

國立交通大學
機械工程學系碩士班
碩士論文

超音波誘發液晶配向層排列之分析

Analysis of Ultrasonic Manipulation for
Alignment Layers of Liquid Crystals

研究生：吳昱瑾

指導教授：尹慶中 博士

中華民國九十九年八月

超音波誘發液晶配向層排列之分析

Analysis of Ultrasonic Manipulation for Alignment Layer of
Liquid Crystals

研究生：吳昱瑾

Student：Yu-Chin Wu

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

A Thesis

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 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年八月

超音波誘發液晶配向層排列之分析

研究生：吳昱瑾

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

配向層聚乙烯醇為長鏈狀分子，在固化過程中，若以無數週期之結構導波所形成的穩定壓力梯度，可誘發配向層分子達成有秩序的排列。本研究將聚乙烯醇層模型化為為具黏滯係數之等向性固體，推導具流體薄層負載之平板結構的聲導波波傳，數值模擬聲導波相速度頻散曲線及各模態的位移、應力、壓力差分佈與質點軌跡，假設聚乙烯醇配向層之厚度與黏度因受熱而改變，推估結構導波產生不同的壓力梯度對其分子排列的影響。數值分析結果顯示，配向層溶液厚度越薄，對結構導波驅動大範圍的配向層排列較為有利，否則應提高表面聲波元件的驅動電壓。配向層溶液黏度越大，或是驅動頻率越高，可以越有效的排列配向層分子。附錄為試片製作與實驗架構，未來可以實驗對照分析結果，作進一步的討論。

關鍵字：聲導波、配向層、聚乙烯醇、超音波操控

Analysis of Ultrasonic Manipulation for Alignment Layers of Liquid Crystals

Student: Yu-Chin Wu

Advisor: Dr. Ching-Chung Yin

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

After being insonified by a large number of ultrasonic cycles during curing process, the long chain poly-vinyl-alcohol (PVA) molecules could be gradually parallel to one another due to acoustic pressure gradient formed in the alignment layer. The thesis presents an investigation on acoustic guided wave propagation in a PVA layer coated on the glass plate. The PVA layer is modeled as a hypothetical isotropic solid with viscosity. Phase velocity dispersion curves and distributions of displacement, stress, and pressure difference are numerically simulated. The pressure difference changes with the variations in thickness and viscosity of PVA layer. It plays an important role on realignment of PVA molecules. The simulated result indicates that thin and large area of PVA fluid layer can be aligned well by ultrasound, otherwise more energy should be applied. Better alignment can be achieved for the PVA layer with higher viscosity or application of higher-frequency ultrasound. The experimental set up is designed and detailedly described in appendix so that prediction can be compared with experimental results in the future.

Keywords: acoustic guided wave, alignment layer, poly-vinyl-alcohol, manipulation with ultrasound.

誌謝

在交大待了六年，即將正式畢業了！

在此感謝指導教授 尹慶中博士兩年來的悉心栽培與教導，使得本論文能順利完成，至上由衷的感謝。同時感謝楊哲化老師及鄭泗東老師撥冗擔任口試委員，給予學生建議與指證，使論文內容更完美。

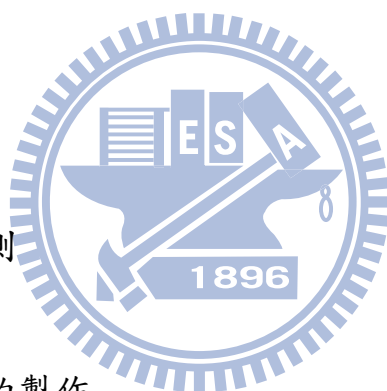
感謝非破壞評估實驗室的博班學長許世明犧牲好幾個回家陪女兒的周末在程式上鼎力相助，由衷感謝。感謝學長游泰和、王多聞、溫子達在學業及實驗上的指導與幫助。感謝學長鍾重光、黃康哲與學姐張逸涵在學業上的幫助，也讓實驗室充滿歡樂。同學賴佑年、鄭博毅，以及大批的學弟們，我會懷念在實驗室與你們歡笑相處的日子。本論文也要感謝交大顯示所林琪文學長、李則賢同學在實驗上的幫助，並感謝交大完善的實驗設備與許多雖然不認是但幫助過我的同學們。

我親愛的爸媽，吳坤申先生與賴芬娟女士，感謝你們在我求學路上的照顧與支持，讓我能專心完成學業，請不用太擔心女兒往後將踏入新的旅程，交大培養出的學生有品質保證。最後，謹以此論文獻給我摯愛的家人、師長與朋友。

目錄

| | 頁次 |
|----------------------|-----|
| 摘要 | i |
| 目錄 | iii |
| 表目錄 | iv |
| 圖目錄 | v |
| 第一章 緒論 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 文獻回顧 | 1 |
| 1.2.1 界面聲波發展與聲導波研究 | 2 |
| 1.2.2 超音波影響微小分子排列之研究 | 3 |
| 1.3 研究簡介 | 4 |
| 第二章 理論說明 | 6 |
| 2.1 壓電晶體之壓電特性 | 6 |
| 2.2 表面聲波元件之檢測 | 6 |
| 2.3 配向技術 | 7 |
| 2.3.1 配向技術 | 7 |
| 2.3.2 配向材料 | 8 |
| 2.3.3 排列機制 | 9 |
| 2.4 碘系偏光膜 | 10 |
| 2.5 聲導波波傳 | 10 |
| 2.5.1 等向性黏滯性液體之材料常數 | 10 |
| 2.5.2 等向性平板應力與位移表示式 | 13 |
| 2.5.3 等向性流體應力與位移表示式 | 15 |

| | | |
|-------|-----------------------|----|
| 2.5.4 | 具流體薄層負載平板之應力與位移表示式 | 16 |
| 2.5.5 | 時間平均功率流密度 | 17 |
| 第三章 | 數值分析 | 24 |
| 3.1 | 複數尋根—曲線追蹤法 | 24 |
| 3.2 | 數值分析結果討論 | 26 |
| 3.2.1 | 具流體薄層負載結構之頻散曲線 | 26 |
| 3.2.2 | 具流體薄層負載結構之位移、應力與壓力差分佈 | 26 |
| 3.2.3 | 具流體薄層負載結構之二維平面壓力差分佈 | 27 |
| 3.2.4 | 具流體薄層負載結構之質點軌跡 | 28 |
| 第四章 | 結論與展望 | 75 |
| 4.1 | 結論 | 75 |
| 4.2 | 未來展望 | 76 |
| 參考文獻 | | 77 |
| 附錄 | 實驗架構與量測 | 81 |
| A.1 | 試片的準備 | 81 |
| A.2 | 表面聲波元件的製作 | 82 |
| A.2.1 | 壓電基板的選擇條件 | 82 |
| A.2.2 | 指叉電極製作 | 83 |
| A.3 | 實驗平台設計 | 84 |
| A.4 | 配向層檢測方法 | 84 |
| A.4.1 | 液晶分子之觀察 | 84 |
| A.4.2 | 碘系偏光膜觀察 | 85 |



圖目錄

| | 頁次 |
|--|----|
| 圖 2.1 指叉換能器電性示意圖 | 19 |
| 圖 2.2 指叉換能器示意圖 | 19 |
| 圖 2.3 散射參數示意圖 | 20 |
| 圖 2.4 反射及傳輸功率比示意圖 | 20 |
| 圖 2.5 聚乙烯醇化學結構示意圖 | 21 |
| 圖 2.6 碘離子長鏈吸收偏振光示意圖 | 21 |
| 圖 2.7 等向性平板示意圖 | 22 |
| 圖 2.8 具流體薄層負載平板示意圖 | 22 |
| 圖 3.1 glass (1 mm)在波數-頻率域的聲導波頻散曲線 | 29 |
| 圖 3.2 波數 k_{real} 固定下，對 (k_{imag}, ω) 的尋根示意圖 | 29 |
| 圖 3.3 應用外差法對頻散曲線作軌跡追蹤 | 30 |
| 圖 3.4 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm)的 相速度頻散曲線比較 | 30 |
| 圖 3.5 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm)的 相速度頻散曲線比較之局部放大圖 | 31 |
| 圖 3.6 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) A_0 模態的 波數衰減曲線比較 | 31 |
| 圖 3.7 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) A_1 模態的 波數衰減曲線比較 | 32 |

| | | |
|--------|--|----|
| 圖 3.8 | 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) A_2 模態的 波數衰減曲線比較 | 32 |
| 圖 3.9 | 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) A_3 模態的 波數衰減曲線比較 | 33 |
| 圖 3.10 | 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) S_0 模態的 波數衰減曲線比較 | 33 |
| 圖 3.11 | 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) S_1 模態的 波數衰減曲線比較 | 34 |
| 圖 3.12 | 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) S_2 模態的 波數衰減曲線比較 | 34 |
| 圖 3.13 | 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) S_3 模態的 波數衰減曲線比較 | 35 |
| 圖 3.14 | 不同黏滯係數 fluid ($10 \mu\text{m}$) / glass (1 mm) A_0 模態的 波數衰減曲線比較 | 35 |
| 圖 3.15 | 不同黏滯係數 fluid ($1 \mu\text{m}$) / glass (1 mm) A_1 模態的 波數衰減曲線比較 | 36 |
| 圖 3.16 | 不同黏滯係數 fluid ($10 \mu\text{m}$) / glass (1 mm) A_2 模態的 波數衰減曲線比較 | 36 |
| 圖 3.17 | 不同黏滯係數 fluid ($10 \mu\text{m}$) / glass (1 mm) A_3 模態的 波數衰減曲線比較 | 37 |
| 圖 3.18 | 不同黏滯係數 fluid ($10 \mu\text{m}$) / glass (1 mm) S_0 模態的 波數衰減曲線比較 | 37 |
| 圖 3.19 | 不同黏滯係數 fluid ($10 \mu\text{m}$) / glass (1 mm) S_1 模態的 波數衰減曲線比較 | 38 |

| | |
|---|----|
| 圖 3.20 不同黏滯係數 fluid ($10 \mu\text{m}$) / glass (1 mm) S_2 模態的 波數衰減曲線比較 | 38 |
| 圖 3.21 不同黏滯係數 fluid ($10 \mu\text{m}$) / glass (1 mm) S_3 模態的 波數衰減曲線比較 | 39 |
| 圖 3.22 Lamé 模態之體積變化示意圖 | 39 |
| 圖 3.23 fluid ($10 \mu\text{m}$, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 A_0 模態之(a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差 與時間平均功率流密度分佈 | 40 |
| 圖 3.24 fluid ($10 \mu\text{m}$, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 A_0 模態之(a)液體層與固體層、(b)液體層之位移模態 | 41 |
| 圖 3.25 fluid ($10 \mu\text{m}$, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 S_0 模態之(a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差 與時間平均功率流密度分佈 | 42 |
| 圖 3.26 fluid ($10 \mu\text{m}$, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 S_0 模態之(a)液體層與固體層、(b)液體層之位移模態 | 43 |
| 圖 3.27 fluid ($10 \mu\text{m}$, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 A_0 模態之(a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差 與時間平均功率流密度分佈 | 44 |
| 圖 3.28 fluid ($10 \mu\text{m}$, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 A_0 模態之(a)液體層與固體層、(b)液體層之位移模態 | 45 |
| 圖 3.29 fluid ($10 \mu\text{m}$, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 S_0 模態之(a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差 與時間平均功率流密度分佈 | 46 |
| 圖 3.30 fluid ($10 \mu\text{m}$, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 S_0 模態之(a)液體層與固體層、(b)液體層之位移模態 | 47 |

| | |
|--|----|
| 圖 3.31 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A ₀ 模態之(a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差 與時間平均功率流密度分佈 | 48 |
| 圖 3.32 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A ₀ 模態之(a)液體層與固體層、(b)液體層之位移模態 | 49 |
| 圖 3.33 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A ₁ 模態之(a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差 與時間平均功率流密度分佈 | 50 |
| 圖 3.34 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A ₁ 模態之(a)液體層與固體層、(b)液體層之位移模態 | 51 |
| 圖 3.35 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₀ 模態之(a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差 與時間平均功率流密度分佈 | 52 |
| 圖 3.36 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₀ 模態之(a)液體層與固體層、(b)液體層之位移模態 | 53 |
| 圖 3.37 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₁ 模態之(a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差 與時間平均功率流密度分佈 | 54 |
| 圖 3.38 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₁ 模態之(a)液體層與固體層、(b)液體層之位移模態 | 55 |
| 圖 3.39 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1~10 MHz 的 A ₀ 模態之固體層位移分佈 | 56 |
| 圖 3.40 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1~10 MHz 的 S ₀ 模態之固體層位移分佈 | 57 |

| | |
|--|----|
| 圖 3.43 fluid (0.1 m, 0.1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₀ 模態之 X ₁ 與 X ₃ 構成的二維平面壓力分佈 | 59 |
| 圖 3.44 fluid (10 μm, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₀ 模態之 X ₁ 與 X ₃ 構成的二維平面壓力分佈 | 59 |
| 圖 3.45 fluid (1 μm, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₀ 模態之 X ₁ 與 X ₃ 構成的二維平面壓力分佈 | 60 |
| 圖 3.46 fluid (0.1 μm, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₀ 模態之 X ₁ 與 X ₃ 構成的二維平面壓力分佈 | 60 |
| 圖 3.47 fluid (10 μm, 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₀ 模態之 X ₁ 與 X ₃ 構成的二維平面壓力分佈 | 61 |
| 圖 3.48 fluid (1 μm, 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₀ 模態之 X ₁ 與 X ₃ 構成的二維平面壓力分佈 | 61 |
| 圖 3.49 fluid (0.1 μm, 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₀ 模態之 X ₁ 與 X ₃ 構成的二維平面壓力分佈 | 62 |
| 圖 3.50 fluid (10 μm, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 A ₀ 模態之界面質點之軌跡 | 63 |
| 圖 3.51 fluid (10 μm, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 S ₀ 模態之界面質點之軌跡 | 63 |
| 圖 3.52 fluid (10 μm, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 A ₀ 模態之界面質點之軌跡 | 64 |
| 圖 3.53 fluid (10 μm, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 S ₀ 模態之界面質點之軌跡 | 64 |
| 圖 3.55 fluid (10 μm, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A ₁ 模態之界面質點之軌跡 | 65 |

| | |
|--|----|
| 圖 3.56 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₀ 模態之界面質點之軌跡 | 66 |
| 圖 3.57 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₁ 模態之界面質點之軌跡 | 66 |
| 圖 3.58 fluid (10 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 A ₀ 模態之界面質點之軌跡 | 67 |
| 圖 3.59 fluid (10 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 S ₀ 模態之界面質點之軌跡 | 67 |
| 圖 3.60 fluid (10 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A ₀ 模態之界面質點之軌跡 | 68 |
| 圖 3.61 fluid (10 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A ₁ 模態之界面質點之軌跡 | 68 |
| 圖 3.62 fluid (10 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₀ 模態之界面質點之軌跡 | 69 |
| 圖 3.63 fluid (10 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₁ 模態之界面質點之軌跡 | 69 |
| 圖 3.64 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 A ₀ 模態之界面質點之軌跡 | 70 |
| 圖 3.65 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 S ₀ 模態之界面質點之軌跡 | 70 |
| 圖 3.66 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 A ₀ 模態之界面質點之軌跡 | 71 |
| 圖 3.67 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 S ₀ 模態之界面質點之軌跡 | 71 |

| | |
|--|----|
| 圖 3.69 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A ₁ 模態之界面質點之軌跡 | 72 |
| 圖 3.70 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₀ 模態之界面質點之軌跡 | 73 |
| 圖 3.71 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S ₁ 模態之界面質點之軌跡 | 73 |
| 圖 A.1 1 MHz 表面聲波元件設計圖 | 86 |
| 圖 A.2 相位相差 $\frac{\pi}{2}$ 之兩組指叉電極示意圖 | 86 |
| 圖 A.3 實驗架構示意圖 | 87 |
| 圖 A.4 表面聲波驅動元件及玻璃波導的結合示意圖 | 87 |
| 圖 A.5 表面聲波誘發配向層分子排列之實驗架構示意圖 | 88 |
| 圖 A.6 摩刷後的配向層與偏振光夾角示意圖 | 88 |



表目錄

| | 頁次 |
|--------------------|----|
| 表 2.1 散射參數之特性 | 23 |
| 表 3.1 數值計算採用的材料常數 | 74 |
| 表 A.1 PZT-5A 之材料係數 | 89 |
| 表 A.2 指叉電極幾何參數 | 89 |



第一章 緒 論

1.1 研究背景

配向技術為目前平面顯示面板產業相當重要的製程之一，此技術可直接決定面板產品的品質好壞，目前產業界使用之摩刷配向技術雖具有一定的品質與水準，但仍有待改進的空間。現今已有許多不同於摩刷配向的技術正在研發當中，卻一直無法超越摩刷配向的所有優點，例如：品質、成本、量產性或均勻性等特性，因此，如何改善或取代摩刷配向技術為目前各界所關切的議題。

超音波駐波用於操控微小物質是一新型的研究技術，過去有學者利用此技術控制氣泡位置、微粒的排列或奈米碳管的方向，獲得到良好的效果，但其實際應用性較低，鮮少有人將此應用於實際製程技術上。本研究在不同操作條件下驅動超音波，造成配向層高分子產生配向效果，希望從其中尋得最佳操縱參數。

然而配向層分子微小，如何直接觀察其受到超音波影響後的排列結果為一研究重點，2009年，張逸涵[1]的研究中，利用傅立葉轉換紅外線光譜儀(Fourier transform infrared spectrometry, FTIR)檢測配向層的異向性，但使用 FTIR 做檢測，需選擇鹽片作為試片基材，鹽片昂貴，可重複使用，但清洗不易，可能因測試材料殘留造成實驗誤差，試片大小也受到限制。本研究使用聚乙烯醇(Poly-vinyl-alcohol, PVA)作為配向材料，可染入碘分子，以線偏光鏡觀察分子排列的狀態。

1.2 文獻回顧

1.2.1 界面聲波發展與聲導波研究

1917 年，Lamb [2]發現在自由邊界之等向性平板中，存在一種沿平板傳遞的頻散波，稱之藍姆波(Lamb waves)。藍姆波侷限於平板上下表面之間，在厚度方向分為對稱與反對稱的彈性波。因在厚度方向維持共振模態，具有波傳距離長、衰減小的特性。當頻率跟厚度之乘積趨近於無窮大時，藍姆波之特徵方程會蛻變為雷利表面聲波(Rayleigh surface acoustic waves)之特徵方程式。

