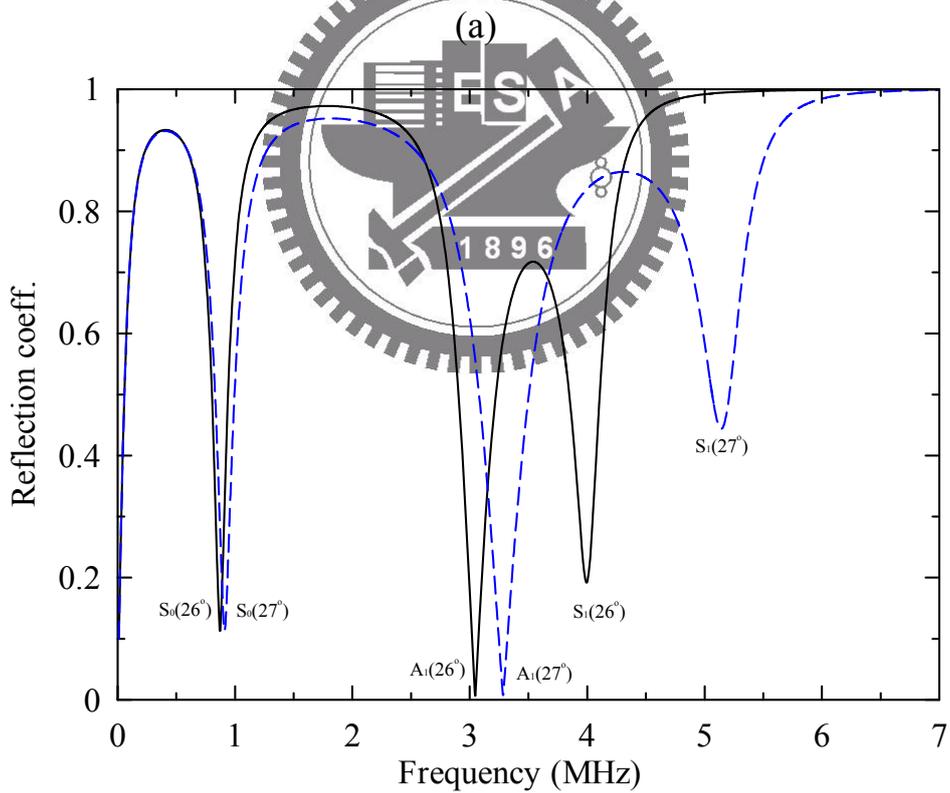
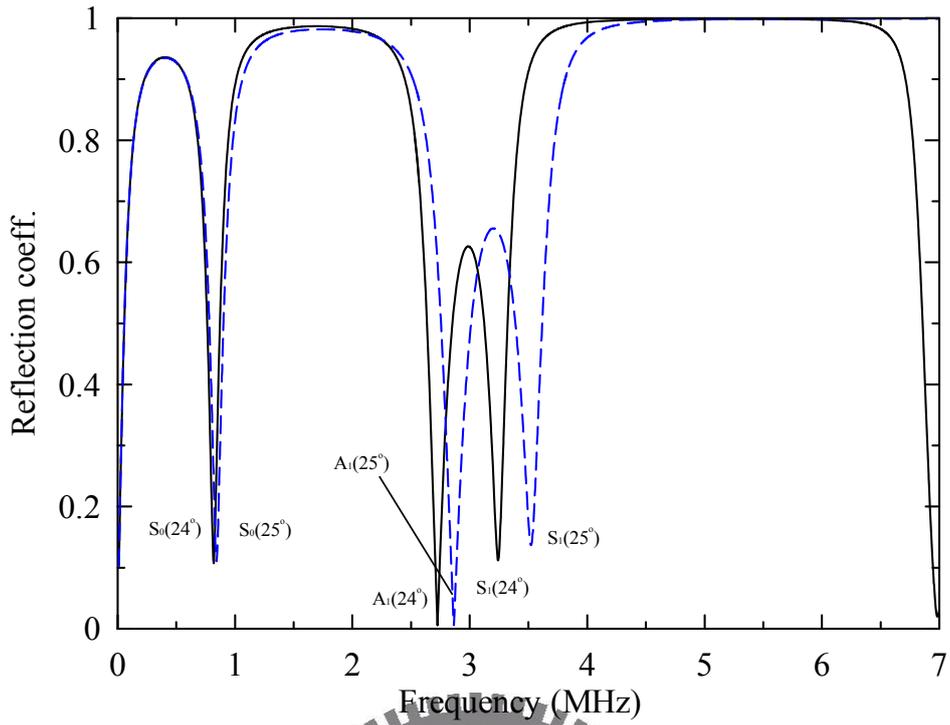


(b)

圖 4.17 1100/50/1100 μm 液晶試片受不同入射角

(a) 20°(實線)、21°(虛線)(b) 22°(實線)、23°(虛線)照射的反射係數。

(圖中 S：對稱模態，A：反對稱模態，括號裡的度數代表入射角)

