

國立交通大學  
機械工程學系碩士班  
碩士論文

聲導波操控向列型液晶的排列之研究

Orientation of Nematic Liquid Crystals by  
Acoustic Guided Wave

研究生：黃康哲

指導教授：尹慶中 博士

中華民國九十八年七月

聲導波操控向列型液晶排列的研究  
Orientation of Nematic Liquid Crystals  
by Guided Acoustic Waves

研究生：黃康哲

Student : Kang-Che Huang

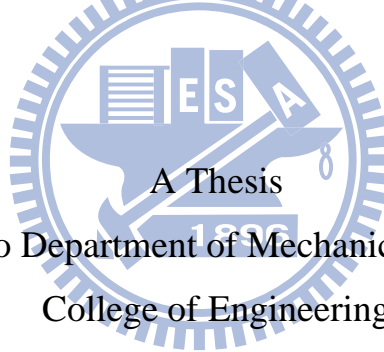
指導教授：尹慶中 博士

Advisor : Dr. Ching-Chung Yin

國立交通大學

機械工程學系碩士班

碩士論文



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 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年七月

# 聲導波操控向列型液晶排列的研究

研究生：黃康哲

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

向列型液晶具單光軸雙折射性質，受到聲場擾動，液晶分子的排列會偏離平衡狀態，使穿透液晶的偏極光強度產生變化，稱為液晶的聲光效應。本研究以鈮酸鋰晶片上的指差換能器激發表面聲波，經耦合液體傳遞至液晶層與玻璃構成之三明治結構中，生成高頻聲導波，轉動液晶分子的光軸。液晶分子微小，不具可視性，故採用雷射光束的穿透率作為定量指標，並以偏光顯微鏡輔助觀察，評估聲導波對於液晶分子排列的影響。

實驗證實聲導波可影響液晶分子排列，穿透光強訊號的上升時間隨超音波驅動電壓的增加而縮短，下降時間則隨液晶層厚度增加而延長。平行於液晶盒傳遞的聲波相速度隨驅動頻率提高而略為遞減，推測其具有頻散特性。本研究以碘酒為染料，滴入液體耦合層，發現折射進入液體耦合層的聲場輻射會引起聲場流。液晶層厚度大於  $25\ \mu\text{m}$  的試片受到聲導波的輻射，會產生垂直於波前的聲場流，聲場輻射與聲場流都會影響液晶分子排列，使穿透光強均勻性發生區域性變化。液晶層厚度增加時，穿透光強的頻譜極值數目也會增加。

關鍵字：向列型液晶、聲光效應、聲導波、聲場輻射、聲場流

# Orientation of Nematic Liquid Crystals by Acoustic Guided Waves

Student: Kang-Che Huang

Advisor: Dr. Ching-Chung Yin

Department of Mechanical Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

Nematic liquid crystals (NLC) are optically uniaxial, birefringent materials. Molecular orientation of NLC could be altered from their equilibrium states by acoustic field. Variation of the polarized light intensity transmitted through a liquid crystal cell disturbed by acoustic waves is called the acousto-optical effect of NLC. This thesis presents an investigation on this effect induced by acoustic guided wave propagating in the liquid crystal layer sandwiched between two glass plates. The interdigital transducers fabricated on lithium niobate substrates were used to generate surface acoustic waves, which refracted into the liquid crystal layer through a coupling fluid. The transmitted laser intensity was measured as a quantitative index to interpret the acousto-optical effect because the nanometer-scale liquid crystal molecules are invisible. Besides that, a polarized microscope was also used to observe the phenomena accompanied with realignment of liquid crystal molecules due to acoustic guided waves.

Experimental results indicate that liquid crystal molecules could be reoriented by acoustic guided waves. The transmitted laser intensity response extends to longer rise time with the increase of driving voltage

for ultrasound. On the other hand, the fall time grows as the thickness of liquid crystal layer increases. The phase velocities of acoustic waves traveling in the liquid crystal cell slightly reduce with the increase of driving frequency. It reveals that the acoustic waves are dispersive. Iodine dye was used to observe the acoustic streaming induced by radiation of acoustic guided waves which were refracted through the coupling liquid layer in the present experimental setup. For the liquid crystal specimens having thickness greater than 25  $\mu\text{m}$ , acoustic streaming field could be induced by radiation of acoustic guided waves. The acoustic streaming has an orientation perpendicular to the wavefront. Both acoustic radiation and acoustic streaming can change molecular orientation and induce local fluctuations of transmitted light intensity. It is found that the increase in thickness of liquid crystal layer also induces more extreme spikes in transmitted light intensity.

Keywords: nematic liquid crystals, acousto-optical effect, acoustic guided waves, acoustic radiation, acoustic streaming.

# 誌謝

來到交通大學這一年半的時間，有機會接觸到各種的研究領域，開拓了更寬廣的視野，學習過程雖然忙碌但感覺格外充實，同時也讓我累積了許多寶貴的經驗。感謝恩師尹慶中 博士的悉心栽培與指導，使本論文得以順利完成，在此致上由衷的謝意。感謝馬劍清老師、陳皇銘老師及蕭國模老師撥冗擔任口試委員，對本論文不吝指正，提供許多精闢的建議，使論文內容更臻完備。

感謝非破壞評估研究室的學長游泰和、許世明、王多聞、劉育翔、溫子達的關心與幫助，引領我適應研究室的生活。特別感謝學長嚴承侯、潘權文及蔡汶志在學業上的勉勵與生活經驗的分享，同學鍾重光、張逸涵的相互扶持與鼓勵，有幸能跟你們一起渡過碩士生涯，這份共同努力的革命情感令我永誌難忘。學弟賴佑年、鄭博毅及學妹吳昱瑾，過去的一年感謝有你們的陪伴，讓我的研究生活增色不少，在此預祝你們研究順利。

感謝我最愛的雙親和妹妹，求學之路有你們的叮嚀與關懷，讓我有勇氣面對挫折而不氣餒，你們是我最大的動力與精神支柱。本論文亦要感謝交大奈米所陳俐琪同學在製作表面聲波元件方面的協助，及交大電物所的林家任學長，幫我釐清許多液晶方面的相關知識，並感謝交大顯示科技研究所大方提供完善的實驗設備，和許多不及備載曾幫助過我的朋友。最後，謹以此論文獻給我摯愛的家人、師長及好友。

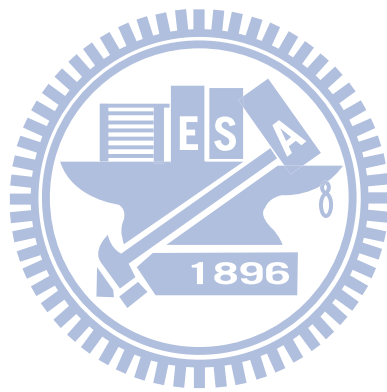
# 目錄

	頁次
中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iv
目錄	v
表目錄	viii
圖目錄	ix
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 文獻回顧	2
1.2.1 界面聲波的發展過程	2
1.2.2 固體/液體/固體之聲導波研究	2
1.2.3 液晶的聲光效應研究	3
1.2.4 洩漏表面聲波於微流道之研究	4
1.3 內容簡介	5
第二章 理論說明	7
2.1 表面聲波元件簡介	7
2.1.1 鈮酸鋰壓電晶體之分析	7
2.1.2 脈衝函數模型	8
2.2 表面聲波元件之檢測	10
2.3 液晶簡介	11
2.4 連續彈性體形變理論	12
2.5 液晶的光學理論	13
2.6 液晶試片聲導波波傳理論	14

第三章	實驗設計與架構	15
3.1	表面聲波元件製程	15
3.1.1	壓電基板的選擇條件	15
3.1.2	指叉狀電極的設計	16
3.2	微機電製程	16
3.3	液晶試片的準備	19
3.3.1	液晶試片的製作流程	19
3.3.2	液晶試片的檢測	21
3.4	量測系統架構	21
3.4.1	散射參數的量測系統	21
3.4.2	吸波塗劑效能量測系統	22
3.4.3	聲光效應量測系統	22
3.4.4	反應時間量測系統	23
3.4.5	CCD 影像擷取系統	23
第四章	實驗量測與結果分析	24
4.1	散射參數的量測	24
4.2	吸波塗劑之效能評估	24
4.3	聲光效應實驗分析	25
4.3.1	短時間穿透光強的動態訊號	25
4.3.2	反應時間量測系統	26
4.3.3	CCD 影像之分析	28
4.3.4	微流道之聲場流分析	29
第五章	結論與未來展望	31
5.1	結論	31
5.1.1	液晶聲光效應實驗結果分析	31

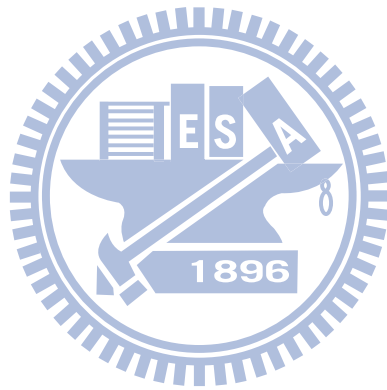


5.1.2 聲場流於微流道之實驗結果分析	32
5.2 未來展望	32
參考文獻	34
附表	37
附圖	41



## 表目錄

表 1	127.86°Y Cut 鈮酸鋰的各項基本性質	37
表 2	單一型指叉狀電極幾何參數(20MHz)	38
表 3	啣啣型指叉狀電極幾何參數(15~20MHz)	38
表 4	向列型液晶 5CB 的材料參數	39
表 5	溶劑成分配置表	40
表 6	數值計算採用的材料常數	40

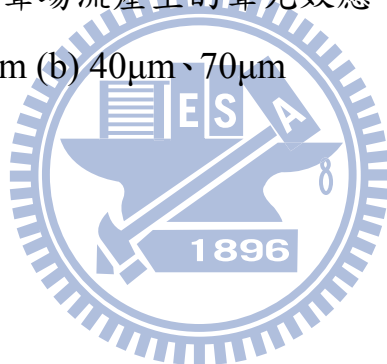


## 圖目錄

圖 2.1	指叉換能器示意圖	41
圖 2.2	施加交流電場於指叉電極之壓電效應示意圖	41
圖 2.3	脈衝函數模型	42
圖 2.4	指叉換能器示意圖	42
圖 2.5	模擬 5~10MHz 電極數目為 50.5 與 25.5 對之頻率響應	43
圖 2.6	模擬 15~20MHz 電極數目為 50.5 與 25.5 對之頻率響應	43
圖 2.7	模擬 10~20MHz 電極數目為 50.5 與 25.5 對之頻率響應	44
圖 2.8	模擬 16MHz 電極數目為 50.5 與 25.5 對之頻率響應	44
圖 2.9	模擬 20MHz 電極數目為 50.5 與 25.5 對之頻率響應	45
圖 2.10	散射參數示意圖	46
圖 2.11	反射及傳輸功率比示意圖	46
圖 2.12	(a)向列型、(b)層列型及(c)膽固醇型液晶示意圖	47
圖 2.13	液晶的(a)展開、(b)扭曲、(c)彎曲示意圖	48
圖 2.14	液晶分子的尋常光場	49
圖 2.15	液晶分子的非尋常光場	49
圖 2.16	等向性三明治結構示意圖	50
圖 2.17	等向性三明治結構示意圖	50
圖 3.1	鋰酸鋁的材料性質	51
圖 3.2	表面聲波元件之微機電製程	52
圖 3.3	(a)AutoCAD 光罩設計圖(b)15~20MHz 啞啞型 IDT (c) 16MHz 單一型 IDT	53
圖 3.4	散射參數量測系統示意圖	54
圖 3.5	測試吸波塗劑系統示意圖	55
圖 3.6	表面聲波元件示意圖	56

圖 3.7	表面聲波元件聲光實驗系統示意圖	57
圖 3.8	自動化光強量測程式	58
圖 3.9	自動化光強量測實驗流程圖	58
圖 4.1	單一型(16MHz)表面聲波元件之頻率響應	59
圖 4.2	啣啣型(15~20MHz)表面聲波元件之頻率響應	59
圖 4.3	無吸波塗劑之接收訊號	60
圖 4.4	兩邊緣皆有吸波塗劑之接收訊號	60
圖 4.5	液晶試片間距 70 $\mu\text{m}$ 之週期性亮暗條紋	61
圖 4.6	液晶試片間距 25 $\mu\text{m}$ 之週期性亮暗條紋	61
圖 4.7	不同厚度液晶試片的穿透光強變化	62
圖 4.8	不同厚度液晶試片的穿透光強變化擬合曲線	62
圖 4.9	單一型表面聲波元件之施加電壓與光強關係	63
圖 4.10	啣啣型表面聲波元件之施加電壓與光強關係	63
圖 4.11	液晶層厚度為 25 $\mu\text{m}$ 的反應時間	64
圖 4.12	液晶層厚度為 70 $\mu\text{m}$ 的反應時間	64
圖 4.13	使用啣啣型指叉換能器於不同厚度液晶層的下陷時間	65
圖 4.14	啣啣型指叉換能器於 15~20MHz 的聲場強度	65
圖 4.15	掃頻時間為 30~50ms，液晶穿透光強的歷時曲線	66
圖 4.16	掃頻時間為 60~80ms，液晶穿透光強的歷時曲線	66
圖 4.17	單一型表面聲波元件(15MHz)所產生之液晶條紋尺寸	67
圖 4.18	啣啣型表面聲波元件(15~18MHz)所產生之液晶條紋尺寸	67
圖 4.19	(a) 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，試片為 1100/25/1100 $\mu\text{m}$ ，1~20MHz	68
圖 4.19	(b) 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，試片為 $1100/25/1100\ \mu\text{m}$ ， 10~20MHz	68
圖 4.20 掃頻時間為 1s 之 CCD 擷取影像	69
圖 4.21 掃頻時間為 30ms 之 CCD 擷取影像	69
圖 4.22 偏光顯微鏡中 CCD 擷取影像，在 $25\ \mu\text{m}$ 液晶試片內產生垂直 於波前方向的聲場流亮暗條紋	70
圖 4.23 在鈦酸鋰上激發表面聲波 1750ns 後，能量傳遞至玻璃/水/鈦 酸鋰系統的質點速度分佈，引用 Hodgson <i>et al</i> [20]的結果	71
圖 4.24 以碘酒為染料，滴入液體耦合層	72
圖 4.25 表面聲波在液體耦合層產生數條垂直於波前之節線	72
圖 4.26 穿透光強度與聲場流產生的聲光效應，液晶層厚度為 (a) $25\ \mu\text{m}$ 、 $40\ \mu\text{m}$ (b) $40\ \mu\text{m}$ 、 $70\ \mu\text{m}$	73



# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與動機

液晶是具有液體黏滯性及固態晶體雙折射光學性質的第四狀態材料。最早在 1888 年由 F. Reinitzer 所發現，至今已有一百多年的歷史。液晶的電光效應被發現之後，液晶的研究與應用逐漸受到重視，隨著顯示科技產業的發展，無論在基礎科學或應用工程領域上，液晶已逐漸被廣泛應用在顯示裝置、光學裝置及感測器方面。

液晶具有光的異向性與誘電性，會受到聲場、電場、磁場等外場作用所影響，會使其光學特性發生變化。1974 年，Kapustina [1]於低頻的機械應變中，發現液晶分子的光軸會隨之振盪。此後，陸續有許多學者探討超音波聲場對於液晶分子排列的影響。

向列型液晶的分子排列方向可被超音波影響，造成通過液晶的光強度改變，聲波強度與液晶穿透光強度變化之間的關係稱為液晶的聲光效應(acousto-optic effect)。液晶聲光效應的研究是討論電場、磁場以外的超音波聲場對於液晶分子排列的影響，目前的實驗已初步證實聲場與液晶排列之間有耦合的關係存在，由於牽涉領域太過廣泛，至今仍欠缺有系統的理论與完善的模型，探討超音波對棒狀高分子材料排列的影響。

本研究以製作在鈮酸鋰(LiNbO<sub>3</sub>)晶片上的指差電極(interdigital electrodes)激發表面聲波，聲波能量經耦合液體傳遞，由波式轉換折射進入液晶試片，在液晶層與玻璃之間產生高頻聲導波，可以有效地改變液晶層邊界的條件及壓力梯度，轉動液晶分子的排列。由於液晶分子非常微小，不具有可視性，故以雷射光束的穿透率作為聲光效應的定量指標，改變實驗參數，配合 CCD 擷取影像，定性且定量的分

析液晶分子排列趨勢，評估聲導波影響棒狀高分子材料排列狀態的效能。

## 1.2 文獻回顧

### 1.2.1 界面聲波的發展過程

1916 年，Lamb [2]發現在表面無曳力作用之等向性平板中，存在一種沿平板傳遞的頻散波，稱為藍姆波(Lamb waves)，聲波被侷限於平板上下表面之間，相對於平板中平面，可分為對稱與反對稱的彈性波。因為聲波擾動在厚度方向維持共振模態，具有波傳距離長、衰減小的特性。當頻率與厚度之乘積趨近於無窮大時，藍姆波之特徵方程會退化為雷利波(Rayleigh waves)之特徵方程。

1948 年，Scholte [3]發現沿著固液界面存在一種相速度略低於液體的聲波波速，聲波在固體介質中的大部分能量均侷限於界面附近，並推導等向性平板在液體負載下的頻散方程式，此種波傳的模態稱為界面聲波(interface acoustic waves)或(Scholte waves)。

### 1.2.2 固體/液體/固體之聲導波研究

1992 年，Zhu 與 Wu [4]推導單層平板浸沒於無限域黏滯性液體中，以及平板浸沒於有限厚度黏滯性液體的聲導波相速度頻散方程式。1994 年，Laperre 與 Thys [5]以數值模擬彈性波在三明治結構中，對稱與反對稱模態的頻散曲線。

1997 年，Nayfeh 與 Nagy [6]根據之前 Zhu 與 Wu [4]的理論，將三明治結構中的液體層假設為類似固體的介質，模擬流體於不同黏滯係數時的聲導波相速度。他們經由數值模擬，發現無論將薄板浸沒或覆蓋於具黏滯性的流體中，皆會在某些特定頻率下，讓薄板中的藍姆

波於最低階對稱模態出現能量驟降的現象。使固液界面原本為橢圓軌跡的偏振轉變為垂直於表面的線偏振狀態。同年，Hassan 與 Nagy [7] 探討三明治結構的液體層在低頻時的聲導波頻散現象，採用雷射干涉技術量測掃頻時液體的聲導波相速度，驗證數值模擬的結果。

2003 年，Hosten 與 Castaings [8] 以表面阻抗矩陣 (surface impedance matrices) 法推導固體與理想流體組成的層狀結構聲導波的相速度頻散方程式，並計算位移與應力的分佈。

### 1.2.3 液晶的聲光效應研究

1933 年，Oseen [9] 以彈性連續體理論來分析液晶分子。1972 年，Bertolotti et al [10] 曾進行以超音波聲場改變向列型液晶分子排列的實驗。將超音波垂直入射於液晶試片，並以光電倍增管量測穿透試片之光強度，由示波器上觀察光強度的變化，實驗結果顯示超音波脈衝訊號的時間越長，穿透光強度變化的持續時間也隨之增加。

1976 年，Miyano 與 Shen [11] 在相同的操作條件之下，觀察水或液晶會產生相似聲場流 (acoustic streaming) 的狀態。建立簡化過後的流體動力學模型，並考慮流體的黏滯性質，計算傳遞至液晶層中的聲導波模態。再模擬液晶層中垂直於波傳的方向上，會產生半週期性的渦流，造成液晶分子重排，並結合液晶的雙折射光學性質，解釋產生週期性條紋的成因。

1981 年，Sato and Ueda [12] 將液晶試片製作於鈮酸鋰上，並於鈮酸鋰上鍍一層金，藉光學反射的方式觀察到向列型液晶在表面聲波的驅動之下，會產生週期性的條紋，並與電場產生的 Williams domains 做比較。發現在垂直配向的液晶試片中，觀察到條紋週期與試片間隙大小無關，而是與表面聲波元件的驅動頻率有直接地關係，且當液晶



層厚度大於  $100\mu\text{m}$  時，就很難有週期性條紋的產生。

1999 年，Moritake et al [13]以指叉換能器(interdigital transducer, IDT)激發表面聲波，使通過液晶盒結構，觀察表面聲波對於液晶的影響。2000 年，Inoue et al [14]將向列型液晶簡化為等向性流體，以數值方法分析玻璃/液晶/玻璃三明治結構的波傳特性，並根據實驗量測液晶穿透光的明暗週期，計算縱波在液晶中的波長。

2005 年，Greanya et al [15]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。實驗觀察超音波源切換時之光強度動態訊號，並推導穿透光強度與超音波作用時間的關係。同年，Kozhevnikov [16]，根據斜向入射於液晶層的聲波，以流體動力學理論配合邊界條件，求得聲波強度與液晶分子導軸轉動之關係式。

#### 1.2.4 洩漏表面聲波於微流道之研究

1995 年，Uchida et al [17]進行聲流(acoustic streaming)的數值模擬與實驗，將鈮酸鋰表面聲波延遲元件(delay line)沒入水槽中，自表面聲波元件激發的高頻聲波，會以一雷利角(Rayleigh angle)折射進入液體中，當沿著縱波傳遞的方向之聲場壓力梯度增強時，可由 CCD 相機中捕捉到液體內有聲流的現象產生。

2007 年，Tan et al [18]進行洩漏表面聲波於微流道方面的研究，設計單一型指叉電極於  $128^\circ$  Y-cut 鈮酸鋰上，並使用雷射在鈮酸鋰壓電基板上刻出一微流道。研究指出當微流道孔徑小於表面聲波波長時，流道內部的液體會產生規律性排列，與波前垂直。當流道孔徑大於波長時，則會於微流道中產生渦流(vortex)現象，並以數值模擬分析微流道內等向性液體的聲流速度變化。同年，Tan et al [19]散佈附

著性奈米煙狀顆粒(adherent nanoscale smoke particles)於鈮酸鋰表面，研究顯示奈米顆粒會聚集於振幅較大的區域，以顆粒聚集的疏密程度，進行聲場分佈可視化的研究。

2009 年，Hodgson et al [20]研究關於表面聲波能量洩漏至液體內部的方​​式，於鈮酸鋰基材上激發雷利波，使用水或甘油作為能量耦合劑，藉此讓聲波輻射(acoustic radiation)的能量折射進入玻璃基板內。以雷射都普勒測振儀(laser Doppler Vibrometry, LDV)量測能量傳遞時玻璃的橫向位移，觀察到一沿著玻璃傳遞的反對稱藍姆波，其洩漏進入玻璃基板的能量足以推動位於基板上方水珠，以 8mm/s 的速度前進。該研究並以二維數值模擬能量洩漏至液體層的過程。

### 1.3 內容簡介

本文以垂直排列的向列型液晶試片為研究對象，設計不同形式之指叉狀電極，激發表面聲波經耦合液體折射進入液晶盒(liquid crystal cell)試片內，改變其液晶分子的排列方式，使用光學量測系統分析，探討聲場對棒狀高分子材料排列的影響。

全文共分為五章，第二章為簡介壓電晶體的分析、設計指叉電極的脈衝函數理論、表面聲波元件散射參數的定義及液晶的光學理論。

第三章敘述實驗設計與量測架構，介紹表面聲波元件的製作過程，說明壓電基板的選擇條件與半導體製程的操作流程。並詳述液晶試片的製作過程、液晶聲光效應量測系統的架設方式及 CCD 影像擷取裝置。

第四章整理實驗量測結果，首先呈現單一型與啣啣型表面聲波元件的阻抗分析，討論於不同厚度的試片間，液晶聲光效應之變化，最後詳述洩漏表面聲波現象的觀察結果，以碘酒為染料，觀察表面聲波

洩漏進入液體時的聲流場分佈趨勢。

第五章為實驗的結論與展望，總結前述實驗結果，展望未來可深入研究的内容與方向。



## 第二章 理論說明

### 2.1 表面聲波元件簡介

壓電材料具有電場及位移場耦合的特性，適用於表面聲波的激發及感測。表面聲波元件的製作是以壓電材料為基底，於壓電材料或鍍層表面沉積金屬電極，最常見的結構為一組由兩個梳狀電極交疊而成的指叉電極，稱為指叉換能器(interdigital transducer)，如圖 2.1 所示。施以適當頻率的交流電壓訊號於交指叉電極，可激發表面聲波，朝正、負軸向波傳。表面聲波經過指叉電極，亦會產生電流，轉換成電壓訊號接收。

#### 2.1.1 鈮酸鋰壓電晶體之分析

當機械應力施加於壓電材料時，材料兩端會伴隨著產生一個與應力大小成比例的電荷(或電壓)。當應力施加的方向相反時，電荷的極性亦會隨之而逆反，稱為正壓電效應(direct piezoelectric effect)。反之，若施加一直流電於材料兩端時，材料變形會隨著電場的大小改變，稱為逆壓電效應(converse piezoelectric effect)，當電場的方向逆反時，材料變形方向也隨之改變。若施予一交流電場，材料的變形方向會隨著電場的改變，作收縮及膨脹的交互變化，如圖 2.2 所示。

當鈮酸鋰晶體的切面角度與晶格座標 $[0\ 1\ 0]$ 夾角約  $128^\circ$  時，沿 $[1\ 0\ 0]$ 方向波傳的表面聲波相速度最快，機電耦合係數在此方向附近也最大。以此切面角度作為基底材料，可在相同的指叉狀電極線寬下，提高其中心頻率。倘若在  $128^\circ$  Y-cut 鈮酸鋰的表面，沿 $[1\ 0\ 0]$ 方向製作兩組指差電極，電極之間的節距(pitch)為  $P$ ，產生的表面聲波波長為兩倍