1948 年，Scholte [3]發現沿著固液界面，存在一種相速度略低於液體聲波波速的波傳模態，固體中大部分的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 Scholte waves。

1992 年，Zhu 與 Wu [4]推導單層平板浸沒於無限域黏滯性液體中，及平板浸沒於有限厚度黏滯性液體的彈性波頻散方程式。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 的理論，將三明治結構中的黏滯性液體假設為類似等向性固體(hypothetical isotropic solid)的介質，模擬流體於不同黏滯係數時，相速度的變化。他們經由數值模擬，發現無論將薄板浸沒或覆著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。使原本位於固液界面的橢圓偏振轉變為垂直於表面的線偏振狀態。同年，Hassan 與 Nagy [7]探討此結構的液體層在低頻時的頻散現象，並使用雷射干涉技術量測掃頻時液體的相速度變化，驗證數值模擬的結果。

2003 年，Hosten 與 Castaings [8]以表面阻抗矩陣法(surface impedance

matrices)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，並數值計算位移與應力的分佈。

1.2.2 超音波影響微小分子排列之研究

1971年，Crum [9]將壓電陶瓷換能器置於上方密封之玻璃細管的正下方，玻璃管內裝滿液體及其他成分之液滴。於換能器施加電壓，在玻璃管內液體間形成駐波，駐波能量可平衡液滴浮力與重力，使液滴懸浮於其中，作者由實驗及理論計算，求得驅動液滴靜止平衡所需的最小能量。

1995年，Hertz [10]將兩個鋇鈦酸鉛(lead zirconate titanate, PZT)換能器分別沒於液體底部與液面下方，兩換能器面相對，調整其相對距離使聚焦點在同一位置上。施加 11 MHz 的交流電後，兩個壓電換能器所產生的駐波可使液體內之直徑 2.1 μm 玻璃球聚集並排列於節點上，但因液體內聲場流(acoustic streaming)現象，作用力不穩定，玻璃球之規律性排列僅限於一定範圍內。

2003年，Haake *et al* [11]將超音波換能器於玻璃板側面激發剪力波，使玻璃板下方液體內之玻璃球排列於節點處，藉由改變驅動頻率與換能器位置，可改變玻璃球聚集位置。同時驅動玻璃板之相臨兩側面的超音波換能器，使玻璃板產生二維的振動模態，下方的玻璃球則聚集成交錯的直線狀與橫線狀排列。

2004年，Strobl *et al* [12]以表面聲波排列奈米碳管之方向。奈米碳管懸浮於一液體中，以玻璃覆蓋並置於鈮酸鋰基材之上，鈮酸鋰晶體上的表面聲波元件生成的超音波，洩露進入間隙為 20 μm 的奈米碳管懸浮液中。作者先以乳膠球狀物取代奈米碳管，乳膠球在表面聲波的影響下會聚成條狀，且與波傳方向垂直，相鄰條紋的間距為一半的驅動波長，證明此為表

面聲波造成之駐波效應。當驅動之懸浮物改為奈米碳管時，其排列方向則會與波傳方向夾 25° 到 45° 。作者認為此現象是液體受表面聲波影響而產生旋渦(vortex)流動的效應。

2008 年，Alvarez *et al* [13]將高分子與溶劑混合之液滴，以細針針尖滴在表面聲波元件之鈦酸鋰基材上，表面聲波受激發後，傳遞經過此液滴，會以很高的速率將此液滴向前推去，後方僅留下極薄的高分子薄膜，薄膜會因表面聲波引起的振動反應與溶劑蒸發之作用，薄膜在反節點處發生破裂，留下之高分子排列均勻且呈週期性分佈。

同年，Friend *et al* [14]使用與 Alvarez *et al* [13]類似之驅動方式，進一步考慮表面聲波傳入液滴時，會以一毛細(capillary)波之形式傳入液體表面，形成一頻率較低的波動，液體內的奈米粒子因加了表面活性劑，會懸浮於毛細波能量影響之處，作者利用此作用力，將奈米粒子聚集成直徑相當的粒子團。

2009 年，Wood *et al* [15]以不同於 Haake *et al* [11]的方法，採用表面聲波元件取代剪力波換能器，自互相垂直的方向，將表面聲波傳入一含有懸浮微粒的液體中，可精確的製造出二維粒子陣列。

1.3 研究簡介

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。元件的製作是以壓電材料為基底，於壓電材料表面以網版印刷印製金屬電極，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 electrodes, IDT)。施以適當頻率的交流電壓訊號於指叉電極，可激發表面聲波，朝正、負軸方向波傳。表面聲波經過 IDT，亦會產生電流，轉換成電壓訊號接收。

本研究使用表面聲波元件激發試片中的結構導波，在聚乙烯醇(PVA)

層內造成壓力差，改變其分子的排列，達到配向的效果。

全文共分四章，第二章介紹表面聲波元件製作、簡述配向層材料及配向機制，並將聚乙烯醇層視作具黏滯係數的等向性液體，推導聲導波在配向層與玻璃間的波傳行為。第三章以數值方式計算試片結構波傳的相速度頻散曲線，探討流體層厚度與黏滯係數對其頻散曲線的影響，並分析結構導波在流體層內造成的壓力差。第四章為結論與未來工作展望。



第二章 理論說明

2.1 壓電晶體之壓電特性

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)。當應力方向相反時，電荷的極性，亦會隨之而相反，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，當電場的方向相反時，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，稱為逆壓電效應(converse piezoelectric effect)，如圖 2.1 所示。由於單晶壓電材料激發之結構導波向四方傳遞，若以指叉電極(inter-digital transducer, IDT)激發結構導波，不僅能量集中於特定方向，還可以選擇特定波長，生成窄頻的結構導波。

參考圖 2.2 所示，在銦錫酸鉛壓電晶體 PZT-5A 的表面製作指叉電極，電極之間的節距(pitch)為 p ，產生的結構導波長為兩倍節距，假設相速度為 v_R ，則該聲波元件之中心頻率為 $f_0 = v_R / 2p$ 。

2.2 表面聲波元件之檢測

本研究採用採用 HP 8751A 網路分析儀量測表面聲波元件的散射參數。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，利用入射波傳遞至待測物(device under test, DUT)所產生的穿透波和反射波的振幅和相位，描述該待測物的頻譜特性。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 2.3 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。

選擇適當的測量方式，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 2.4 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

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

S_{11} 、 S_{21} 、 S_{22} 及 S_{12} 四個散射參數的特性列於表 2.1 中。

2.3 配向技術

2.3.1 配向方法

目前的顯示技術[16]-[17]是以一光源穿透液晶層與其他光學元件為主要架構，由於液晶分子為具有雙折射性質的棒狀分子，分子長軸與玻璃基板所夾的角度不同，會有不同的相位延遲產生，造成不同的穿透光強，達到灰階效果。主要技術在於探討施加不同電場與未施加電場時之液晶分子的排列方式，液晶分子具有永久偶極，施加電場可讓液晶分子轉動，如何在未施加電場時控制液晶分子之排列，是另一重要技術。液晶分子間有一相互作用力使其排列整齊，但液晶分子在玻璃基板上的排列則需要藉配向層分子加以控制，方能達到穿透光強均勻的目的，使配向層分子具有配向效果之技術則稱為配向技術。

配向技術[18]可分為接觸式配向與非接觸式配向，接觸式配向包含摩刷配向、薄膜剝去法、模具壓製、Langmuir-Blodgett 薄膜。非接觸式配向包含斜向蒸鍍法、光配向、離子束配向、電漿束配向。目前產業界最常使用的方法為摩刷配向法。

摩刷配向法是將均勻塗佈配向層後的玻璃置於移動平台上，旋轉一包覆絨布的滾輪，並接觸單方向移動之玻璃，在配向層分子薄膜上產生細微溝槽。Berreman [19]曾指出，此細微溝槽會使得長棒狀之液晶分子受拘束而順其排列，使整個系統趨於最低自由能的穩定狀態，達到配向液晶分子之效果，此理論稱為溝槽配向(groove alignment)機制。Geary et al [20]則提出另一種說法，在絨布摩刷配向層分子時，高分子配向層受到同一方向之摩擦力作用，表面的鏈狀分子會產生一順向性分佈。當液晶分子與此鏈狀分子排列相同時，可使兩者之間的交互作用能量最低，液晶分子可穩定排列，此理論稱為高分子鏈配向(polymer chain alignment)。摩刷配向法的優點為技術成熟、成本較低、穩定性高，但在接觸式配向的製程過程，容易有靜電產生而累積灰塵、毛屑掉落、大面積配向不均等問題。

2.3.2 配向材料

顯示面板製程中，被廣泛應用的配向層材料為聚亞醯胺(polyimide, PI)，具有耐熱性、低介電常數、韌性佳等優點。但聚亞醯胺需要使用有機溶劑配製，固化溫度也較高(200°C)，相對影響到製程的工作溫度。

本實驗選擇使用一般實驗室常用的水平配向材料聚乙烯醇，化學結構如圖 2.5。聚乙烯醇是一種白色到微黃色的顆粒或粉末，安定、無毒的水溶性高分子，能溶於含 OH 基的極性溶劑中，不溶於幾乎所有的非極性溶劑，水是聚乙烯醇良好的溶劑，在實用的觀點來看，水也是唯一有效的溶劑。

聚乙烯醇具有良好的造膜性，形成的膜具有優異的接著力、耐溶劑性、耐摩擦性、伸張強度與氧氣阻絕性。因為聚乙烯醇同時擁有親水基及疏水基兩種官能基，而具有界面活性的性質，因此聚乙烯醇可以做為高分子乳化、懸浮聚合反應時的保護體。以上這些特有的性質使 PVA 廣泛地應用在各行各業。

2.3.3 排列機制

使用絨布滾輪摩刷配向層表面時，絨布上細小的絨毛會施加一同方向的作用力於配向層表面之分子，分子會因此作用力改變排列，改變的方式分為兩種[21]，第一種是面內重排(in-plane reorientation)，配向層分子之主鏈(main chain)會於玻璃基板平面上沿著摩刷作用力之方向排列，第二種是面外重排(out-of-plane reorientation)，配向層分子因摩刷的作用，分子長軸會與玻璃基板夾一角度，稱為傾斜角(tilt angle)。預傾角定義為玻璃基板表面之液晶分子長軸與基板所夾的角度，預傾角除了與分子材料有關，也與摩刷配向技術中的摩刷強度有關，摩刷強度越大，液晶之預傾角越大[22]。

目前主要的顯示技術有 TN (twisted nematic)型、IPS (in-plane switching)型以及 MVA (multi-domain vertical alignment)型，其中 TN 型與 IPS 型之液晶分子長軸趨向於與玻璃基板平行排列，各需要不同的預傾角，以達到最佳的顯示效能。

TN 型：將向列型液晶夾在兩片玻璃中間組成。這種玻璃的表面上先鍍有一層透明而導電的氧化銦錫(ITO)薄膜，當作電極之用。在 ITO 玻璃上旋轉塗佈配向層，上下基板各做水平配向處理，角度互呈 90 度排列，兩偏振片之偏振方向互相垂直，其控制光源通過與否的機制如圖 2.8 所示。在施加電場時，液晶分子長軸會從平行於玻璃基板排列，趨向於與玻璃基板垂直，若液晶分子之預傾角為 0 度，會造成各液晶分子轉動方向不同，因此預傾角可為 4 到 6 度，限制其轉動方向，如此可避免不均勻亮度的情況發生，且可縮短反應時間。

IPS 型：使用之液晶與 ITO 玻璃相同於 TN 型技術。此技術屬於常暗模式，在沒有外加電場作用的情況下呈現暗態，控制光源通過與否的機制如圖 2.9 所示，細條型正負電極以等距的間隔排列於基板上，施加電壓後，

原來平行於電極的液晶分子會旋轉到與電極垂直的方向，但是液晶分子的長軸仍平行於基板。控制驅動電壓的大小，使液晶分子旋轉到需要的角度，改變穿透光的偏振方式，配合偏振片調制光線的穿透率可顯示不同的色階。此技術的預傾角約為 1 到 2 度，若預傾角過大，則會有漏光的問題產生。

配向層分子與玻璃基板之間是以凡得瓦力的作用結合；配向層與液晶分子之間，則是靠兩者之間的化學作用力連結[23]-[24]，例如凡得瓦力[25]-[26]或偶極作用力。具有永久偶極的液晶與配向層分子的偶極 C=O 或 O-H 間會產生偶極作用力，例如氫鍵(hydrogen bond)，是極強的偶極作用力。透過化學作用力，可使液晶分子順著配向層分子的排列方向而排列，因此，欲使液晶排列均勻，配向層分子的控制是相當重要的技術。

2.4 碘系偏光膜

顯示面板製程中最常用的碘系偏光膜，是 Land 於 1939 年所發明的 H 片[27]。採用具有一定分子量的無定向高分子透明薄膜(通常為聚乙烯醇膜)，將其浸漬在 I_2/KI 的 30~40°C 溫水溶液中，溶液中碘離子擴散進入無定向聚乙烯醇內層，再由兩個滾輪機械拉伸此聚乙烯醇膜，直到 3~5 倍長度。聚乙烯醇分子長鏈受拉力延伸時，逐漸產生一定的分子順向度，附著在聚乙烯醇分子長鏈上的碘離子也隨之有方向性，而形成碘離子長鏈，而碘離子排列的方向性，會隨著聚乙烯醇膜被拉伸的倍率不同而改變[28]。碘離子具有可吸收平行其排列方向的光束電場方向，只讓垂直的光束電場分量通過之特性，如圖 2.6 所示，利用此原理可製造偏光膜。

2.5 聲導波波傳

2.5.1 等向性黏滯性液體之材料常數

牛頓液體的應力與速度梯度必須滿足線性關係，黏滯性液體的應力張量可表示為

$$\mathbf{T}_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu_f \left\{ \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) - \frac{1}{3}v_{k,k}\delta_{ij} \right\} \quad (2.1)$$

其中， T_{ij} 為液體應力分量， p 為聲壓(acoustic pressure)， δ_{ij} 為 Kronecker delta， μ_f 為液體動態黏滯係數(dynamic viscosity)， v_i 為液體質點速度分量。

若忽略體力(body force)的影響，液體的線動量平衡方程式可表示為

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} \quad (2.2)$$

其中 ρ 為質量密度。假設質量密度不為空間的函數，則線性連續方程式可表示為

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho v_{i,i} \quad (2.3)$$

將(2.1)式代入(2.2)式，可得

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = -p_{,i} + \mu_f \left[v_{i,jj} + \frac{1}{3}v_{k,ki} \right] \quad (2.4)$$

若所考慮者為一線性絕熱系統(linear adiabatic system)，狀態方程式(state equation)為

$$p = p(\rho, s) \quad (2.5)$$

其中， s 為熵(entropy)。將(2.5)式對平衡狀態 (ρ, s_0) 取一階泰勒級數展開近似，可近似為

$$p \approx \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s \rho = c^2 \rho \quad (2.6)$$

其中，下標 s 為固定某一溫度的熵值， c 為液體中的聲速(acoustic wave speed)，定義為

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} \quad (2.7)$$

將(2.6)式代入(2.3)式，改寫為

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\rho c^2 v_{i,i} \quad (2.8)$$

若考慮質點速度 v ，聲壓 p 與密度擾動(density fluctuation) ρ 等場變數都具有時諧因子，可表示為

$$v(x_i, t) = -i\omega u(x_i) e^{-i\omega t} \quad (2.9)$$

$$p(x_i, t) = p(x_i) e^{-i\omega t} \quad (2.10)$$

$$\rho(x_i, t) = \rho(x_i) e^{-i\omega t} \quad (2.11)$$

其中， ω 為角頻率(angular frequency)， x_i 為空間變數。

假設聲速 c 、材料密度 ρ 與黏滯係數 μ_f 為常數，考慮(2.9)式、(2.10)式與(2.11)式，可將(2.4)式與(2.8)式表示為

$$p = -\rho c^2 u_{i,i} \quad (2.12)$$

$$\rho \omega^2 u_i = p_{,i} + i\omega \mu_f \left[u_{i,jj} + \frac{1}{3} u_{k,ki} \right] \quad (2.13)$$

將(2.12)式等號左右兩端取梯度(gradient)，代入(2.13)式，可整理為

$$-i\omega \mu_f u_{i,jj} + \left(\rho c^2 - \frac{1}{3} i\omega \mu_f \right) u_{k,ki} + \rho \omega^2 u_i = 0 \quad (2.14)$$

忽略微體力，等向性彈性體的線性 Navier-Stokes 方程式為

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{k,ki} \quad (2.15)$$

其中， λ 與 μ 為彈性體的 Lamé 常數，比較(2.14)式與場變數具時諧因子的(2.15)式，可得到類比於 Lamé 常數之液體材料常數為

$$\lambda' = \kappa + \frac{2}{3} i\omega \mu_f \quad (2.16a)$$

$$\mu' = -i\omega\mu_f \quad (2.16b)$$

其中，上標「'」表示液體的 Lamé 常數， κ 為液體之容積模數(bulk modulus)，表示為

$$\kappa = \rho c^2 \quad (2.17)$$

假設為擬彈性體液體材料常數可以 Voigt 形式表示如下：

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \kappa - \frac{4}{3}i\omega\mu_f & \kappa + \frac{2}{3}i\omega\mu_f & \kappa + \frac{2}{3}i\omega\mu_f & 0 & 0 & 0 \\ \kappa + \frac{2}{3}i\omega\mu_f & \kappa - \frac{4}{3}i\omega\mu_f & \kappa + \frac{2}{3}i\omega\mu_f & 0 & 0 & 0 \\ \kappa + \frac{2}{3}i\omega\mu_f & \kappa + \frac{2}{3}i\omega\mu_f & \kappa - \frac{4}{3}i\omega\mu_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -i\omega\mu_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -i\omega\mu_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -i\omega\mu_f \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