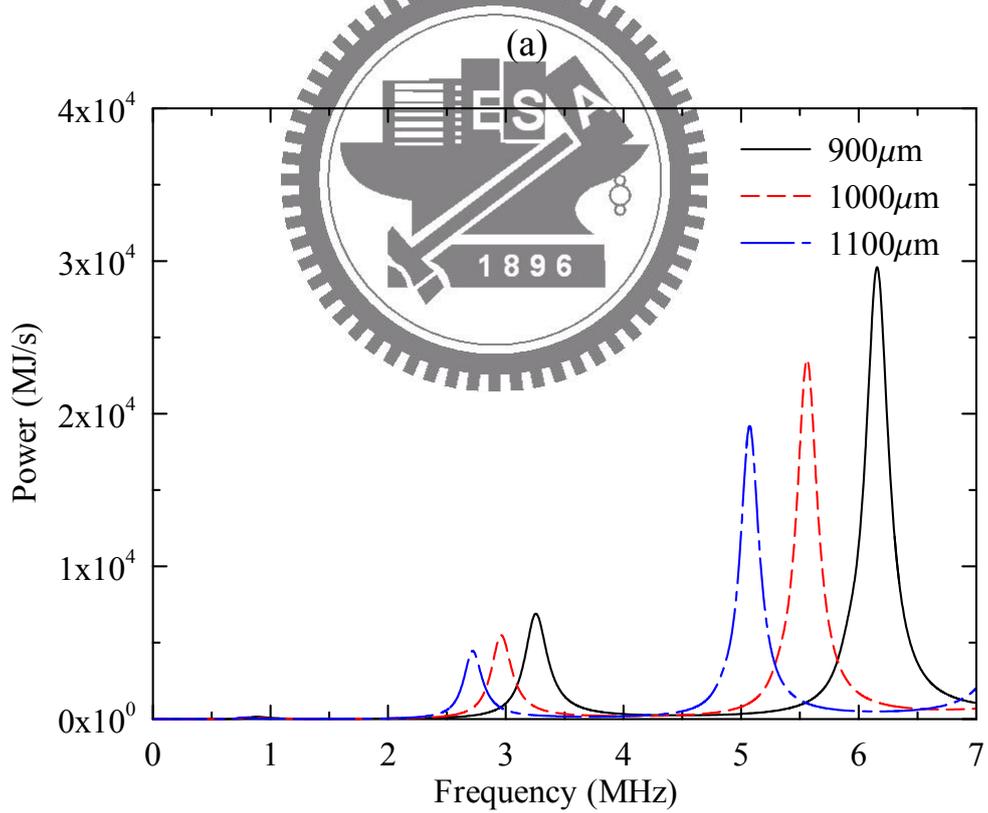
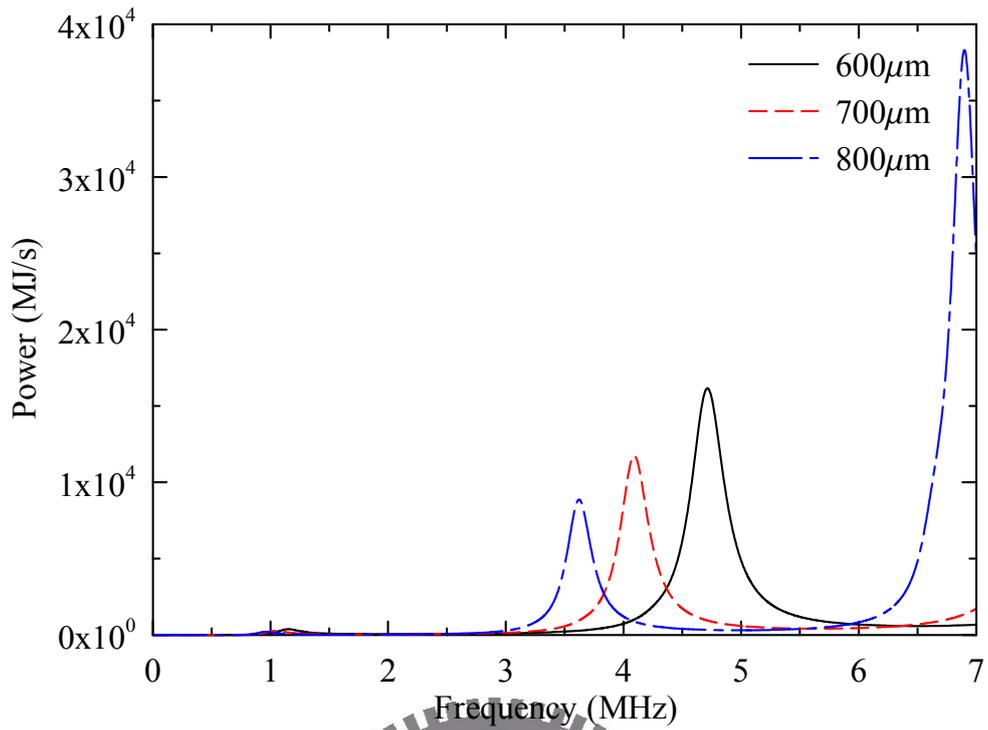


(b)