節距，相速度  $v_R$  為 3,981 m/s[21]，則該表面聲波元件之中心頻率為  $f_0 = v_R/2P$ 。

### 2.1.2 脈衝函數模型

IDT 的脈衝函數模型由 Tancrell 與 Holland[22]於 1971 年所提出，可估算 IDT 的頻率響應，對於表面聲波元件之初步設計有相當大的幫助。此模型可以兩種方式視之，一是位於兩個電極上的電荷脈衝；另一是在電極之間的電場脈衝。本文以第二種方式進行說明，如圖 2.3 所示，假設電極之分佈為非週期性排列，也就是  $d$  不為定值，每一個脈衝皆可視為波源，第  $n$  個波源造成的振幅  $A_n$  正比於電極之間重疊的長度  $L$ ，其正負號由電場的方向所決定。若 IDT 具有  $N_s$  個波源，則整體的脈衝響應為

$$h(t) = \sum_{n=0}^{N_s} s_n A_n \delta(t - t_n) \quad (2-1)$$

其中， $s_n$  代表電場方向的正負號，等於  $(-1)^n$ ，時間  $t_n$  是脈衝生成的位置至觀測點的波程時間。經由傅立葉轉換，可得到其頻率響應為

$$H(\omega) = \sum_{n=0}^{N_s} s_n A_n e^{-i\omega t_n} \quad (2-2)$$

將已知的 IDT 幾何尺寸以及基材的材料性質(詳如表 1)代入公式(2-2)，即可利用此模型估算其頻率響應。

圖 2.3 為指叉換能器示意圖，僅考慮朝左方向傳遞的表面聲波，其中  $L$  代表電極寬度， $P$  代表電極間距。如圖 2.4 所示，設計不同  $L$  與  $P$  值，可在一定時間內，連續激發出不同的驅動頻率，此類型之指叉換能器稱為啁啾型(chirp type)。當電極寬度與電極間距為固定值時，可連續激發相同的驅動頻率，此類型之指叉換能器稱為單一型(single type)。

$$\omega_n = \omega_0 = \text{constant} \quad (2-3)$$

$$B_n = B_0 = \text{constant}$$

將鈮酸鋰 Y+128° 切面的表面聲波相速度及 IDT 幾何尺寸代入以下公式，可以估算指叉換能器的頻率響應，

$$s_n = (-1)^n, A_n = A_0 = \text{Const}$$

$$t_n = t_0 + \frac{1}{V_R} \left( \sum_{m=0}^{n-1} d_m \right) \quad (2-4)$$

$$H(\omega) = \sum_{n=0}^{N_s-1} s_n A_n e^{-i\omega t_n} \quad (2-5)$$

其中， $V_R$  為表面聲波波速， $d_m = 2w_n$ ，本文所設計之啣啣型指叉換能器的頻率分別為 5~10MHz、15~20MHz 與 10~20MHz，以 15~20MHz 為例，驅動後，彈性波會由低頻到高频依序朝左傳遞，激發的頻率  $f$  與相鄰之電極中心距離  $P_m$  有關，

$$\begin{aligned} f &= \frac{V_R}{\lambda} \\ \lambda &= 2 \cdot P_m \\ P_m &= \frac{d_m + d_{m-1}}{2} \end{aligned} \quad (2-7)$$

$d_0$  到  $d_m$  以等差級數遞減，其關係如下：

$$d_m = d_0 + \varepsilon d_0 \quad (2-8)$$

其中  $\varepsilon$  依頻率範圍與電極數目不等而不同。利用上述模型，可模擬出不同電極數目之 IDT 所激發的表面聲波頻率響應，啣啣型指叉換能器之頻率響應如圖 2.5 ~ 2.7 所示，頻率分別為 5~10MHz、15~20MHz 與 10~20MHz。單一型交指叉換能器之頻率響應如圖 2.8、2.9 所示，頻率分別為 16 與 20MHz。無論是啣啣型或單一型之指叉換能器，當施加之交流電壓的驅動頻率與 IDT 本身的中心頻率相同時，可得到最大的頻率響應。

本文比較 25.5 與 50.5 對電極之 IDT 的頻率響應圖，中心頻率的振幅大小與電極數目呈比例關係，且側瓣(side lobes)的振幅大小亦隨之等比例增加。啁啾型之中心頻率範圍較單一型分散，因此在相同的電極數目下，啁啾型驅動單一頻率所分配到的電極數目相對單一型少很多。整體而言，啁啾型的驅動振幅較單一型小。本研究將啁啾型之電極數目設計為 50.5 對，單一型之電極數目設計為 25.5 對，以達到較相近的驅動振幅。為了更有效的利用四吋光罩的空間，將啁啾型 5~10MHz 頻率範圍的 IDT 設計為 25.5 對，以挪出空間設計更多表面聲波元件。

## 2.2 表面聲波元件之檢測

本研究在表面聲波元件的性能量測上，採用 HP 8751A 網路分析儀量測其散射參數，此檢測是在以雷射切割鈮酸鋰晶圓之前進行。

散射參數(scattering parameter)主要是採用入射波(incident)、穿透波(transmission)、和反射波(reflection)的觀念來表示，利用入射波打到待測物(device under test, DUT)所產生的穿透波和反射波的振幅和相位，描述該待測物的電流特性。散射參數的標記為  $S_{out\ in}$ ，第一個標記表示訊號輸出端的埠號，第二個標記代表訊號入射端的埠號，如圖 2.10 所示，其中  $a_1$  與  $a_2$  分別代表埠一與埠二的入射訊號， $b_1$  與  $b_2$  則分別代表埠一與埠二的反射訊號。

在選擇了適當的測量方式，並完成校正程序之後，即可將待測元件連接至散射參數量測系統(S-parameter test set)的 50Ω 雙埠之間。量測 S 參數時，訊號由 DUT 的埠一進入埠二，此時所量到的反射及傳輸功率比分別為  $S_{11}$  和  $S_{21}$ ，如圖 2.11 所示。切換散射參數測試組，使訊號由 DUT 的埠二進入埠一，重複之前量測動作，此時得到的反射及傳輸功率比即為  $S_{22}$  和  $S_{12}$ ，各散射參數之間的關係可以矩陣式表示

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

$S_{11}$ 、 $S_{21}$ 、 $S_{22}$ 及 $S_{12}$ 四個散射參數的特性列於表2中。

## 2.3 液晶簡介

物質以固、液、氣三種狀態存在自然界。一般固態晶體有晶格的形成，其中的原子或分子緊密規則的排列著，表現出異向性(anisotropic)。隨著溫度的上升，晶體中的組成份子具有較高的能量，進而導致晶格的排列逐漸開始改變，物質開始具有流動性，呈現液體狀態。此時物質不再具有異向性和規則排列的特性。在液體狀態時，組成的原子或是分子間的距離和晶體狀態時差不多，依然相當緊密，但不再具有固定外形與規則性的排列，可以自由流動了。當溫度繼續升高，超過其沸點後，組成之原子或分子間的距離變得很遠，束縛很小，物質即變為氣體狀態。

有些物質在加熱熔融後，其相變化並不直接由固體變為液體。這些物質雖然失去部分的固體性質，但排列仍然具有規則性，介於晶體和液體間之中間相(mesophase)，稱之為液晶。這種狀態的物質同時具有固體晶體之某種程度的規則性排列狀態以及某種程度的液體流動性。因為具有這種特殊的性質，液晶物質的應用非常重要而廣泛。

### 液晶的分類

1992年法國的G. Friedel依照分子的排列構造，將液晶分成向列型(nematic)、層列型(smectic)、膽固醇型(cholesteric)三類，如圖 2.12 所示。向列型液晶為平行排列的棒狀分子，分子軸方向保持相互平行，但不具有層列型液晶般的層狀構造，只有一維的規則度。它具有光學上的



正折射性。與層列型液晶比較，該液晶分子易於長軸方向自由運動，分子間的作用力與黏度較小，流動性佳，廣泛用於顯示器方面。

層列型液晶為棒狀分子以層狀構造排列，各分子與層面垂直或具有一傾斜角度，有序性較向列型高，但存在的溫度範圍較向列型低。由於分子層間分子的互相結合力較弱，易於滑動，故層列型液晶具有二維的流體性質與二維的規則性，這類液晶的黏度比一般液體顯著。層列型液晶保持類似晶格的結構，是最接近固態的類型，可產生一暫態偶極而形成鐵電性。

膽固醇型是將向列型液晶參雜一化學元素，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間有微小的偏向，整體形成螺旋構造，特色是具有旋光性、可進行選擇性光散射、圓偏光二色性等性質。

## 2.4 連續彈性體形變理論

液晶分子的軸向變化非常微弱，具彈性體的性質，易受電場、磁場、應力場等影響而改變排列方向。巨觀而言，形變的空間伸展遠超過分子的空間尺度，大部分研究學者將液晶視為彈性連續體。在不同外場作用下，可改變液晶分子的排列方向，外場移除後，分子間的相互作用會使液晶分子逐漸恢復到原本的排列方向。彈性體遭受外力時，其內部會產生反抗形變的恢復力，液晶同樣可以類比此物理現象。如圖 2.13 所示，液晶的體積形變可分為三種：展曲(splay)、扭曲(twist)及彎曲(bend)，這三種狀態的彈性常數分別設為  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 。在外作用力下，液晶可同時具有三種形變，單位體積內的彈性自由能可以下列方程式表示：

$$F_d = \frac{1}{2} K_1 (\nabla \cdot n)^2 + \frac{1}{2} K_2 (n \cdot \nabla \times n)^2 + \frac{1}{2} K_3 (n \times \nabla \times n)^2 \quad (2-10)$$

## 2.5 液晶的光學理論

向列型液晶為單光軸光學材料，光軸與分子長軸重合，與光軸垂直的平面上之物理特性為等向性。液晶的異向性物理量具有兩個獨立分量，以折射率而言，沿光軸入射且偏振方向垂直於光軸所觀察到的折射率為 $n_o$ ，如圖 2.14 所示，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射率為 $n_e$ ，如圖 2.15 所示。

若光以任意角度入射到液晶，入射光的兩個相互正交的光場分量具有各別的相速度與折射率，此現象稱為雙折射(birefringence)。光場的偏振方向垂直於光軸稱為尋常光(ordinary ray)，折射率 $n_o = n_{\perp}$ ；光場的偏振方向平行於光軸稱為非尋常光(extraordinary ray)，折射率 $n_e = n_{\parallel}$ 。如圖 2.16 所示，光場的偏振方向與液晶分子之光軸夾任意 $\theta$ 角的有效折射率為

$$n_{eff} = \left( \frac{\sin^2\theta}{n_{\parallel}^2} + \frac{\cos^2\theta}{n_{\perp}^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

兩互相垂直的偏振光波速不同，導致相位延遲(phase retardation)

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi \cdot \Delta n \cdot d}{\lambda}$$

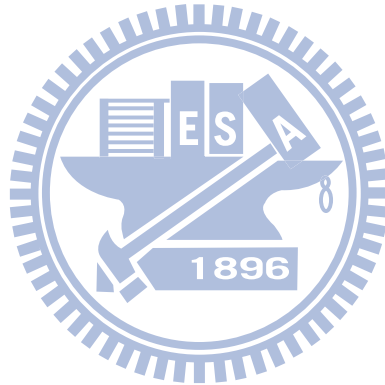
其中 $\Delta n = n_{eff} - n_o$ 將影響穿透光強的變化

$$I = I_0 \sin^2(2\phi) \sin^2 \frac{\Delta\Phi}{2}$$

其中 $\phi$ 為液晶分子光軸與偏振軸的夾角。

## 2.6 液晶試片聲導波波傳理論

液晶試片在不同導波模態作用下，液晶層內產生不同的壓力梯度，引用施文斌學長[23]的研究，將液晶試片模擬為玻璃-液晶-玻璃三明治結構，其中兩側的玻璃為等向性固體，中間的液晶層簡化為具等向黏滯係數之牛頓流體，結構示意圖如圖 2.17 所示， $x_3$  方向視為無限延伸。以一純勢能函數與一向量勢能函數，推導三明治結構之頻散方程式。試片的液晶層簡化為水，界面連續條件考慮流體層與玻璃界面的曳力及厚度方向的位移連續。液晶盒三明治結構具有對稱性，聲導波可分成對稱模態 (symmetric mode) 與反對稱模態 (anti-symmetric mode)，應用對稱性，三明治結構可簡化為上層固體層與一半厚度之液體層。



## 第三章 實驗設計與架構

### 3.1 表面聲波元件製程

本節將詳述實際製作表面聲波元件的過程與量測架構。適當切角的單晶體壓電材料有較高的機電耦合係數，代表電能轉換成機械能的效率較高。本研究選用  $128^\circ$  Y-cut 鈮酸鋰為表面聲波元件之壓電基材，所設計的表面聲波元件以 X 軸的正向為波傳方向，鈮酸鋰的材料性質詳列於表 1，圖 3.1 所示為其幾何示意圖。根據不同的響應需求設計指叉狀電極，本研究借用交通大學貴重儀器中心的微機電製程設備，製作單一與啣啣型兩種表面聲波換能器，並以網路分析儀進行元件反射與傳輸特性的定性量測，評估元件設計效能的優劣。

#### 3.1.1 壓電基板的選擇條件

##### 1. 表面聲波相速度

表面聲波元件的中心頻率由基材的表面聲波相速度與指叉狀電極的週期數目所決定，採用相同的基材，高頻的表面聲波元件需要較嚴格的製程技術。若在相同的曝光顯影條件下，選擇高剛性的基材可延伸應用頻率之上限。另外，在低頻之應用上，為了減小元件的尺寸，則須選擇低速的基材，延伸應用頻率的下限。

##### 2. 機電耦合係數

機電耦合係數為材料電性能量與力學能量之間的轉換比例，以高機電耦合係數之基材製作表面聲波元件，較具有操控液晶分子排列的潛力，是選擇基材的考量因素之一。

### 3.波束轉向效應

在非等向性材料中，聲波之能量速度方向不一定會與波前垂直，此即所謂波束轉向效應(beam steering)。當波前與波傳能量方向不垂直時，指叉狀換能器之配置就必須作調整。這個現象並不會直接影響元件的表現，但是當波傳能量角度(power flow angle, PFA)增大時，些微的波傳角度改變就會使波傳能量角度變化很大，因此基板材料方向與指叉換能器的配置就必須精確地考慮。然而，表面聲波元件之基材大多為非等向性壓電介質，故選擇適當之波傳角度，使表面波的能量速度能與波前垂直，避免波束轉向效應發生，亦為設計表面聲波元件之重要因素。

#### 3.1.2 指叉狀電極的設計

表面聲波元件所選用的壓電基底材料為四吋  $128^\circ$  Y-cut 鈮酸鋰晶片，厚度 0.5mm，設計之波傳方向與晶格座標 X 軸平行。繼而在鈮酸鋰晶片之拋光面鍍上鋁箔，作為指叉換能器的金屬材料。設計兩種形式的表面聲波元件，分別為單一型式及啣啣型指叉狀電極，其幾何參數詳列於表 2、表 3 中。當表面聲波之波長約為基材厚度的五分之一時，可激發雷利波，聲波能量集中於基材表面，具有操控分子排列的潛力。本研究所使用的玻璃厚度為  $1,100\mu\text{m}$ ，表面聲波設計波長最大值設為約  $220\mu\text{m}$ ，行進於玻璃的雷利波波速約為  $3,133\text{m/s}$ 。當指叉換能器的中心頻率大於  $14.2\text{MHz}$ ，可於玻璃基材上產生表面聲波，操作頻率的範圍選擇在  $15\sim 20\text{MHz}$  間。

### 3.2 微機電製程

本研究中的製程均為微面加工技術(surface micromachining)，因

元件之線寬在微米的範圍，故採用微機電系統(microelectromechanical system, MEMS)技術製作表面聲波元件，如圖 3.2 所示。以下略述表面聲波元件的製程步驟與參數。

### 1.光罩設計

將表 2、表 3 所列設計之表面聲波元件指叉狀電極的幾何參數，以 AutoCAD 繪製光罩設計圖，如圖 3.3 所示，委託交通大學貴重儀器中心以雷射圖形產生系統(DWL-200)製作光罩。

### 2.晶圓清洗

將鈦酸鋰晶圓置入裝有丙酮溶劑的玻璃皿中，再將此玻璃皿放入超音波振洗機內清潔五分鐘。接著以去離子水(DI water)沖洗五分鐘，放入盛有 IPA 溶劑的玻璃皿內五分鐘後，再以去離子水沖洗五分鐘。最後使用氮氣槍吹去附著於表面的水分，放置於加熱盤上，設定溫度為攝氏 120 度，做去水烘烤，五分鐘即可。

### 3.金屬薄膜蒸鍍

利用國家奈米元件實驗室的 E-gun 電子槍金屬蒸鍍系統(AST PEVA 600I)，進行晶屬薄膜蒸鍍(metallization)。由於此種機型只能接受六吋的晶圓，因此將清洗後之鈦酸鋰晶片以耐熱膠帶黏貼於六吋矽晶圓上，以電子束蒸鍍法(EBE)進行金屬薄膜的沈積。本實驗中，基礎真空度(base pressure)約為 $3.7 \times 10^{-6}$  torr，以蒸鍍速率 1nm/sec 在鈦酸鋰壓電基板上沈積厚度約 1500Å 的鋁。

### 4.微影製程

微影製程(lithography)的目的是將光罩上設計的元件圖案轉移至

塗佈適當光阻的晶圓上。光阻材料曝光後會改變鍵結的機制，經由顯影的步驟去除多餘的光阻，即可在晶圓上呈現所設計的圖案。

欲在已蒸鍍完成的材料上製作表面聲波換能器，需先在蒸鍍材料上製作蝕刻擋罩，以避免所要保留的區域被蝕刻。本研究使用位於本校貴重儀器中心的光阻旋轉塗佈機(photo resist spinner)，塗佈機的轉速為慢轉每秒 1000 轉 10 秒，快轉每秒 5000 轉 30 秒，將光阻旋塗於鍍有鋁之鈦酸鋰晶片上，塗佈厚度為  $1\mu\text{m}$ 。

曝光(exposure)的製程使光阻受紫外光照射，吸收足夠能量的紫外光可以打斷光阻材料內部鍵結。再經由紅外線光罩對準曝光機(mask exposure IR aligner)進行曝光 9 秒鐘，使晶片表面所覆蓋的光阻層，吸收適當的能量以便進行光化轉換，才能成功且正確的將光罩上的圖形，轉移到塗有光阻(AZ4620)之晶片上。接著將晶片泡入顯影液(FHD-5)中約 60 秒，以便將光阻層所轉移的潛在圖案顯現出來。最後放入烤箱內，進一步將光阻內所殘留的溶劑含量，經由蒸發降到最低，即可完成蝕刻擋罩之製作。

## 5. 乾式蝕刻

經過微影製程後，利用蝕刻製程(etching)，將不需要之金屬薄膜區域去除。本研究使用交通大學貴重儀器中心的高密度活性離子蝕刻系統(HDP-RIE)，反應性離子蝕刻(reactive ion etching, RIE)，結合物理性的離子轟擊與化學反應的蝕刻。此種方式兼具非等向性與高蝕刻選擇比等雙重優點，蝕刻的進行主要靠化學反應達成，可獲得較高之選擇比。加入離子轟擊有兩項作用，一是將被蝕刻材質表面的原子鍵結破壞，以加速反應速率；二是將再沈積於被蝕刻表面的產物或聚合物(polymer)打掉，使被蝕刻的表面能再與蝕刻氣體接觸。非等向性蝕刻的達成是靠再沈積的產物或聚合物，沈積在蝕刻圖形上。表面的沈

積物被離子打掉，故蝕刻可繼續進行。在側壁上的沈積物，因未受離子轟擊而保留下來，阻隔了蝕刻表面與反應氣體的接觸，使得側壁不受蝕刻，達成非等向性蝕刻。將已經完成蝕刻擋罩製作之晶片放入高密度活性離子蝕刻系統中，製程時間設定為 18 秒，製程中易有破片的情況產生，需注意晶圓擺放的位置是否於儀器中央，同時使用散熱效果較好的底座，否則經電漿蝕刻後，邊緣的電極會產生焦黑的狀況。

## 6. 光阻移除

將製作完成之鈮酸鋰晶圓放入裝有丙酮溶劑的玻璃皿中，再將此玻璃皿放入超音波振洗機內，5 分鐘後立即將鈮酸鋰晶片放入裝有甲醇溶劑的玻璃皿內，5 分鐘後再以去離子水洗淨，並以氮氣槍將表面的水分吹去，如此即完成表面聲波換能器之製作。

## 7. 雷射切割

鈮酸鋰晶圓之材料較脆，容易因外力作用而碎裂，本研究委外加工的切割方式有別於玻璃之接觸式切割，改以非接觸式雷射對位切割系統將晶圓上數個表面聲波元件分離，完成最後的步驟。雷射對位切割系統使用之雷射能量較強，切割後的表面聲波元件邊緣會有稍微的焦黃色出現，因此設計電極與切割線間距為 1mm，避免雷射能量影響表面聲波元件之性能。

## 3.3 液晶試片的準備

### 3.3.1 液晶試片的製作流程

本研究的液晶試片選用垂直配向(vertical alignment)，向列型液晶 5CB 的材料參數列於表 4，借用位於交通大學貴重儀器中心三樓的顯示科技研究的設備。試片製作流程詳述下：



- (1) 使用鑽石刀切割機將 1.1mm 之玻璃切割為 30mm×40mm 及 30mm×18mm 的大小。
- (2) 將切取後的玻璃以清潔劑及純淨水，去除表面之灰塵及油污，清洗至表面可形成不易破裂的水膜，並可看到均勻干涉條紋即可。
- (3) 將玻璃置於試片托架上，放入盛有純淨水之燒杯中，以超音波震盪機清洗玻璃 30 分鐘。
- (4) 以氮氣槍將清洗完之玻璃表面水珠吹除，置於玻璃皿中，使用加熱板將玻璃加熱烤乾、去除水氣，設定溫度為 100°C，歷時 30 分鐘。
- (5) 將玻璃置於玻璃皿中，用 UV-臭氧燈進行照射 20 分鐘以去除表面的有機物質。
- (6) 使用旋轉塗佈機將垂直配向層塗佈於玻璃上，調配垂直配向層溶劑比例如下：  
A：Solvent (NBG-776)  
B：Solvent (NBG-776) 與 VA (PIA-X660-01X) 以 1：1 比例混合，溶液成份配置如表 5 所列。
- (7) 將玻璃置於旋轉塗佈機上，依序旋鍍 A 溶劑與 B 溶液，在此參數下旋鍍之配層厚度為 350Å。
- (8) 將旋鍍完之玻璃置於培養皿中，以加熱板加熱 1 小時，設定溫度為 200°C。
- (9) 在鍍好配向層之玻璃基板面上放置墊片(spacer)與少許 UV 膠 (NOA-65)於玻璃兩側，並取另一面玻璃置於上方，兩玻璃鍍有配向層之面對。
- (10) 將液晶試片置於 UV 燈下照射約 15 分鐘左右，使內部 UV 膠固化，固定兩玻璃基板的間距。

(11)將液晶試片置於加熱板上，加熱至  $40^{\circ}\text{C}$  (高於 5CB 液晶清亮點  $36^{\circ}\text{C}$  即可)，再以毛細管閉口端沾取少量液晶材料，滴於兩玻璃未封口處。液晶溫度高於清亮點後，會呈現等向性液體狀態，其黏度較低且流動性較強，待液晶材料完全充滿液晶盒後，再緩慢降至室溫。在此過程中，液晶分子受配向層分子的錨錠(anchoring)作用而排列。本實驗使用垂直配向，液晶層分子長軸會與玻璃基板垂直，其餘分子則靠分子間之作用力而互相平行。

### 3.3.2 液晶試片的檢測

向列型液晶為單光軸晶體，具雙折折性質，不同的排列會產生不同的有效折折率。垂直配向的液晶分子與玻璃表面相互垂直，將分子的長軸視為光軸方向。偏光板分成靠近光源的起偏板與遠離光源的檢偏板，以起偏板將偏振方向平行於玻璃表面的線偏光正向入射試片，線偏光會沿著光軸在液晶層中前進，不會發生雙折折現象，接著通過與起偏板偏振方向垂直的檢偏板後，光將不會穿透檢偏板。反之，若入射之線偏光的偏極方向未平行或垂直於液晶分子的排列方向，則會發生雙折折效應，使穿透檢偏板的光強度產生變化。

液晶層的垂直配向排列整齊與否可由偏光顯微鏡檢驗，當液晶試片未受到外界擾動的時候，若觀察到均勻暗態分佈，可確認液晶分子的排列呈均勻垂直配向的狀態。

## 3.4 量測系統架構

### 3.4.1 散射參數的量測系統

利用網路分析儀(network analyzer)量測待測元件入射、反射、穿透能量的振幅與相位差關係，可瞭解待測元件之反射與傳輸的頻譜特性，散射參數(scattering parameters)量測可以定量分析射頻元件雙埠

之間的特性。以探針接觸表面聲波元件，並於元件的輸入及輸出端各並聯一  $50\Omega$  之高功率電阻，與網路分析儀的阻抗匹配，量測系統安裝的方式如圖 3.4 所示。本研究使用 HP8751A 網路分析儀，工作頻率範圍為  $5\text{Hz}\sim 500\text{MHz}$ ，搭配使用的 HP87511A 散射參數測試組 (S-parameter test set) 的工作頻率範圍為  $100\text{kHz}\sim 500\text{MHz}$ 。

### 3.4.2 吸波塗劑效能量測系統

測試表面聲波元件訊號之系統如圖 3.5 所示，於指叉電極輸入及輸出端各並聯一  $50\Omega$  之高功率電阻，與示波器及函數產生器的輸出阻抗匹配。為避免指叉電極承受所有功率消耗，將函數產生器設定於叢發模式 (burst) 下操作，電壓振幅設為  $400\text{mV}$ ，產生 20 個叢發週期之  $16\text{MHz}$  弦波訊號。使用游標辨識 DUT 響應頻譜的顯著頻率。首先以 BNC 訊號線將函數產生器的同步輸出 (sync) 連接至示波器的一個頻道，設定此頻道為觸發 (trigger) 頻道，接著將 DUT 的輸出端連接到示波器的另一輸入頻道，以手動觸發的方式進行訊號量測。

### 3.4.3 聲光效應量測系統

本實驗以水做為能量耦合劑，如圖 3.6 所示，量測系統示意圖如圖 3.7 所示，將表面聲波元件及液晶盒試片設置於兩相互垂直的偏光板之間，於表面聲波元件之指叉電極輸入端並聯一  $50\Omega$  之高功率電阻。表面聲波元件平行於光學桌面，待測試片的上、下方安裝兩組為  $45^\circ$  的高能量雷射反射鏡，使波長為  $632\text{nm}$  氦氖雷射的光路通過此系統，最後以光接收器量測穿透液晶試片的光強度變化。

以 NI-DAQ 擷取卡 PXI-6251 讀取光接收器轉換的電壓訊號，建立自動化訊號擷取系統。首先於 LabVIEW 圖控程式介面設定實驗參數，如圖 3.8 所示，由個人電腦的 GPIB 介面卡下達指令至函數產生

器(Aglient 33250A)，產生電壓訊號，經功率放大器(ENI 325LA)增益後，激發指叉換能器產生表面聲波。折射進入液晶試片的聲導波會影響液晶分子排列，利用光接收器(New Focus photo-receiver 1801)觀察穿透的氦氖雷射光(He-Ne laser)強度變化。最後再以個人電腦的NI-DAQ 卡擷取光接收器之光強電壓訊號，實驗流程如圖 3.9 所示。

#### 3.4.4 反應時間量測系統

本實驗採用 AM 調變(amplitude modulation)叢發訊號驅動表面聲波元件，目的為量測液晶分子受到聲導波擾動的反應時間。函數產生器受到面板輸入設定的限制，無法在叢發模式中產生長時間的連續正弦波，故使用 LabVIEW 程式設計本實驗所需的波形。函數產生器輸出的波形是由載波(carrier wave)與調變波(modulated wave)所組成，利用調變波的週期長短，決定連續正弦波的作用時間。