將(2.16)式代入等向性材料彈性體的縱波與橫波波速表示式，則具黏滯性液體的波速為

$$c_p^f = \sqrt{\frac{\kappa + \frac{2}{3}i\omega\mu_f}{\rho}} \quad (2.19a)$$

$$c_s^f = \sqrt{\frac{-i\omega\mu_f}{\rho}} \quad (2.19b)$$

c_p^f 與 c_s^f 分別為具黏滯性液體之縱波與剪力波波速，複數波速的虛部代表能量會衰減。

2.5.2 等向性平板應力與位移表示式

考慮等向性平板如圖 2.7 所示，假設 x_2 方向無限長，可將平板視為二維波傳問題。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

$$\rho \ddot{u}_i = \sigma_{ij,j} \quad (2.20)$$

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} u_{k,l} \quad (2.21)$$

將位移向量 u_i ($i=1,3$) 以純量勢函數 ϕ 與向量勢函數 ψ 表示

$$u_1 = \frac{\partial \phi}{\partial x_1} - \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \quad (2.22a)$$

$$u_3 = \frac{\partial \phi}{\partial x_3} + \frac{\partial \psi}{\partial x_1} \quad (2.22b)$$

將(2.22)式代入(2.21)式，應力分量表示如下

$$T_{11} = (\lambda + 2\mu)\nabla^2 \phi - 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1 \partial x_3} \right) \quad (2.23a)$$

$$T_{33} = (\lambda + 2\mu)\nabla^2 \phi - 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1 \partial x_3} \right) \quad (2.23b)$$

$$T_{13} = \mu \left\{ 2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1 \partial x_3} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} \right\} \quad (2.23c)$$

將(2.23)式代入(2.20)式，獲得獨立之運動方程式為

$$c_{11} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} \right) = \rho \ddot{\phi} \quad (2.24a)$$

$$c_{44} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} \right) = \rho \ddot{\psi} \quad (2.24b)$$

此處， $c_{11} = \lambda + 2\mu$ ， $c_{44} = \mu$ ， λ 及 μ 為等向性平板的 Lamé 常數。

考慮一沿 x_1 軸方向傳遞之時諧波(plane harmonic wave)，依平面波展開法(plane wave expansion)，其純量與向量勢函數解可表示為

$$\phi = (Ae^{-i\eta x_3} + Be^{i\eta x_3}) e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (2.25a)$$

$$\psi = (Ce^{-i\eta x_3} + De^{i\eta x_3}) e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (2.25b)$$

k 為 x_1 方向之波數(wave number)， A 、 B 、 C 與 D 為振幅係數， η 與 ν 分別為縱波與剪力波在 x_3 方向之波數，分別為

$$\eta = \sqrt{k_l^2 - k^2} \quad (2.26a)$$

$$\nu = \sqrt{k_t^2 - k^2} \quad (2.26b)$$

k_l 與 k_t 分別為縱波與剪力波之波數，滿足

$$k_l^2 = \frac{\omega^2 \rho}{c_{11}} \quad (2.27a)$$

$$k_t^2 = \frac{\omega^2 \rho}{c_{44}} \quad (2.27b)$$

將(2.25)式代入(2.22)及(2.23)式，整理獲得位移與曳力組成的狀態向量(state vector)，以矩陣型式表示為

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_3 \\ T_{13} \\ T_{33} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -i\nu & ik & ik & i\nu \\ ik & i\eta & i\eta & ik \\ -\mu(2k^2 - k_t^2) & 2\mu k \eta & -\mu(2k^2 - k_t^2) & 2\mu k \eta \\ -2\mu k \nu & \mu(2k^2 - k_t^2) & \mu(2k^2 - k_t^2) & 2\mu k \nu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1^+ e^{i\nu x_3} \\ C_2^+ e^{i\eta x_3} \\ C_1^- e^{-i\nu x_3} \\ C_2^- e^{-i\eta x_3} \end{Bmatrix} \quad (2.28)$$

此處參考圖 2.7 所示， C_1^+ 、 C_3^+ 代表朝 x_3 軸正向傳遞的下傳波， C_1^- 、 C_3^- 代表朝 x_3 軸負向傳遞的上傳波。

2.5.3 等向性流體應力與位移表示式

假設黏滯性液體為均質(homogeneous)，將黏滯性液體模擬成剪力模數 (shear modulus) 為 $-i\omega\mu_f$ 的等向性固體，其中液體的材料常數為

$$c'_{11} = \kappa - (4/3)i\omega\mu_f \quad (2.29a)$$

$$c'_{12} = \kappa + (2/3)i\omega\mu_f \quad (2.29b)$$

$$c'_{44} = -i\omega\mu_f \quad (2.29c)$$

其中，上標「 $'$ 」表示液體之材料常數。

類似推導等向性平板的位移與應力過程，將液體的狀態向量表示成矩陣式

$$\begin{Bmatrix} u_1^f \\ u_3^f \\ T_{13}^f \\ T_{33}^f \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -i\nu_f & ik & i\nu_f & ik \\ ik & i\eta & ik & -i\eta_f \\ -\mu'(2k^2 - k_{yf}^2) & 2\mu'k\eta_f & -\mu'(2k^2 - k_{yf}^2) & 2\mu'k\eta_f \\ -2\mu'k\nu_f & \mu'(2k^2 - k_{yf}^2) & 2\mu'k\nu_f & \mu'(2k^2 - k_{yf}^2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1^+ e^{i\nu_f x_3} \\ A_2^+ e^{i\eta_f x_3} \\ A_1^- e^{-i\nu_f x_3} \\ A_2^- e^{-i\eta_f x_3} \end{Bmatrix} \quad (2.30)$$

其中，符號 f 代表液體， η_f 、 ν_f 與 μ_f 分別定義為

$$\eta_f = \sqrt{k_{yf}^2 - k^2} = \sqrt{\frac{\omega^2 \rho_f}{c'_{11}} - k^2} \quad (2.31a)$$

$$\nu_f = \sqrt{k_{yf}^2 - k^2} = \sqrt{\frac{i\omega\rho_f}{\mu_f} - k^2} \quad (2.31b)$$

$$\mu' = c'_{44} = -i\omega\mu_f \quad (2.31c)$$

此處， k_{pf} 、 k_{sf} 為液體剪力波波數， η_f 與 ν_f 分別為液體的縱波與橫波在 x_3 方向之波數。與(2.28式)相似， A_1^+ 、 A_2^+ 代表朝 x_3 軸正向傳遞的下傳波， A_1^- 、 A_2^- 代表朝 x_3 軸負向傳遞的上傳波。

2.5.4 具流體薄層負載平板之應力與位移表示式

將試片模擬成如圖 2.8 所示的結構， x_2 方向視為無限延伸，上層為具有黏滯性的液體層，下層為等向性固體層，各層介質所受的位移及應力狀態，以純量勢函數 φ 與向量勢函數 ψ 來表示，層與層之間的介面與上、下介面必須滿足介面連續邊界條件，推導整體結構之頻散與衰減現象的特徵方程式。

則等向性平板($-h \leq x_3 \leq 0$)的狀態向量及矩陣式可寫作

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{U}_1(k, x_3, \omega) \\ \mathbf{V}_1(k, x_3, \omega) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1^+ & \mathbf{P}_1^- \\ \mathbf{Q}_1^+ & \mathbf{Q}_1^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1^+(x_3) & 0 \\ 0 & \mathbf{D}_1^-(x_3) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{C}_1^+ \\ \mathbf{C}_1^- \end{Bmatrix} \quad (2.32)$$

具黏滯性液體($0 \leq x_3 \leq H$)的狀態向量及矩陣式可寫作

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{U}_2(k, x_3, \omega) \\ \mathbf{V}_2(k, x_3, \omega) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_2^+ & \mathbf{P}_2^- \\ \mathbf{Q}_2^+ & \mathbf{Q}_2^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_2^+(x_3) & 0 \\ 0 & \mathbf{D}_2^-(x_3) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{C}_2^+ \\ \mathbf{C}_2^- \end{Bmatrix} \quad (2.33)$$

其中

$$\mathbf{P}^\pm = \begin{bmatrix} p_{11}^\pm & p_{12}^\pm \\ p_{21}^\pm & p_{22}^\pm \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mp i\nu & ik \\ ik & \pm i\eta \end{bmatrix} \quad (2.34a)$$

$$\mathbf{Q}^\pm = \begin{bmatrix} q_{11}^\pm & q_{12}^\pm \\ q_{21}^\pm & q_{22}^\pm \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mu(2k^2 - k_t^2) & \mp 2\mu k\nu \\ \mp 2\mu k\nu & \mu(2k^2 - k_t^2) \end{bmatrix} \quad (2.34b)$$

$$\mathbf{D}^\pm = \text{diag} [e^{\pm i\nu x_3} \quad e^{\pm i\eta x_3}] \quad (2.34c)$$

液體上表面($x_3 = Z_0 = -h$)與固體下表面($x_3 = Z_2 = H$)，邊界之曳力為零，且液體與固體之邊界($x_3 = Z_1 = 0$)需滿足位移與應力連續。

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{Q}_1^+ \mathbf{E}_1^{-1} & -\mathbf{Q}_1^- \mathbf{E}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{P}_1^+ & \mathbf{P}_1^- & -\mathbf{P}_2^+ & -\mathbf{P}_2^- \\ \mathbf{Q}_1^+ & \mathbf{Q}_1^- & -\mathbf{Q}_2^+ & -\mathbf{Q}_2^- \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_2^+ \mathbf{E}_2 & \mathbf{Q}_2^- \mathbf{E}_2^{-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{E}_1 \mathbf{C}_1^+ \\ \mathbf{C}_1^- \\ \mathbf{C}_2^+ \\ \mathbf{E}_2 \mathbf{C}_2^- \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (2.35)$$

其中，

$$\mathbf{E}_m = \text{diag} [e^{i\nu_m h_m} \quad e^{i\eta_m h_m}] \quad (2.36)$$

$$h_m = Z_m - Z_{m-1} \quad (2.37)$$

(2.35)式即為整體結構導波之頻散與衰減現象的特徵方程式，可利用 Matlab 作數值分析，求得具薄層流體負載之平板結構導波的頻散曲線。

2.5.5 時間平均功率流密度

為了統一數值分析模型通過截面的能量，將時間平均能量通量 (time-average energy flux) 作正規化(normalization)。將時間平均功率流密度

(time-average power flow density)對截面積做積分，即為時間平均能量通量。定義物體本身對外界所做的功率為

$$E_{flowout}^a \equiv - \int_{\partial V} \text{Re}(t_i) \text{Re}(v_i) dA = - \int_{\partial V} \hat{n}_j \text{Re}(T_{ji}) \text{Re}(v_i) dA \quad (2.38)$$

此處， T_{ji} 為應力分量， v_i 為直點的速度分量。在本章先前的推導中 T_{ji} 與 v_i 都是複變時諧函數，但是在計算功率時，必須分別取其實部相乘。

將時間 T 內，通過截面 dA ，法向量為 \hat{n}_j 的功率流密度(power flow density)定義為

$$P_j^a \equiv -\text{Re}(T_{ji}) \text{Re}(v_i) \quad (2.39)$$

將功率流密度對時間 T 積分後，對時間 T 取平均，為時間平均功率流密度

$$\langle P_j^a \rangle_{av} \equiv \frac{1}{T} \int_0^T P_j^a dt \quad (2.40)$$

則(2.40)式可寫成

$$\langle P_j^a \rangle_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}(\sigma_{ji}^* \bar{v}_i) = -\frac{1}{2} \omega \text{Im}(\sigma_{ji}^* \bar{u}_i) \quad (2.41)$$

其中， σ_{ji} 、 \bar{v}_i 、 \bar{u}_i 為應力分量 T_{ji} 、質點速度 v_i 、位移 u_i 的振幅(amplitude)。