圖 4.18 1100/50/1100 μm 液晶試片受不同入射角

(a) 24°(實線)、25°(虛線)(b) 26°(實線)、27°(虛線)照射的反射係數。

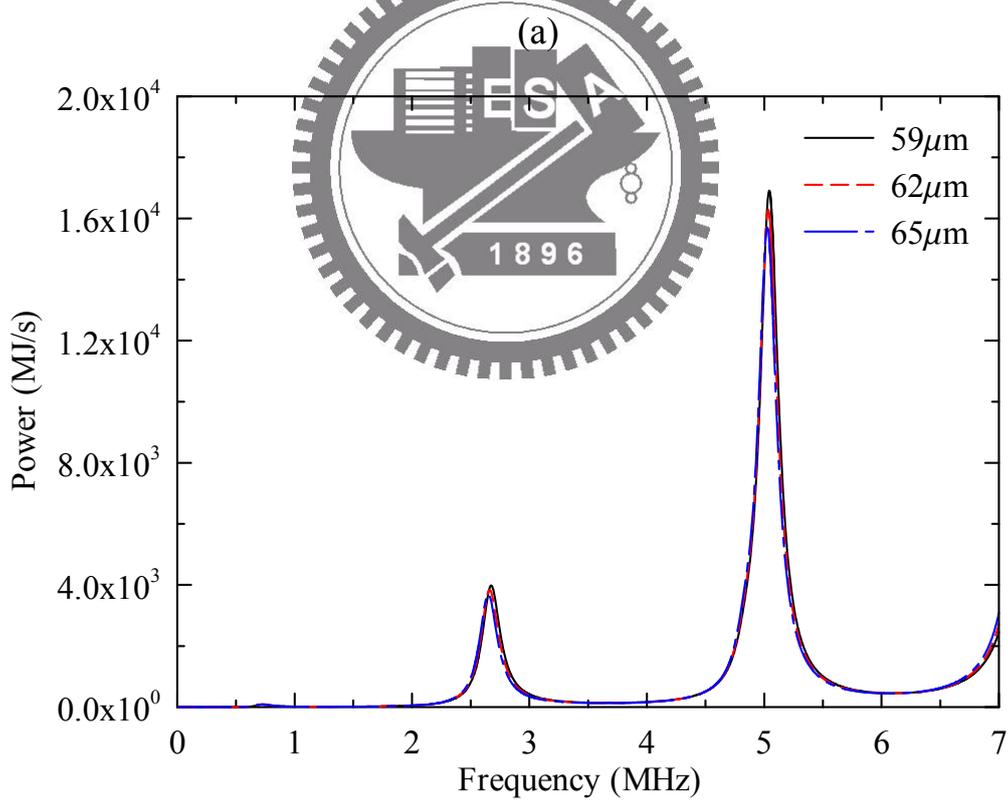
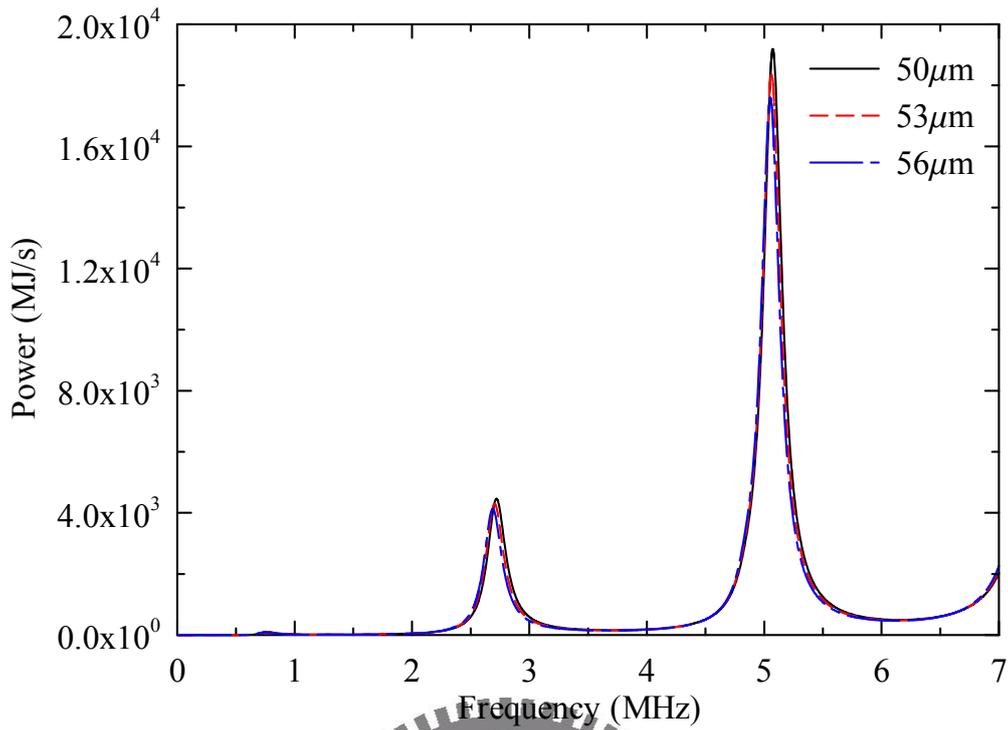
(圖中 S：對稱模態，A：反對稱模態，括號裡的度數代表入射角)



(b)

圖 4.19 液晶試片玻璃厚度對於液晶層能量頻譜的影響

(a) 600~800 μm (b) 900~1100 μm (液晶層厚度均為 50 μm)



(b)

圖 4.20 液晶層厚度對於液晶層能量頻譜的影響

(a) 50~56 μm (b) 59~65 μm (上下玻璃厚度均為 1100 μm)