本實驗先讓液晶層受到較長時間的超音波激振，當入射的超音波停止後，液晶分子需要較長的時間才能恢復至初始垂直排列於玻璃基板的狀態。基於前述情況的考量，在程式設計上將每次產生連續正弦波的間隔時間增加至 10 秒，使液晶分子有充足的時間回復到初始穩定狀態後，再由 LabVIEW 程式再次啟動函數產生器輸出設計的波形，確保每一筆擷取訊號的正確性。

#### 3.4.5 CCD 影像擷取系統

本研究另外於偏光顯微鏡上方架設一 CCD 相機(Watec, WAT-202D digital color camera)，即時擷取與記錄受聲場影響之液晶層透光強變化，可進一步瞭解液晶層內壓力分佈及分子排列趨勢，有利後續的定性分析。

## 第四章 實驗量測與結果分析

### 4.1 散射參數的量測

表面聲波元件之輸入與輸出端訊號振幅的比值稱為散射參數  $S_{21}$ ，通常視為元件之頻率響應。於待測表面聲波元件的輸入及輸出端各並聯一  $50\Omega$  之高功率電阻，與網路分析儀內部的阻抗匹配，圖 4.1、圖 4.2 所示為本研究設計委製的表面聲波元件的散射參數  $S_{21}$  之頻率響應。

根據上述的訊號量測結果顯示，單一型指叉狀電極的輸出端在 15.7 MHz 有最大值，量測頻率低於脈衝理論模型估算之中心頻率 1.875%；啞啾型散射參數的最大值在 18.8 MHz，其頻率響應圖與模擬計算之結果有較大的差異。分析可能的原因是數值模擬將表面聲波波速設為定值，然而本研究所採用的表面聲波元件厚度僅有  $500\mu\text{m}$ ，實際在待測元件上的波傳可能是板波，相速度會隨著頻率而改變。本實驗使用之表面聲波元件所激發的頻率較高，易有較多高階模態產生，但無法由本實驗架構得知各模態所佔的權重比例，行進波相速度的估計較不精確，估計是造成中心頻率偏移的主要原因之一。

### 4.2 吸波塗劑之效能評估

在指叉換能器的實際應用上，大多要求激發沿著單一方向傳遞之表面聲波，但是單相指叉電極在操作時，會同時激發出沿著正、逆兩方向傳遞的表面聲波，其中一方向的訊號非但不需要，同時於基板邊緣之反射波還會干擾直接波傳的表面聲波訊號。本研究嘗試在鈦酸鋰邊緣塗佈吸波塗劑作為聲波的吸能器(absorber)，成份為環氧樹脂與鎢粉混合物，量測結果如圖 4.3、4.4 所示，吸能劑於未固化時的吸波效

果相當顯著。

吸波塗劑經過 2~3 小時，待環氧樹脂固化之後，吸收反射波的效果則會大打折扣。由於環氧樹脂固化後不易從鈮酸鋰表面去除，所以後續實驗皆嘗試以牙膏取代，並於驅動之前塗佈在元件的邊緣區域，以確保吸波劑能達到最佳的效果。

### 4.3 聲光效應實驗分析

本實驗為液晶聲光效應的定量量測，將指叉電極製作於具壓電性質的鈮酸鋰基材，施加一交流電壓激發表面聲波。以水作為耦合劑，將表面聲波的能量傳遞至液晶試片中。經由波式轉換，於液晶與玻璃交接面上產生聲導波，改變液晶層之壓力梯度。再以光接收器觀察穿透的雷射光強變化，紀錄液晶之聲光效應。

#### 4.3.1 短時間穿透光強的動態訊號

藉由 LabVIEW 程式送指令至函數產生器，初始設計指叉電極的中心頻率為 19.905 MHz，由於電極厚度的影響，會使指叉電極的中心頻率產生偏移，修正之後以 19.775 MHz 的正弦波為中心頻率，訊號振幅的峰至峰值為 90 mV，透過功率放大器使訊號增益 50dB，激發指叉電極產生表面聲波。

本實驗採用叢發模式(burst mode)激發表面聲波，受到函數產生器的功能限制，每次叢發週期數目的極限為一百萬個。將函數產生器的叢發週期(burst period)設定為 1,000 ms，也就是每隔 1,000 ms 給予一 50 ms 的連續正弦波於表面聲波元件，觀察液晶層厚度為 70 $\mu$ m 與 25 $\mu$ m 的液晶盒試片之穿透光強變化。

本實驗使用表面聲波元件產生一頻率為 19.775 MHz、作用時間 50 ms 之連續正弦波，折射進入液晶層中。在 25  $\mu$ m 與 70  $\mu$ m 間距的

試片中，皆可觀察到一亮一暗的週期性條紋，顯示指差電極所產生之表面聲波改變了液晶分子的排列狀態，使大部份的分子平行排列於玻璃基板，穿透光強度改變。彈性波之傳遞速度快，在單一的驅動頻率下，行進波於液晶層中來回反射後消長成駐波(standing wave)的形態，因此，由 CCD 擷取之照片中可明顯地觀察到週期性亮暗條紋。

實驗中觀察到在間距  $25\mu\text{m}$  的試片中產生之週期性亮暗條紋較  $70\mu\text{m}$  的試片清晰，如圖 4.5、4.6 所示。由此推測於越薄的液晶層中，聲導波操控液晶分子排列的效果越佳。然而，當液晶試片間距縮短為  $8\mu\text{m}$  時，卻無法在相同的操作條件下，在試片中觀察到明顯的週期性亮暗條紋。推測液晶層存有一利於聲導波操控液晶分子的最佳厚度。圖 4.7 顯示在不同的驅動電壓條件下，不同厚度液晶層的光通量比較圖，圖中可明顯地觀察出當液晶層厚度小於  $20\mu\text{m}$  時，通過液晶試片之光強度有大幅下降的趨勢。推測關鍵因素為介於上下玻璃基板配向層錨定力過強，以致液晶分子間不易受到聲場擾動而改變排列方式。由圖 4.8 的光強變化擬合曲線可推測，利於聲導波操控 5CB 液晶流體的理想厚度應介於  $20\sim 30\mu\text{m}$  左右。

### 4.3.2 反應時間量測系統

#### 1. 單一型表面聲波元件

本實驗採用 AM 調變波量測液晶受超音波作用之反應時間，輸出波形是由  $19.775\text{ MHz}$  正弦波的載波波形及振幅調變波所組成，也就是利用調變波的週期長短，決定連續波的作用時間。本實驗以  $0.1\text{ Hz}$  的 AM 調變產生持續 5 秒的正弦波，函數產生器所設定的驅動電壓為  $95$ 、 $100$ 、 $105$ 、 $110\text{ mV}$ ，觀察在不同驅動電壓下，液晶反應時間的變化。定義上升時間(rise time)，為穿透液晶層之光強度從  $10\%$  變化到  $90\%$  時液晶分子所需的扭轉時間。

在液晶層為 25 $\mu\text{m}$  厚的試片中，無論是激發單一型或啁啾型的表面聲波元件，皆可觀察到穿透光強度隨驅動電壓的增加而升高，如圖 4.9、圖 4.10 所示。但是上升時間卻並非如此，施加電壓為 28V 時，聲導波可在約 200 ms 的時間裡讓內部液晶分子排列趨於穩定。當電壓增加至 32V 時，整體光強度變化需要約 800 ms 才能達到穩定狀態，如圖 4.11 所示。當電壓大於 30V 時，聲導波能量持續增加，破壞了原有的平衡狀態，觀察到穿透光強產生一明顯的峰值，造成液晶分子的排列狀態不均勻，繼而下降至穩定的趨勢，液晶分子尋找穩態排列的時間亦隨之增長。

圖 4.12 所示為在 70 $\mu\text{m}$  的試片中，需要更大的驅動電壓才可以達到與 25 $\mu\text{m}$  試片相似的光強度。當電壓大於 38V 時，穿透光強度才出現穩定變化的趨勢。依據此實驗結果分析，當液晶層越厚，需要較大的驅動電壓及較長的作用時間，才能讓液晶分子的排列趨於穩定。

穿透光強的下降時間(fall time)定義為光強度從 90%變化到 10%時所需要的反應時間，如圖 4.13 所示，相同厚度的液晶試片量測到的下降時間，並沒有因驅動電壓的改變產生顯著地變化，意味液晶層受到聲場擾動後，分子恢復原始排列狀態所需的時間隨著液晶層的厚度而增加。

## 2. 啁啾型表面聲元件

啁啾型指又換能器可依操作需求激發不同頻率之表面聲波，配合函數產生器之設定產生連續掃頻的弦波。由上述所量測的散設參數，可知啁啾型表面聲波元件並非在設計頻率內皆能達到相同振幅，為了瞭解表面聲波元件的聲場強度分佈，架設兩埠啁啾型表面聲波元件，量測系統架設方式與圖 3.5 相同，於相同驅動電壓下，頻率掃描範圍為 15 至 20 MHz，掃描間距為 0.1 MHz，擷取接收端於各頻率下之最



大振幅，如圖 4.14 所示。由圖中可分辨出在 15~18MHz 範圍內，表面聲波元件所產生的聲場強度較大，故選擇其為掃頻範圍。

在相同厚度的液晶盒試片及驅動電壓下，調整掃頻時間(sweep time)為 30、40、50、60、70、80ms，隨著掃頻的時間增加，光強度變化曲線的擾動(fluctuation)現象越來越顯著，如圖 4.15、4.16 所示。液晶是一雙折射晶體，可藉由光強度的變化呈現內部分子排列的趨勢，光強曲線產生的擾動現象越顯著，表示內部液晶分子的排列越不穩定。

### 4.3.3 CCD 影像之分析

本研究的目的是在於有效的影響棒狀高分子材料的排列，希望能藉不同形式的指叉電極，產生不同的聲場操控液晶分子，以偏光顯微鏡之 CCD 影像評估排列的效果。

在液晶層大於 25 $\mu\text{m}$  的試片中，皆可明顯地觀察到週期性亮暗條紋，意即指叉電極所產生之行進波改變了液晶分子的排列狀態，亮紋區域代表液晶分子有平行排列於玻璃基板的趨勢。彈性波的傳遞速度快，在單一的驅動頻率下，行進波於液晶層中來回反射，消長成駐波的形態，針對玻璃厚度 1,100 $\mu\text{m}$ ，液晶層厚度 25 $\mu\text{m}$  的液晶試片，以頻率各為 15、16、17、18MHz 的正弦波驅動表面聲波元件，實驗結果發現單一頻率可激發相同波長的週期性亮暗條紋，如圖 4.17 所示，週期隨著頻率的提高而縮短，將暗紋間距視為駐波節點，近似指叉電極所設計之波長的一半。在相同的實驗條件下，啟動啣啣型表面聲波元件的瞬間，亦可觀察到不同波長的亮暗條紋，如圖 4.18 所示，根據公式  $C = f \cdot \lambda$ ，估算聲導波於液晶試片中的相速度，與施文斌[23]模擬自由聲導波相速度頻散曲線有相同的趨勢。數值模擬將液晶層簡化為一等向性流體，所採用的材料常數列於表 6。圖 4.19(a)所示為液

晶層內部之界面聲波與聲導波的相速度頻散曲線。實驗結果顯示，液晶盒內的聲導波相速度會隨驅動頻率的提高遞減，界面聲波在高頻區域為非頻散，表示波速不會因頻率的調整而改變，推測液晶層內所產生之超音波為聲導波，如圖 4.19(b)所示。

#### 4.3.4 微流道之聲場流分析

表面聲波元件產生的聲波能量，經液體耦合層折射進入液晶層。當掃頻時間增加為 1 秒時，每一頻率作用的時間也增長，因此在 CCD 擷取影像中觀察到明顯的亮暗條紋，如圖 4.20 所示。啣啣型 IDT 可在設定時間內持續變換頻率，其主要目的是為了消除單一型所產生的駐波條紋。若縮短掃頻時間為 30ms 時，頻率變換的時間相對縮短，意味著每一頻率所作用的時間縮短，不易於液晶層內產生駐波，其消除與波前方向平行之駐波條紋的效果顯著，如圖 4.21 所示。

值得關注的是，在液晶層厚度大於 25 $\mu\text{m}$  的試片中，無論使用單一或啣啣型的表面聲波元件，皆能觀察到垂直於波前的區域性亮暗條紋，推測跟表面聲波能量洩漏至耦合液體的聲場所引發的流體運動有關，造成液晶層產生非線性的混合狀態，此流場稱為聲場流，條紋間距較平行於波前的駐波條紋寬且不均勻，如圖 4.22 所示。

2009 年 Hodgson *et al*[20]的研究指出，以 127.68° Y-cut 鈮酸鋰激發表面聲波，由聲場輻射將能量經液體耦合層傳至上方厚度為 150 $\mu\text{m}$  的玻璃基板，顯示設定驅動電壓大於 230mW 時，耦合液體可將足夠的能量傳遞至玻璃基板，推動位於玻璃基板上方的水珠，以 8mm/s 速度移動。以 20MHz 的正弦波驅動單一型指叉電極，同時使用雷射都普勒測振儀，量測玻璃基板上下表面的橫向位移場。量測結果顯示，沿著上下玻璃基板之位移振幅相近，皆以遠離振源中心的方向行進的，顯示有一板波於玻璃基板產生。數值模擬表面聲波從鈮酸鋰洩

漏至液體內部的流場分佈，顯示指叉電極激發之洩漏表面聲波(leaky SAW)輻射進入水中，形成沿玻璃基板傳遞的高階反對稱板波，如圖 4.23 所示。

本研究試以碘酒為染料，滴入液體耦合層，如圖 4.24 所示，觀察液體在耦合層內的流動狀態。以啣啣型指叉電極，驅動電壓設為 31.6V，發現液體耦合層中產生數條垂直於波前的節線，如圖 4.25 所示，由碘酒與水的混合情形，發現碘酒在流道左右兩側的混合相當劇烈，推測其壓力不均勻，流體擾動較大，位於中央的流體擾動較緩慢。洩漏表面聲波造成的聲場流，與 Hodgson *et al*[20]的數值模擬結果相似度很高。

進一步分析 CCD 相機所擷取的掃頻影像，發現聲場流發生的時間會因驅動頻率的調整而改變，代表聲場流會在某些特定頻率時被激發。本研究使用偏光顯微鏡觀察聲場流產生的位置，以麥克筆於玻璃試片上作記號，將表面聲波元件移至光強量測系統，確認雷射光通過記號位置，再用酒精將記號擦拭去除，量測液晶試片於不同頻率下之光通量變化，利用穿透光強的高低判斷內部聲場流產生的顯著與否。以 25、40、70 $\mu\text{m}$  厚的液晶層為實驗對象，液晶盒上下側的玻璃厚度仍為 1,100 $\mu\text{m}$ ，在相同的驅動頻率範圍內，實驗結果顯示液晶層厚度增加時，產生共振的模態也隨之增加，如圖 4.26 所示。

## 第五章 結論與未來展望

本研究採用製作在鈮酸鋰壓電材料上的指叉換能器，激發表面聲波進入液晶試片，改變液晶分子的排列趨勢。液晶分子微小，不具可視性，故以雷射光束的穿透率作為定量指標，並使用安裝於偏光顯微鏡上方的 CCD 相機擷取影像，定性且定量的分析液晶分子排列趨勢，評估聲導波影響棒狀高分子材料排列狀態的效能。

### 5.1 結論

#### 5.1.1 液晶聲光效應實驗結果分析

- (1)有利於界面聲波操控流體的液晶層厚度：當液晶層厚度小於  $10\mu\text{m}$ ，介於上下玻璃基版的錨定力很強，代表液晶分子間不易受到聲場擾動而改變排列方式，本實驗以穿透光強變化推測，利於界面聲波操控流體的液晶理想厚度應介於  $20\sim 30\mu\text{m}$  左右。
- (2)表面聲波的高頻衰減特性：隨著驅動元件頻率的增加，必須提高驅動電壓，得以在液晶試片中激振出影響液晶聲光效應的聲導波。
- (3)液晶於聲場作用下的反應時間：
  - a.上升時間：在液晶層厚度相同的試片，上升時間隨驅動電壓的增加而縮短，當液晶層厚度增加時，整體穿透光強達到穩定變化所需的時間較長，代表分子尋找穩態排列的時間亦隨之增長。
  - b.下降時間：液晶層受到聲場擾動後，分子恢復原始排列狀態所需的時間，主要是與液晶層的厚度關係成正比，在相同厚度的液晶試片中，下降時間並沒有因驅動電壓的增減而產生顯著地變化。

(4)單一型與啁啾型表面聲波元件的比較：啁啾型表面聲波元件可在設定時間內快速地變換頻率，縮短掃頻時間至 30ms 時，其消除單一型表面聲波元件所產生的駐波條紋之效果相當顯著。

(5)液晶層內的聲場型態：實驗結果顯示，液晶層內所產生週期性亮暗條紋的波長，會隨著頻率的提高而縮短，代表聲導波的波速會隨驅動頻率的提高而遞減，與數值模擬的趨勢吻合，皆在高頻區域有頻散現象，固推測於液晶層內所產生之波形為導波型態。

### 5.1.2 聲場流於微流道之實驗結果分析

(1)在厚度大於 25 $\mu\text{m}$  的液晶試片中，無論使用單一或啁啾型的表面聲波元件，皆能觀察到垂直於波前的聲場流，推測跟表面聲波能量洩漏至液體耦合劑的聲場形式有關。本研究以碘酒為染料滴入液體耦合層，發現流體產生數條垂直於波前的節線，流道左右兩側的聲場擾動較大，位於中央的液體聲場擾動緩慢，洩漏表面聲波造成的聲場流與 Hodgson *et al*[20]數值模擬的相似度很高。

(2)聲場流所出現的時間會因驅動頻率的調整而改變，代表聲場流可在某些特定頻率時被激發，由穿透液晶試片盒試片的光強高低來判斷內部聲場流的產生與否，以厚度為 25、40、70 $\mu\text{m}$  的液晶層為例，實驗結果顯示當液晶層厚度增加時，光強度的峰值會數目會隨之增加。

## 5.2 未來展望

實驗設計部分，可嘗試增加玻璃試片的厚度，在液晶層與玻璃之間產生高頻界面聲波，有效地改變液晶層的邊界條件與壓力梯度，使超音波能量集中於固體與液體層的界面附近，可能較本研究所激發的

聲導波更具操控液晶分子排列的潛力。

由本研究的觀察結果，發現液體耦合層厚度對液晶聲光效應的產生有很大的影響，未來可以設計能精確調整液體耦合層厚度的實驗架構，作為調制聲光效應的參數之一。在偏光顯微鏡的部份，可選擇放大倍率較小的光學管，方便觀察聲場影響液晶分子排列的全貌。

研究結果顯示，雷利波洩漏至液體層產生聲場流的分布相當複雜，未來可以考慮結合多重物理場耦合的數值模擬軟體，探討微流道內部的液體流速分佈與不同形式指叉電極之間的關係，達到有效操控棒狀高分子材料排列的積極目的。



## 參考文獻

- [1] O. A. Kapustina and Y. G. Statnikov (1974), "Effect of ultrasonic surface waves on liquid crystals," *Soviet Physics - Journal of Experimental and Theoretical Physics*, Volume 37, p. 117.
- [2] H. Lamb (1916), "On waves in an elastic plate," *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Volume 93, Issue 648, pp. 114-128.
- [3] J. G. Scholte (1948), *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, Volume 51, p. 533.
- [4] J. Wu and Z. Zhu (1992), "The propagation of Lamb waves in a plate bordered with layers of a liquid," *Journal of the Acoustic Society of America*, Volume 91, Issue 2, pp. 861-867.
- [5] J. Laperre and W. Thys (1994), "Mode coupling in solid/liquid/solid trilayers," *Journal of the Acoustic Society of America*, Volume 96, Issue 3, pp. 1643-1650.
- [6] A. H. Nayfeh and P. B. Nagy (1997), "Excess attenuation of leaky Lamb waves due to viscous fluid loading," *Journal of the Acoustic Society of America*, Volume 101, Issue 5, pp. 2649-2658.
- [7] W. Hassan and P. B. Nagy (1997), "On the low-frequency oscillation of a fluid layer between two elastic plates," *Journal of the Acoustic Society of America*, Volume 102, Issue 6, pp. 3343-3348.
- [8] B. Hosten and M. Castaings (2003), "Surface impedance matrices to model the propagation in multilayered media," *Ultrasonics*, Volume 41, Issue 7, pp. 501-507.
- [9] C. W. Oseen (1933), "The theory of liquid crystal," *Transactions of*

*the Faraday Society*, Volume 29, pp. 883-889.

- [10] M. Bertolotti, S. Matellucci, F. Scudieri, and D. Sette (1972), “Acoustic modulation of light by nematic liquid crystal,” *Applied Physics Letters*, Volume 21, Issue 2, pp. 74-75.
- [11] K. Miyano and Y. R. Shen (1977), “Excitation of strip domain patterns by propagating acoustic waves in an oriented nematic film,” *Physical Review A*, Volume 15, pp. 2471-2485.
- [12] S. Sato and H. Ueda (1981), “Effects of surface acoustic waves on molecular orientation in nematic liquid crystals,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Volume 20, Issue 17, pp. L511-L514.
- [13] H. Moritake, T. Seike, and K. Toda (1999), “Acousto-optic effects of nematic liquid crystals induced by elastic wave propagating in glass substrate,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Volume 38, pp. 3076-3079.
- [14] M. Inoue, H. Moritake, and K. Toda (2000), “Periodic property of domain in nematic liquid crystal induced by elastic wave,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Volume 39, pp. 3125-3129.
- [15] V. A. Greanya, M. S. Spector, J. V. Selinger, B.T. Weslowski, and R. Shashidhar (2003), “Acousto-optic response of nematic liquid crystals,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Volume 94, Issue 12, pp. 7571-7575.
- [16] E. Kozhevnikov (2005), “Deformation of a homeotropic nematic liquid crystal layer at oblique incidence of an ultrasonic wave,” *Acoustical Physics*, Volume 51, Issue 6, pp. 686-697.
- [17] T. Uchida, T. Suzuki, and S. Shiokawa (1995), “Investigation of acoustic streaming excited by surface acoustic waves,” *Proceedings*



of 1995 IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 1081-1083.

- [18] M. K. Tan, J. R. Friend and L. Y. Yeo (2007), “Surface acoustic wave driven microchannel flow,” *Proceedings of 16th Australasian Fluid Mechanics Conference*, pp. 790-793.
- [19] M. K. Tan, J. R. Friend, and L. Y. Yeo (2007), “Direct visualization of surface acoustic waves along substrates using smoke particles,” *Applied Physics Letters*, Volume 91, Issue 22, 224101.
- [20] R. P. Hodgson, M. Tan, L. Yeo, and J. Friend (2009), “Transmitting high power rf acoustic radiation via fluid couplants into superstrates for microfluidics,” *Applied Physics Letters*, Volume 94, Issue 2, 024102.
- [21] D. Royer and E. Dieulesaint (2000), *Elastic Waves in Solids I: Free and Guided Propagation*, p. 300, Springer-Verlag, Berlin.
- [22] R. H. Tancrill and M. G. Holland (1971), “Acoustic surface wave filters,” *Proceedings of IEEE*, Volume 59, pp. 393-409.
- [23] 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。

表 1 127.86°Y Cut 鋯酸鋰的各項基本性質

項目		LiNbO <sub>3</sub>	
生長溫度		1253°C	
結晶系		三方	
點群		3m	
晶格常數	a (Å)	5.1483	
	c (Å)	13.863	
硬度(Mohs)		5	
密度	10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	4.647	
居禮溫度(Tc)		~1142°C	
比熱(Cp)		89(@100°C)	
介電常數(@500Hz)		85.2	
		28.7	
彈性勁度常數 (constant field @25°C in 10 <sup>11</sup> N/m <sup>2</sup> )	C <sub>11</sub>	2.030	
	C <sub>12</sub>	0.573	
	C <sub>13</sub>	0.752	
	C <sub>14</sub>	0.085	
	C <sub>33</sub>	2.424	
	C <sub>44</sub>	0.595	
壓電應力常數(C/m <sup>2</sup> )		C <sub>66</sub>	0.728
		e <sub>15</sub>	3.76
		e <sub>22</sub>	2.43
		e <sub>31</sub>	0.23
		e <sub>33</sub>	1.33

表 2 單一型指叉狀電極幾何參數(20MHz)

聲波孔徑(acoustic aperture)	20mm
電極寬度	50 $\mu$ m
電極對數	25
電極厚度	0.15 $\mu$ m



表 3 啣啣型指叉狀電極幾何參數(15~20MHz)

聲波孔徑(acoustic aperture)	16mm
電極週期 (maximum)	66.4 $\mu$ m
電極週期 (minimum)	49.8 $\mu$ m
電極對數	50
電極厚度	0.15 $\mu$ m

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)	$\eta_1$	129.6
	$\eta_2$	22.9
	$\eta_3$	37.4
折射係數 (20°C, 632.8nm)	$n_e$	1.706
	$n_o$	1.530
	$\Delta n$	0.175
介電常數 (25°C)	$\epsilon_{\parallel}$	19.7
	$\epsilon_{\perp}$	6.4
	$\Delta \epsilon$	13.3
彈性係數 /dyne(22°C)	$K_{11}$	$6.4 \times 10^{-7}$
	$K_{33}$	$10.0 \times 10^{-7}$

表 5 溶劑成分配置表

名稱 成份	NBG-776
N-methyl-2-pyrrolidone	35(wt%)
Butyl cellosolve	35(wt%)
$\gamma$ -Butyrolactone	30(wt%)