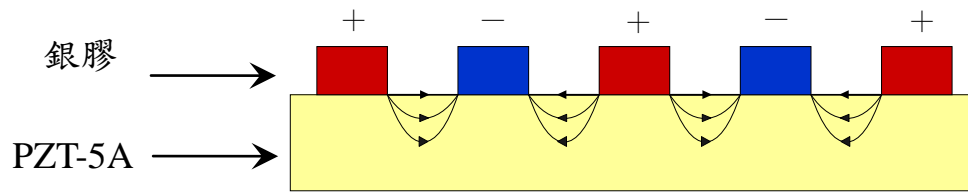


圖 2.1 指叉換能器電性示意圖

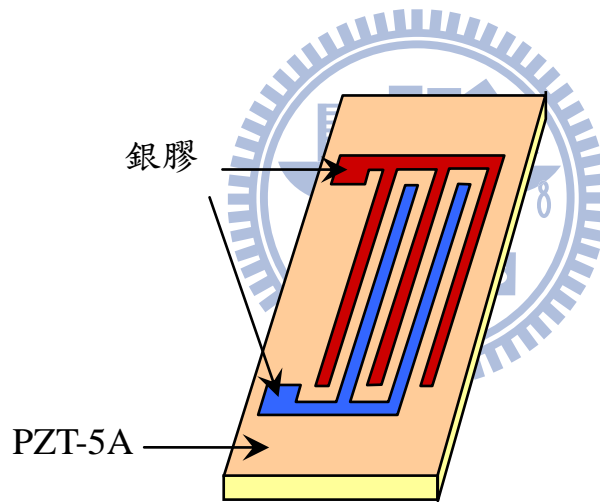


圖 2.2 指叉換能器示意圖

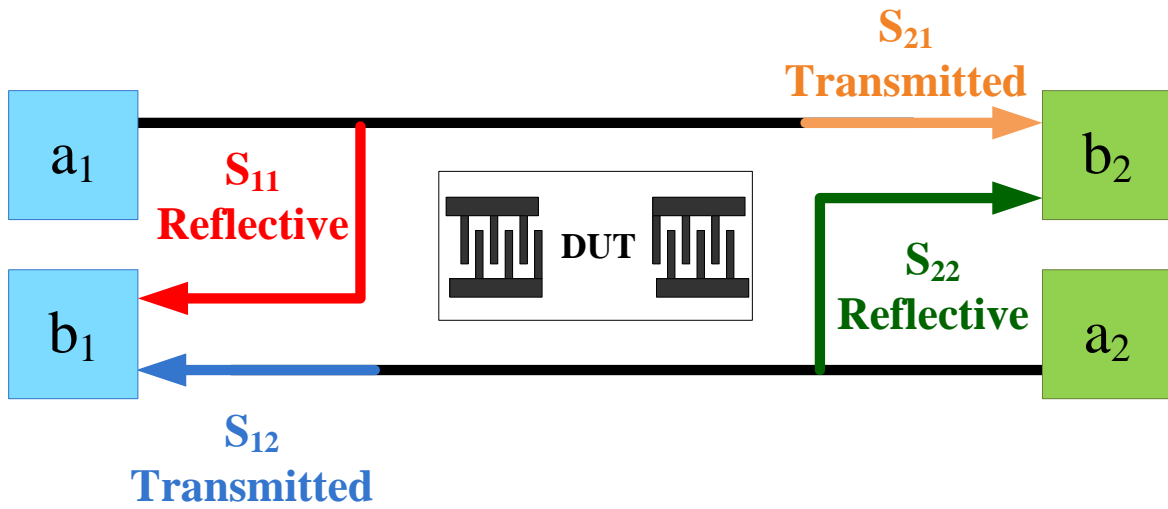


圖 2.3 散射參數示意圖

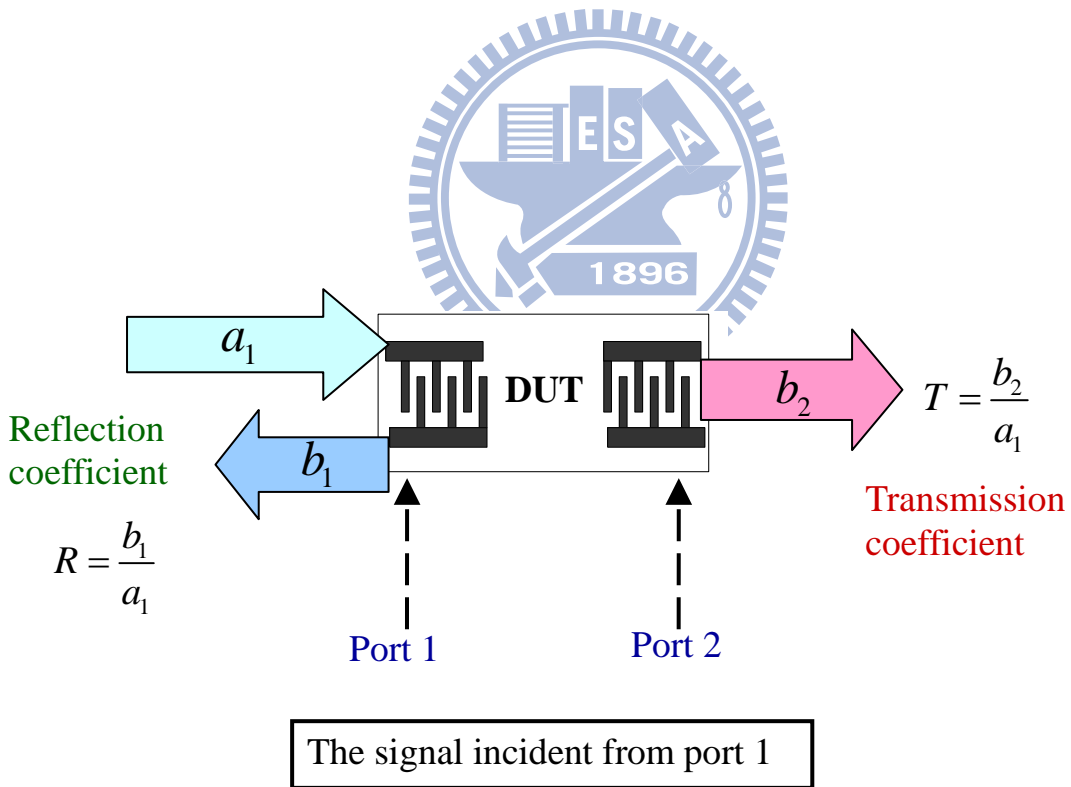


圖 2.4 反射及傳輸功率比示意圖

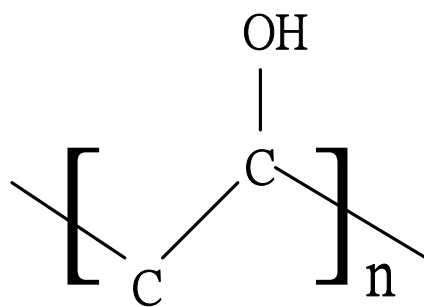


圖 2.5 聚乙炔醇化學結構示意圖

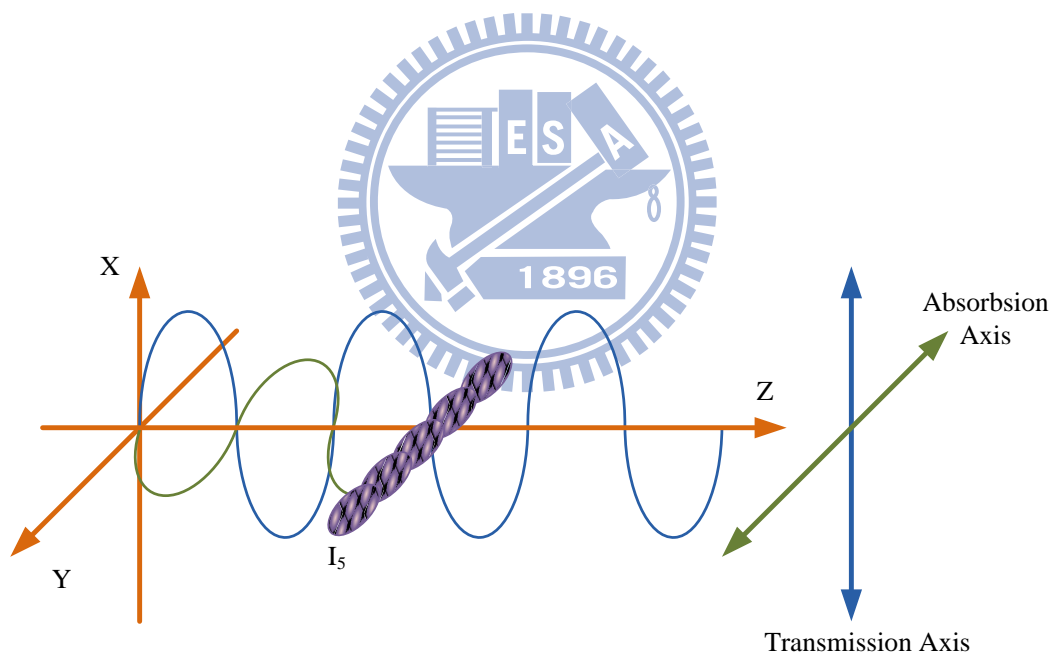


圖 2.6 碘離子長鏈吸收偏振光示意圖

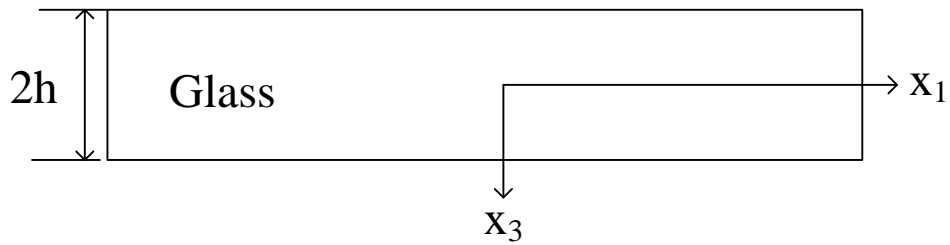


圖 2.7 等向性平板示意圖

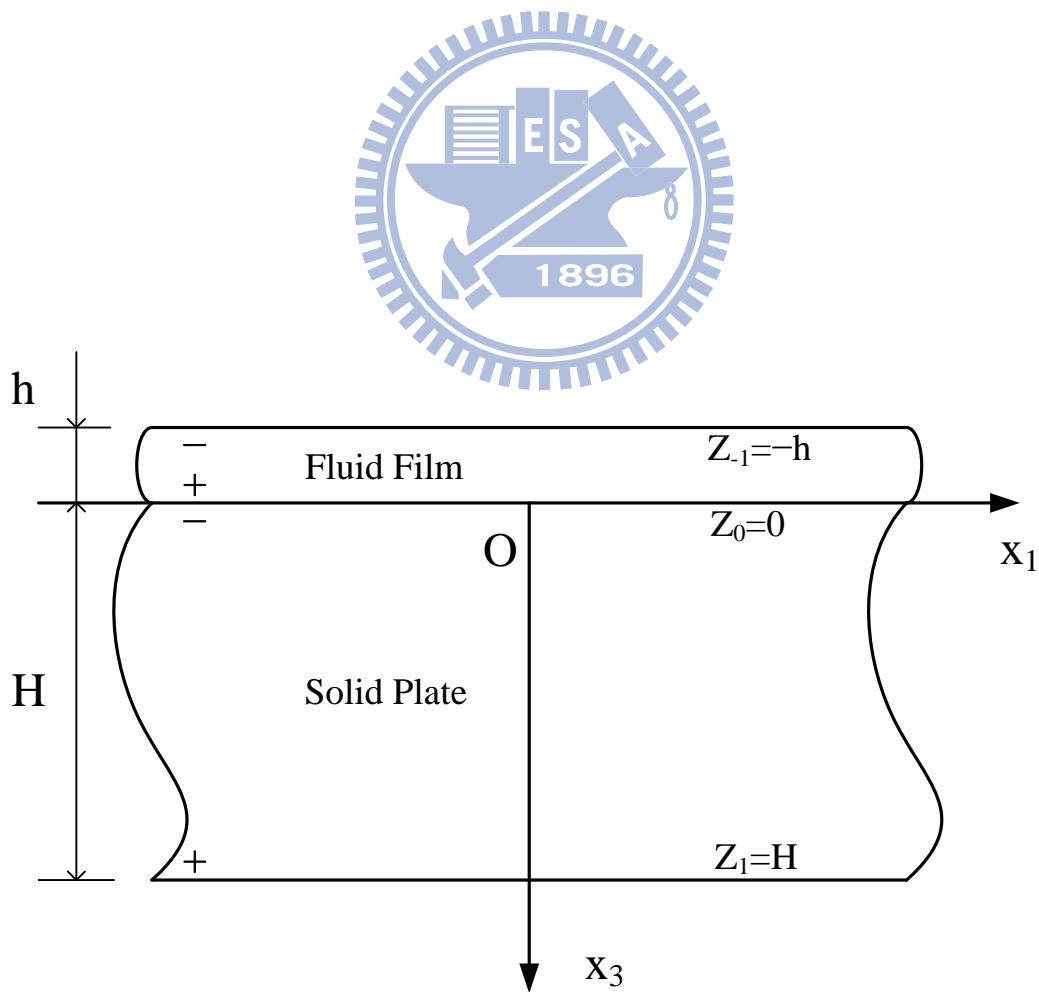
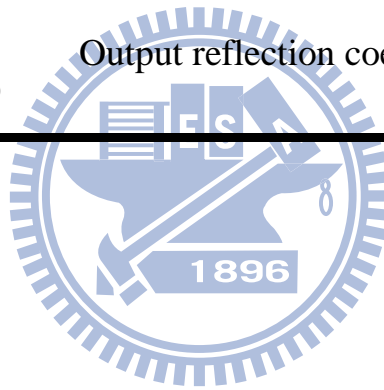


圖 2.8 具流體薄層負載平板示意圖

表 2.1 散射參數之特性

| S-Parameter | Definition | Test Set Description | Direction |
|-------------|--|-------------------------------|-----------|
| S_{11} | $\left. \frac{b_1}{a_1} \right _{a_2=0}$ | Input reflection coefficient | FWD |
| S_{21} | $\left. \frac{b_2}{a_1} \right _{a_2=0}$ | Forward gain | FWD |
| S_{12} | $\left. \frac{b_1}{a_2} \right _{a_1=0}$ | Reverse gain | REV |
| S_{22} | $\left. \frac{b_2}{a_2} \right _{a_1=0}$ | Output reflection coefficient | REV |



第三章 數值分析

本章以具流體薄層負載結構為對象，數值分析聲導波的頻散曲線。以實驗中使用的聚乙烯醇水溶液之旋鍍厚度與黏滯係數，作為流體薄層數值分析參數的範圍參考。配向層旋鍍厚度約一般為 0.1~1 μm ，本研究加熱固化程序中，選用 0.1~10 μm 作為數值分析的參數範圍。配向層溶液的黏度隨著濃度改變而無法得知正確黏度，常見的黏性液體，例如橄欖油黏度為 0.1 Pa.s，甘油為 15 Pa.s，本文選用 0.1~10 Pa.s 作為數值分析之流體層黏性係數的變化範圍。由於聚乙烯醇水溶液的旋鍍層很薄(小於 1 μm)，為簡化數值分析模型，不考慮聲場流(acoustic streaming flow)的影響。另外，因結構導波波長遠大於振幅，使得液體表面曲率微小，可忽略表面張力。

3.1 複數尋根—曲線追蹤法

Lowe[30]-[31]針對一個彈性介質的聲導波頻散特徵方程式 $\Omega(\omega, k)$ 求解，曾發展出一個有效複數尋根方式，稱為曲線追蹤法(curve tracing)。過去的研究因介質本身阻尼或能量消散的影響，計算所得根的虛部值也會非常小，故不考慮對求解特徵方程式 $\Omega(\omega, k)$ 時，波數 k 的虛根。但考慮熱彈耦合的問題時，介質本身因熱效應造成能量消散，虛根大小的影響就顯得非常重要。原本的波數 $k = k_{real} + ik_{imag} = k_{real}(1 + i\kappa/2\pi)$ ，頻散特徵方程式 $\Omega(\omega, k)$ 則可考慮表示為 $\Omega(\omega, k_{real}, k_{imag})$ 或 $\Omega(\omega, k_{real}, \kappa)$ 的型式，其中 k_{imag} 與 κ 分別為每單位波傳距離與每單位波長的衰減(attenuation)。

首先，參考圖 3.1 所示波數-頻率域的頻散曲線圖，由此圖可發現，在波數軸上的任意一點，皆可對應出數量無限多的頻率 ω ，此一特徵有助於在作 ω 尋根時，不至於因為沒有對應的 ω 值而無法做波數掃描。曲線追蹤

法便是以此特點作出發，下面則列出此方法的步驟流程：

- (1) 先在波數軸上任意選出鄰近間隔非常小的 3 個點 k_1 、 k_2 與 k_3 。
- (2) 當 $k_{real} = k_1$ 時，假設 $\kappa = 0$ ，此時可知 $\Omega(\omega, k_1, \kappa)$ 為頻率 ω 的單值函數，利用 Matlab 指令 `fminbnd` 尋找出區域最小值(local minimum)的位置點 ω_{1j} ，代表在第 j 條頻散曲線所對應的頻率值。參考圖 3.2 所示，其中粗線代表對頻率 ω 的粗略搜尋(coarse search)，最小值即為尋到的根 ω_{1j} 。
- (3) 以第 1 條頻散曲線所對應的頻率值 ω_{11} 為例，選擇 $(\omega_{11}, k_1, 0)$ 作為初始點，此時 $\Omega(\omega, k_1, \kappa)$ 為頻率 ω 與 κ 衰減的函數，利用 `fminsearch` 指令在此初始點附近尋找區域最小值且結果為 $(\omega_{11}^*, k_1, \kappa_{11}^*)$ 。圖 3.2 中，細虛線代表細密蒐尋(fine search)的軌跡，即以粗線上的任意最小值作出發，尋找附近另一新的區域最小值。
- (4) 以此類推，在固定波數 k_1 值的情況下，可尋找出一組落在 N 條頻散曲線的頻率與衰減數據，即 $(\omega_{1j}^*, k_1, \kappa_{1j}^*)$ ($j = 1 \sim N$)。
- (5) 同理，當 $k_{real} = k_2$ 與 $k_{real} = k_3$ 時，重複步驟(1)至(4)的流程，獲得另外兩組頻率與衰減數據，即 $(\omega_{2j}^*, k_1, \kappa_{2j}^*)$ ($j = 1 \sim N$)。
- (6) 以第 1 條頻散曲線上的 3 個點為例，利用二階函數外差法，由 $(\omega_{11}^*, k_1, \kappa_{11}^*)$ 、 $(\omega_{21}^*, k_1, \kappa_{21}^*)$ 、 $(\omega_{31}^*, k_1, \kappa_{31}^*)$ ，算出第 4 點 $(\omega_{41}, k_1, \kappa_{41})$ 。然而以外差法求出的第 4 點不會剛好是區域最小值，須再以此點作為初始點，利用 `fminsearch` 指令在該點附近尋找區域最小值，其結果為 $(\omega_{41}^*, k_1, \kappa_{41}^*)$ 。以此類推，可順著已知的點尋獲下一個未知點。圖 3.3 中，空心點為外差所獲得的結果，實心點為空心點附近的區域最小值，最後，將實心點連接成一條曲線，即可建構出一條含複數根的頻散曲線。
- (7) 重複步驟(6)，建構出其餘的頻散曲線。

3.2 數值分析結果討論

3.2.1 具流體薄層負載結構之頻散曲線

本節探討上層為聚乙烯醇水溶液、下層為玻璃的具流體薄層負載結構，改變流體層厚度對於頻散曲線的影響。玻璃與聚乙烯醇水溶液的材料參數如表 3.1 所列。圖 3.4 所示為 1 mm 厚玻璃平板上，聚乙烯醇水溶液流體層黏度同為 1 Pa.s，厚度分別為 10 μm 、1 μm 及 0.1 μm 的聲導波相速度頻散曲線比較圖，由局部放大圖 3.5，可觀察到隨著流體層厚度增加，相速度頻散曲線向下偏移。

由於流體層厚度薄，對相速度頻散曲線影響微小，選擇觀察變化較大的波數衰減曲線。如圖 3.6 至圖 3.13 所示，隨著流體層厚度增加，其衰減值越大，尤其當流體層厚度為 10 μm 時的衰減值，遠大於 1 μm 與 0.1 μm 厚的衰減值。衰減曲線值越高，表示該結構導波衰減得越快，如欲驅動相同面積尺寸試片的配向層分子，需要提供較高的能量。圖 3.14 至圖 3.21 所示為相同厚度、不同黏度流體層之板波模態波數衰減曲線比較，發現於 A_0 模態時，波數衰減值隨黏度增加。另外可觀察到，各模態於特定頻率下，衰減曲線會趨近於一個最小值。因於該頻率時，板波的運動特性為 Lamé 模態，此模態的特徵為波傳時單位體積的脹縮變化為零，如圖 3.22 所示，不僅等體積變化，幾乎無能量轉換與消散。

3.2.2 具流體薄層負載結構之位移、應力與壓力差分佈

本研究計算各模態聲導波時，固定波傳方向單位截面積通過的能量，令法線方向為 X_1 方向之截面的時間平均能量通量(time-average energy flux) 為 1 個單位，以 0.5 MHz、1 MHz 和 10 MHz 為計算例。圖 3.23 至圖 3.30 所示為頻率 0.5 MHz 與 1 MHz 下，fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) A_0 與

S_0 模態之位移、應力、壓力差、時間平均功率流密度分佈圖與二維展開位移模態圖。本研究之結構並非對稱結構，但沿用反對稱與對稱的 A_0 與 S_0 名詞代號。位移與應力分佈圖可觀察到對稱與反對稱行為，為板波特徵，且在固液界面上位移與應力連續。壓力差為流體受到外力後，體積變化所造成的壓力差值，可由圖中觀察到在固液界面上壓力差為最大值，流體上表面壓力差最小。圖 3.31 至圖 3.38 所示為 10 MHz 頻率下，同結構尺寸的 A_0 、 A_1 、 S_0 及 S_1 模態之位移、應力、壓力差分佈圖與二維展開位移模態圖，注意到圖 3.31 所示，10 MHz 頻率下的 A_0 模態之固體層位移與應力分佈圖，非零之應力與應變集中於固液界面(X_3 坐標為 0 處)，具有雷利表面聲波特徵。但是圖 3.35 所示之 10 MHz 頻率下的 S_0 模態之固體層位移與應力分佈圖，非零之應力與應變卻集中於固體層下表面，推測為流體薄層附載造成平板結構不對稱，使得 S_0 板波能量聚集於平板下表面，與流體薄層達成對稱性。圖 3.39 與圖 3.40 所示為 fluid ($10 \mu\text{m}$, $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) / glass (1 mm) 頻率 1~10 MHz 的 A_0 與 S_0 位移分佈圖，可觀察到隨著頻率增加，位移逐漸向固液界面或固體層下表面集中的趨勢。圖 3.32、圖 3.34、圖 3.36 及圖 3.38 所示為位移模態二為展開圖，可觀察到對稱與反對稱模態，由液體層的位移模態圖可看到其位移分佈與結構導波波長相同。

3.2.3 具流體薄層負載結構之二維平面壓力差分佈

壓力梯度為單位距離的壓力差變化，當 X_1 方向的壓力梯度越大，配向層分子越傾向於 X_2 方向排列，也就是平行於結構導波波前，此時能量最小，故 X_1 方向壓力梯度越大，配向效果越好。

圖 3.41 至圖 3.50 所示為在 10 MHz 頻率下，變化流體層厚度與黏度， S_0 模態在 X_1 與 X_3 張成之平面的壓力分佈圖。發現流體層厚度越薄，流體上表層與下表層的壓力差振幅差值越小，甚至振幅趨於相等。此外，黏度

越大，流體上表層與下表層的壓力差振幅差值越小，因黏度越大時，其特性越接近固體，固體層與流體層界面上的變化越容易擾動流體表層。因此，流體層厚度越薄、黏度越大時，流體表面的 X_1 方向壓力梯度越大，對配向層分子的排列較有益。

3.2.4 具流體薄層負載結構之質點軌跡

圖 3.50 至圖 3.71 所示為 0.5、1 及 10 MHz 頻率下，fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm)、fluid (10 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 和 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 的各模態在流固耦合界面之質點軌跡圖，在不同的黏度、厚度下，除了 0.5 與 1 MHz 的 S_0 模態的軌跡為順時針、 X_3 方向的軸長對 X_1 方向之軸長比值小於一，軌跡好像一個扁橢圓，其他模態的軌跡均為逆時針且 X_3 方向軸長對 X_1 方向軸長比值大於一。越高階模態的 X_3 方向軸長對 X_1 方向軸長的比值越大，推測為模態越高，相同頻率下的波長越短，質點被侷限在較小的 X_1 方向運動，使得界面質點軌跡的 X_3 方向軸長對 X_1 方向軸長比值增加。