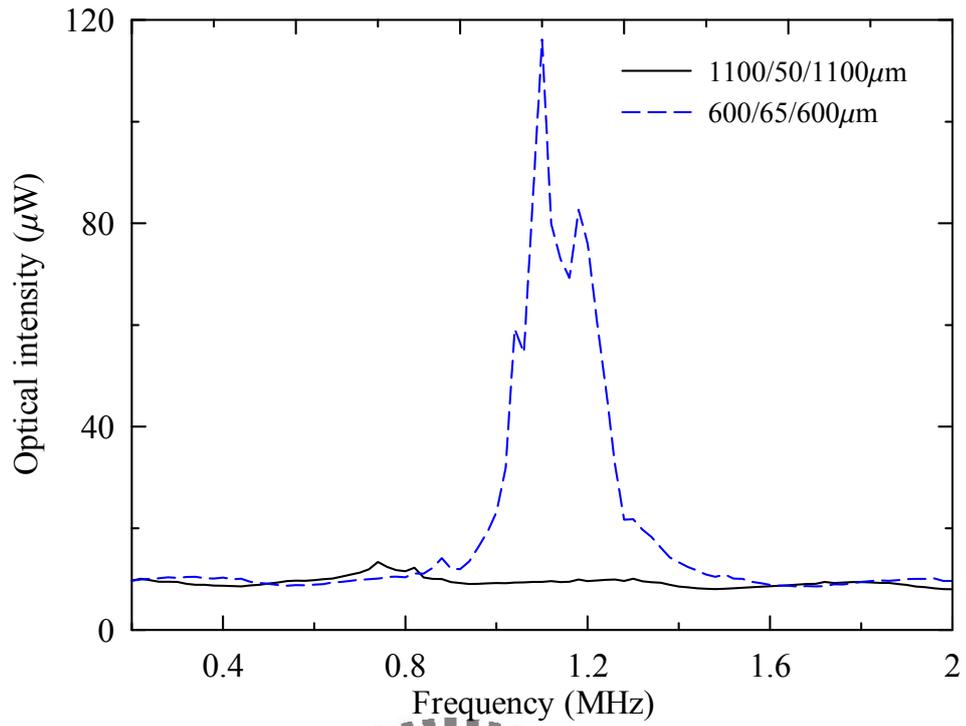


圖 4.21 超音波入射角 20° 對不同厚度液晶試片的穿透光穩態響應

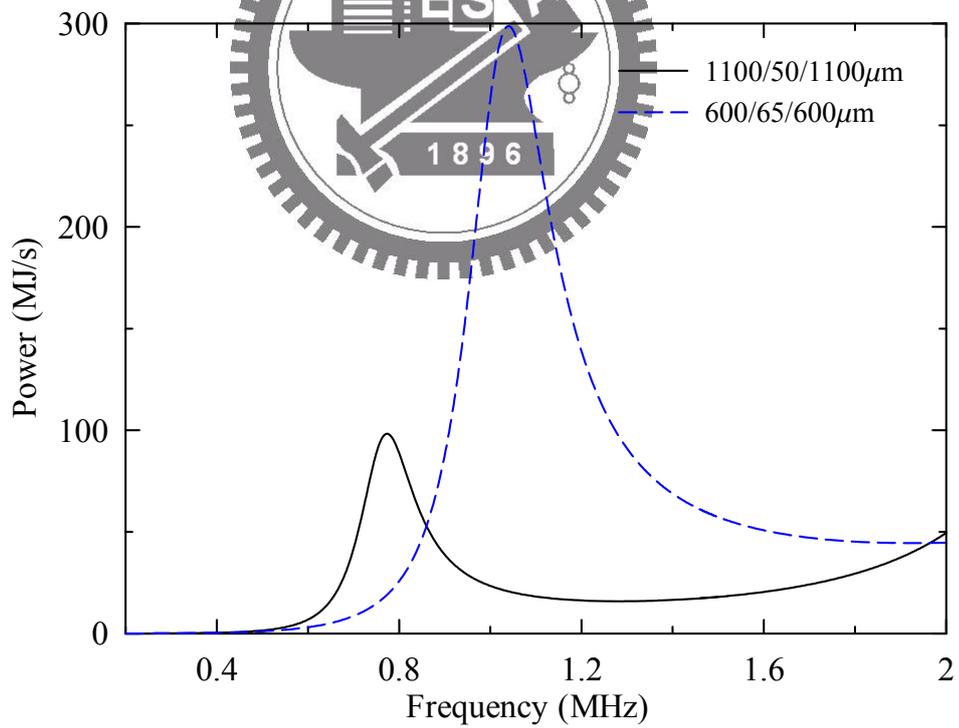