表 6 數值計算採用的材料常數

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

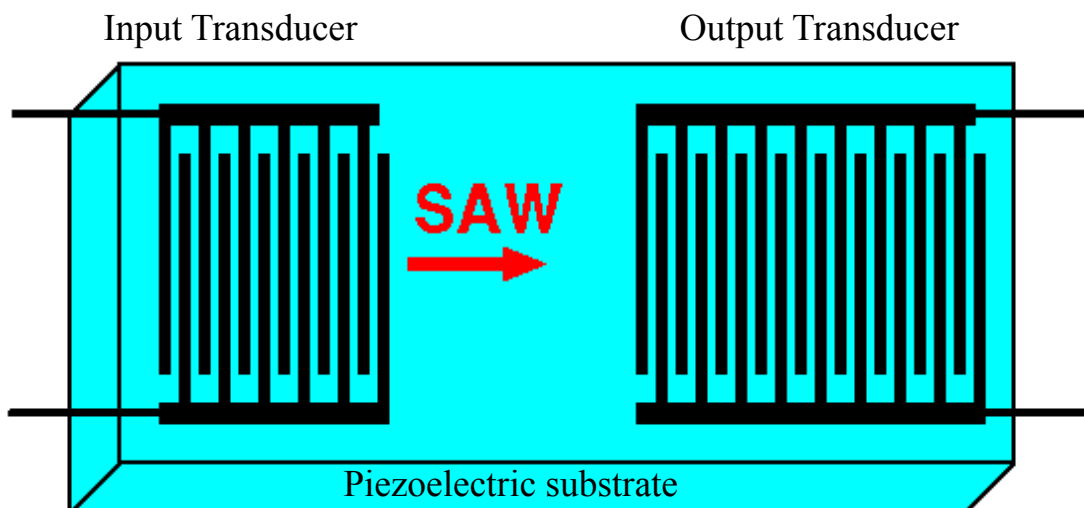


圖 2.1 指叉換能器示意圖

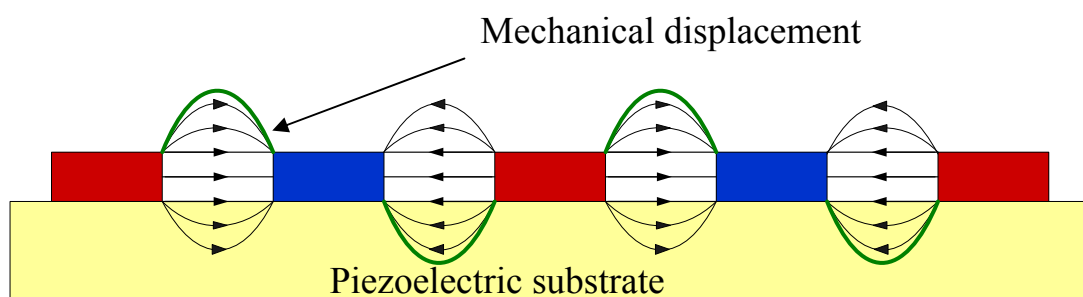


圖 2.2 施加交流電場於指叉電極之壓電效應示意圖

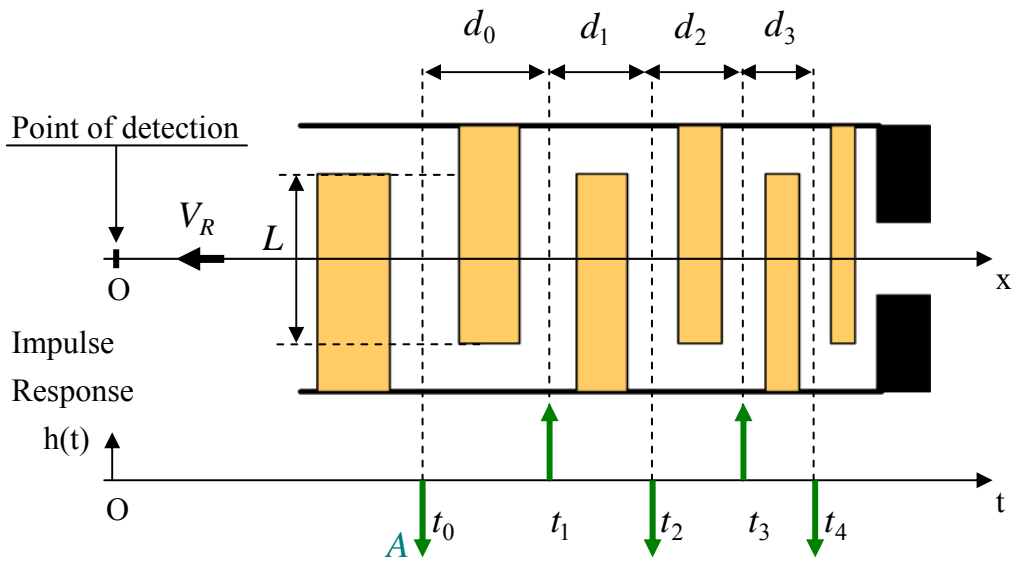


圖 2.3 脈衝函數模型

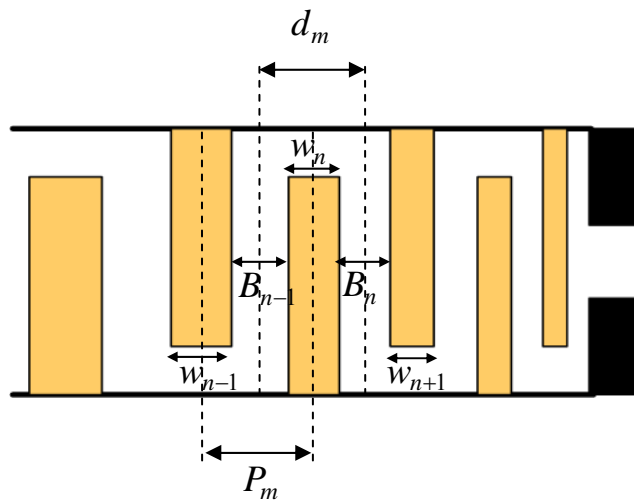


圖 2.4 指叉換能器示意圖

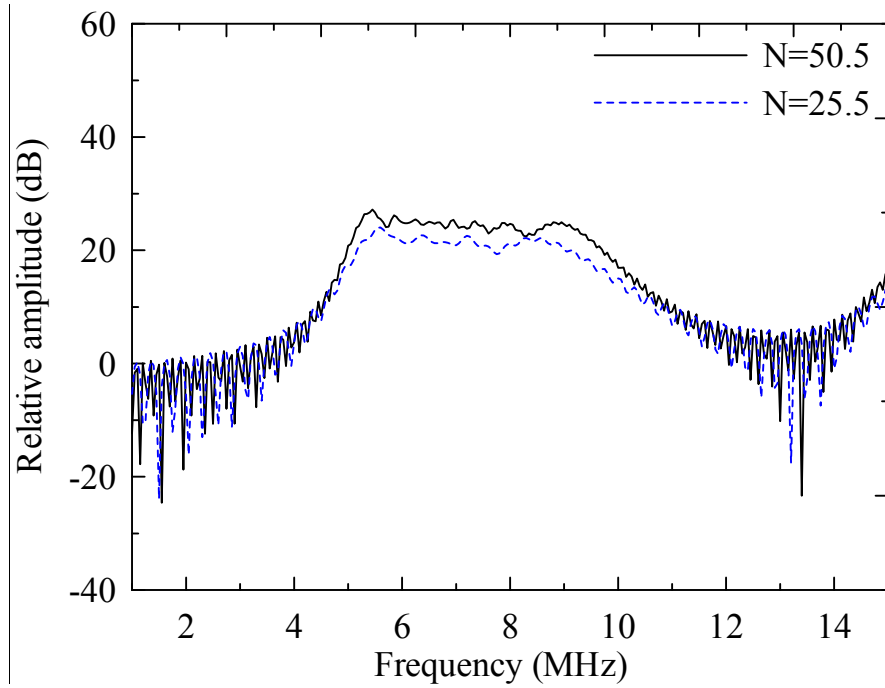


圖 2.5 模擬 5~10MHz 電極數目為 50.5 與 25.5 對之頻率響應

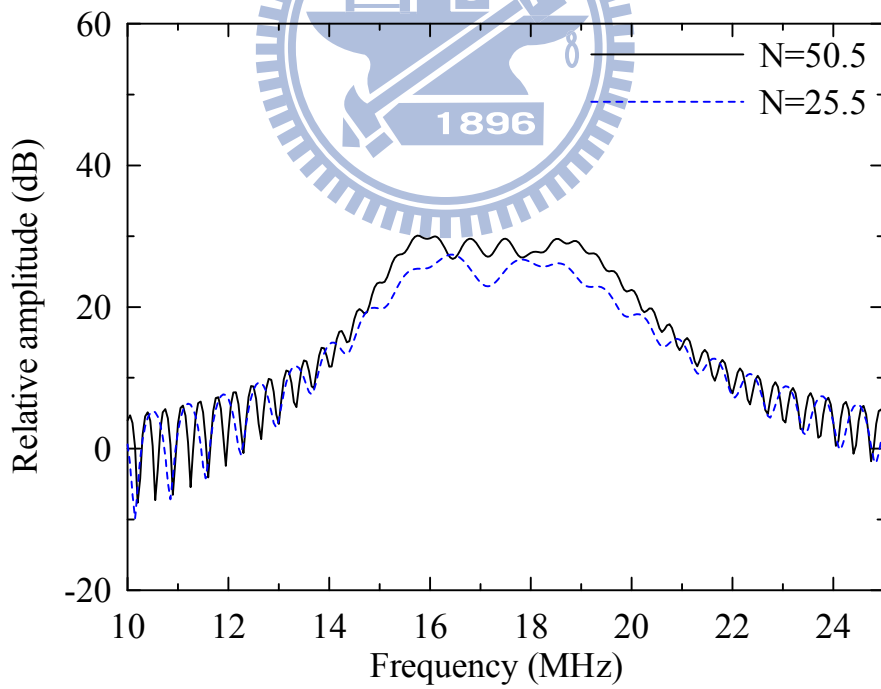


圖 2.6 模擬 15~20MHz 電極數目為 50.5 與 25.5 對之頻率響應



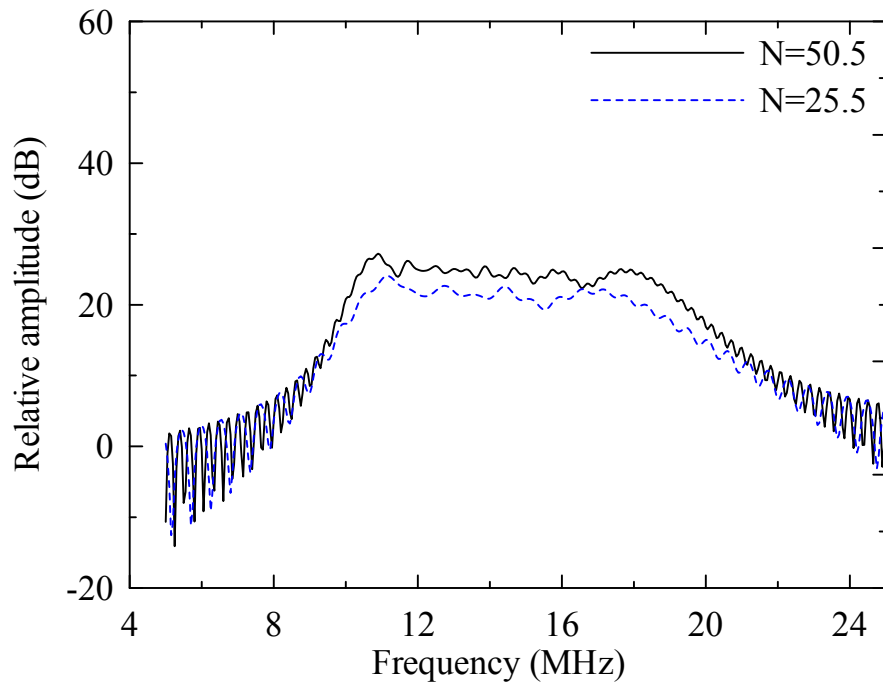


圖 2.7 模擬 10~20MHz 電極數目為 50.5 與 25.5 對之頻率響應

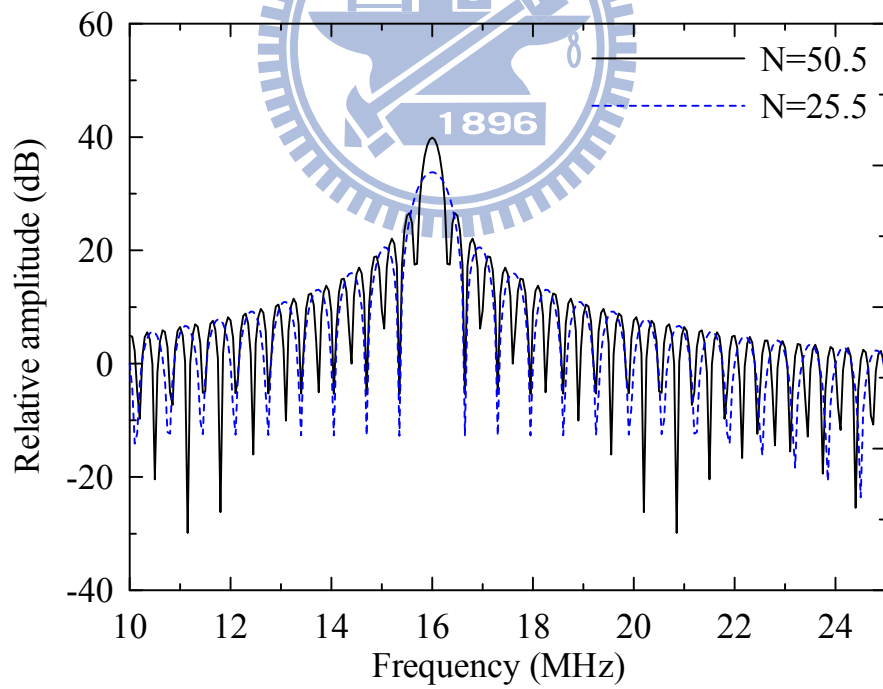


圖 2.8 模擬 16MHz 電極數目為 50.5 與 25.5 對之頻率響應

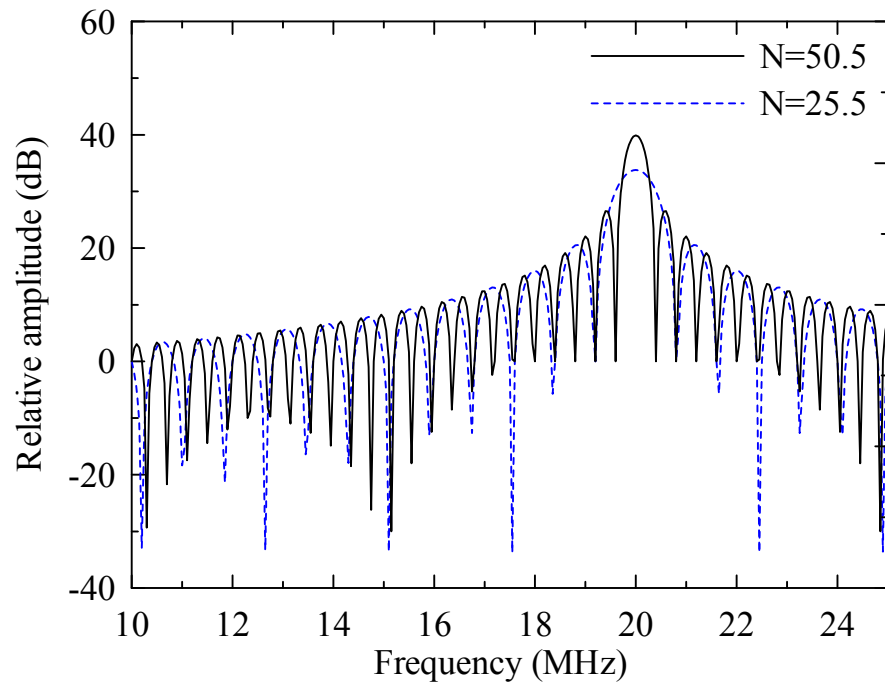


圖 2.9 模擬 20MHz 電極數目為 50.5 與 25.5 對之頻率響應



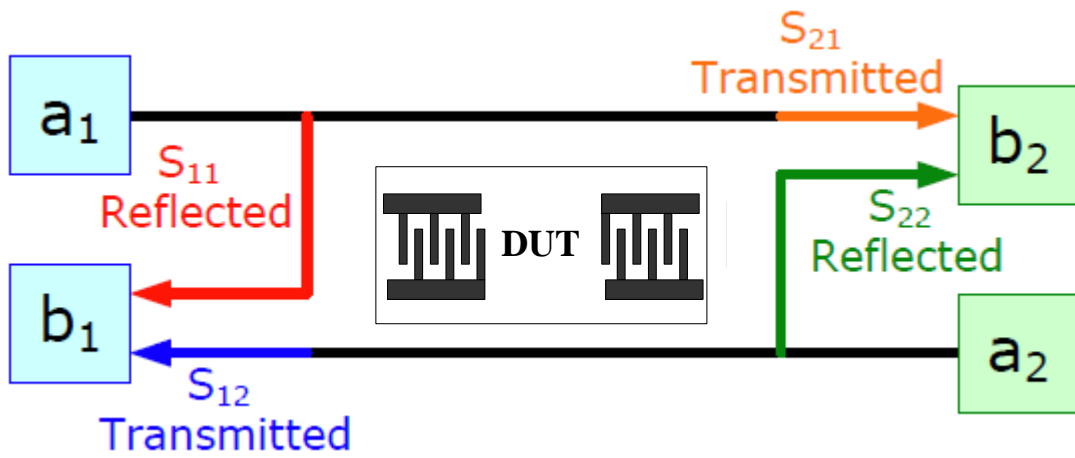


圖 2.10 散射參數示意圖

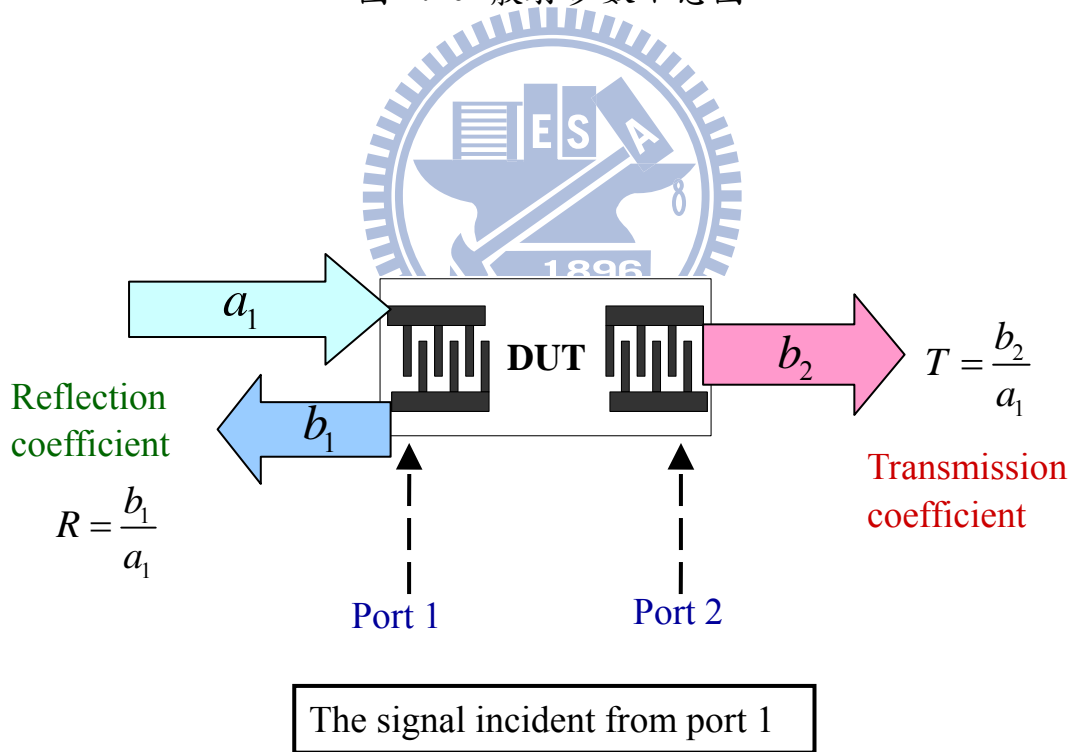


圖 2.11 反射及傳輸功率比示意圖

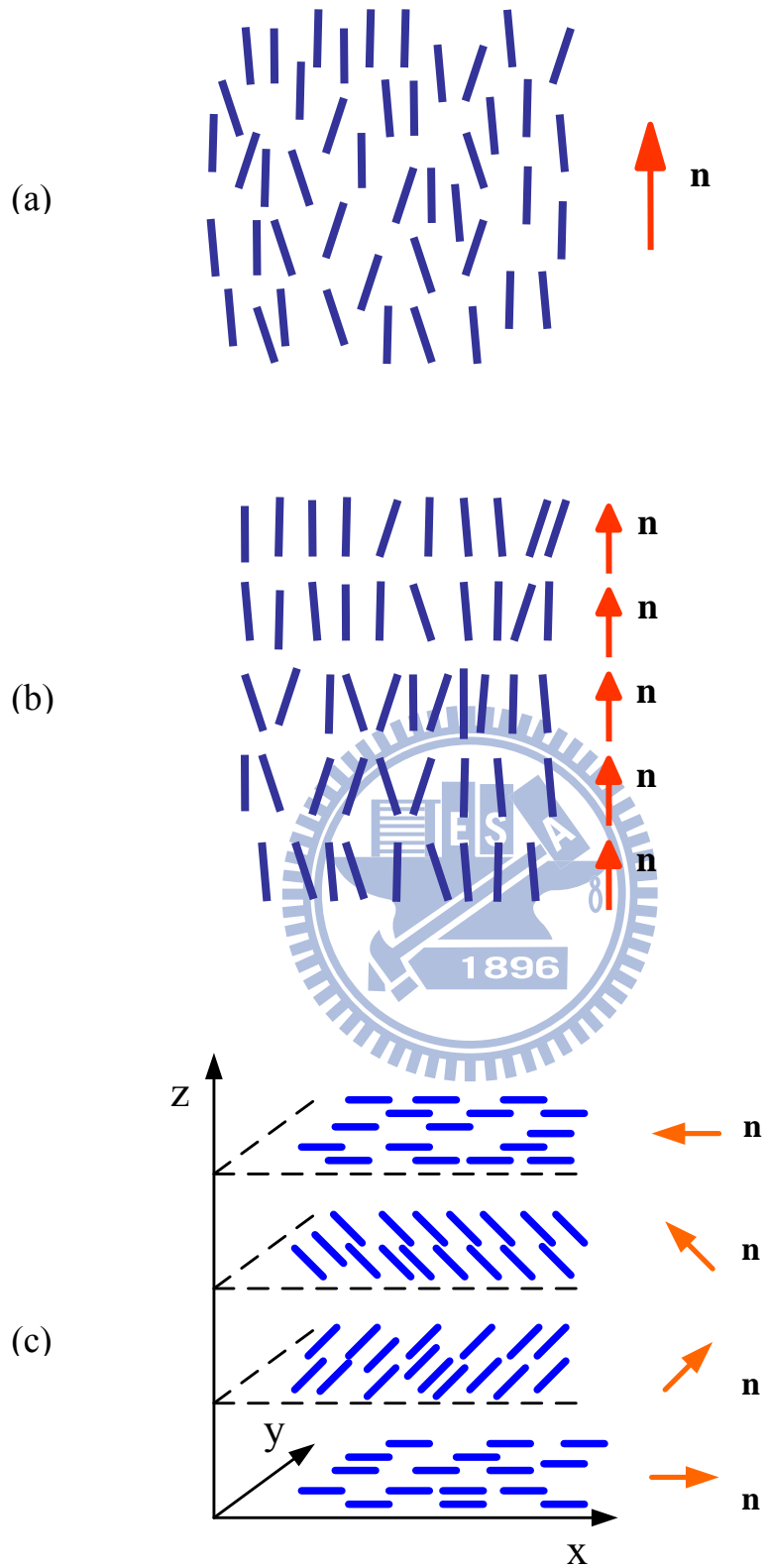