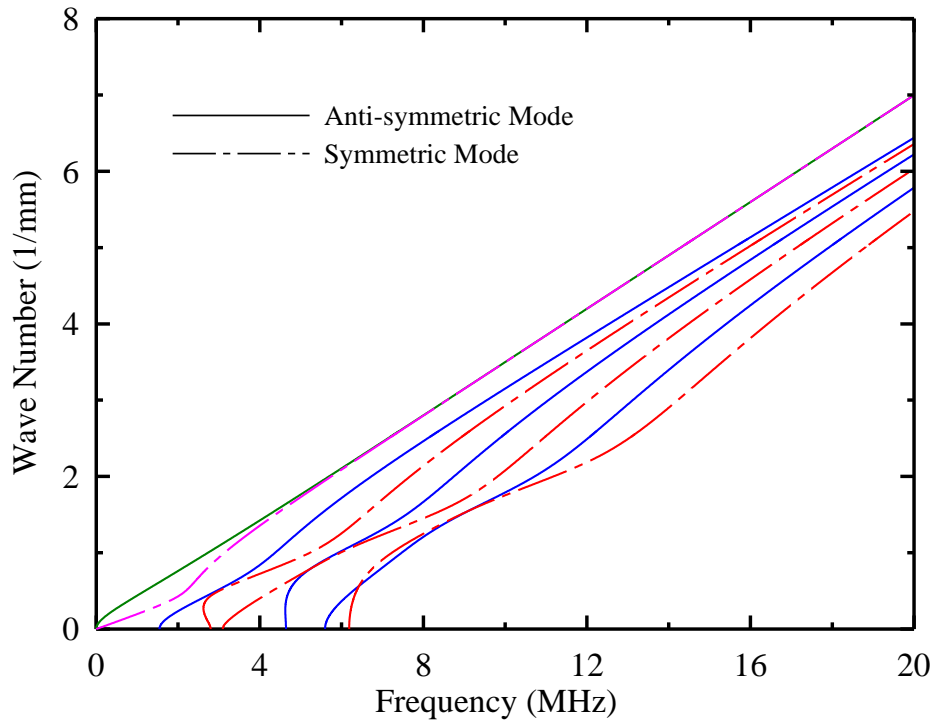


圖 3.1 glass (1 mm) 在波數-頻率域的聲導波頻散曲線

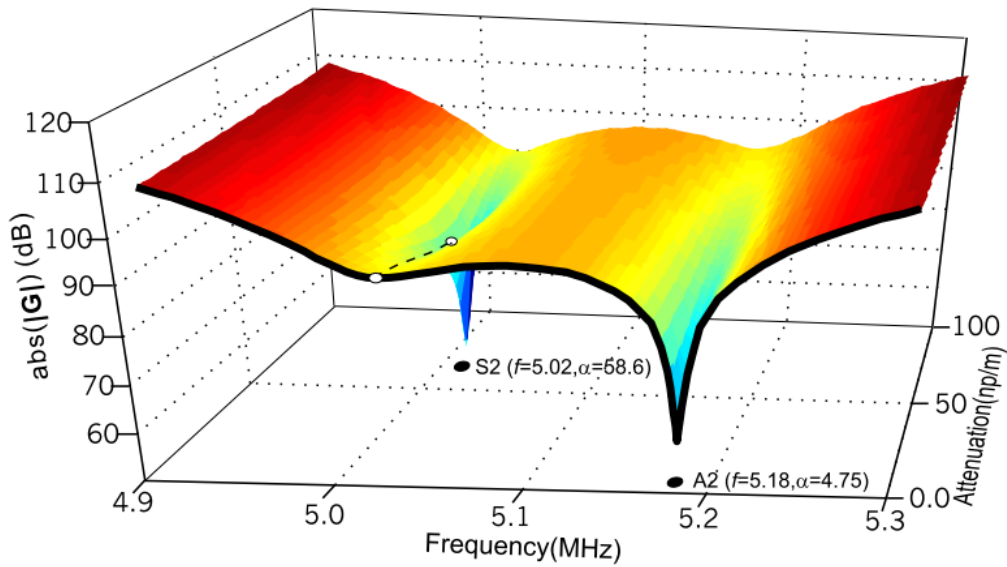


圖 3.2 波數 k_{real} 固定下，對 (k_{imag}, ω) 的尋根示意圖

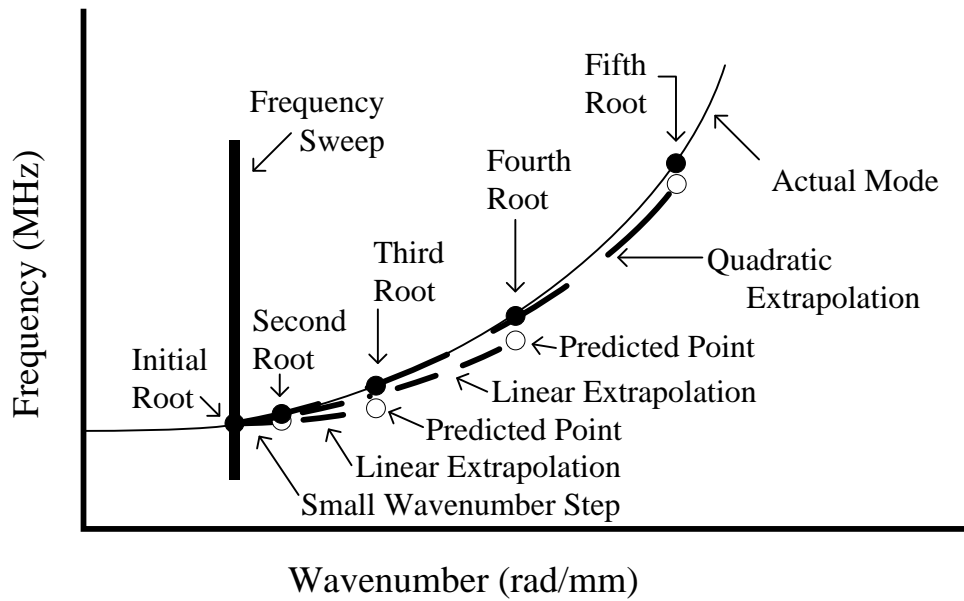


圖 3.3 應用外差法對頻散曲線作軌跡追蹤

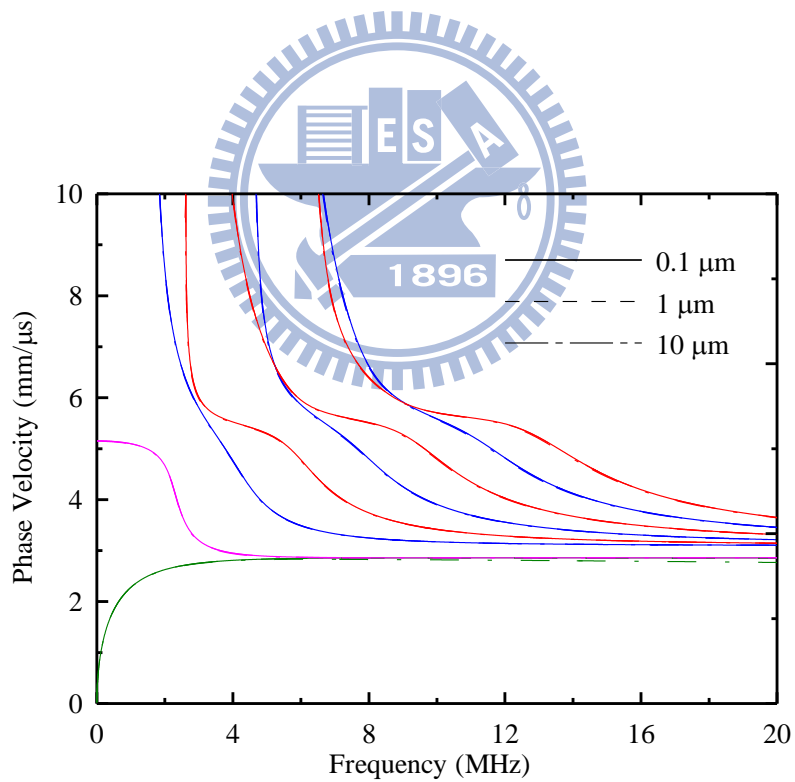


圖 3.4 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) 的相速度頻散曲線比較

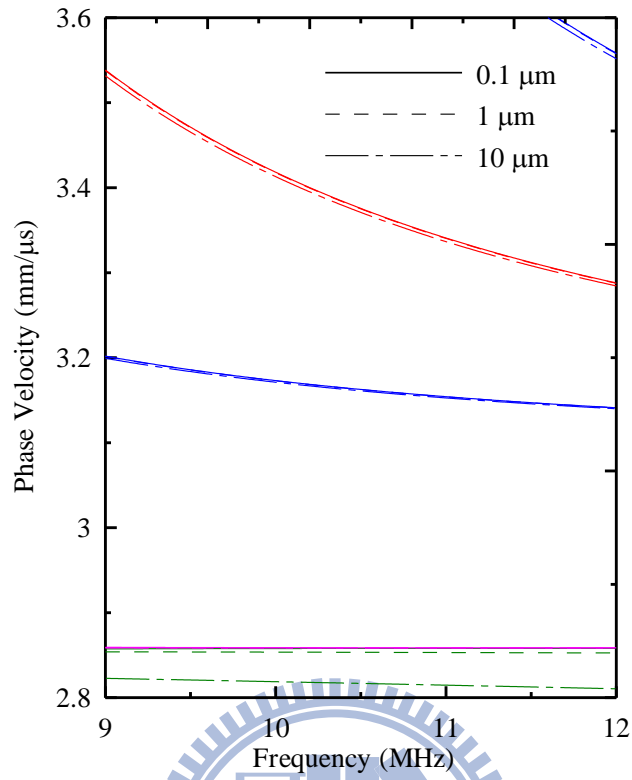


圖 3.5 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) 的相速度頻散曲線比較之
局部放大圖

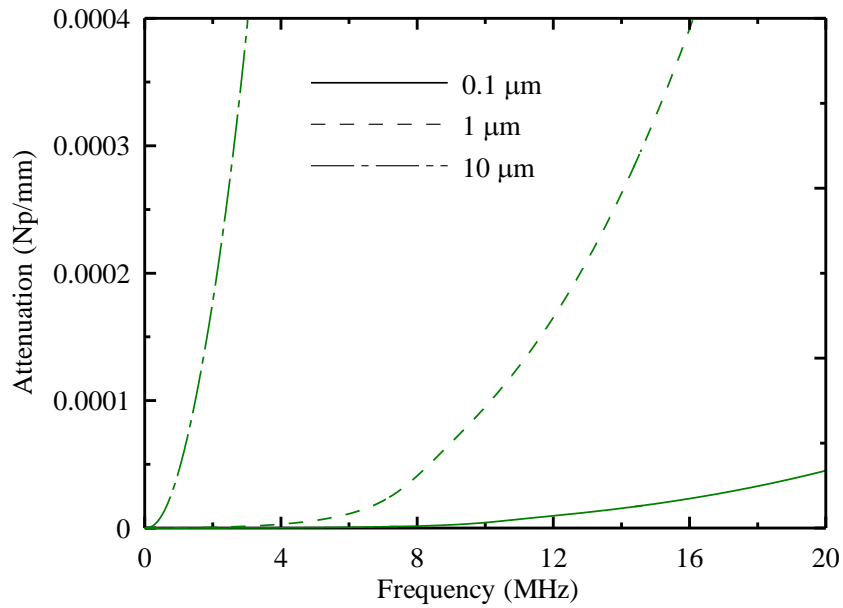


圖 3.6 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) A_0 模態的波數衰減曲線比較

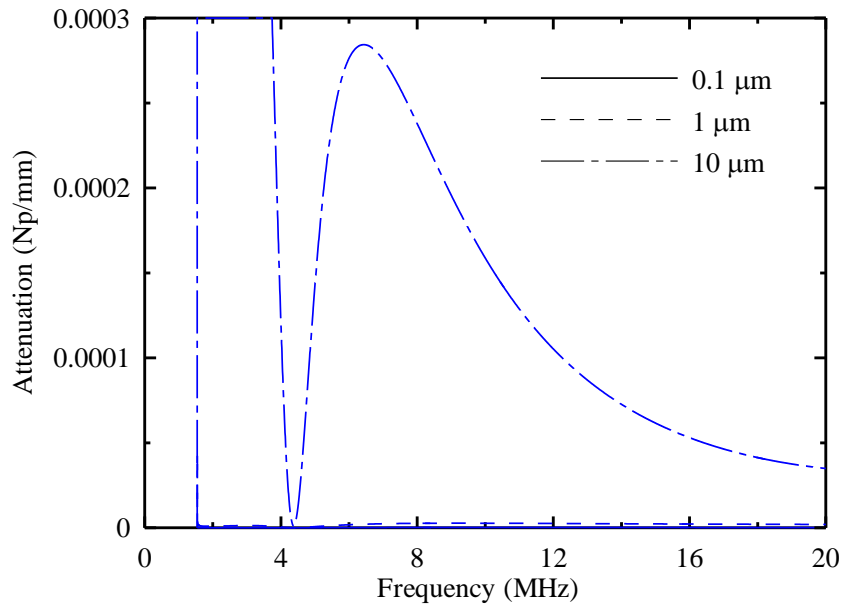


圖 3.7 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) A_1 模態的波數衰減曲線比較
(0.1 μm 時的值遠小於 0.001 μm 時的值)

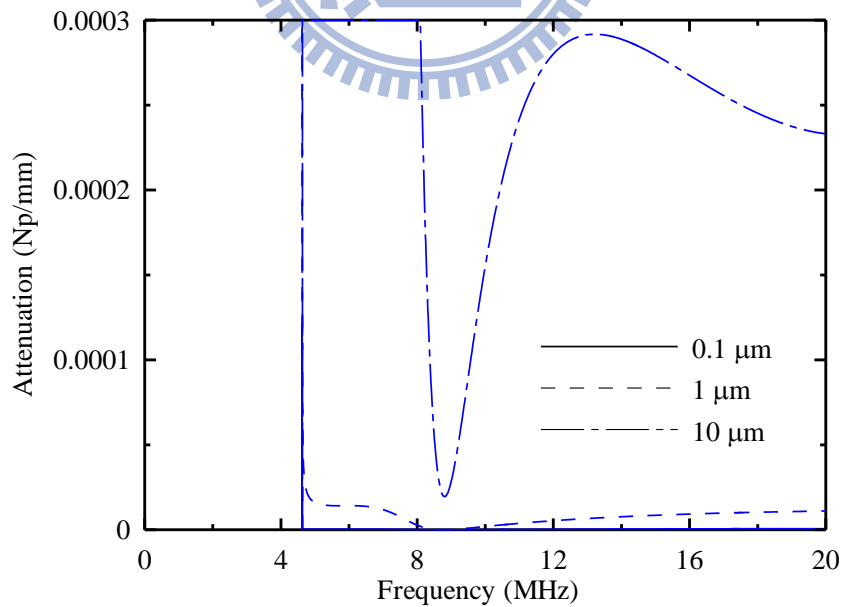


圖 3.8 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) A_2 模態的波數衰減曲線比較
(0.1 μm 時的值遠小於 0.001 μm 時的值)

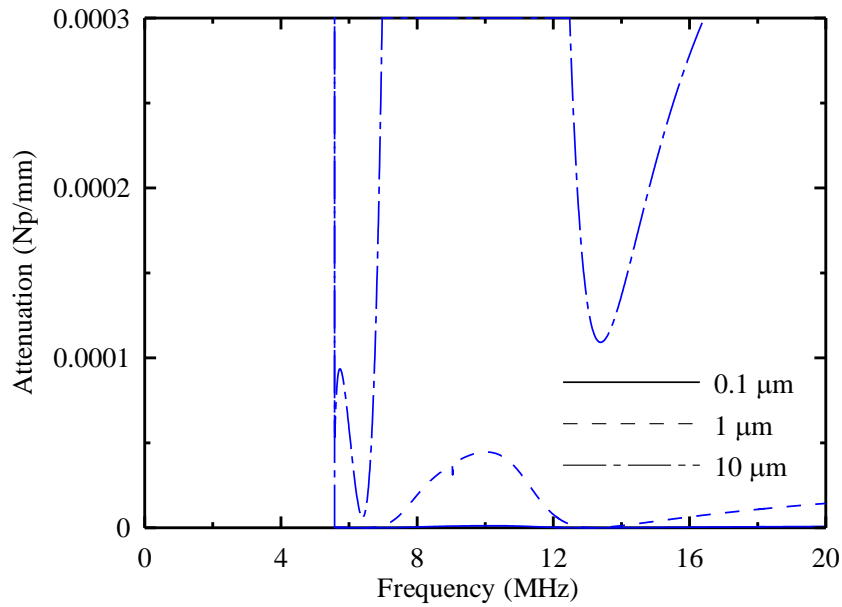


圖 3.9 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) A_3 模態的波數衰減曲線比較
(0.1 μm 時的值遠小於 0.001 μm 時的值)

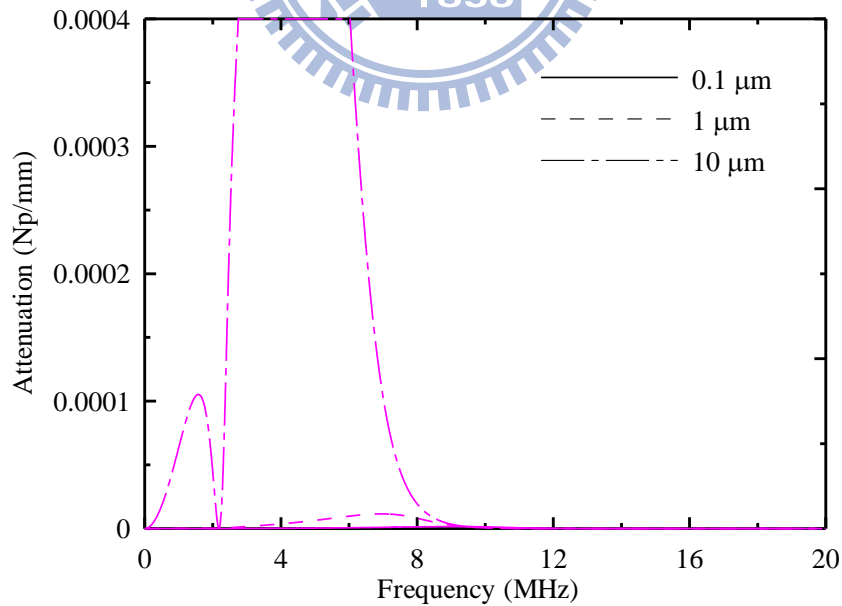


圖 3.10 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) S_0 模態的波數衰減曲線比較
(0.1 μm 時的值遠小於 0.001 μm 時的值)