圖 4.22 超音波入射角 20° 對不同厚度液晶試片的液晶層能量頻譜

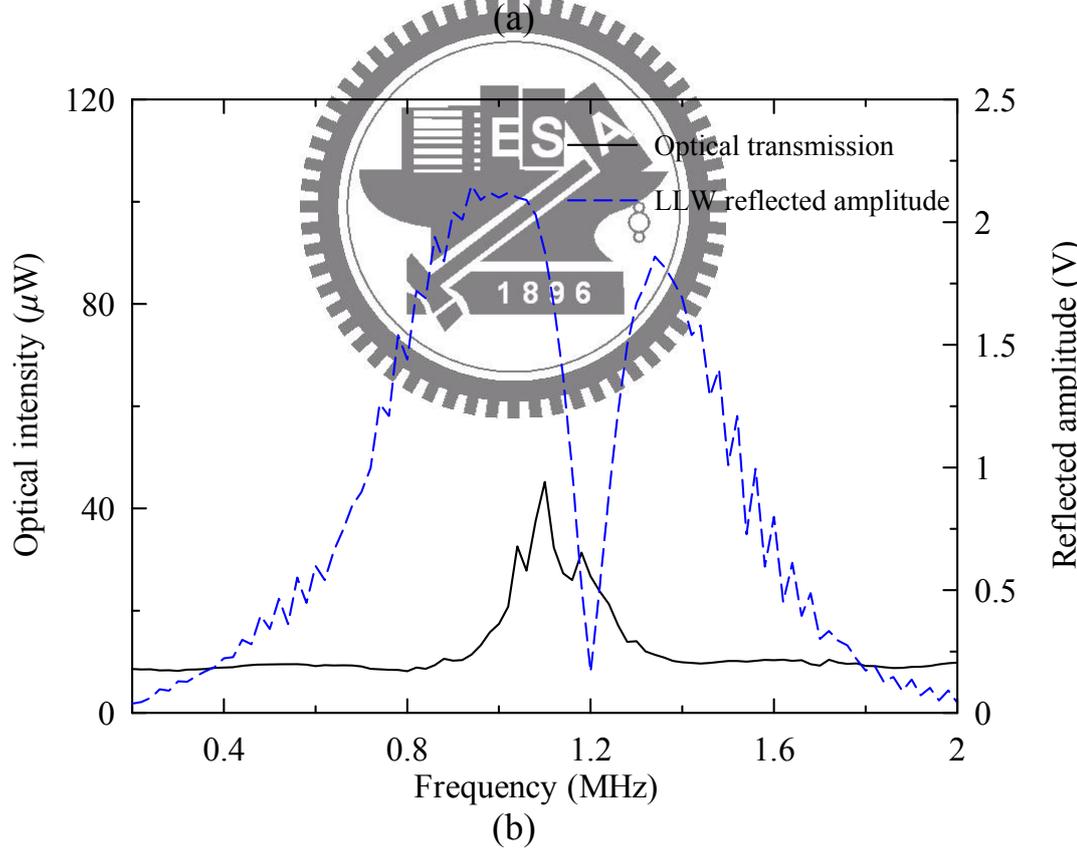
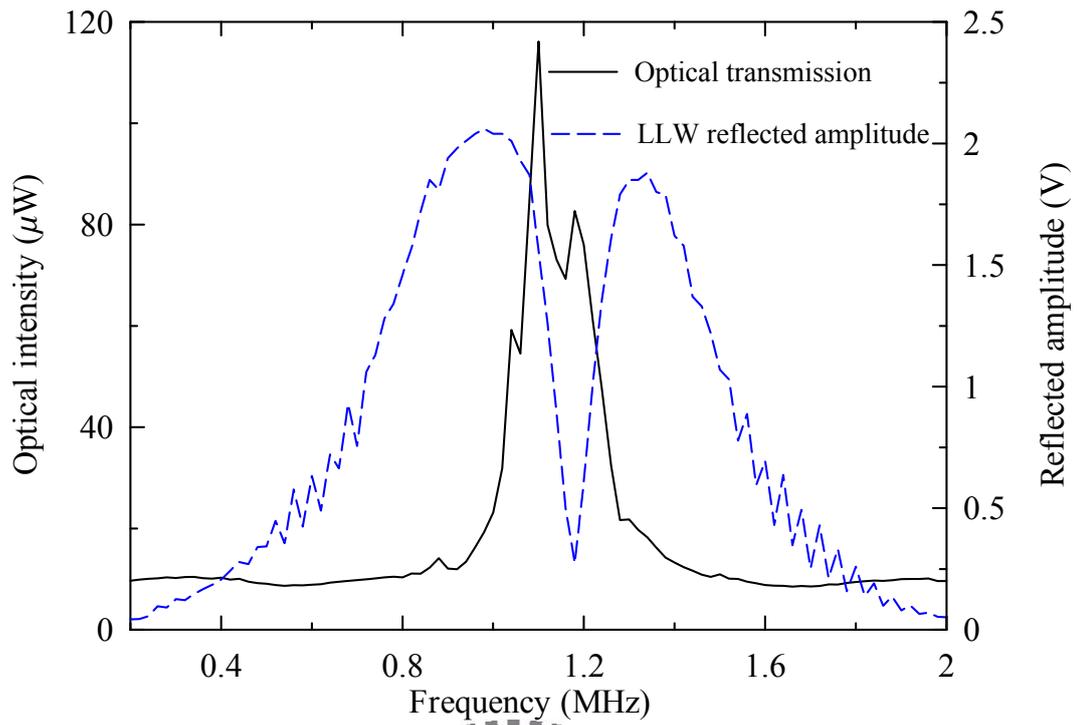