圖 2.12 (a)向列型、(b)層列型及(c)膽固醇型液晶示意圖

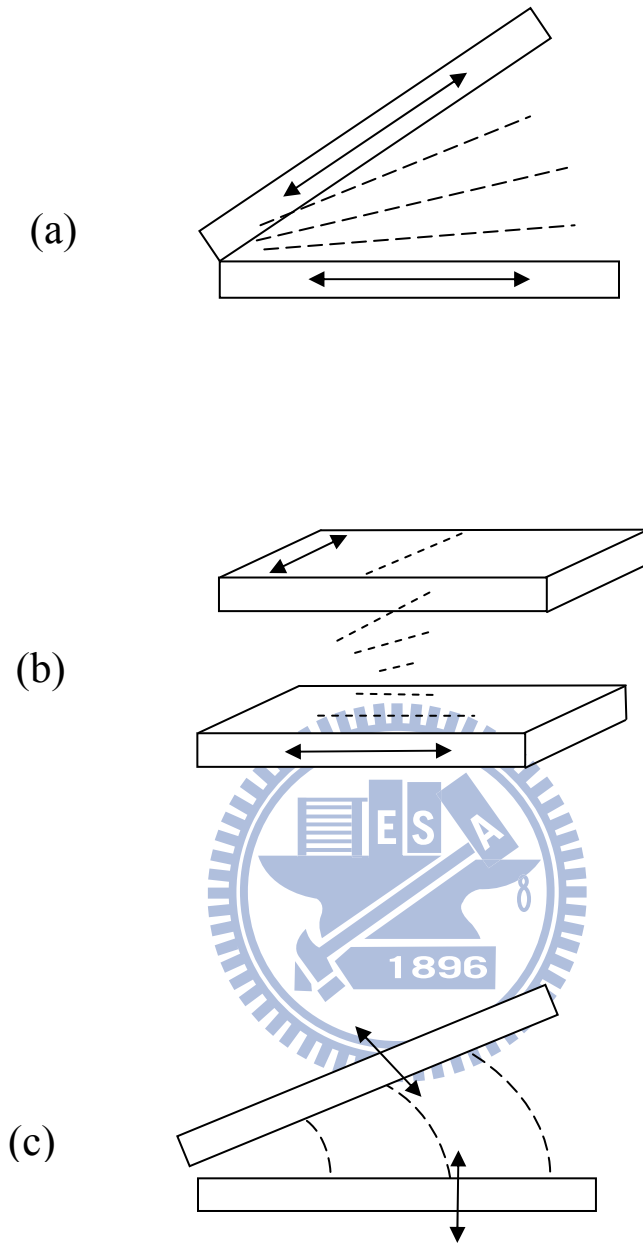


圖 2.13 液晶的(a)展開、(b)扭曲、(c)彎曲示意圖

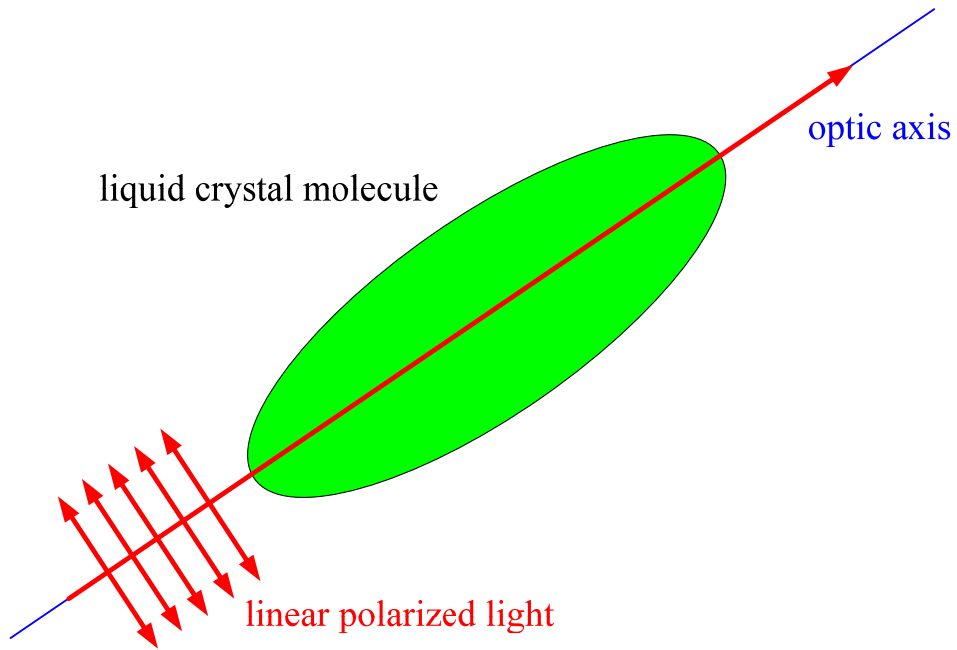


圖 2.14 液晶分子的尋常光場  $n_o$

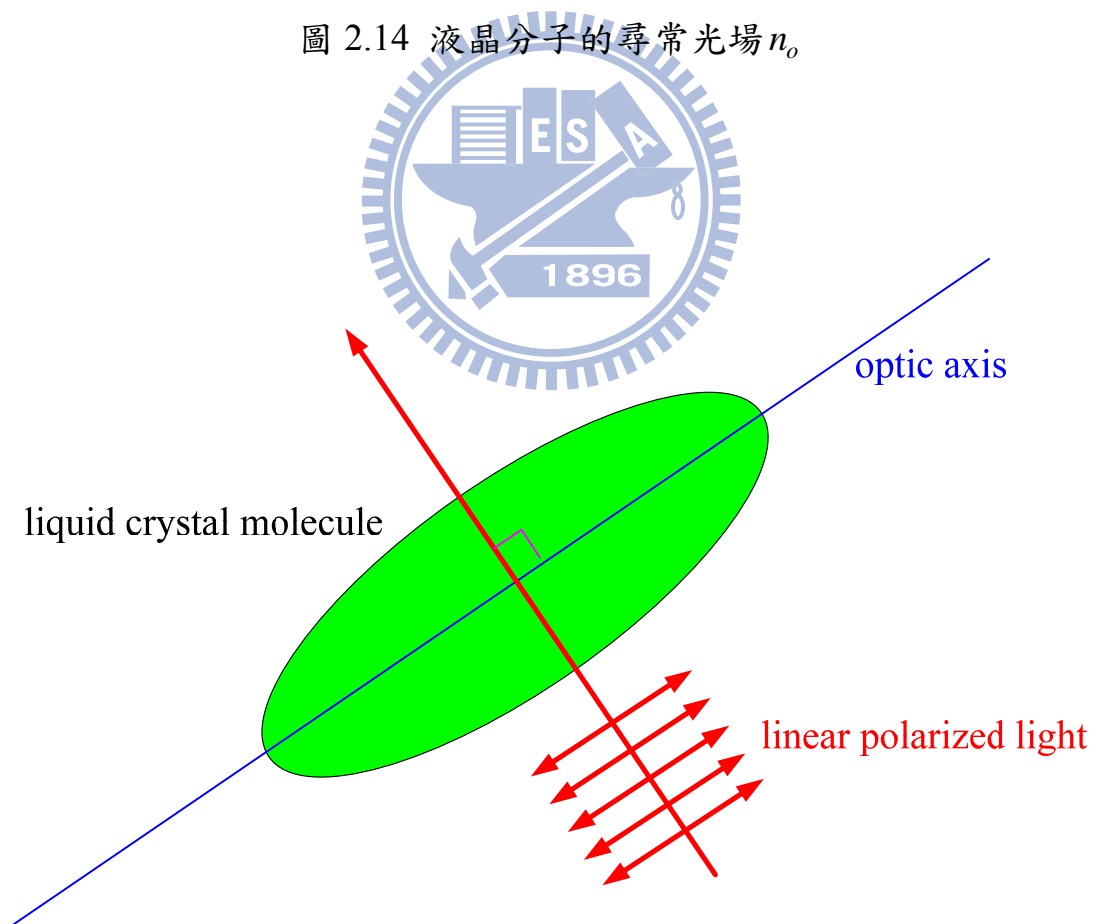


圖 2.15 液晶分子的非尋常光場  $n_e$

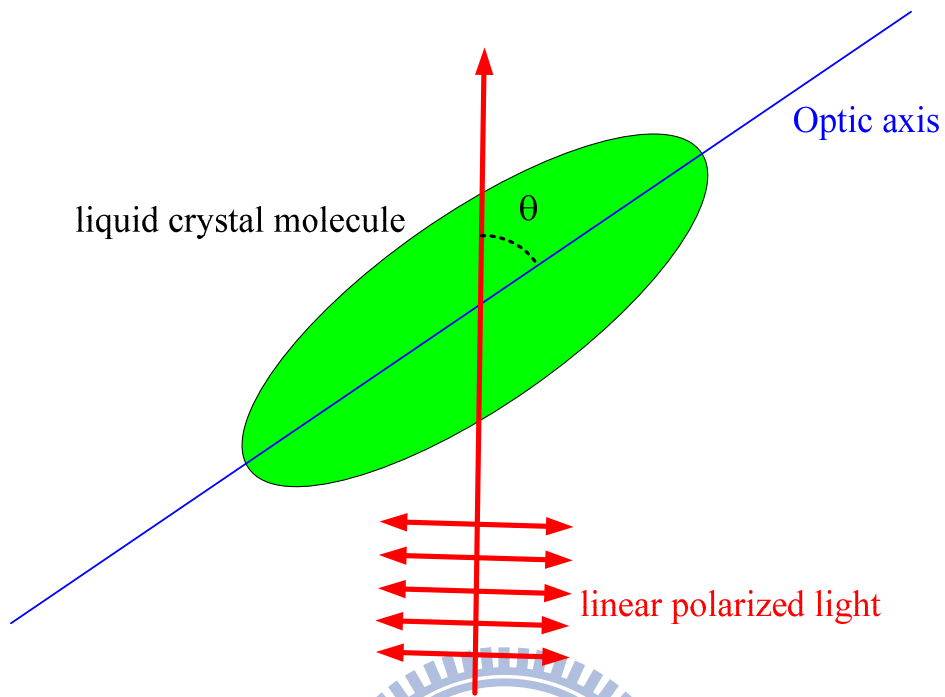


圖 2.16 光場的偏振方向與液晶分子光軸夾 $\theta$ 角之有效折射率示意圖

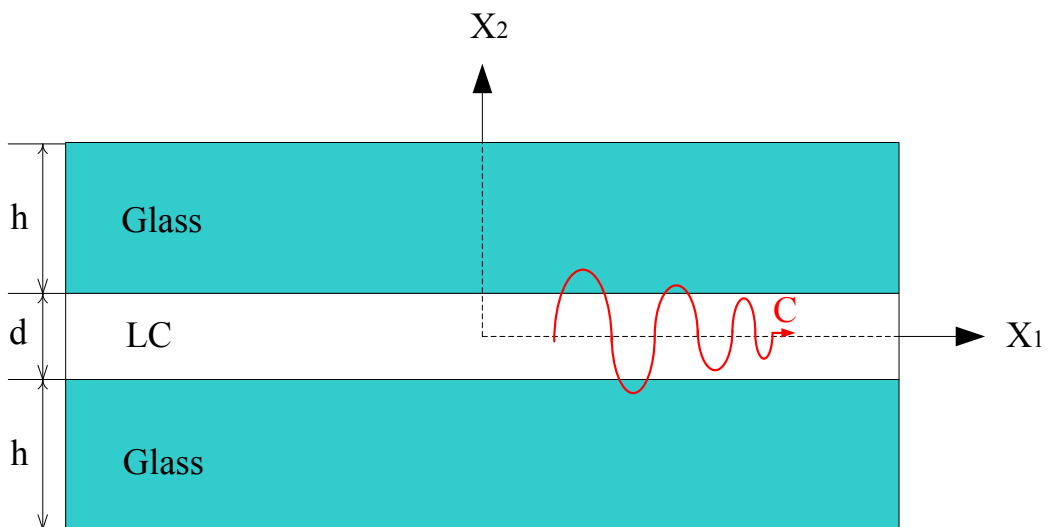


圖 2.17 等向性三明治結構示意圖

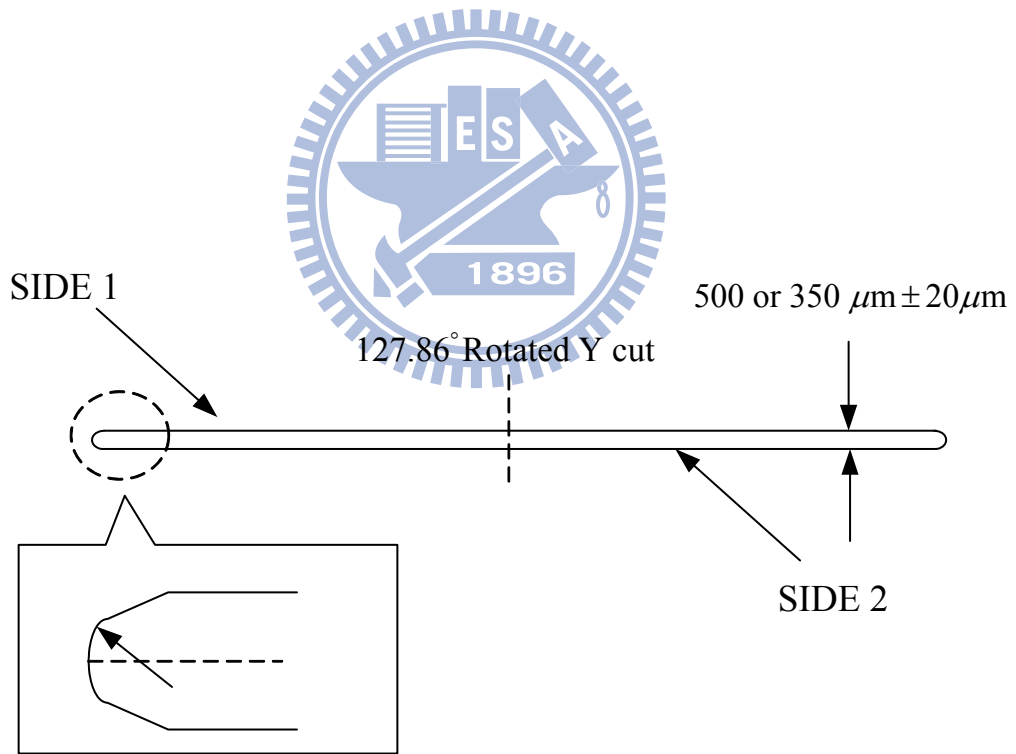
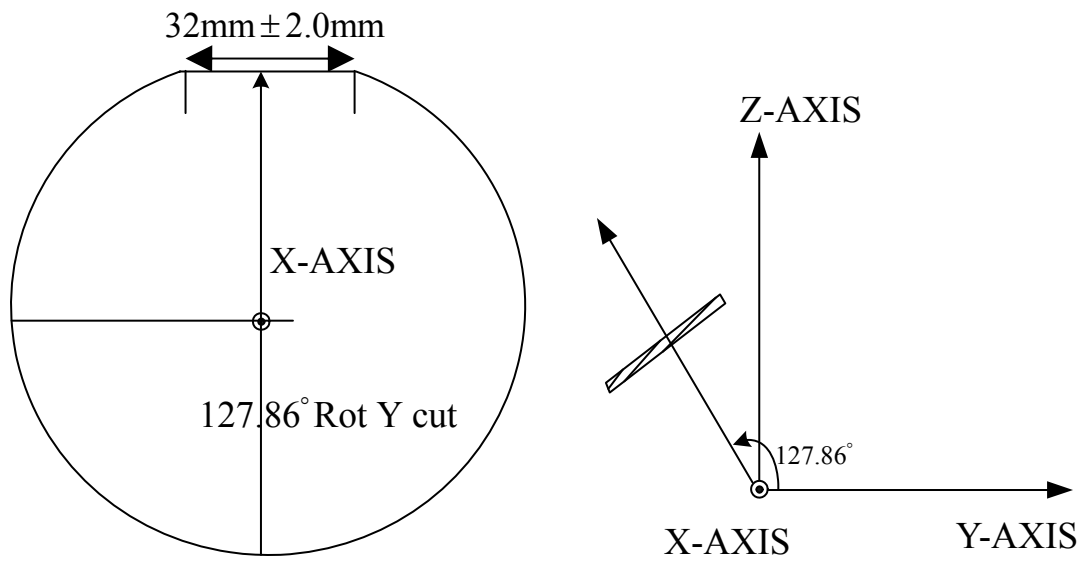


圖 3.1 鈮酸鋰的材料性質



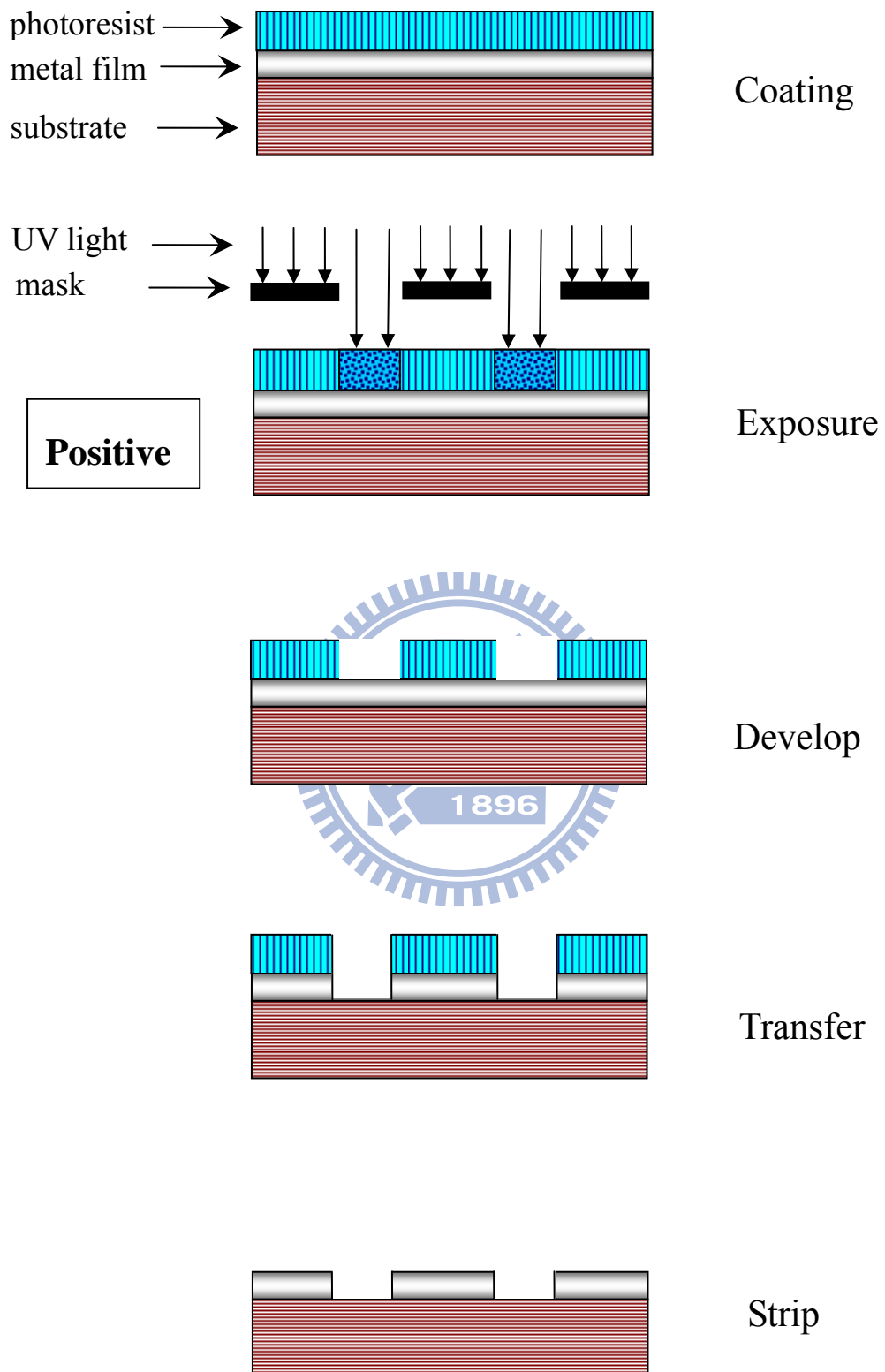
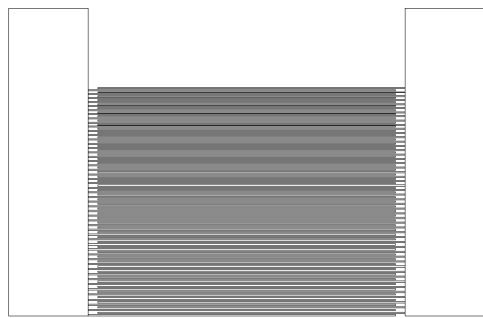
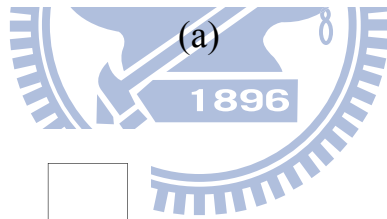
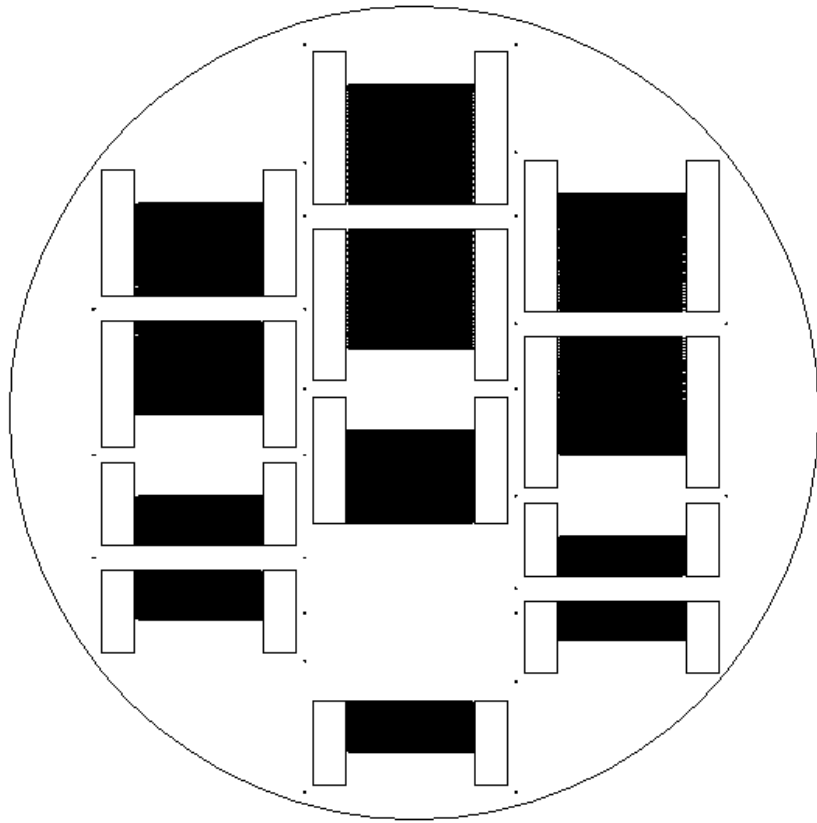
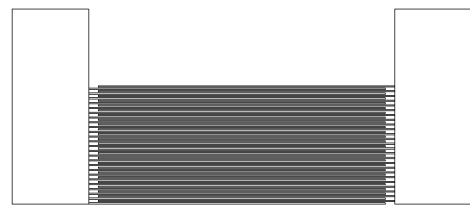


圖 3.2 表面聲波元件之微機電製程



(b)



(c)

圖 3.3 (a)AutoCAD 光罩設計圖 (b)15~20MHz 啁啾型 IDT

(c) 16MHz 單一型 IDT

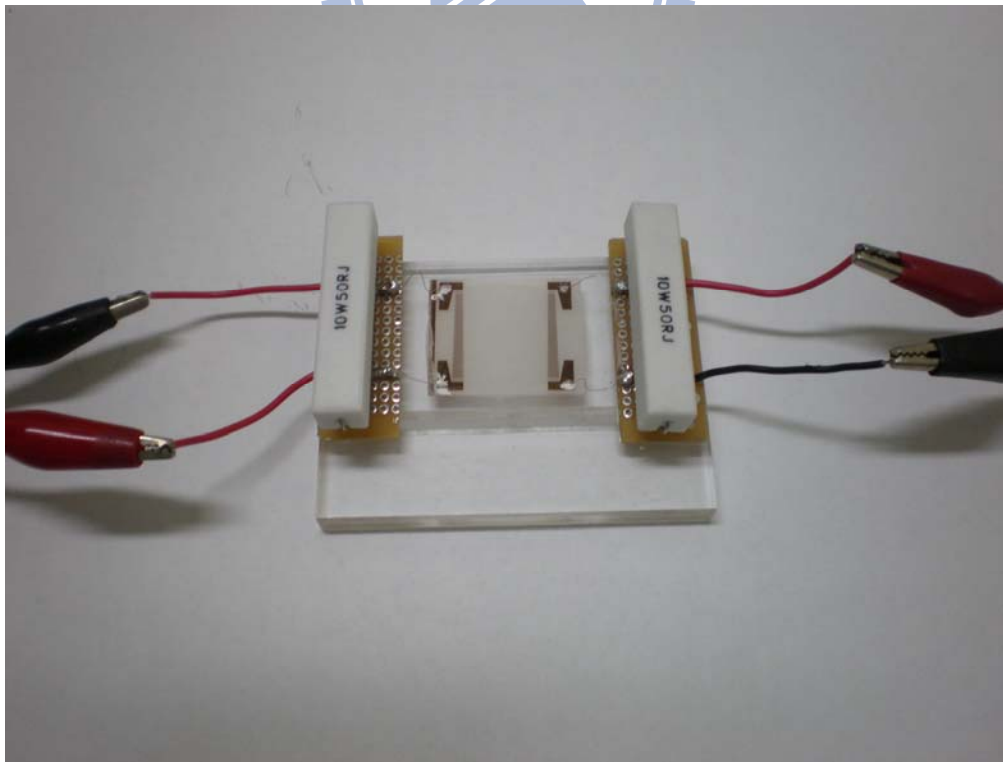
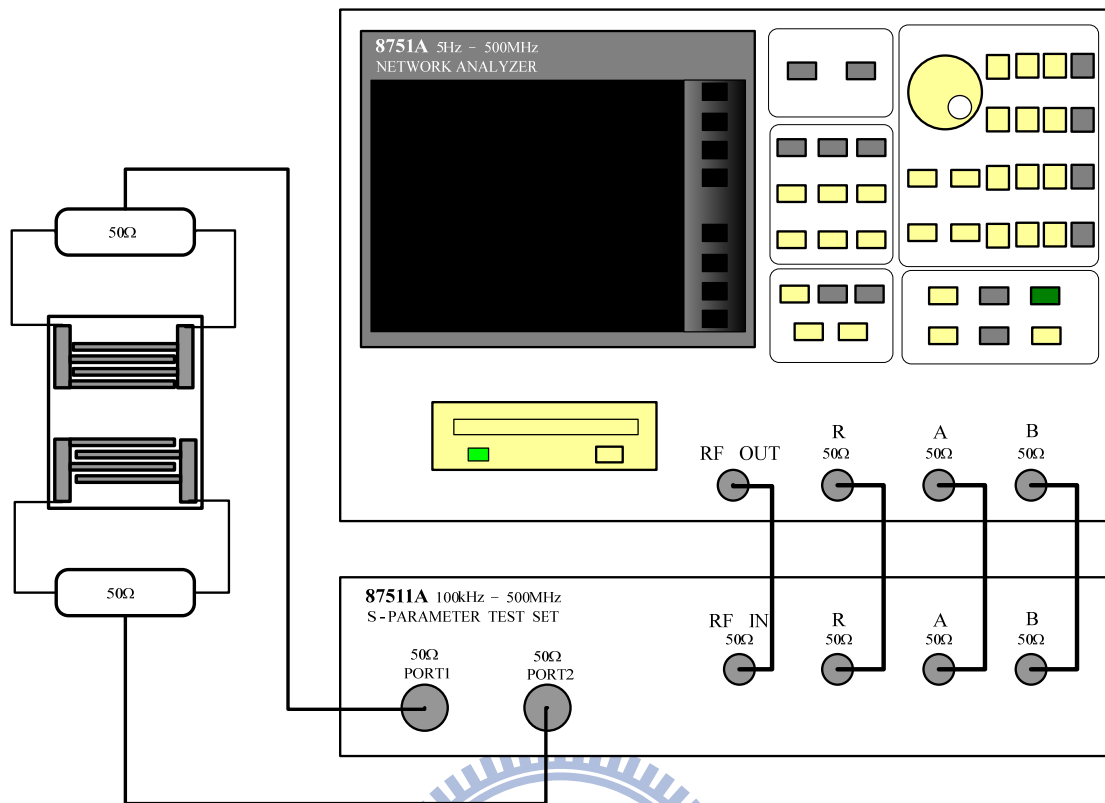