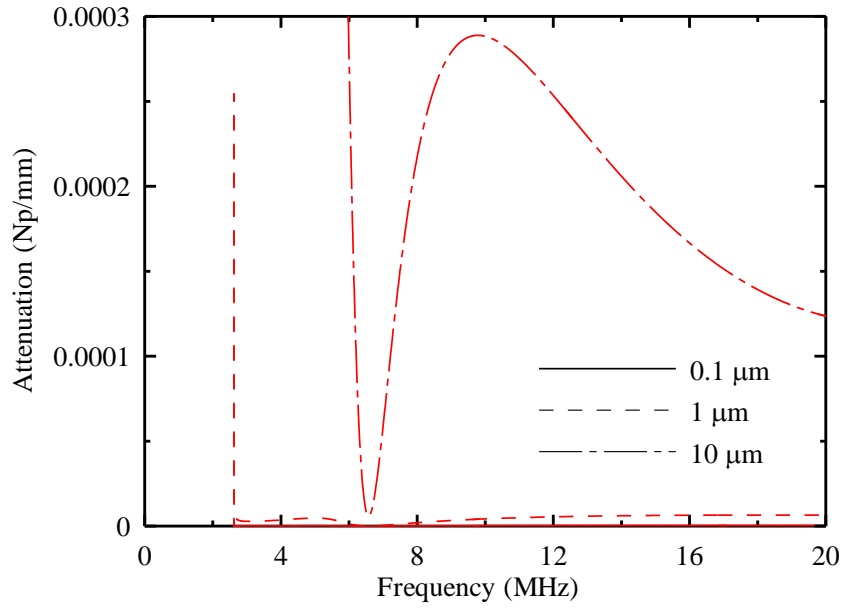


圖 3.11 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) S_1 模態的波數衰減曲線比較
(0.1 μm 時的值遠小於 0.001 μm 時的值)

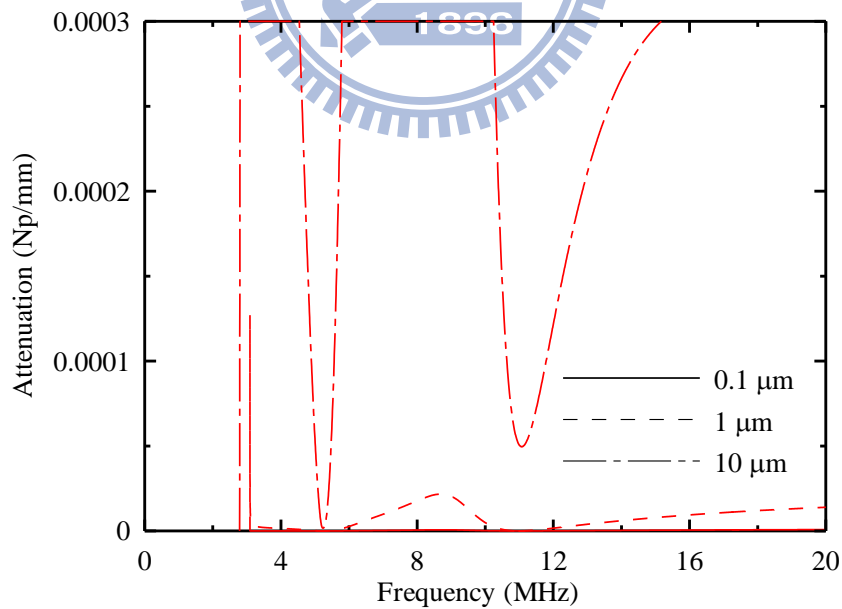


圖 3.12 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) S_2 模態的波數衰減曲線比較
(0.1 μm 時的值遠小於 0.001 μm 時的值)

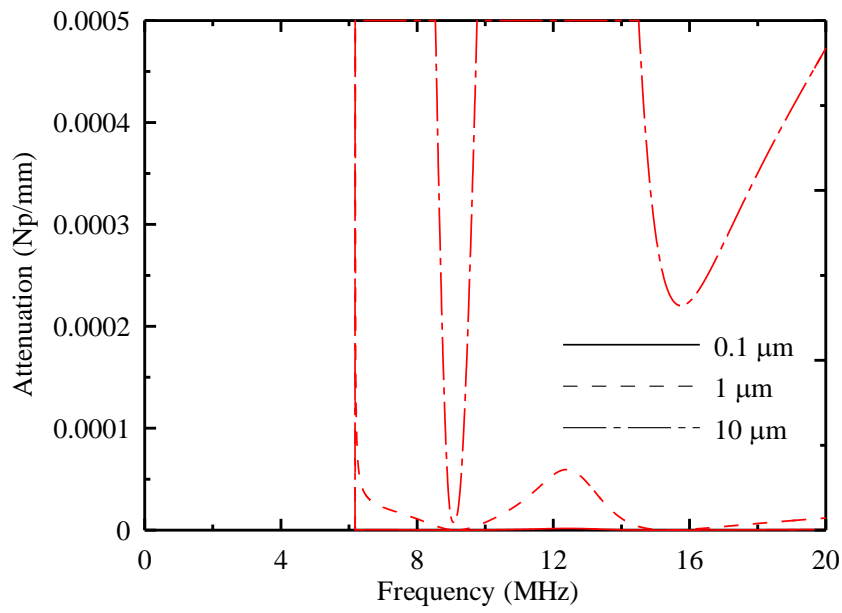


圖 3.13 不同厚度 fluid (1 Pa.s) / glass (1 mm) S_3 模態的波數衰減曲線比較
(0.1 μm 時的值遠小於 0.001 μm 時的值)