圖 4.23 超音波以入射角(a) 20° (b) 21° 照射 $600/65/600\mu\text{m}$ 液晶試片的穿透光強度與洩漏蘭姆波反射振幅頻譜。

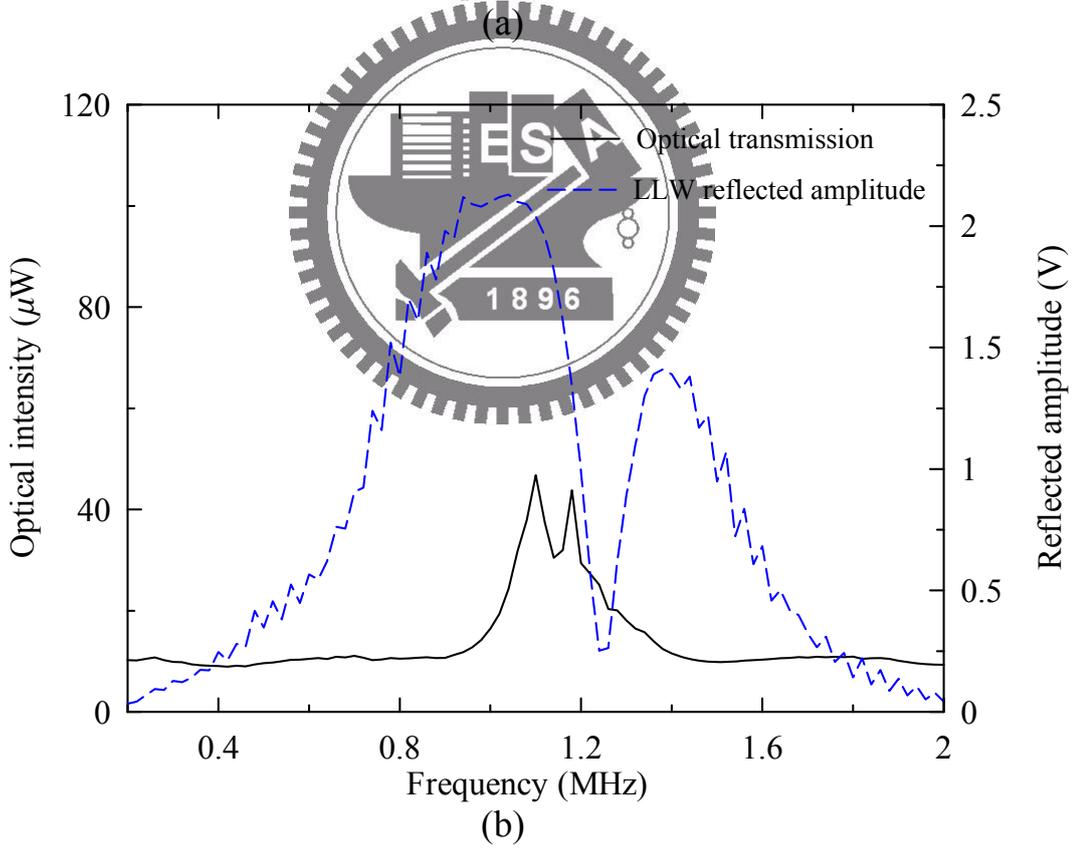
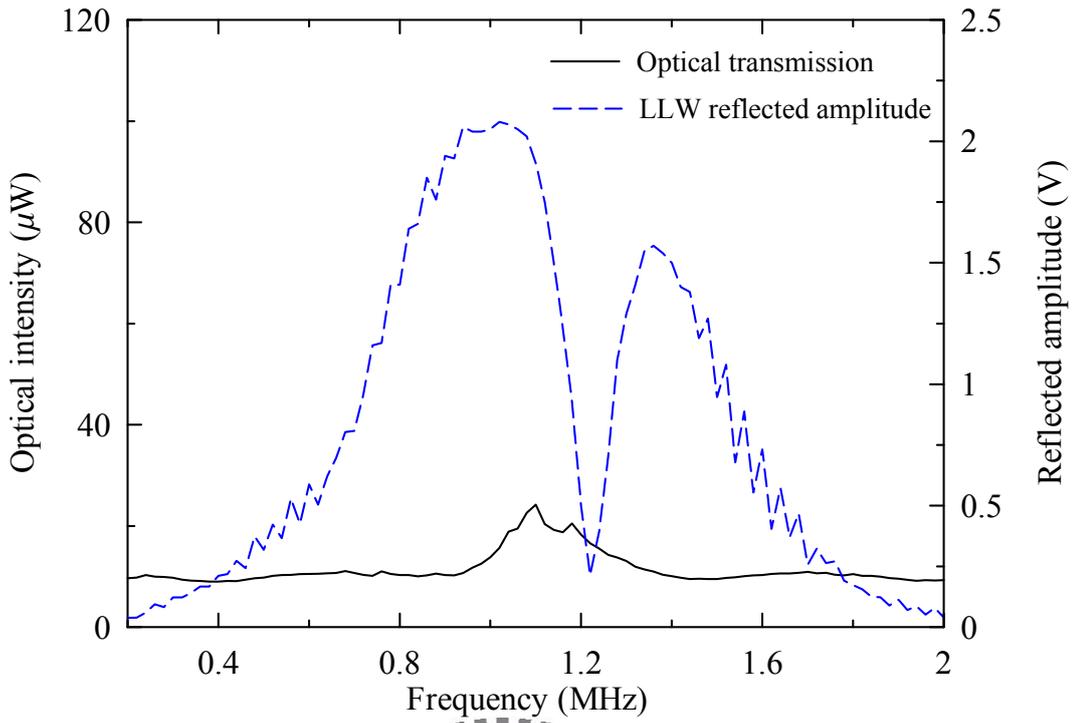