圖 3.4 散射參數量測系統示意圖

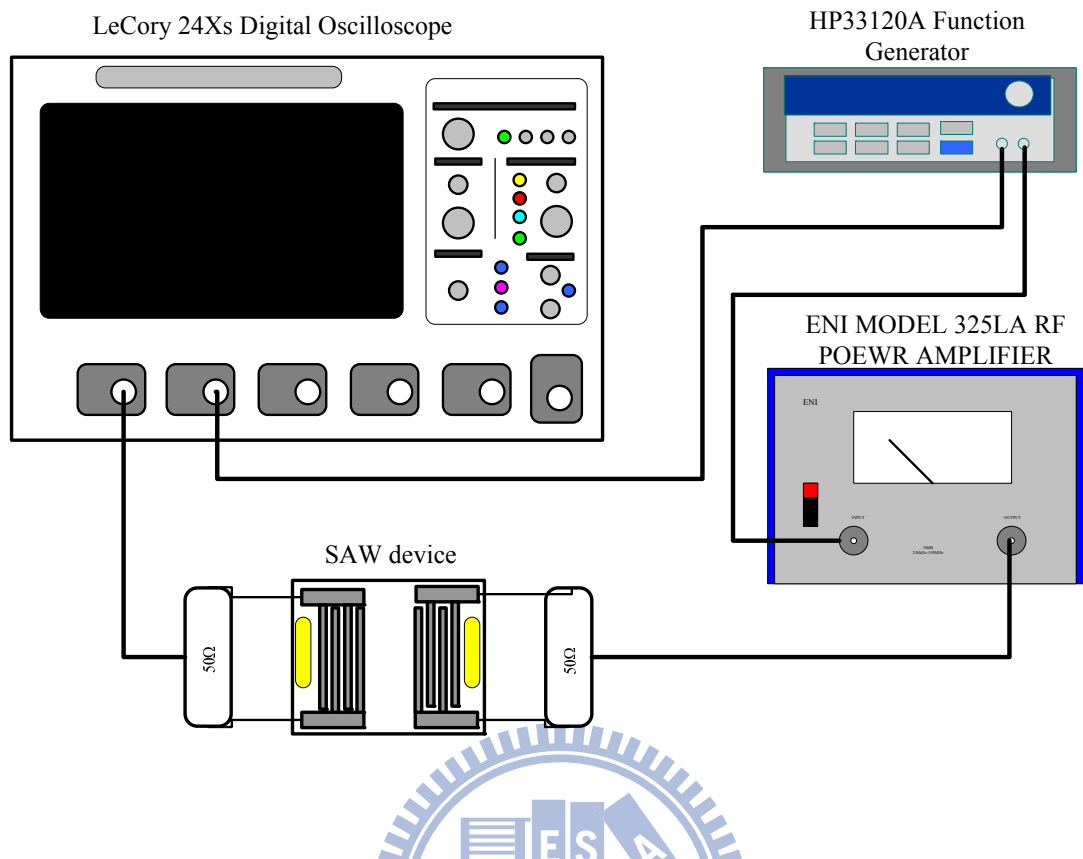


圖 3.5 測試吸波塗劑系統示意圖

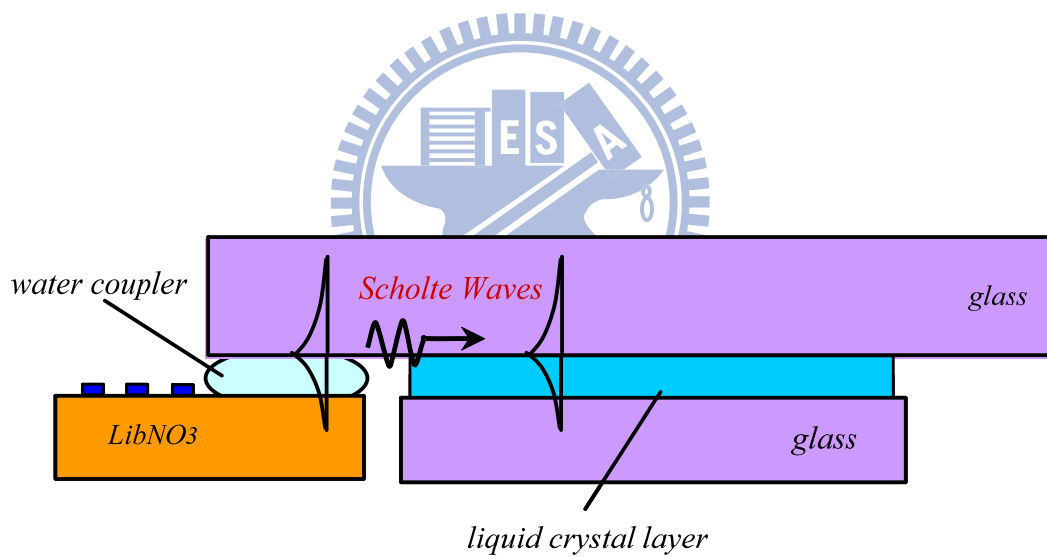
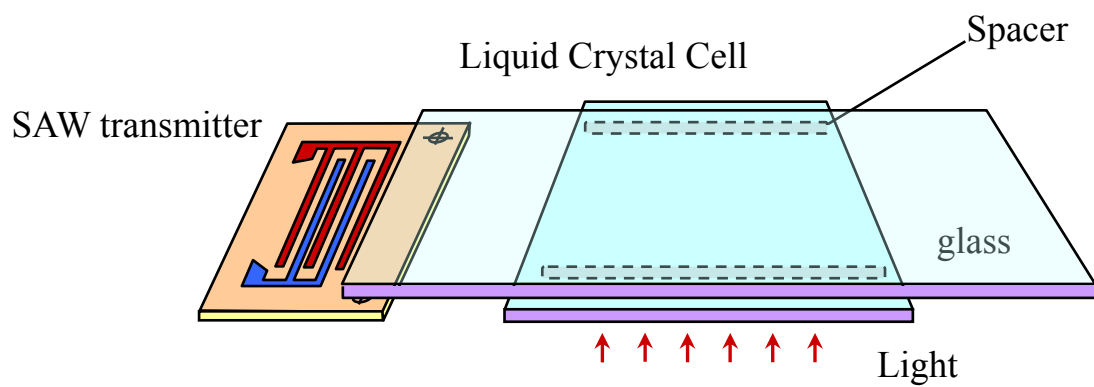