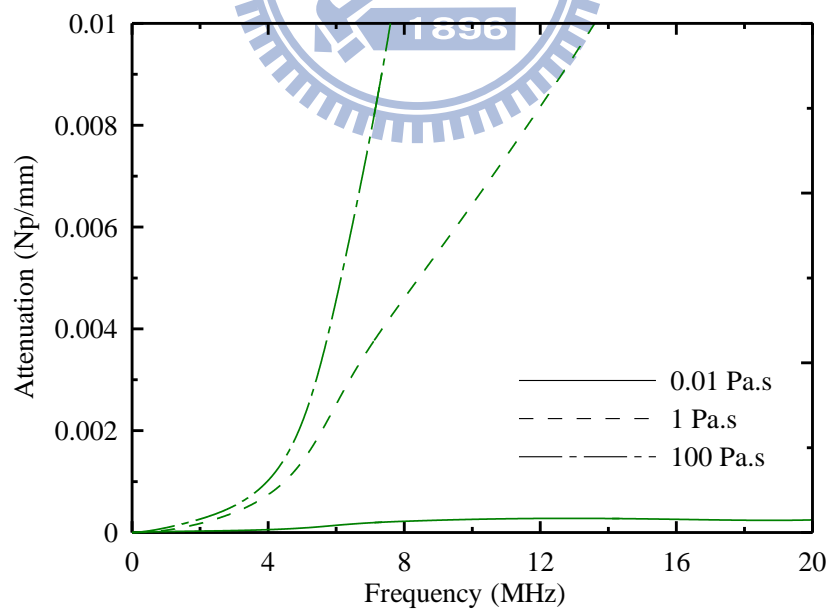


圖 3.14 不同黏滯係數 fluid (10 μm) / glass (1 mm) A_0 模態的
波數衰減曲線比較

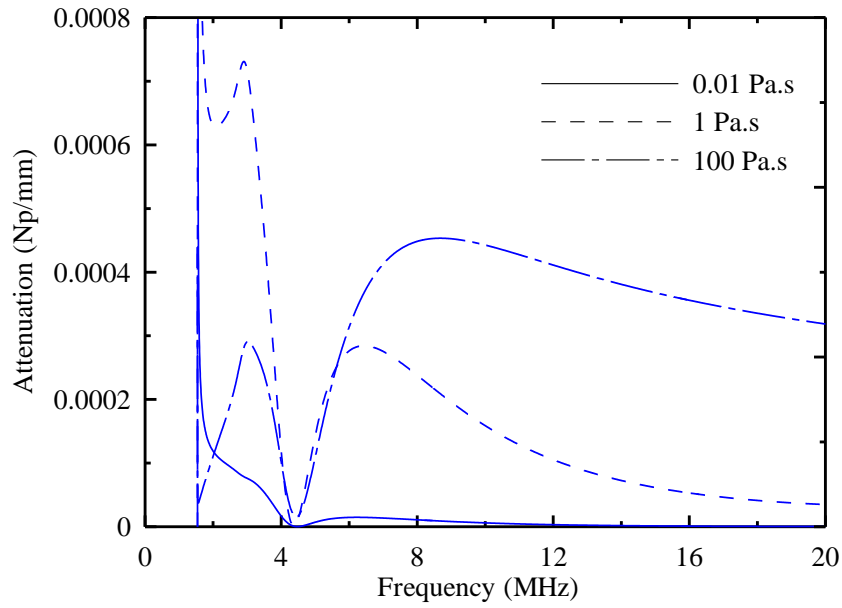


圖 3.15 不同黏滯係數 fluid (1 μm) / glass (1 mm) A_1 模態的

波數衰減曲線比較

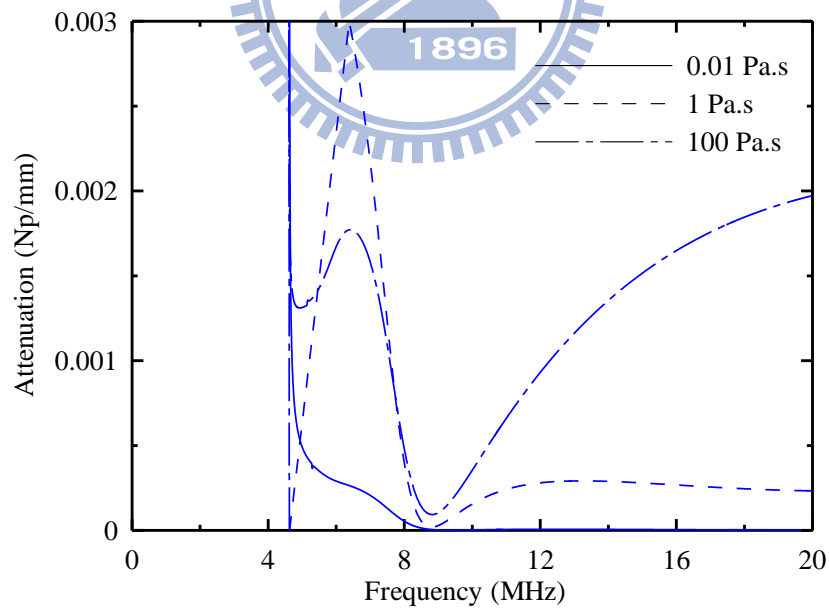


圖 3.16 不同黏滯係數 fluid (10 μm) / glass (1 mm) A_2 模態的

波數衰減曲線比較

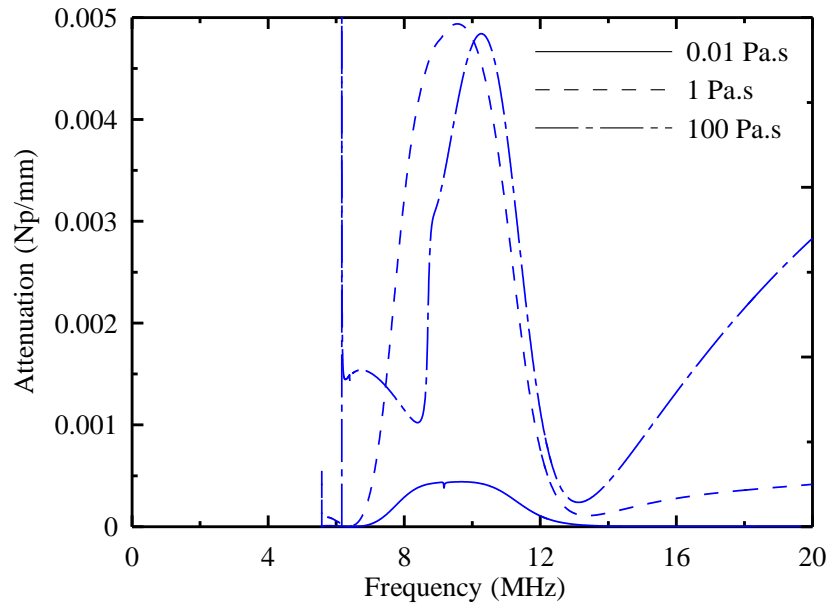


圖 3.17 不同黏滯係數 fluid ($10\ \mu\text{m}$) / glass (1 mm) A_3 模態的

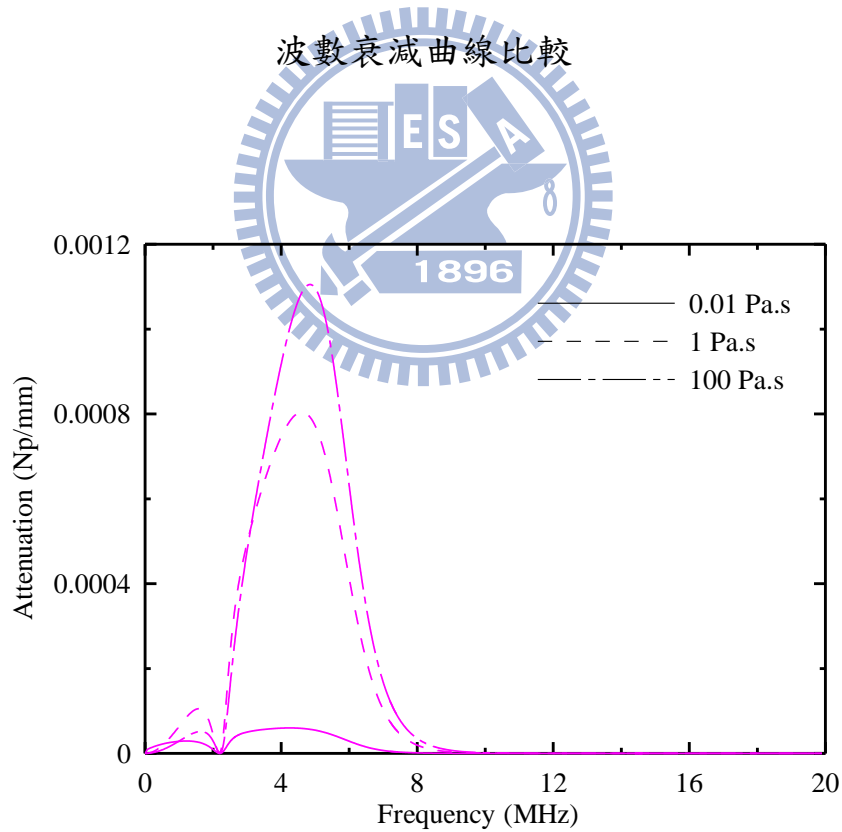


圖 3.18 不同黏滯係數 fluid ($10\ \mu\text{m}$) / glass (1 mm) S_0 模態的

波數衰減曲線比較

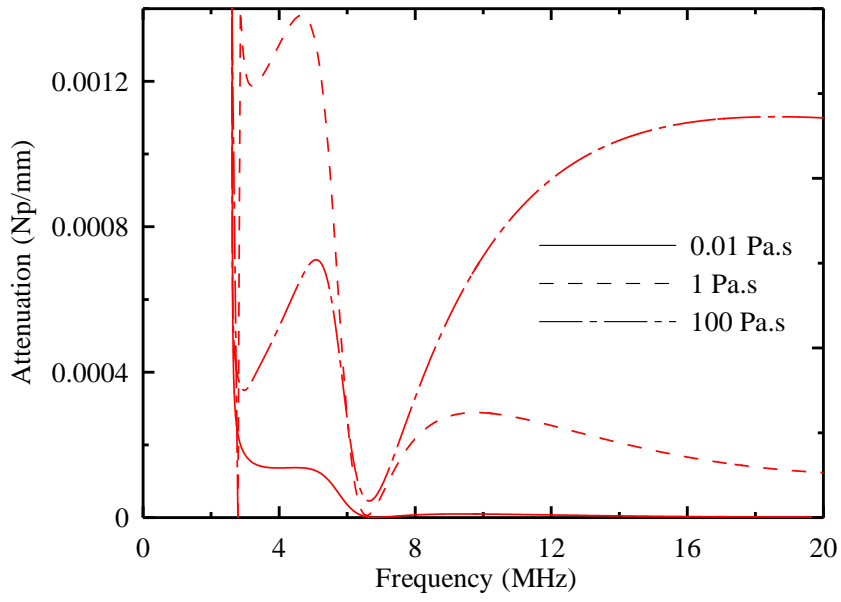


圖 3.19 不同黏滯係數 fluid (10 μm) / glass (1 mm) S_1 模態的

波數衰減曲線比較

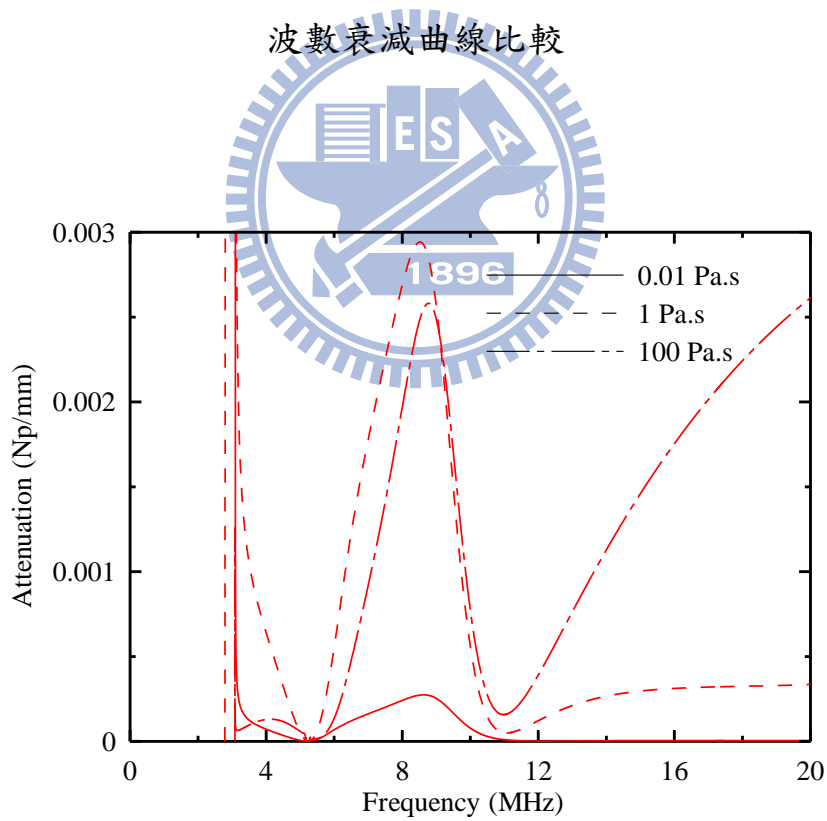


圖 3.20 不同黏滯係數 fluid (10 μm) / glass (1 mm) S_2 模態的

波數衰減曲線比較

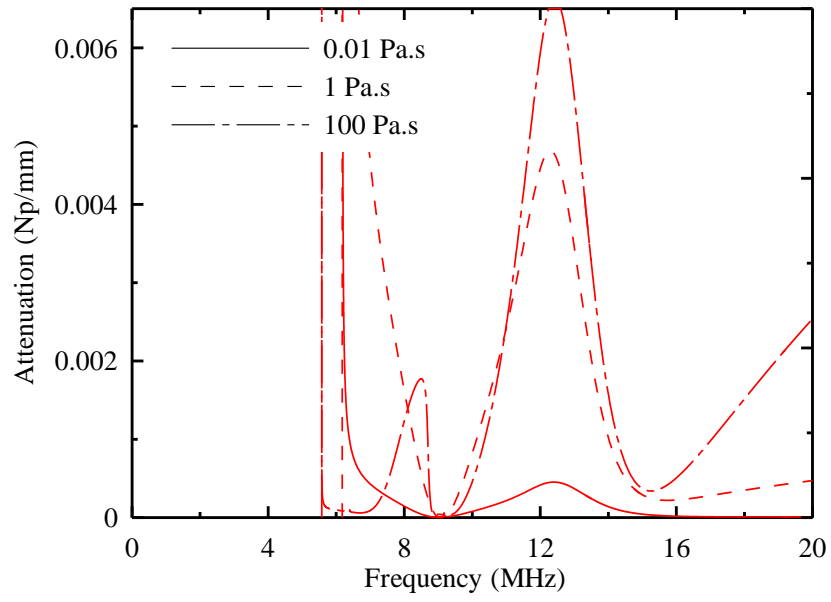


圖 3.21 不同黏滯係數 fluid ($10\ \mu\text{m}$) / glass ($1\ \text{mm}$) S_3 模態的
波數衰減曲線比較

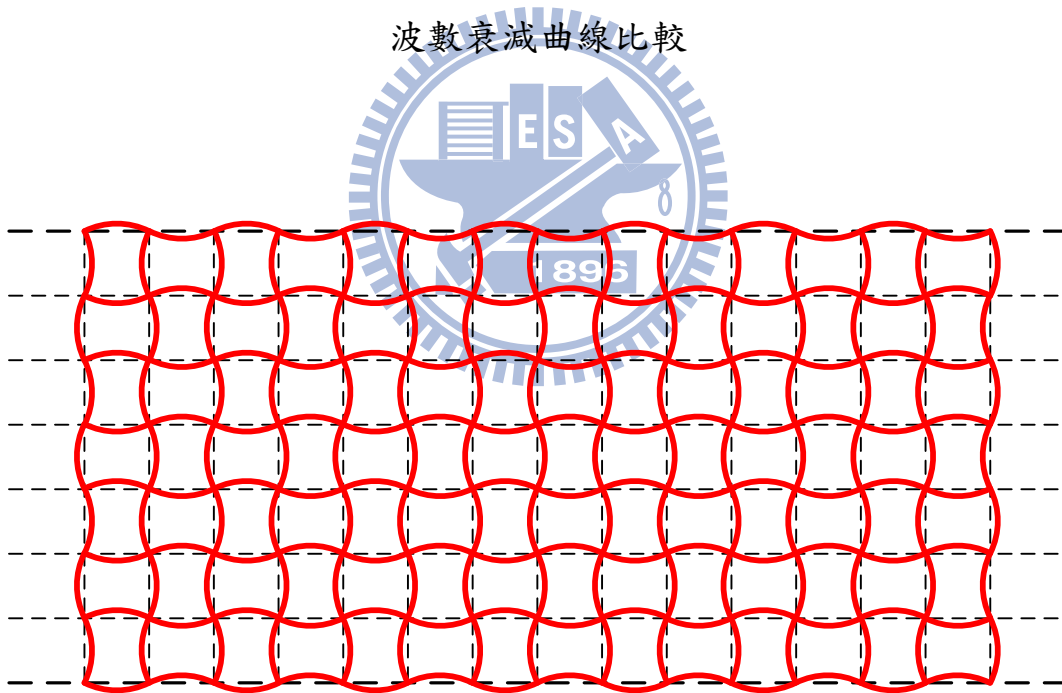


圖 3.22 Lamé 模態之體積變化示意圖

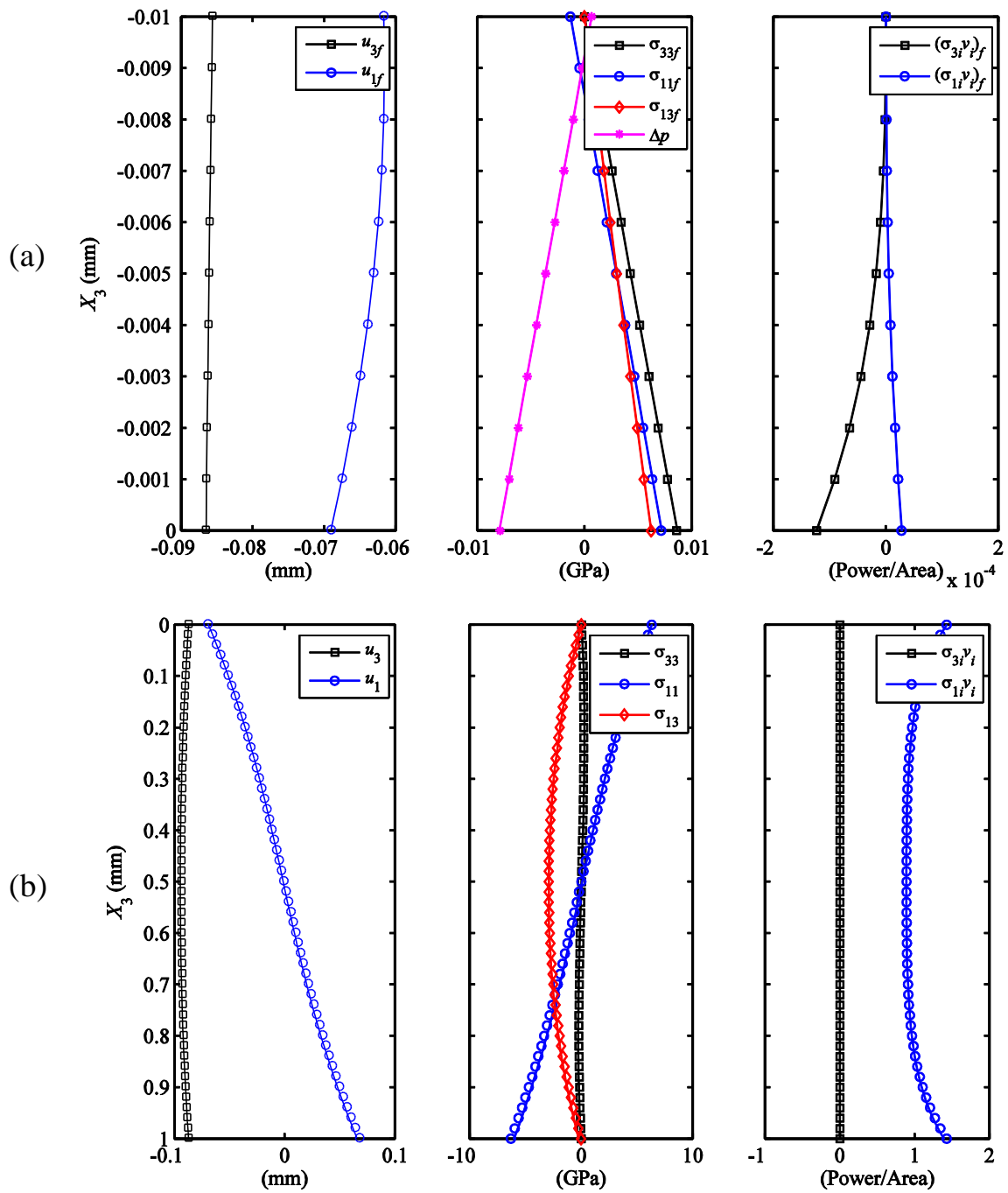


圖 3.23 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 A_0 模態之
 (a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差與時間平均功率流密度分佈

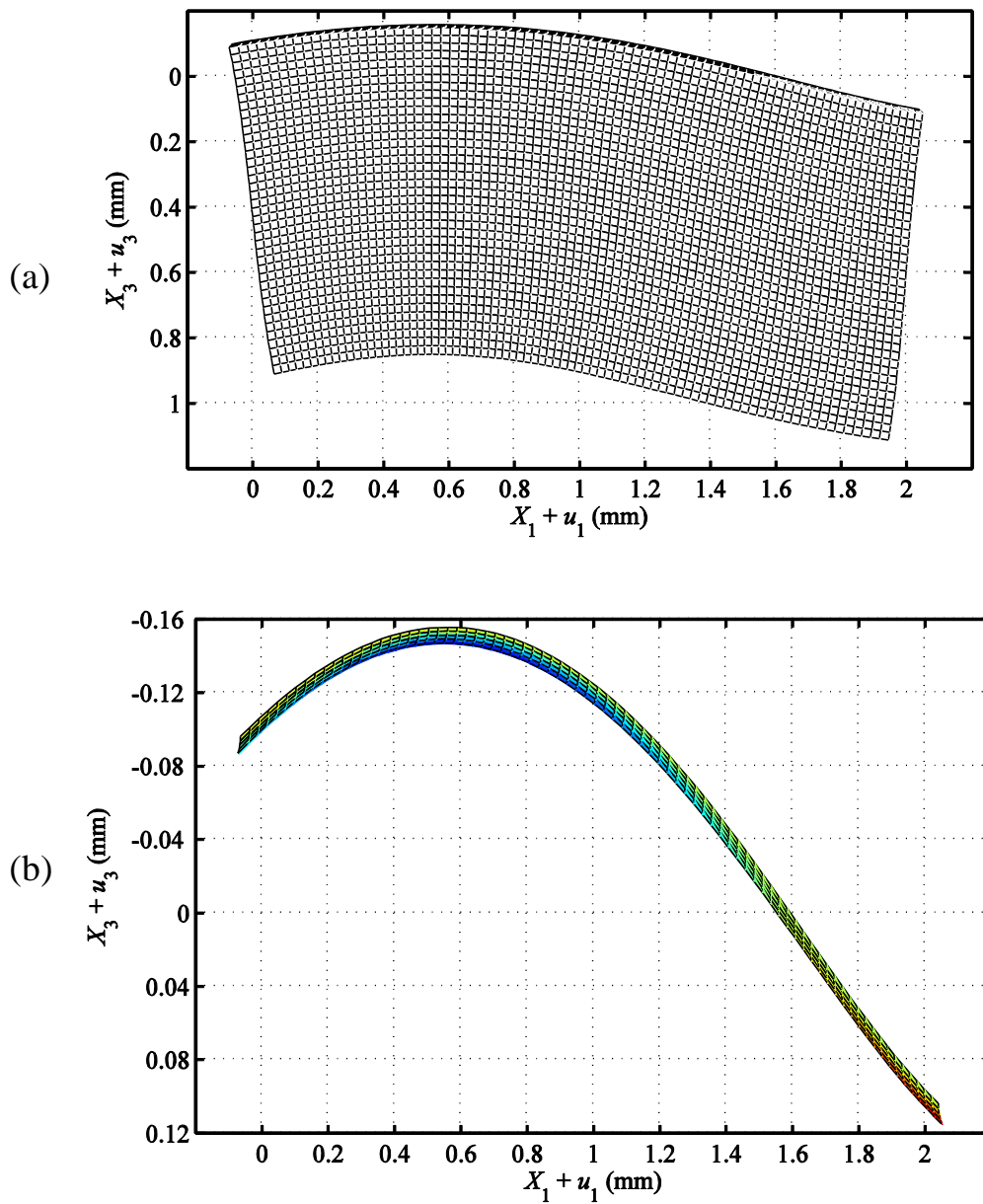


圖 3.24 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 A_0 模態之
 (a)液體層與固體層、(b)液體層之位移模態

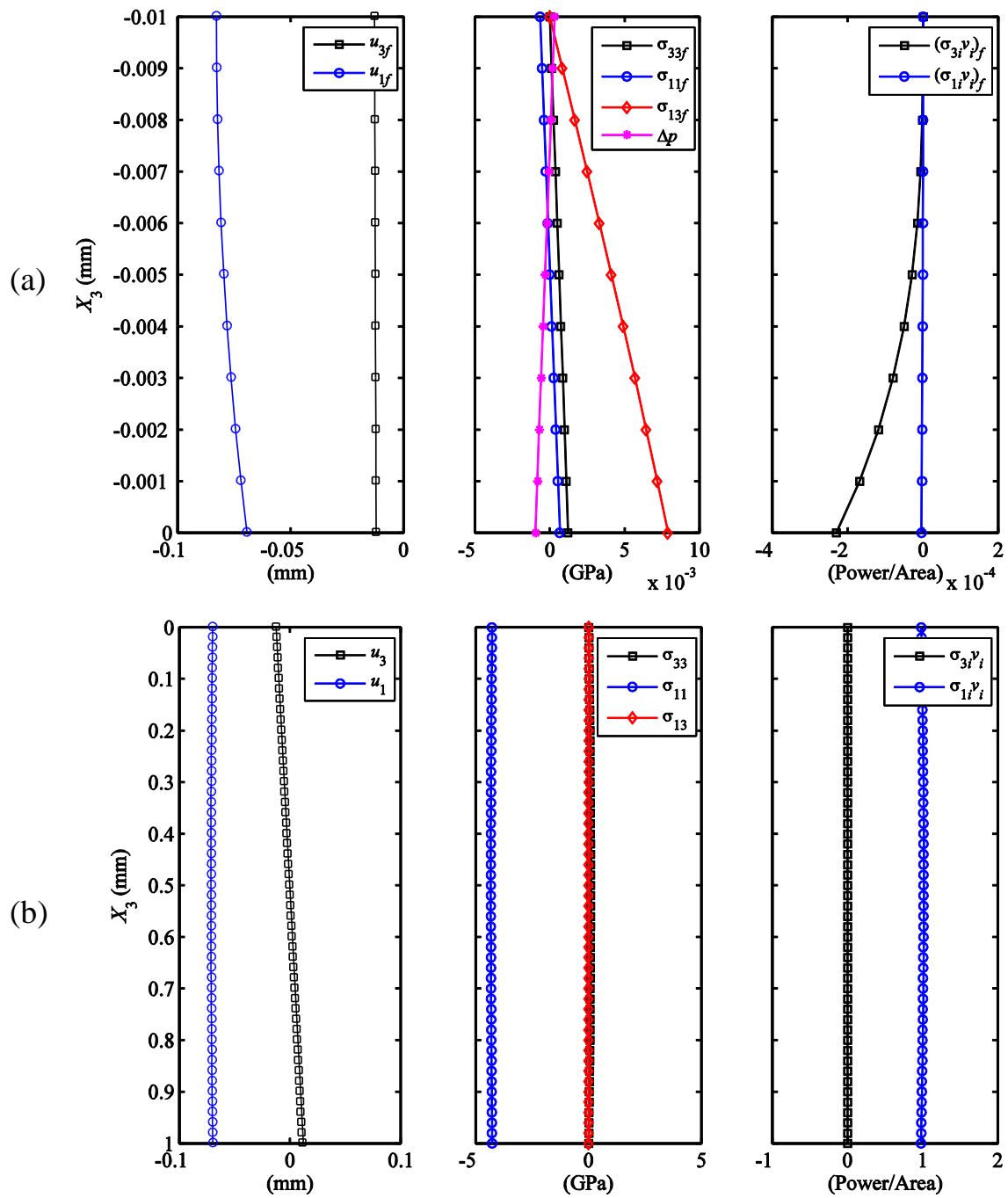


圖 3.25 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 S_0 模態之
(a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差與時間平均功率流密度分佈