圖 4.24 超音波以入射角(a) 22° (b) 23° 照射 $600/65/600\mu\text{m}$ 液晶試片的穿透光強度與洩漏蘭姆波反射振幅頻譜。

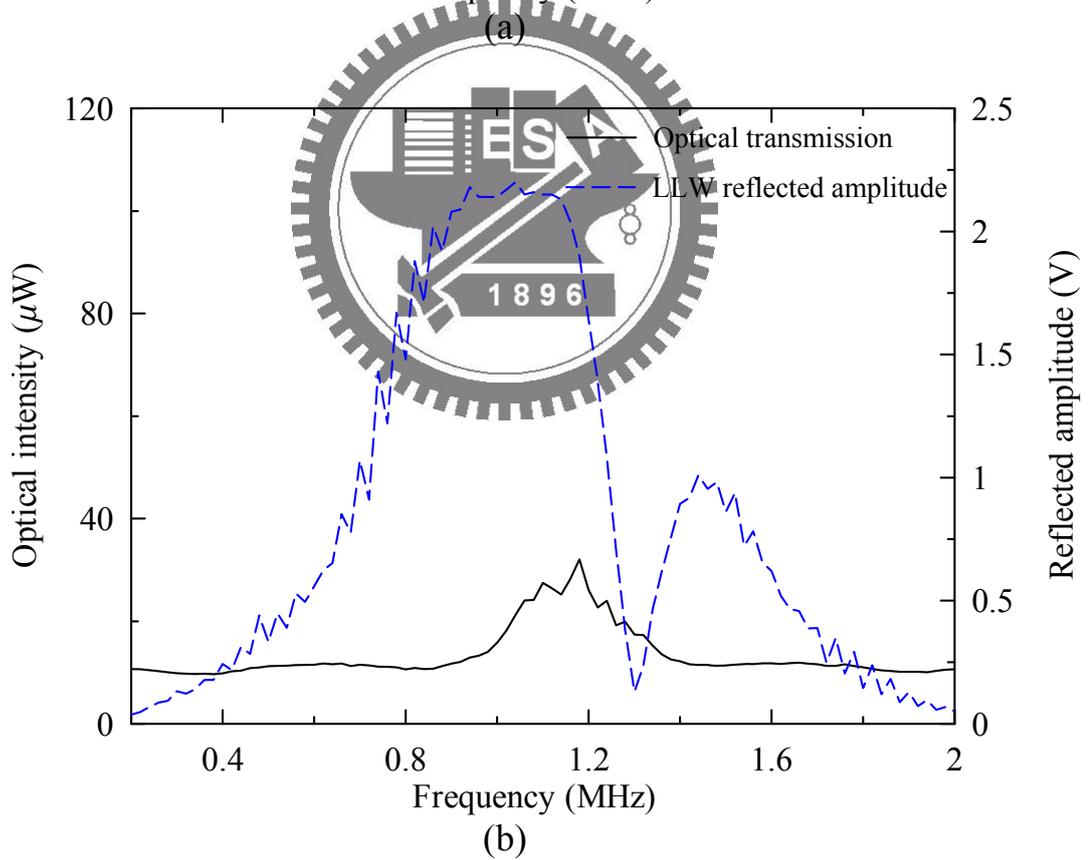
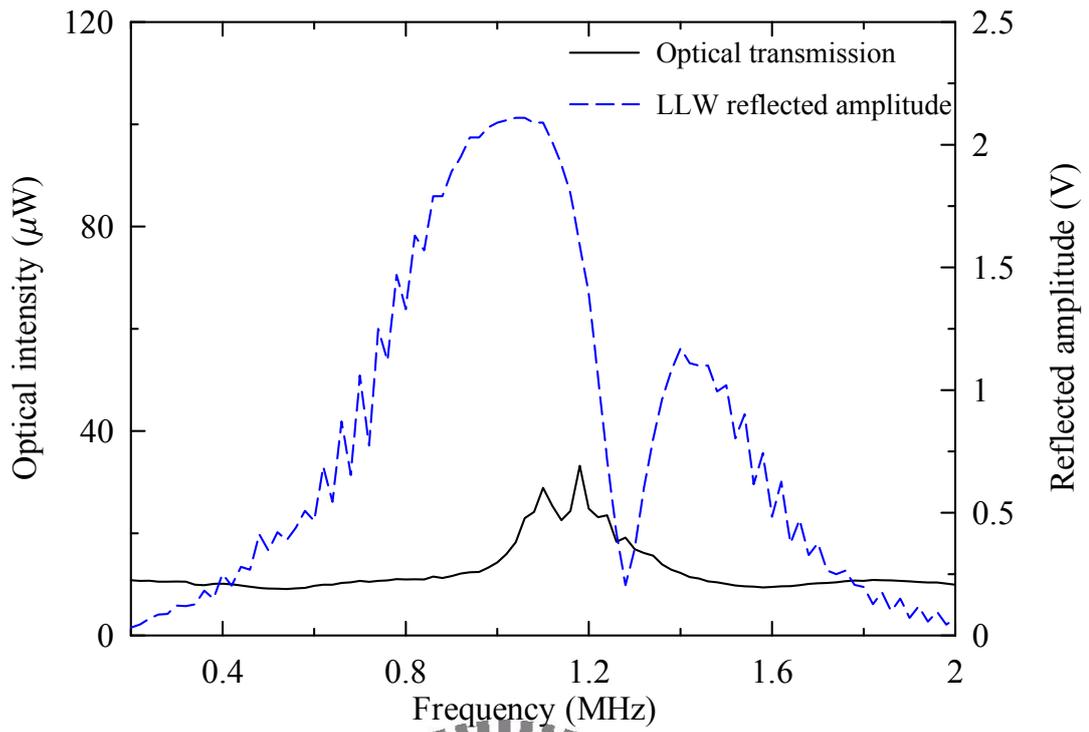