圖 3.6 表面聲波元件示意圖

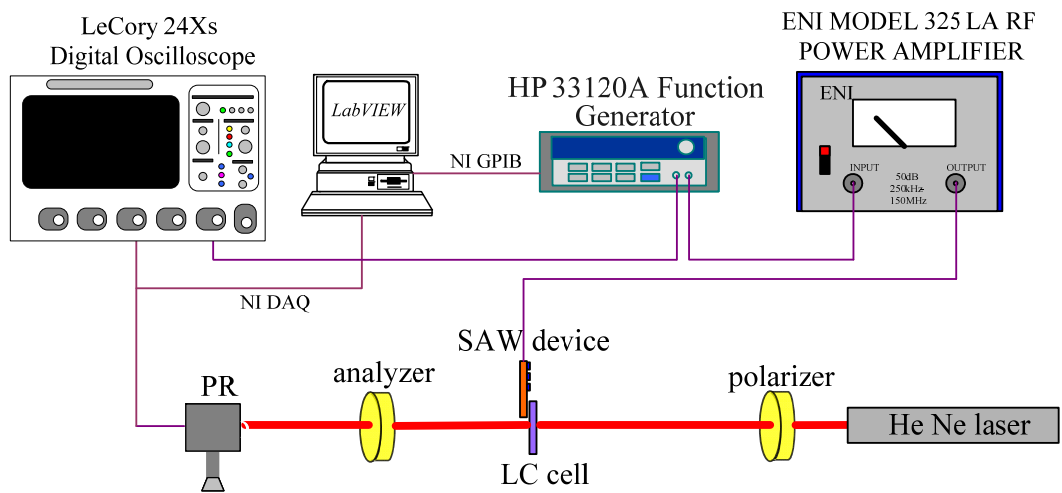


圖 3.7 表面聲波元件聲光實驗系統示意圖

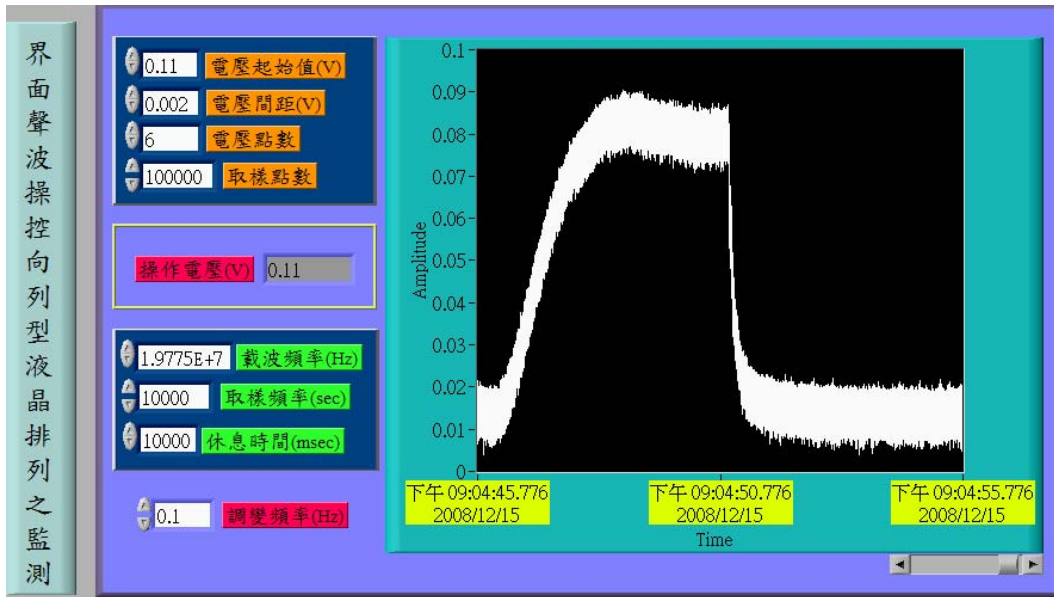


圖 3.8 自動化光強量測程式

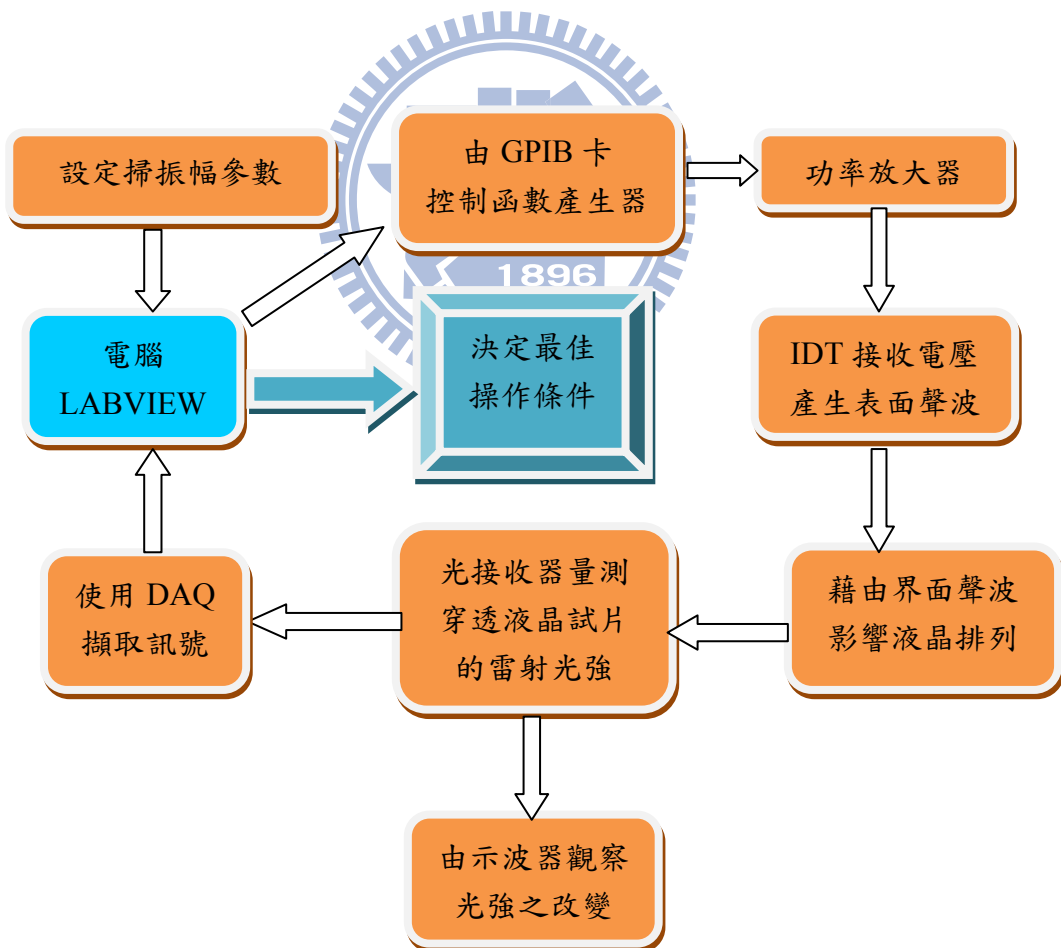


圖 3.9 自動化光強量測實驗流程圖

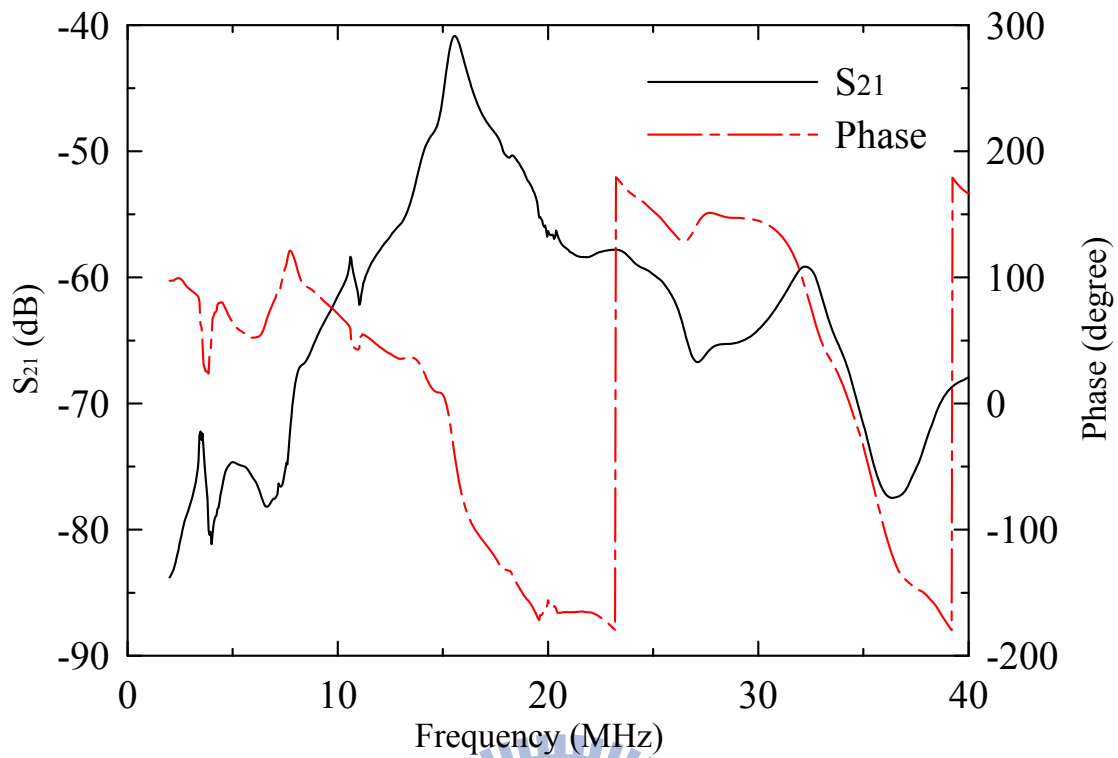


圖 4.1 單一型(16MHz)表面聲波元件之頻率響應

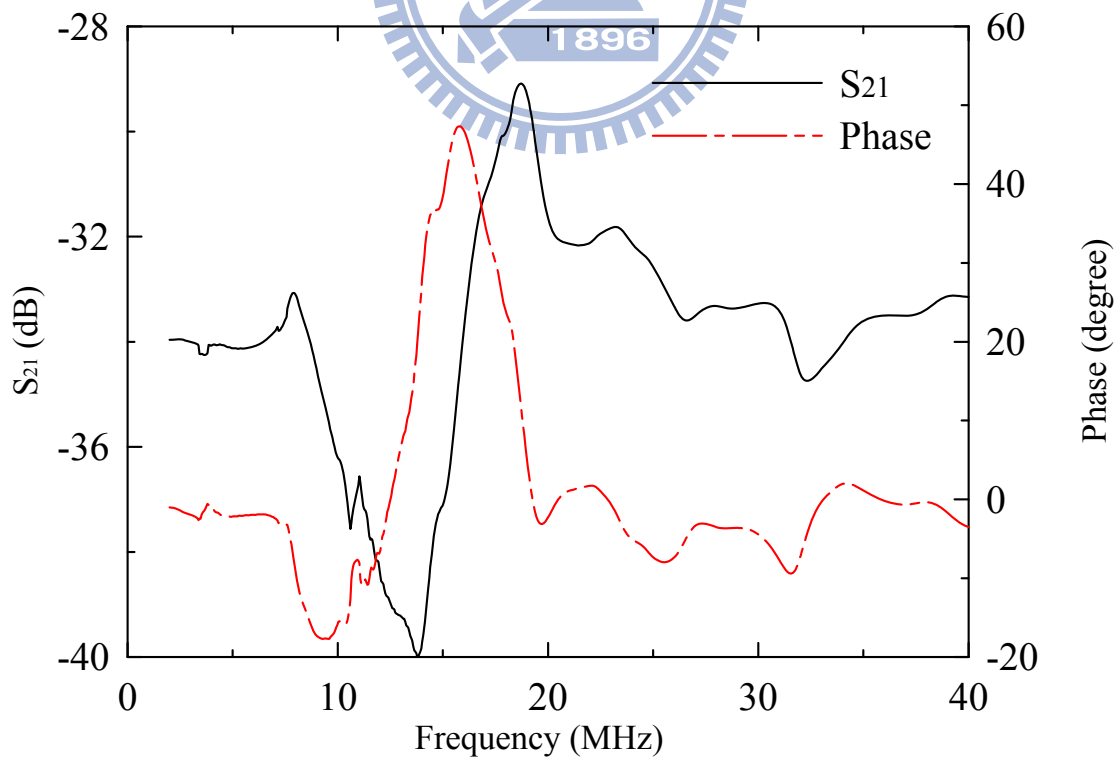


圖 4.2 啞啞型(15~20MHz)表面聲波元件之頻率響應



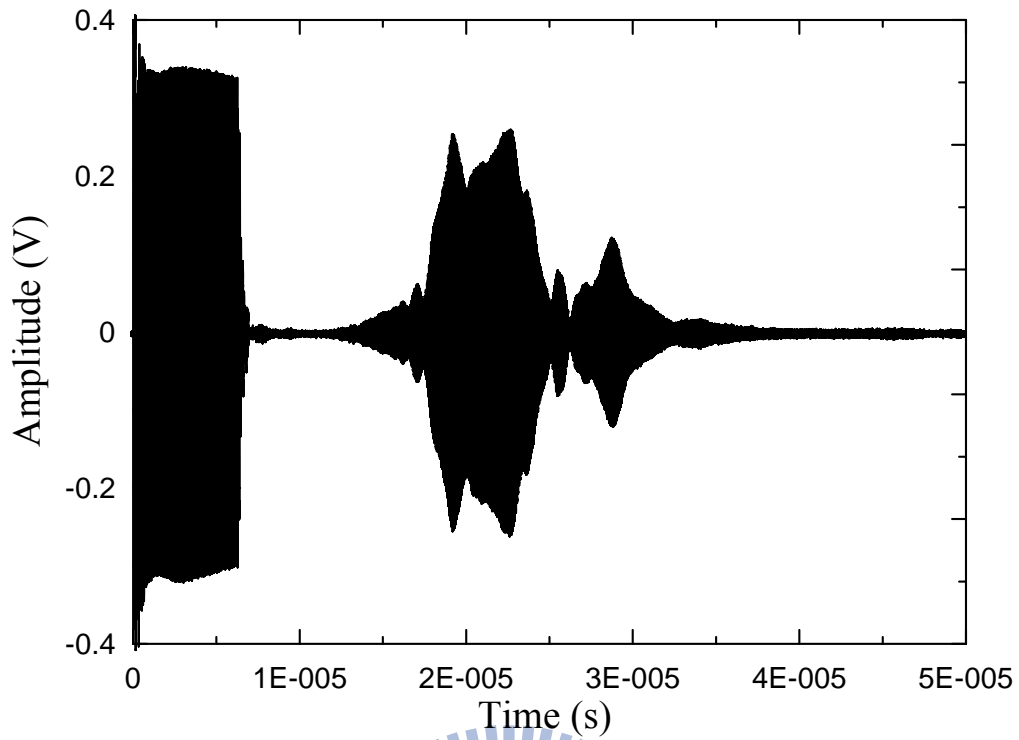


圖 4.3 無吸波塗劑之接收訊號

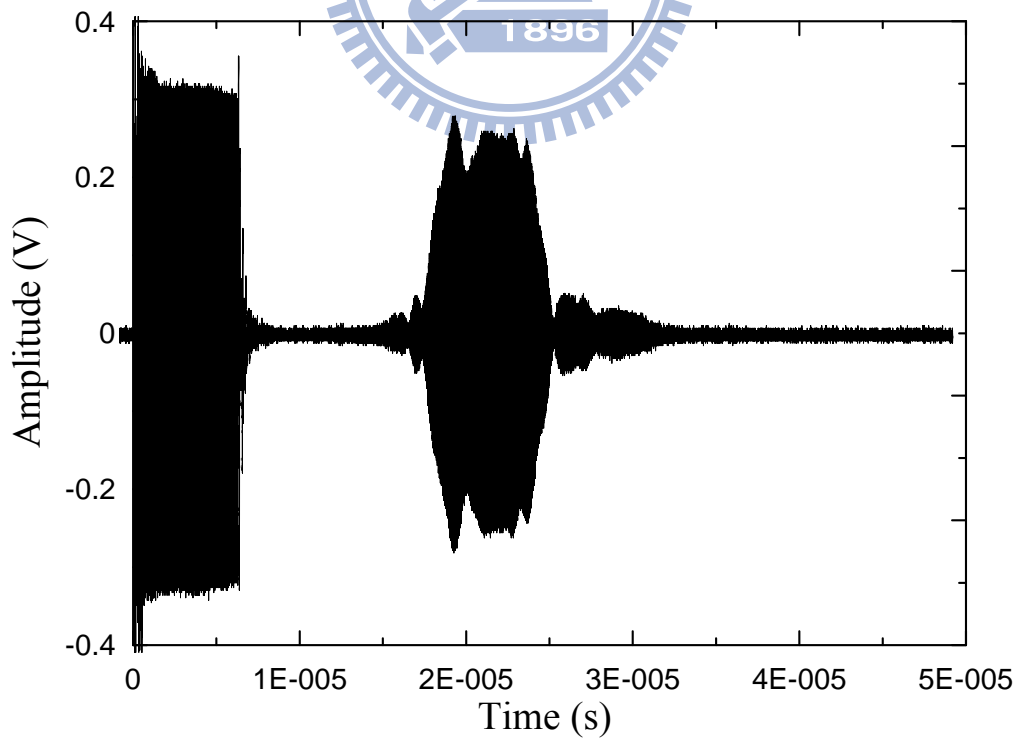


圖 4.4 兩邊緣皆有吸波塗劑之接收訊號

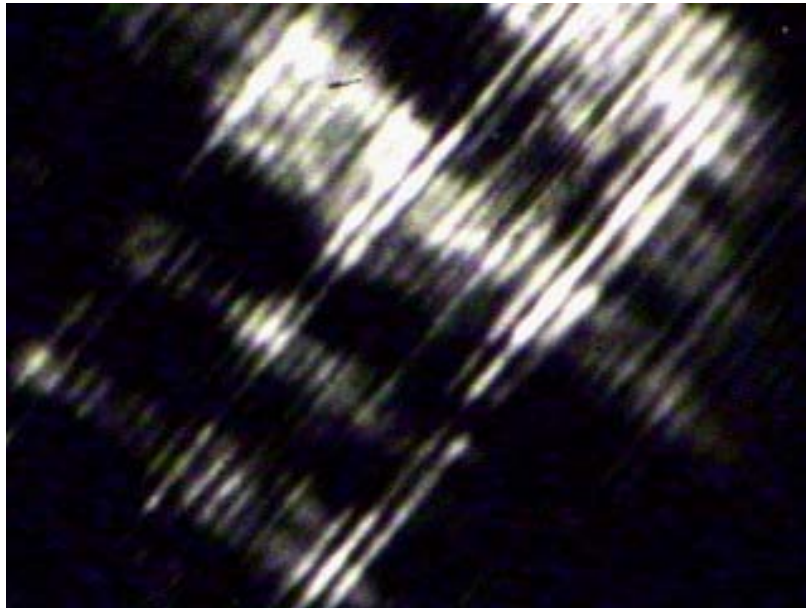


圖 4.5 液晶試片間距  $70\mu\text{m}$  之週期性亮暗條紋

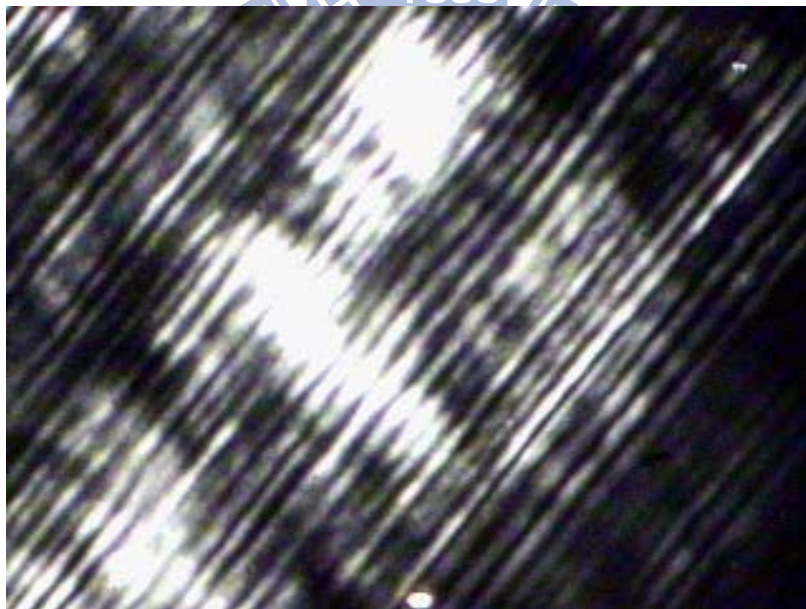


圖 4.6 液晶試片間距  $25\mu\text{m}$  之週期性亮暗條紋

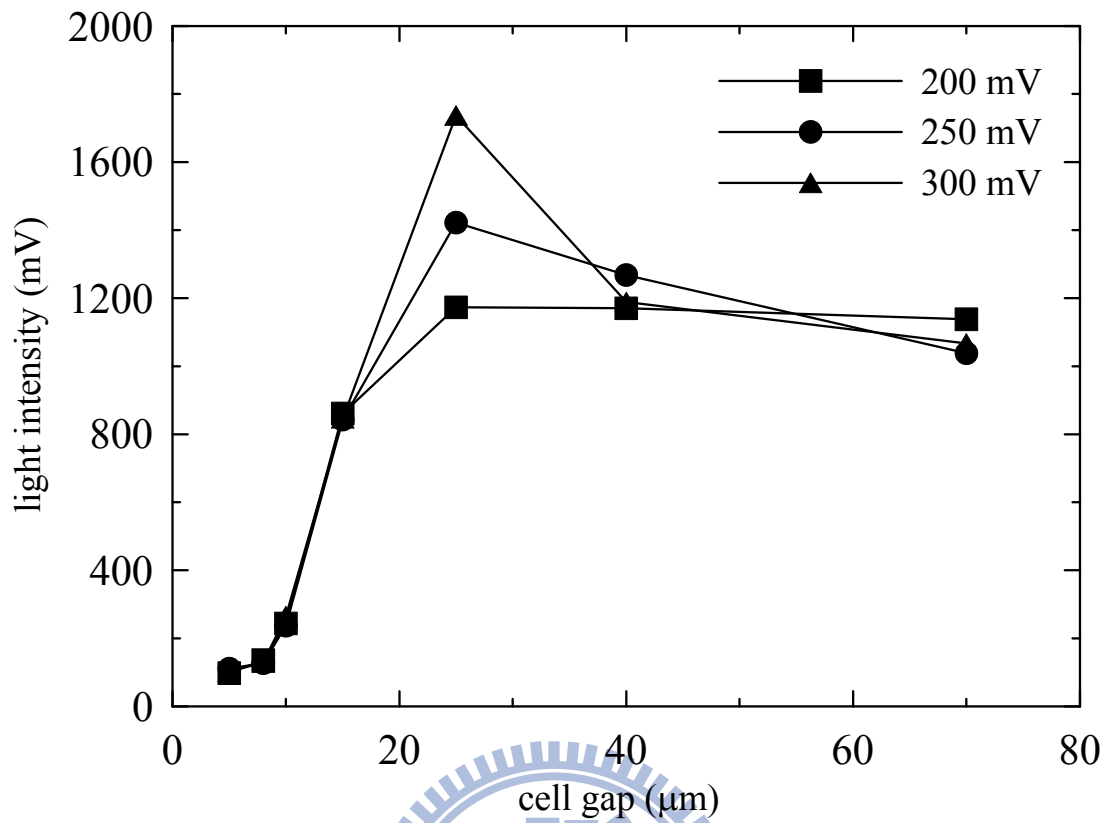


圖 4.7 不同厚度液晶試片的穿透光強變化

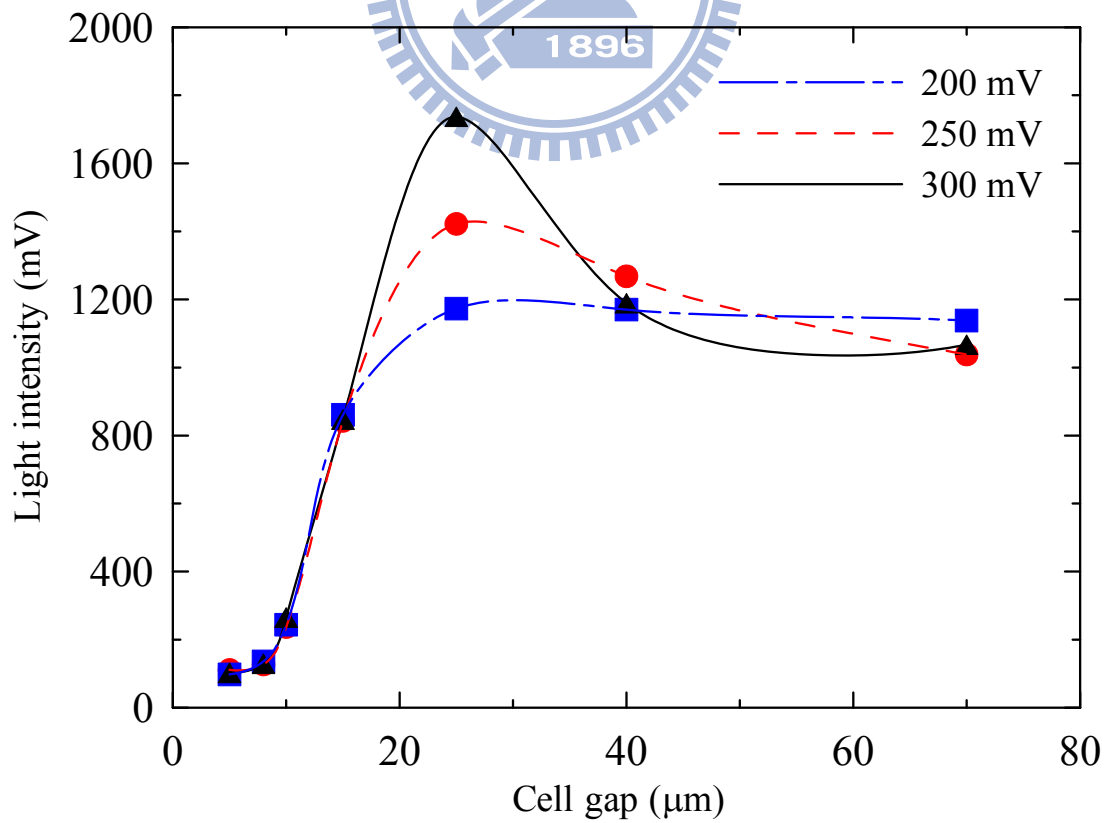


圖 4.8 不同厚度液晶試片的穿透光強變化擬合曲線

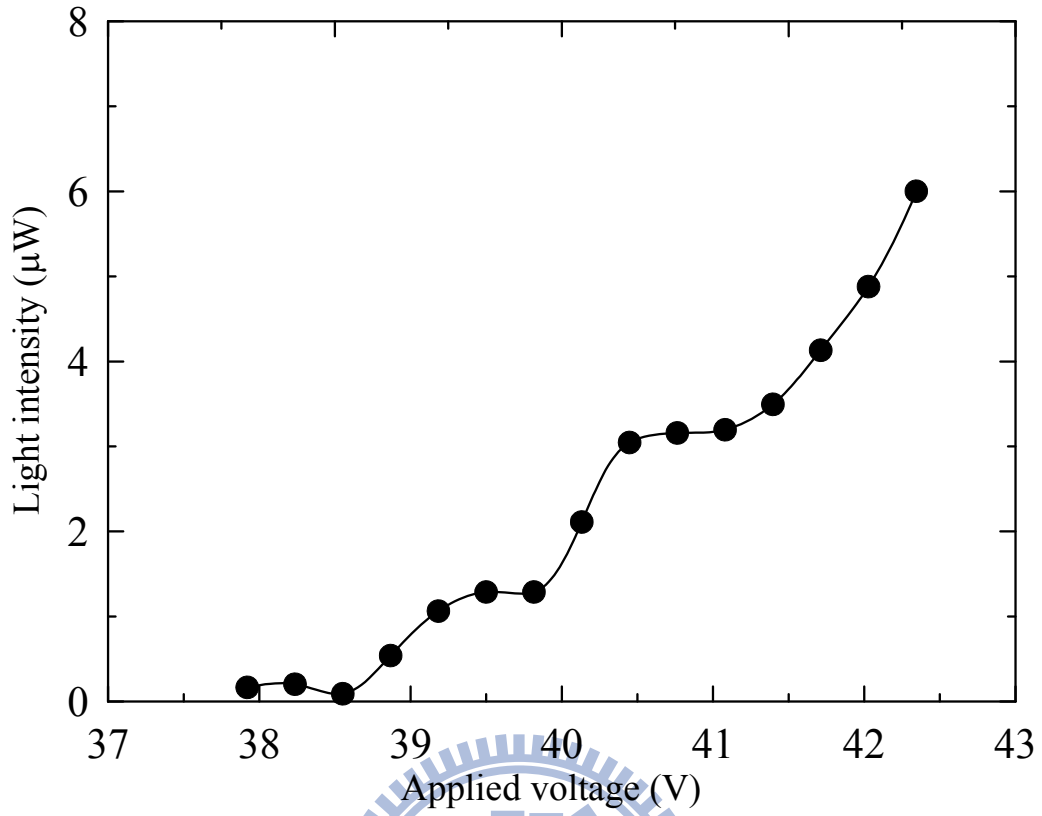


圖 4.9 單一型表面聲波元件之施加電壓與光強關係

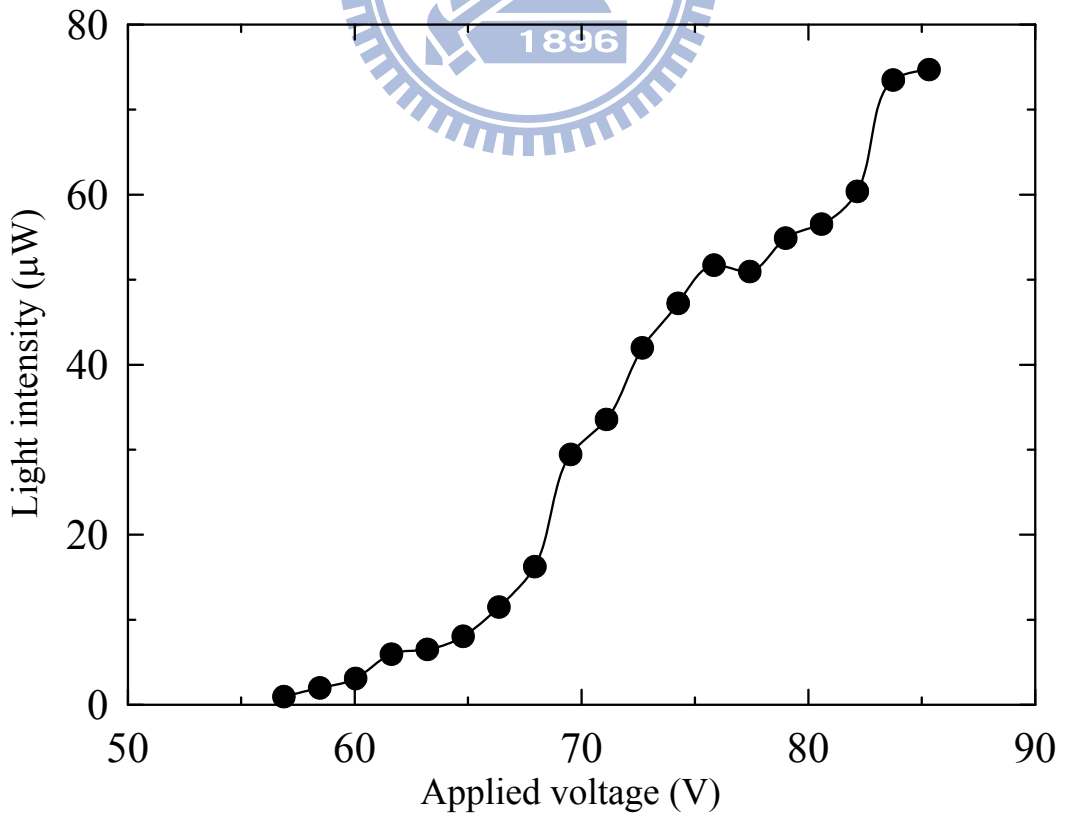


圖 4.10 喇叭型表面聲波元件之施加電壓與光強關係

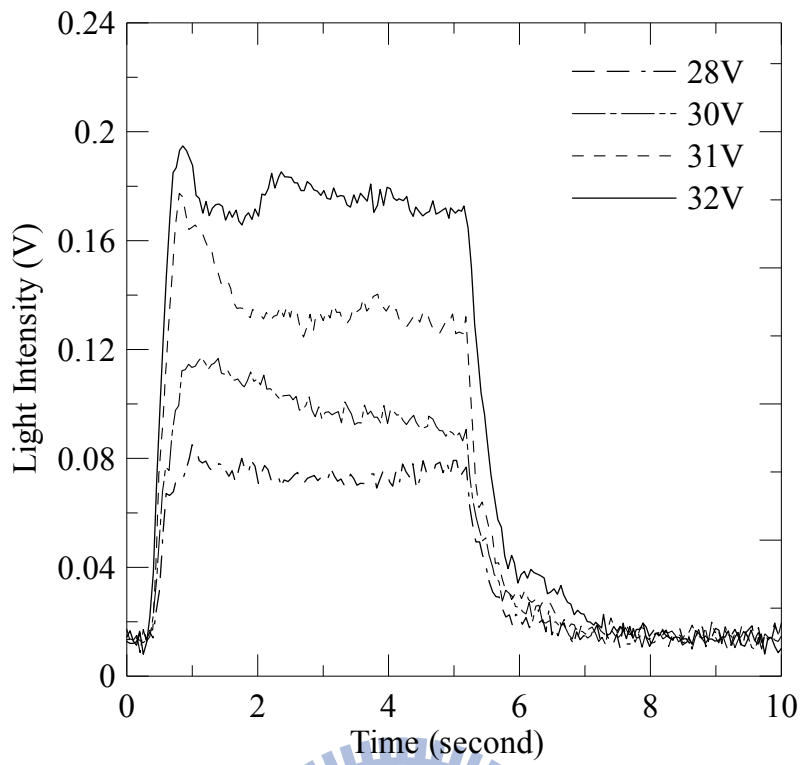


圖 4.11 液晶層厚度為 25 $\mu\text{m}$  的反應時間

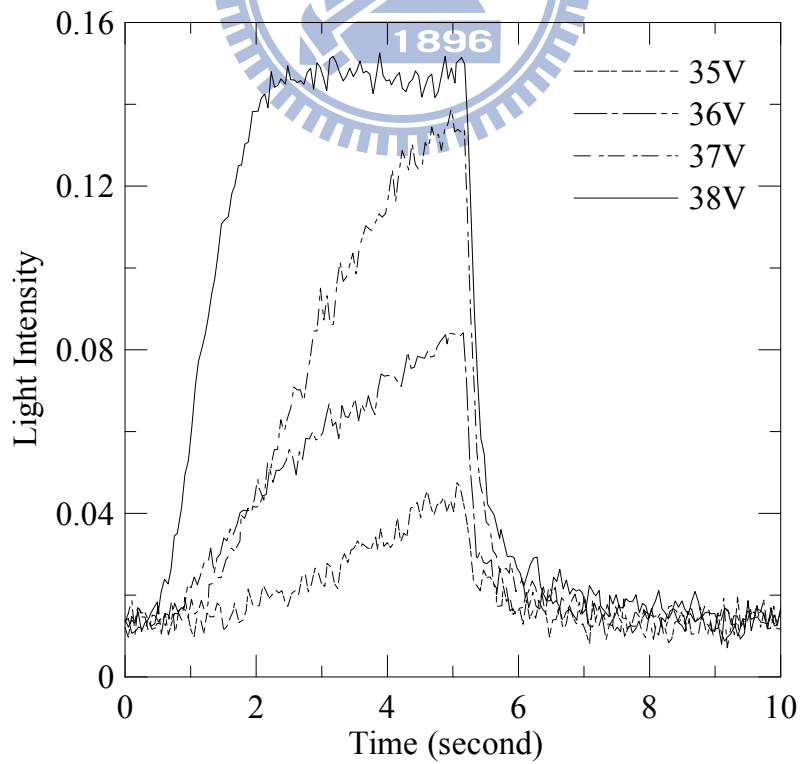


圖 4.12 液晶層厚度為 70 $\mu\text{m}$  的反應時間

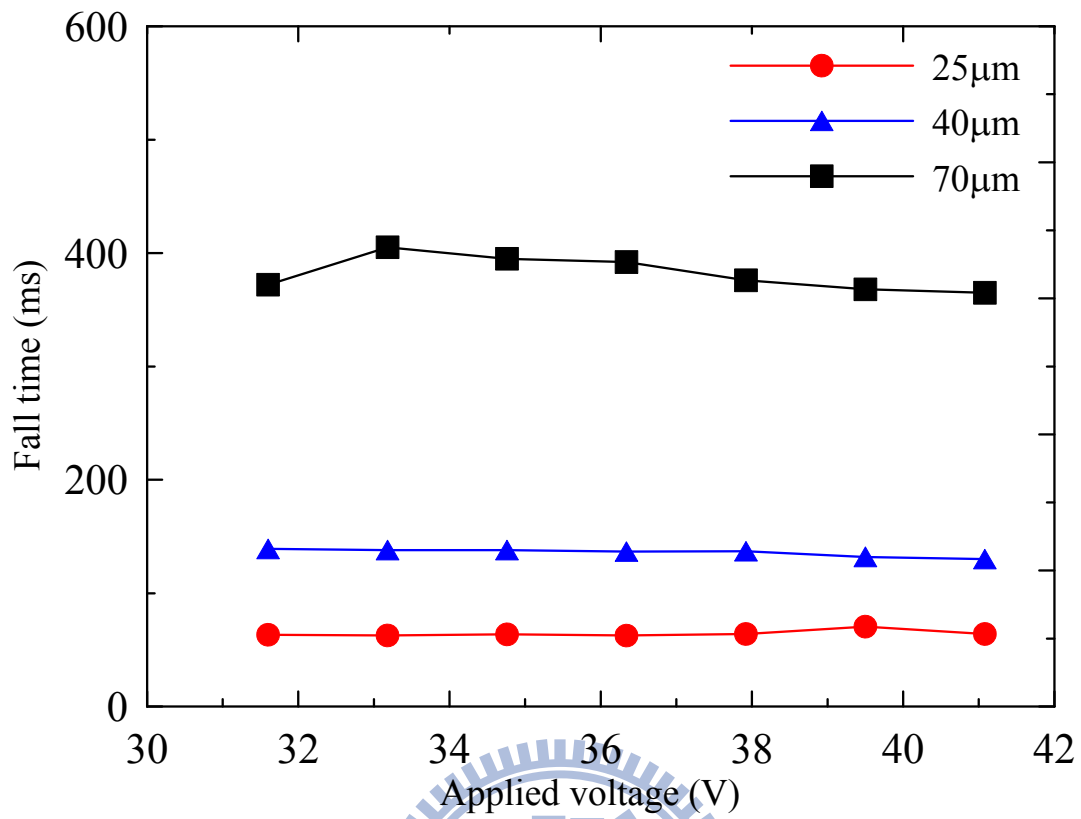


圖 4.13 使用啁啾型指叉換能器於不同厚度液晶層的下陷時間

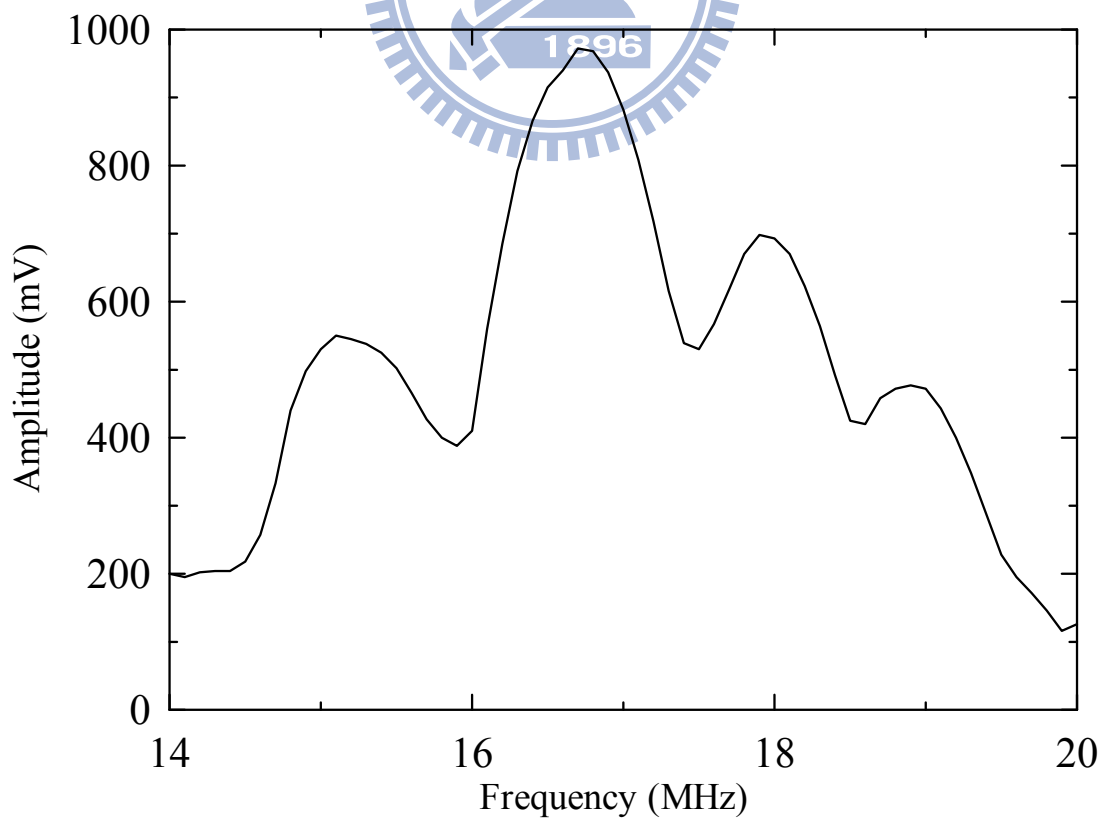


圖 4.14 啁啾型指叉換能器於 15~20MHz 的聲場強度

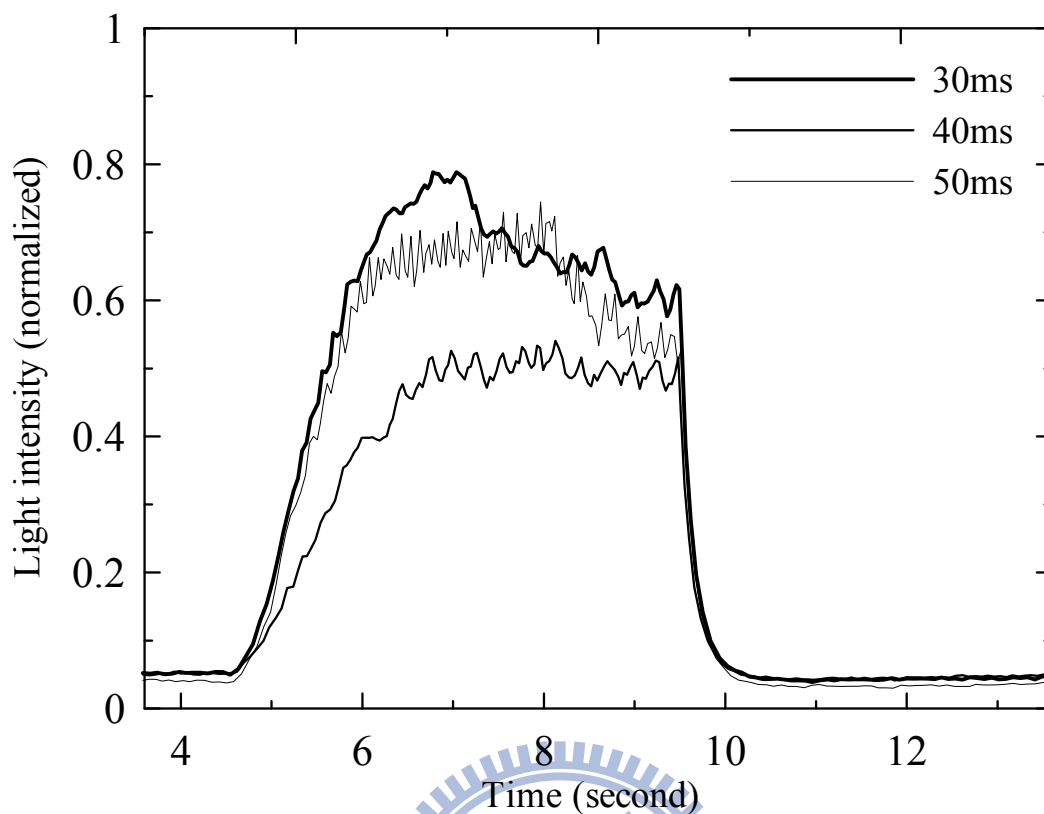


圖 4.15 掃頻時間為 30~50ms，液晶穿透光強的歷時曲線

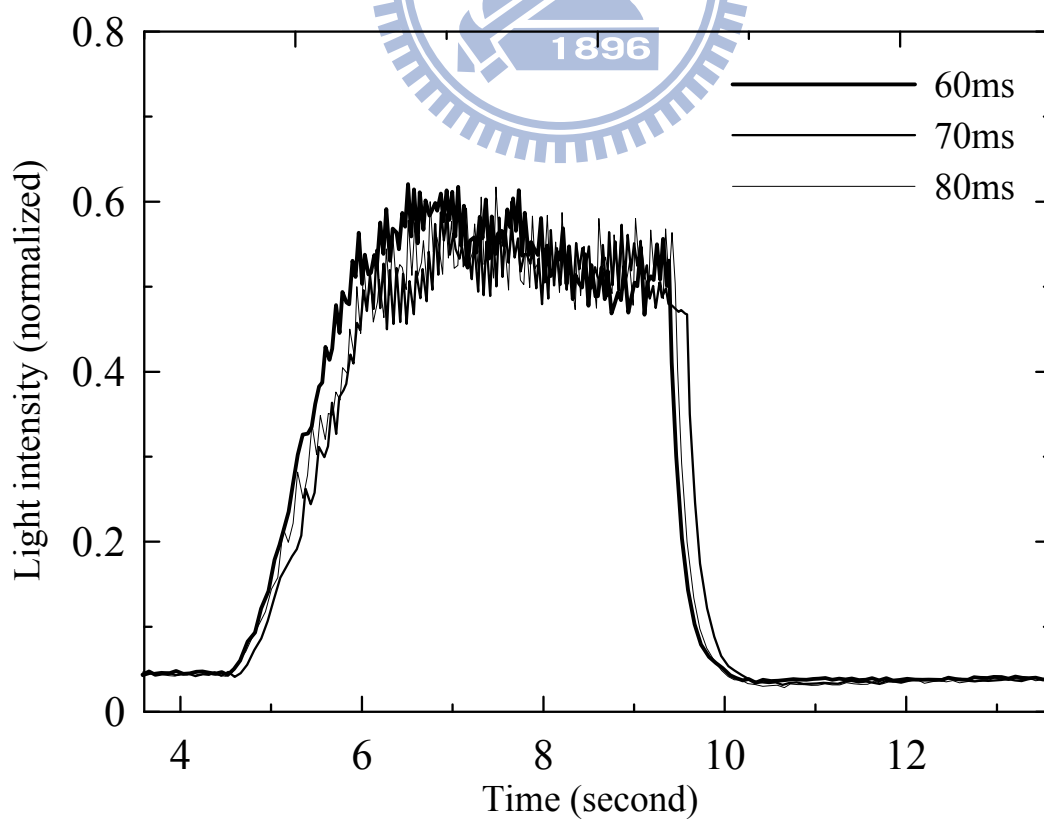


圖 4.16 掃頻時間為 60~80ms，液晶穿透光強的歷時曲線

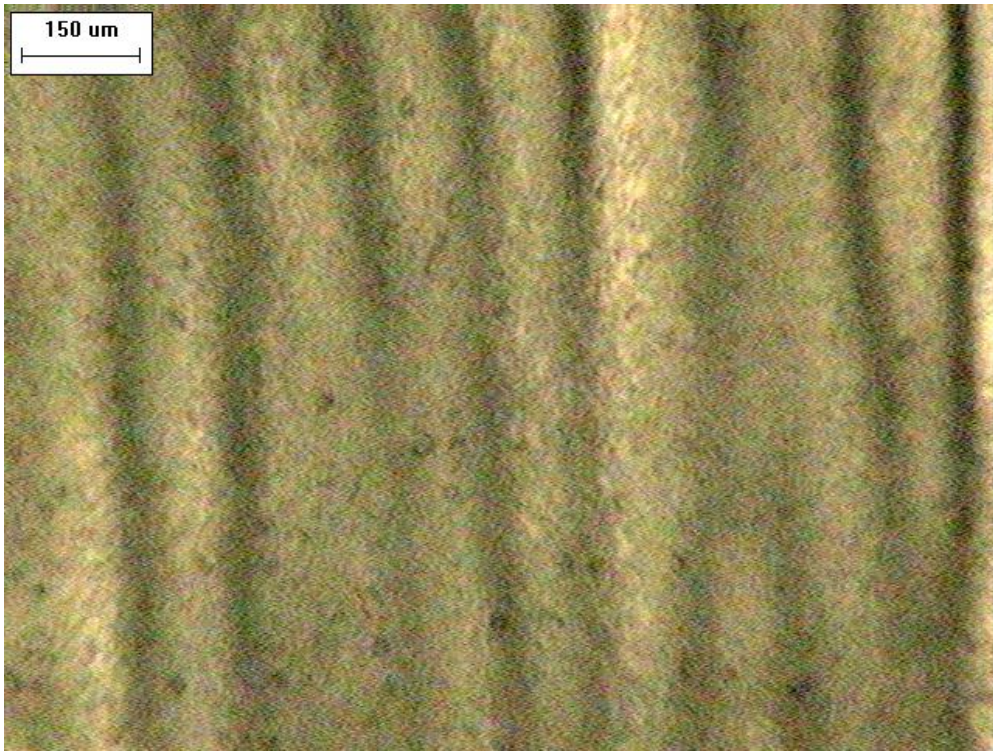


圖 4.17 單一型表面聲波元件(15MHz)所產生之液晶條紋尺寸

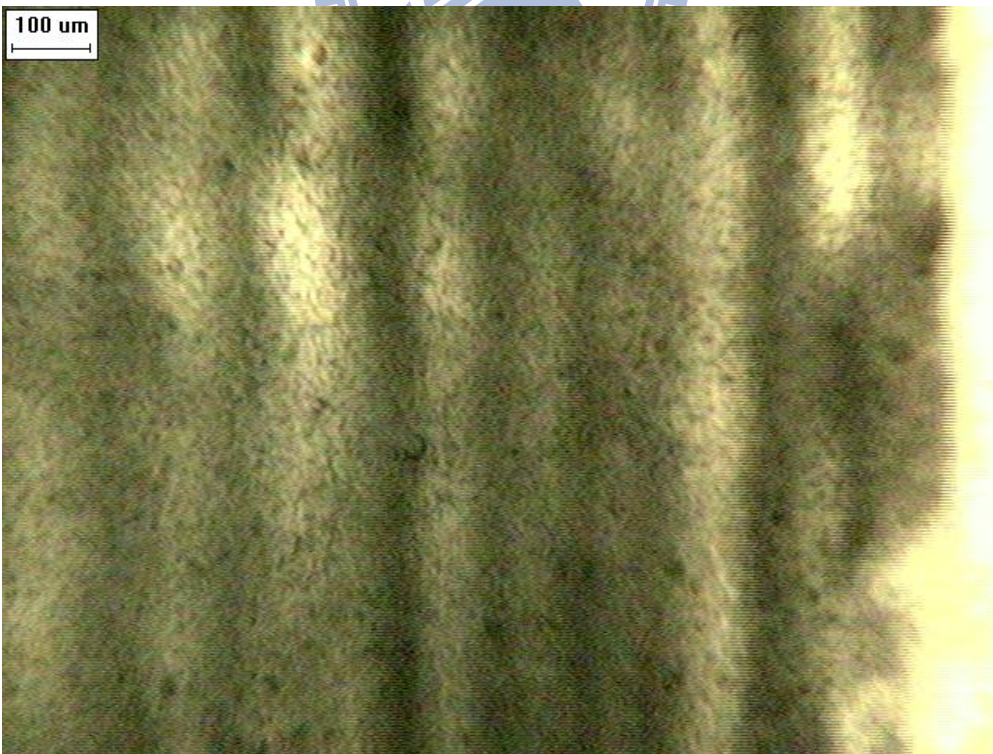
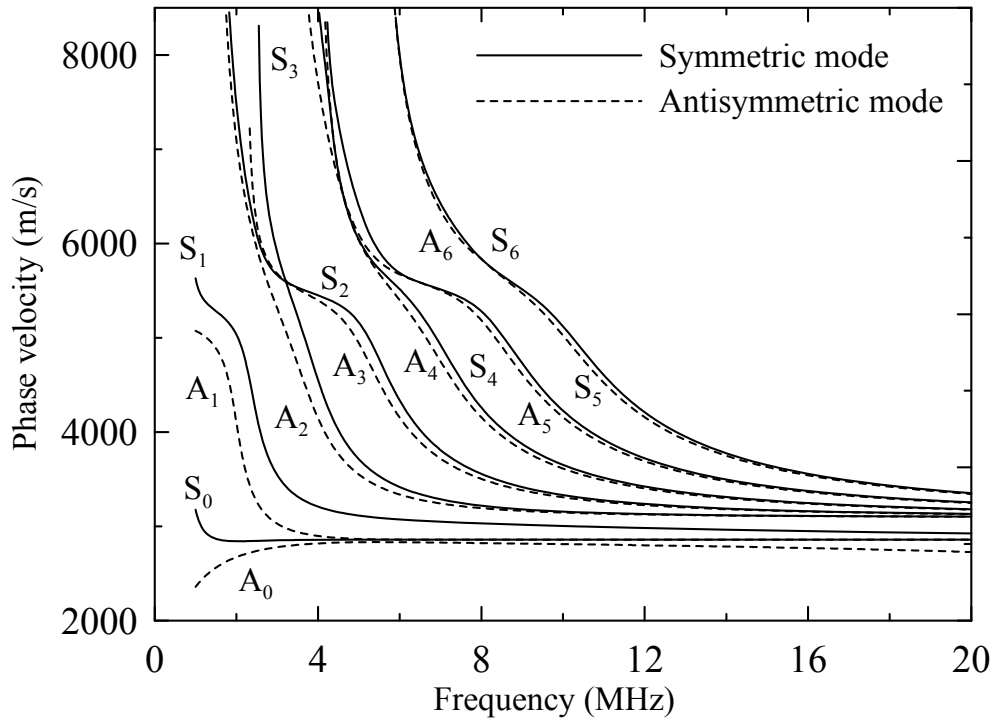
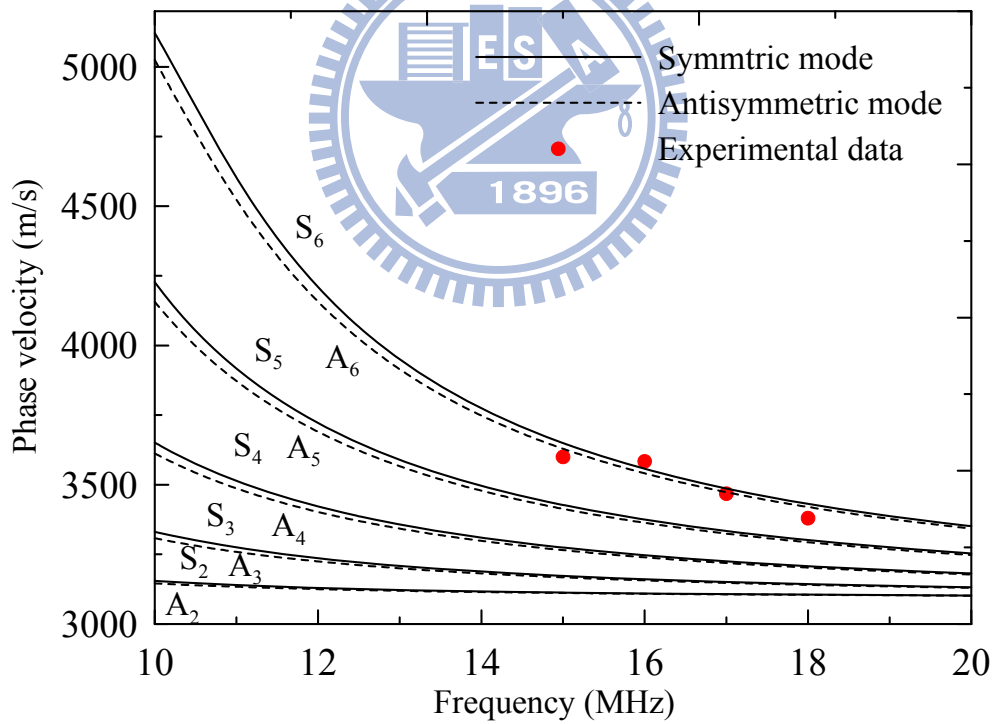


圖 4.18 啁啾型表面聲波元件(15~18MHz)所產生之液晶條紋尺寸





(a)



(b)

圖 4.19 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，試片為  $1100/25/1100 \mu\text{m}$

(a)1~20MHz (b)10~20MHz。

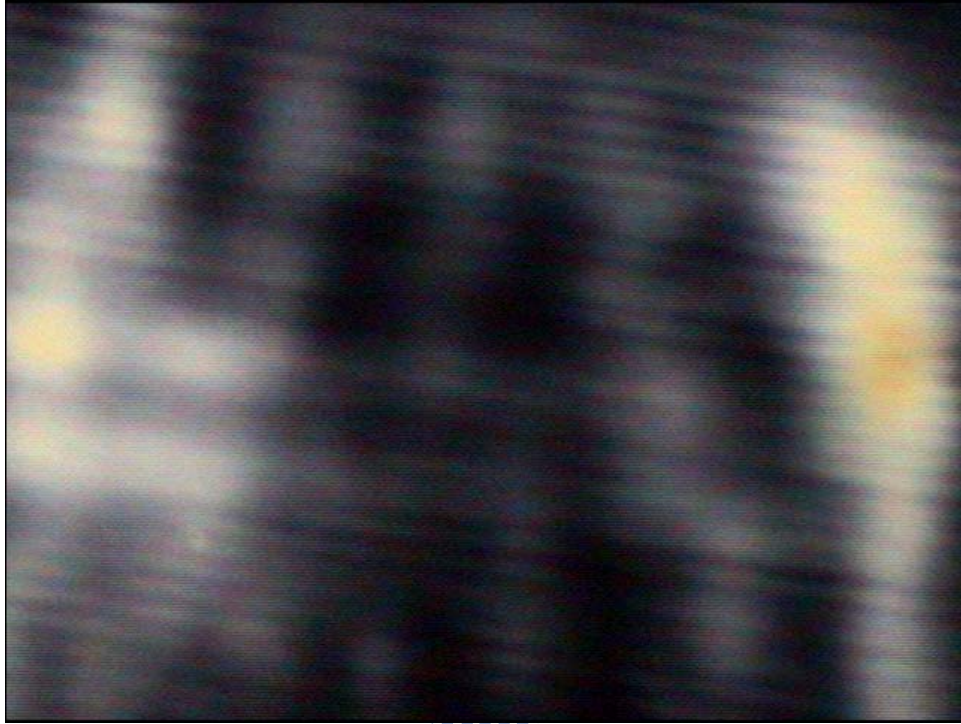


圖 4.20 掃頻時間為 1s 之 CCD 擷取影像



圖 4.21 掃頻時間為 30ms 之 CCD 擷取影像

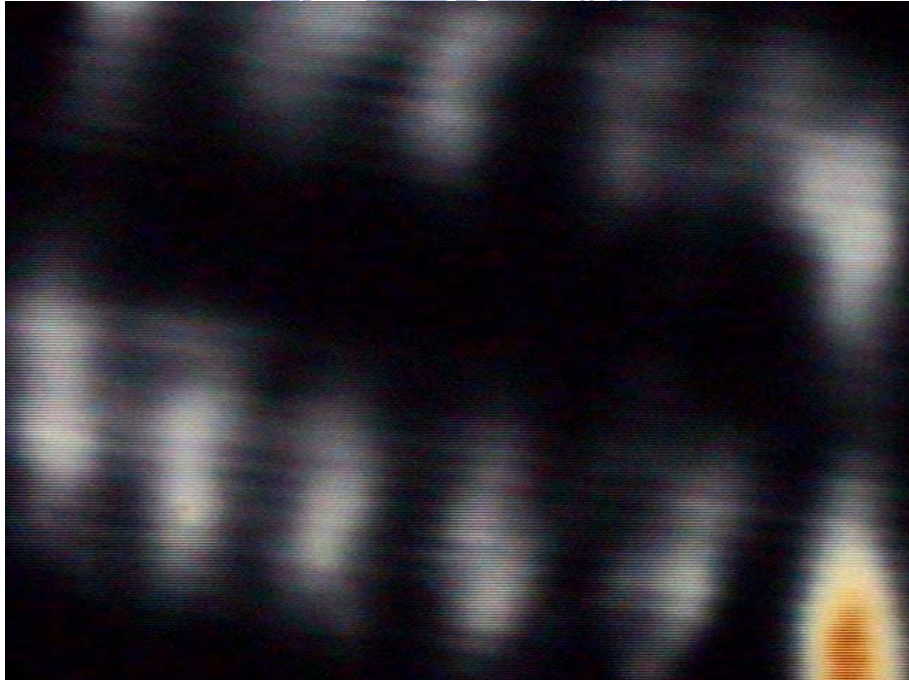


圖 4.22 偏光顯微鏡中 CCD 擷取影像，在  $25\mu\text{m}$  液晶試片內產生垂直於波前方向的聲場流亮暗條紋。

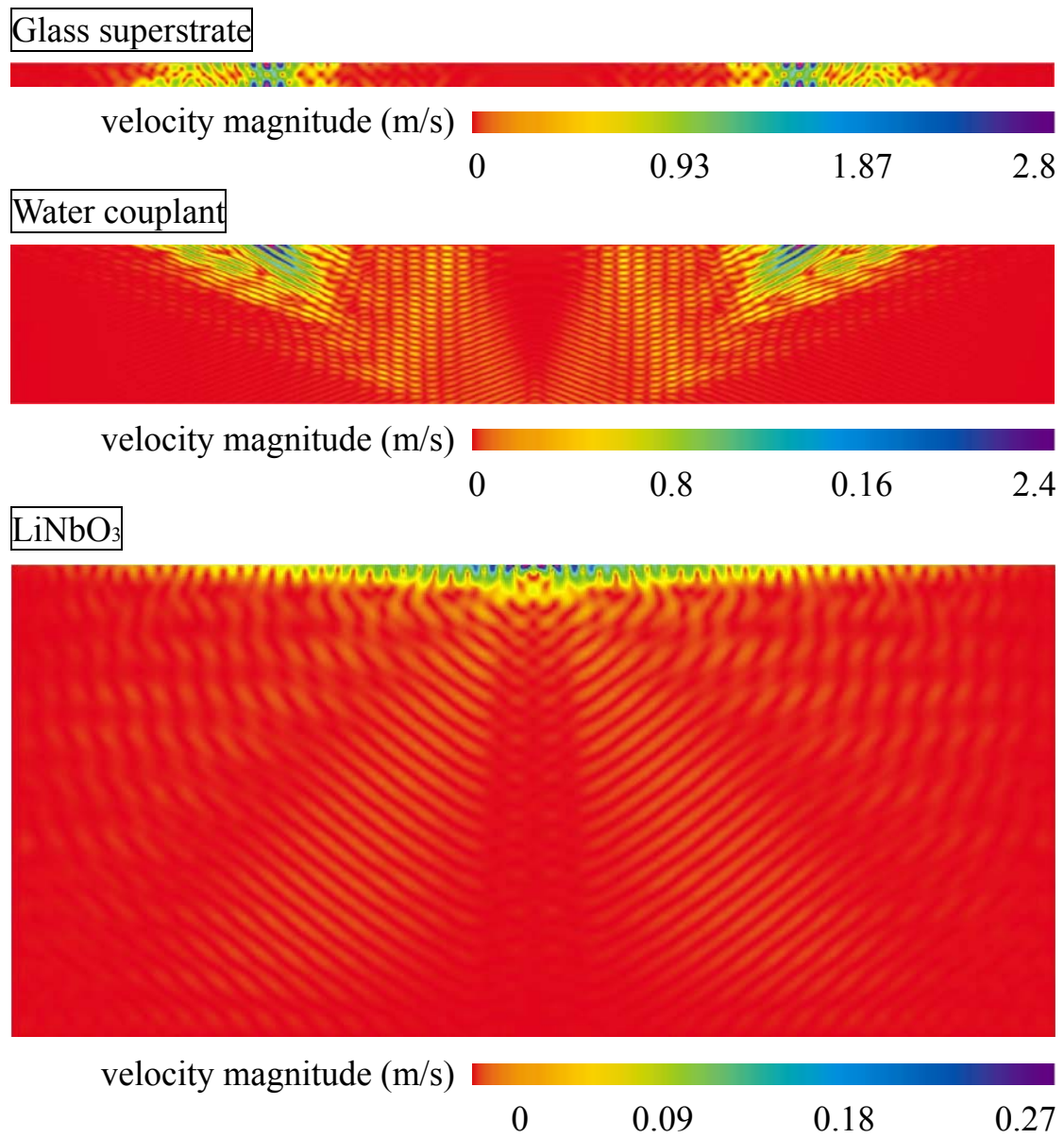


圖 4.23 在鈮酸鋰上激發表面聲波 1750ns 後，能量傳遞至玻璃/水/鈮酸鋰系統的質點速度分佈，引用 Hodgson *et al*[20]的結果。

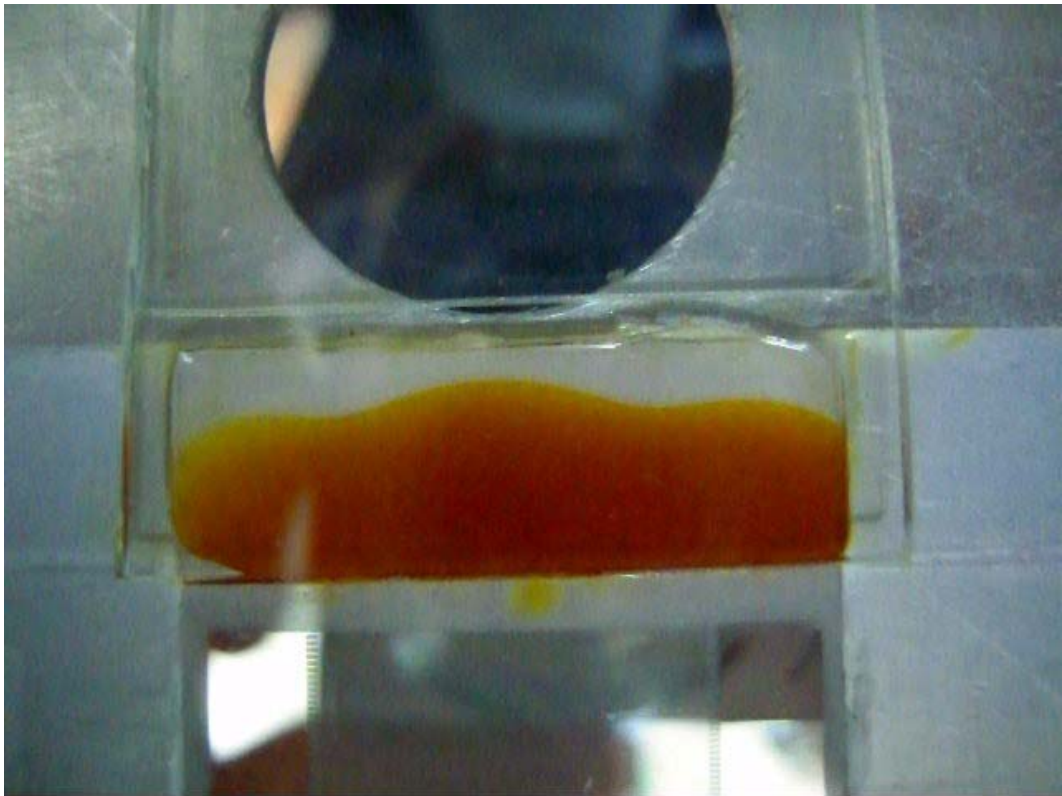


圖 4.24 以碘酒為染料，滴入液體耦合層

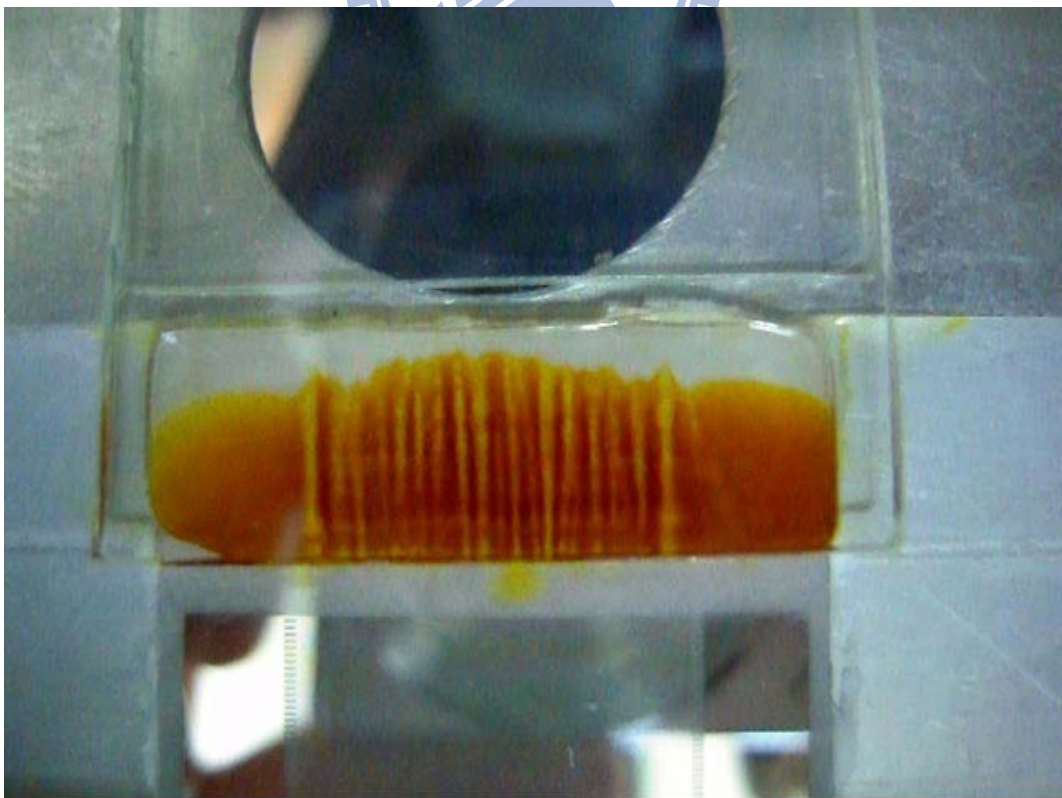
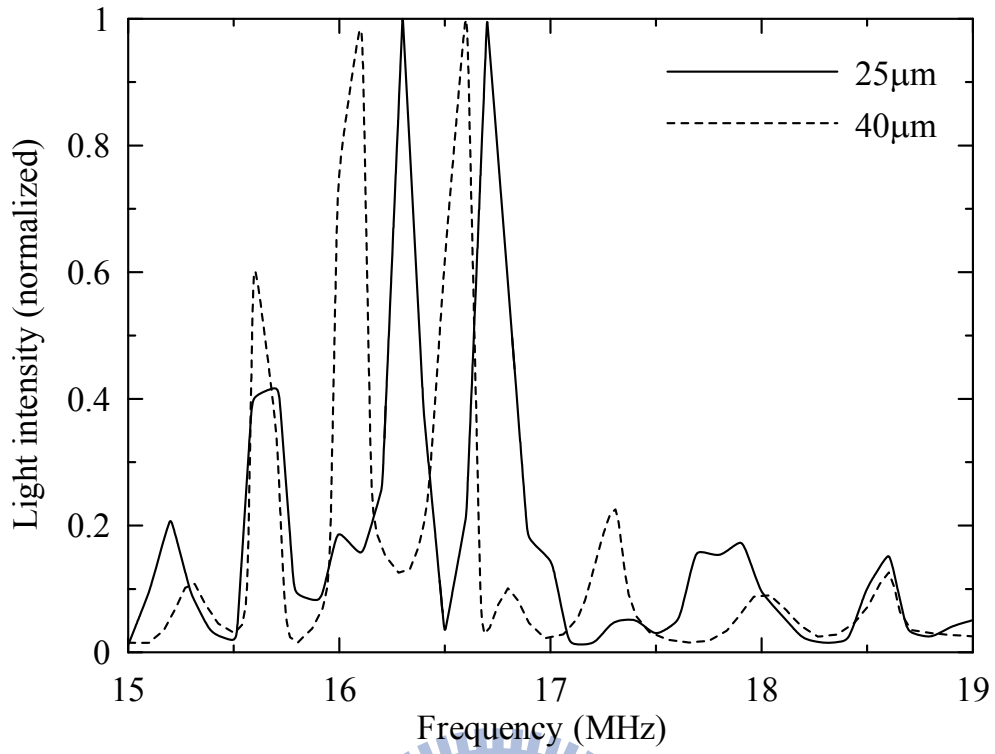
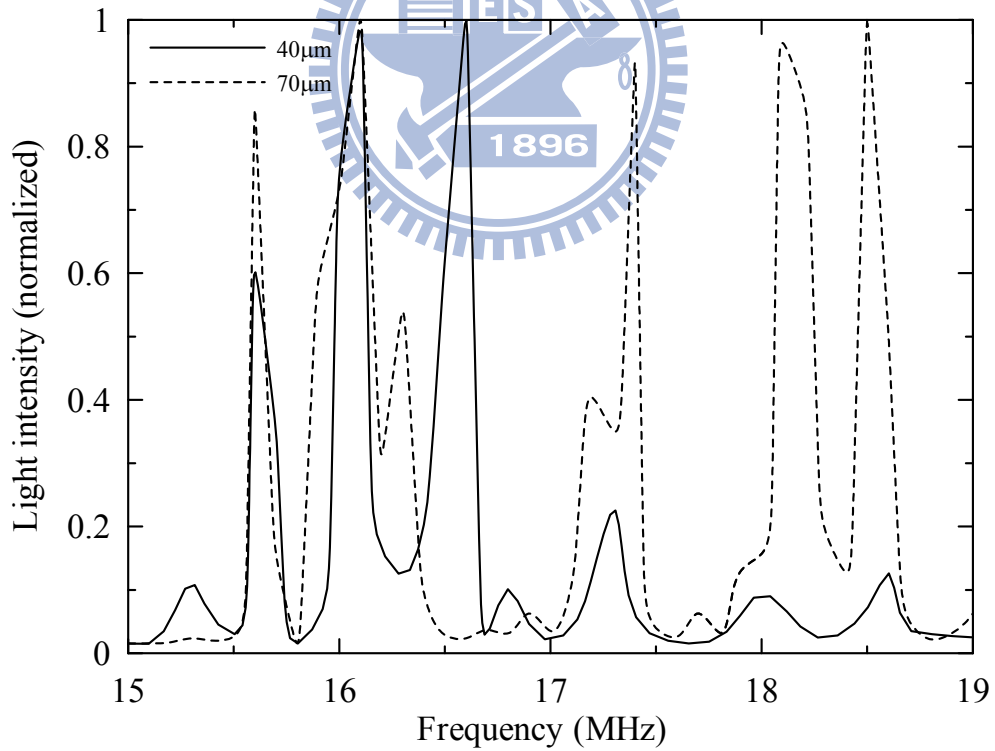


圖 4.25 表面聲波在液體耦合層產生數條垂直於波前之節線



(a)



(b)

圖 4.26 穿透光強度與聲場流產生的聲光效應，液晶層厚度為  
(a)25μm、40μm (b) 40μm、70μm。