圖 4.25 超音波以入射角(a) 24° (b) 25° 照射 $600/65/600\mu\text{m}$ 液晶試片的穿透光強度與洩漏蘭姆波反射振幅頻譜。

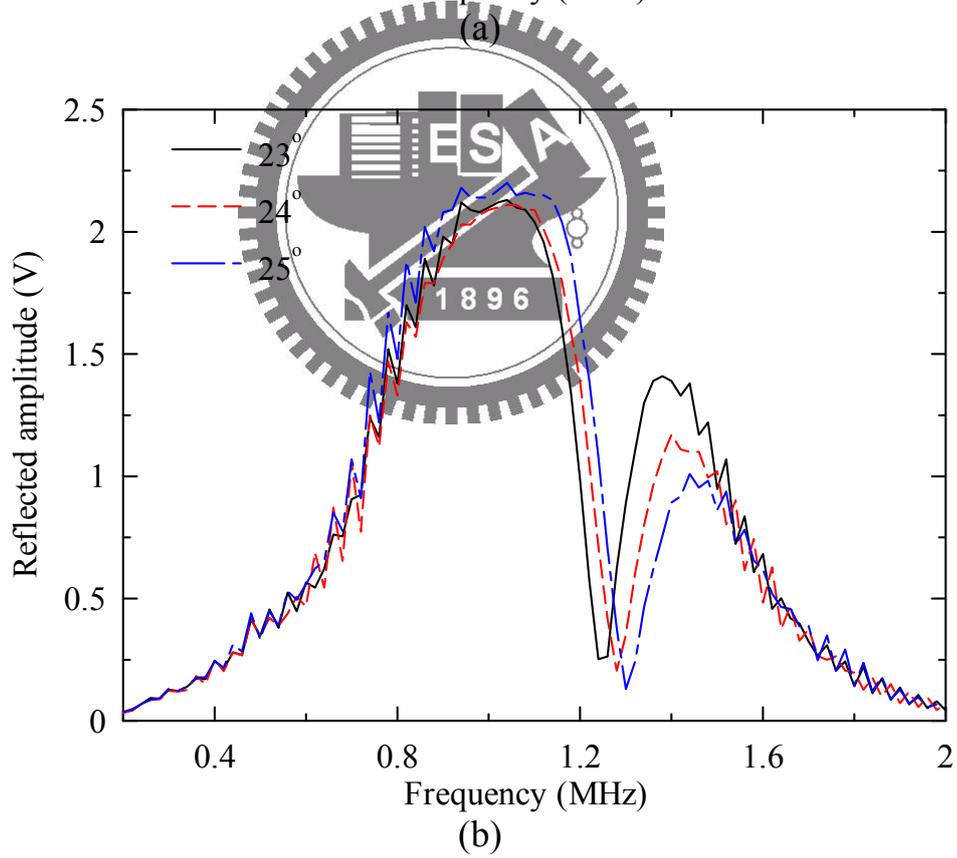
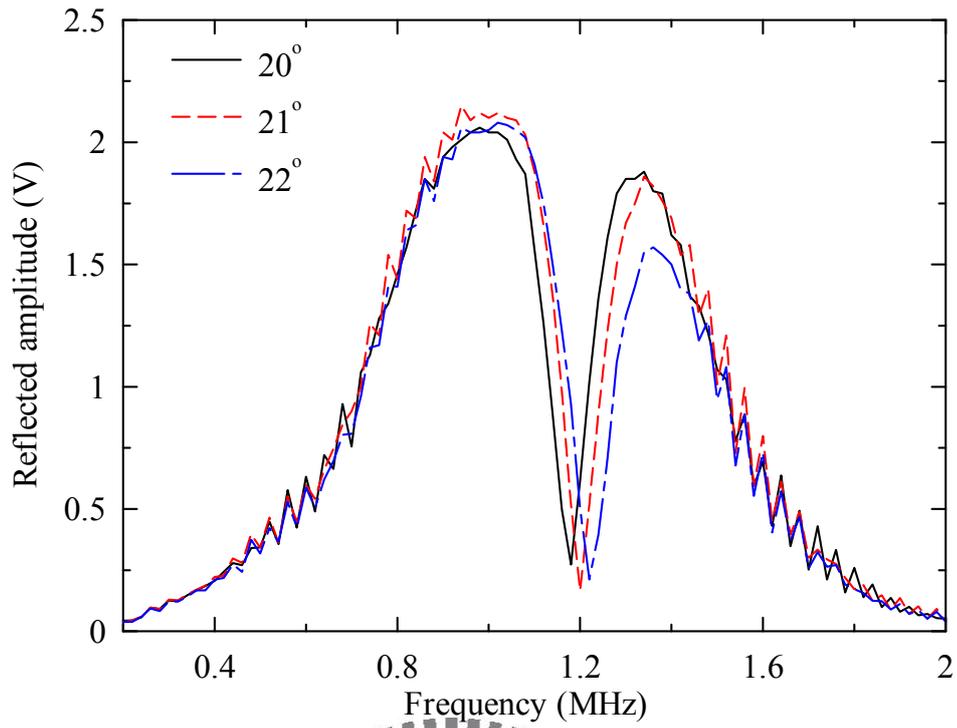


圖 4.26 超音波以入射角(a) $20^\circ \sim 22^\circ$ (b) $23^\circ \sim 25^\circ$ 照射
 $600/65/600\mu\text{m}$ 液晶試片的洩漏蘭姆波反射振幅頻譜。