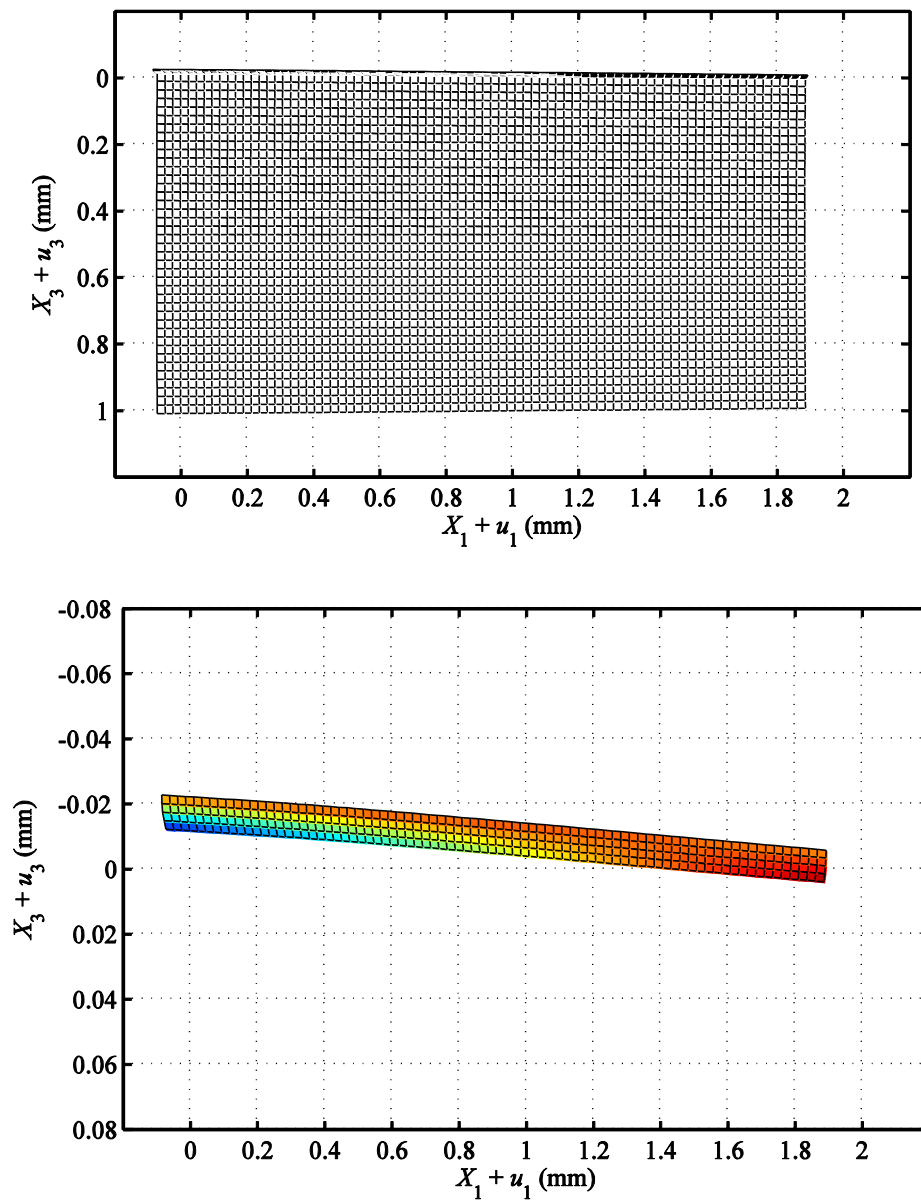


圖 3.26 fluid ($10 \mu\text{m}$, $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 S_0 模態之
 (a)液體層與固體層、(b)液體層之位移模態

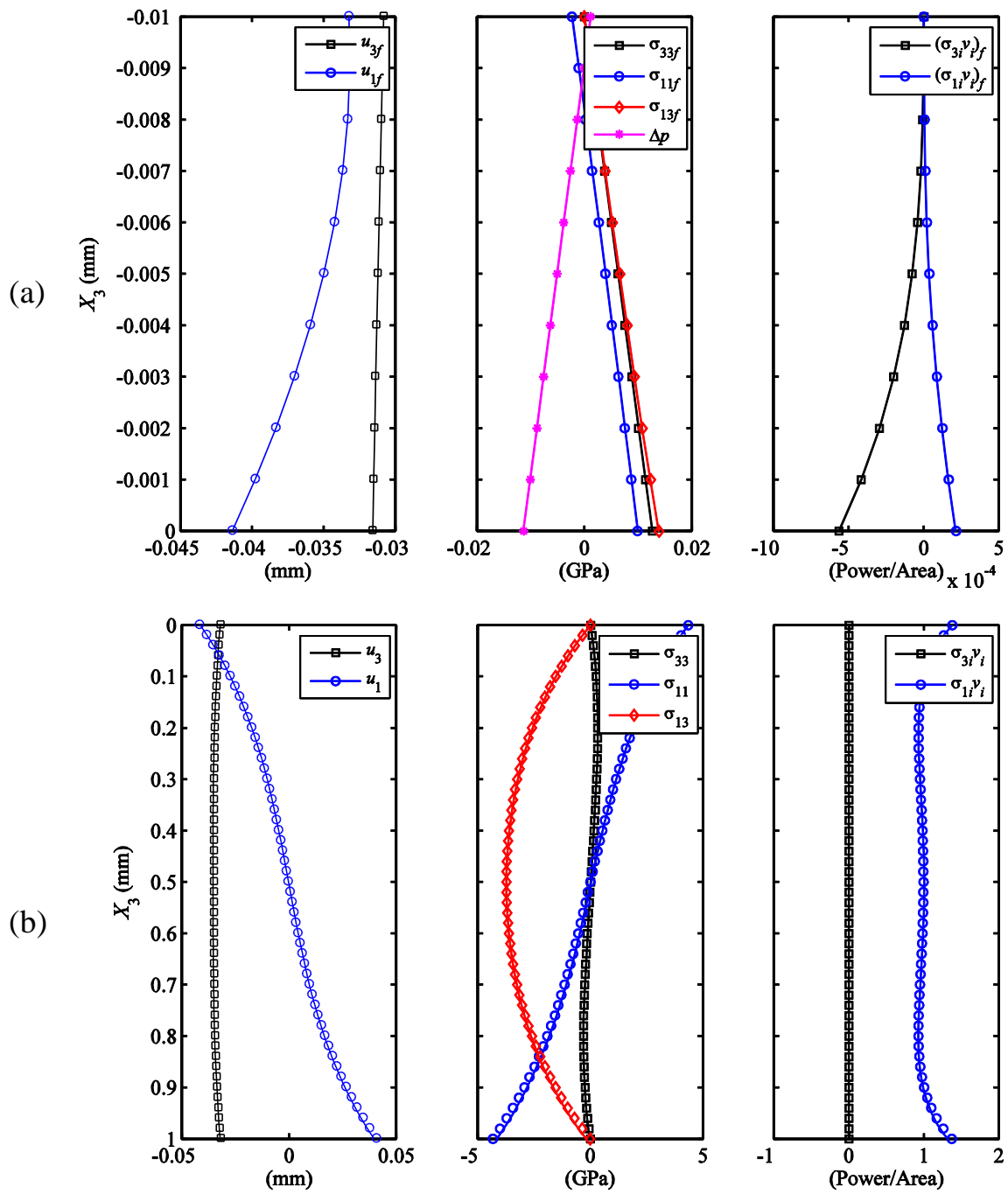


圖 3.27 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 A_0 模態之
(a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差與時間平均功率流密度分佈

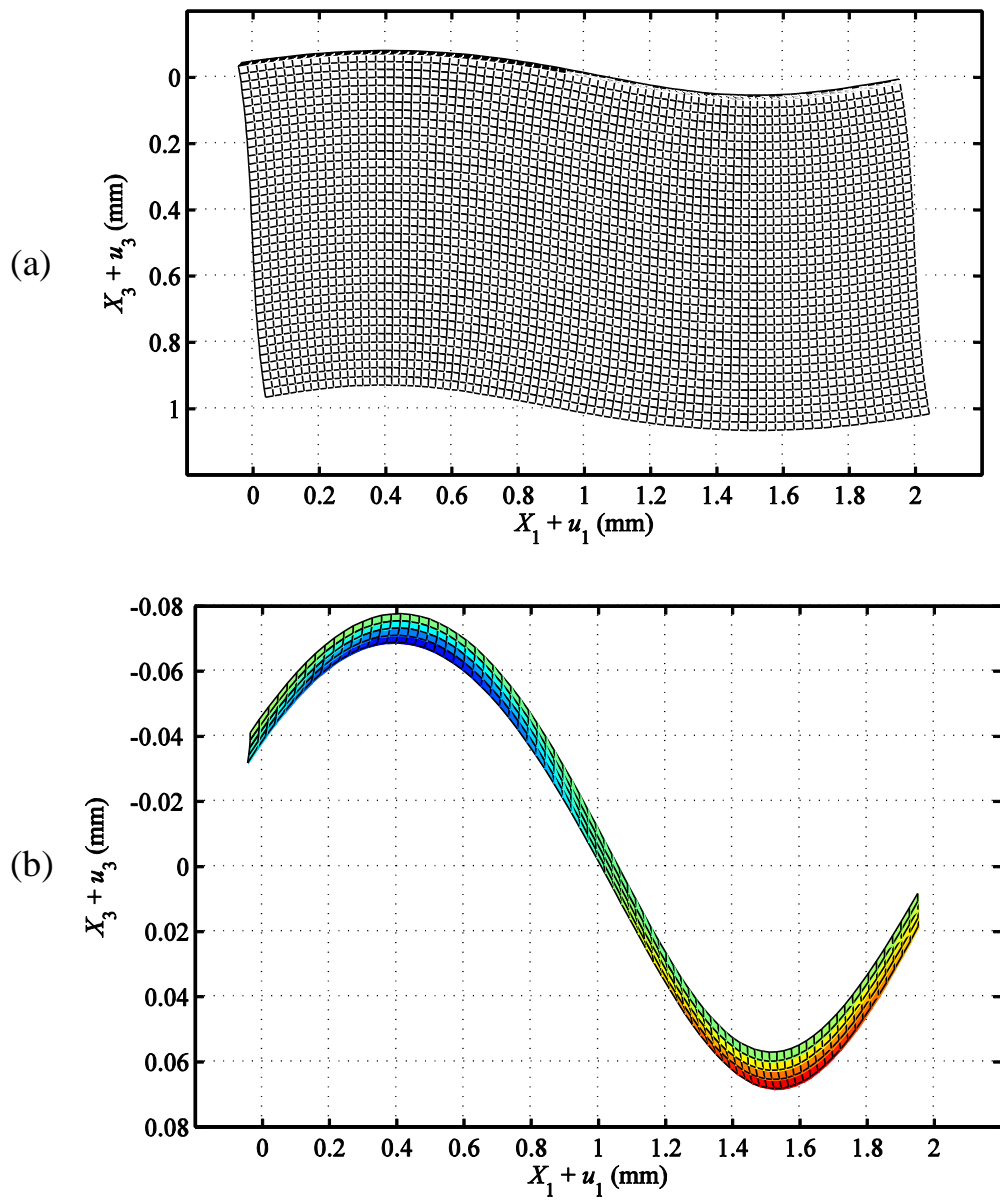


圖 3.28 fluid ($10\ \mu\text{m}$, $1\ \text{Pa}\cdot\text{s}$) / glass ($1\ \text{mm}$) 於頻率 $1\ \text{MHz}$ 的 A_0 模態之
 (a)液體層與固體層、(b)液體層之位移模態

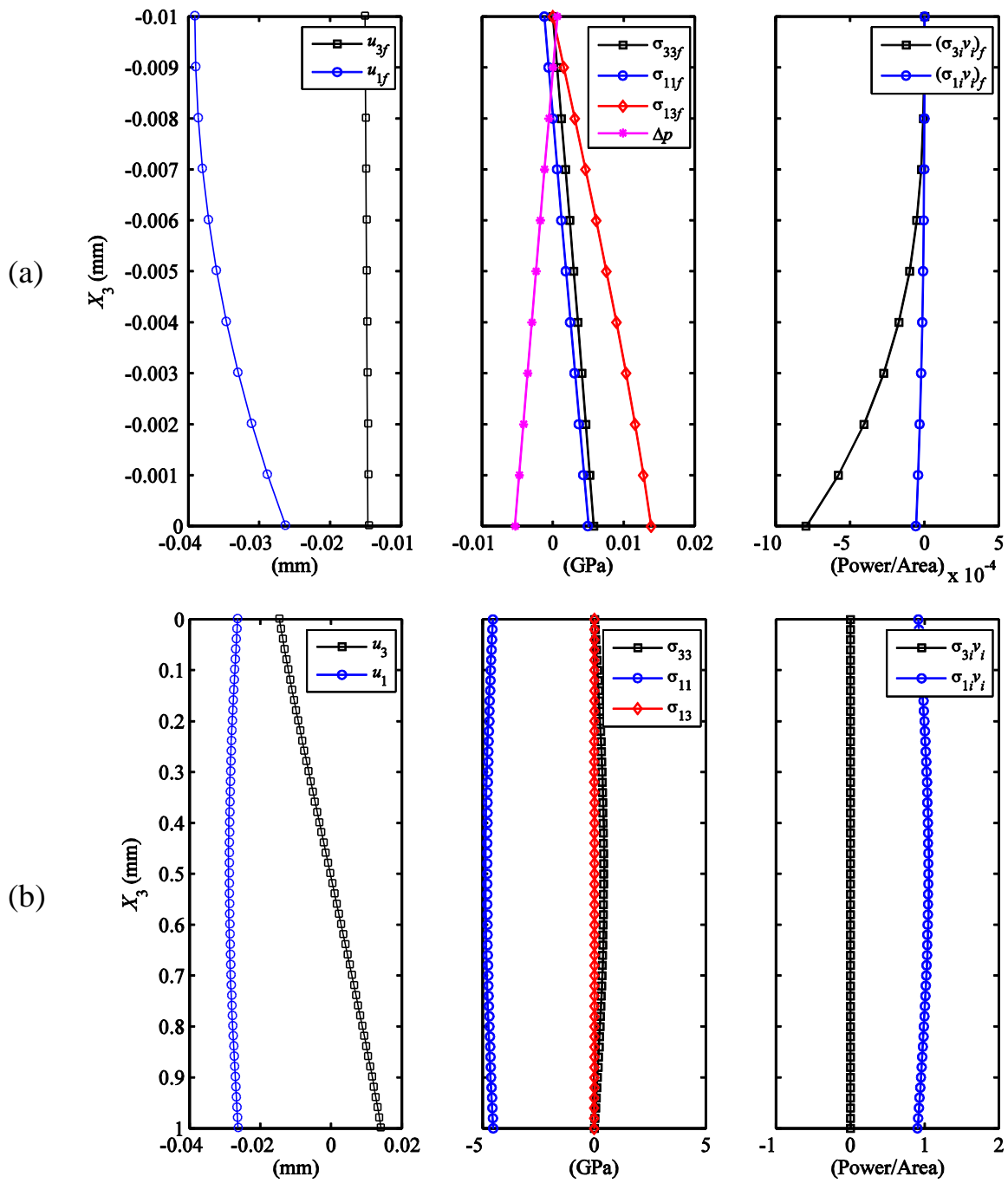


圖 3.29 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 S_0 模態之
(a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差與時間平均功率流密度分佈

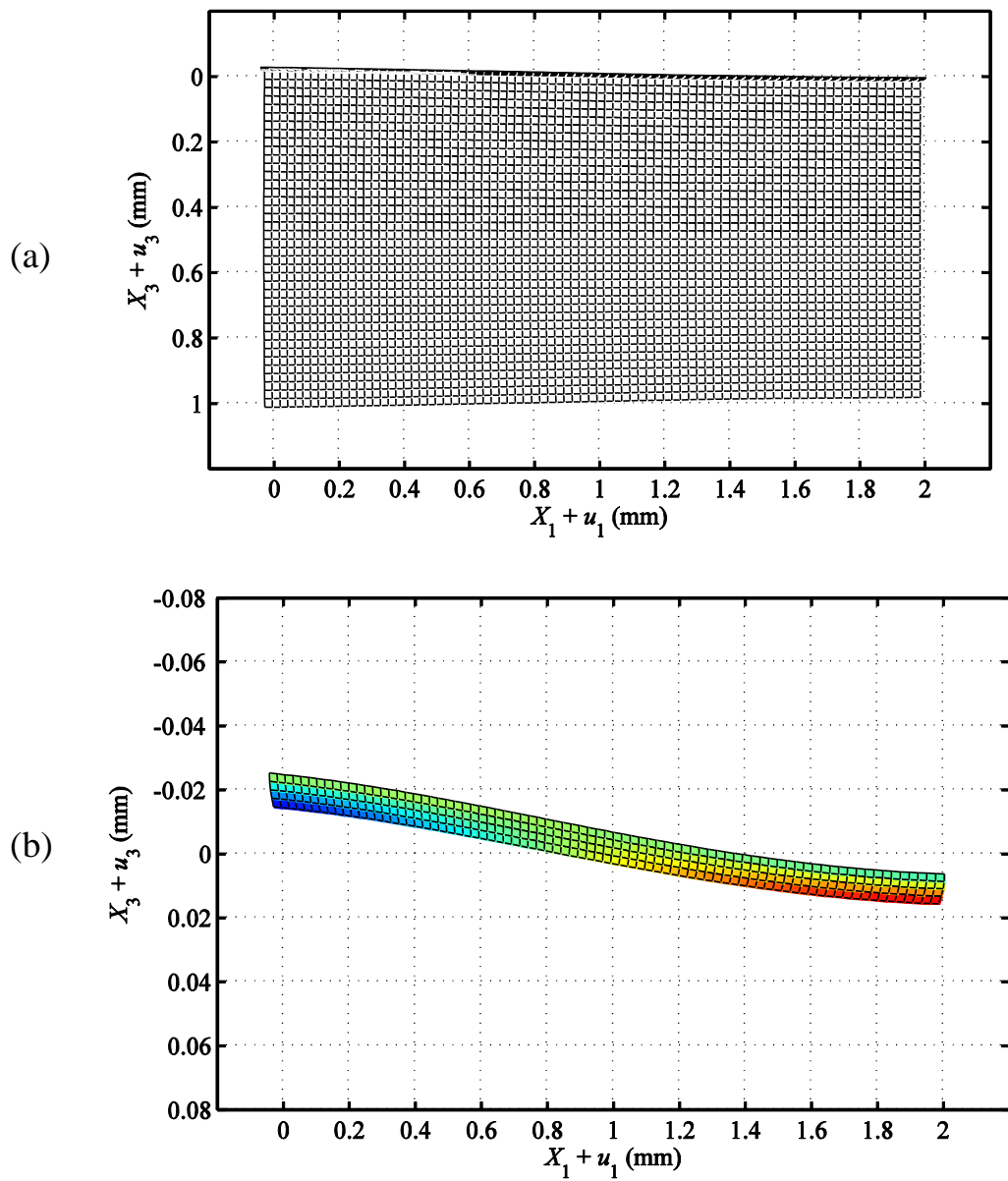


圖 3.30 fluid ($10 \mu\text{m}$, $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 S_0 模態之
 (a) 液體層與固體層、(b) 液體層之位移模態

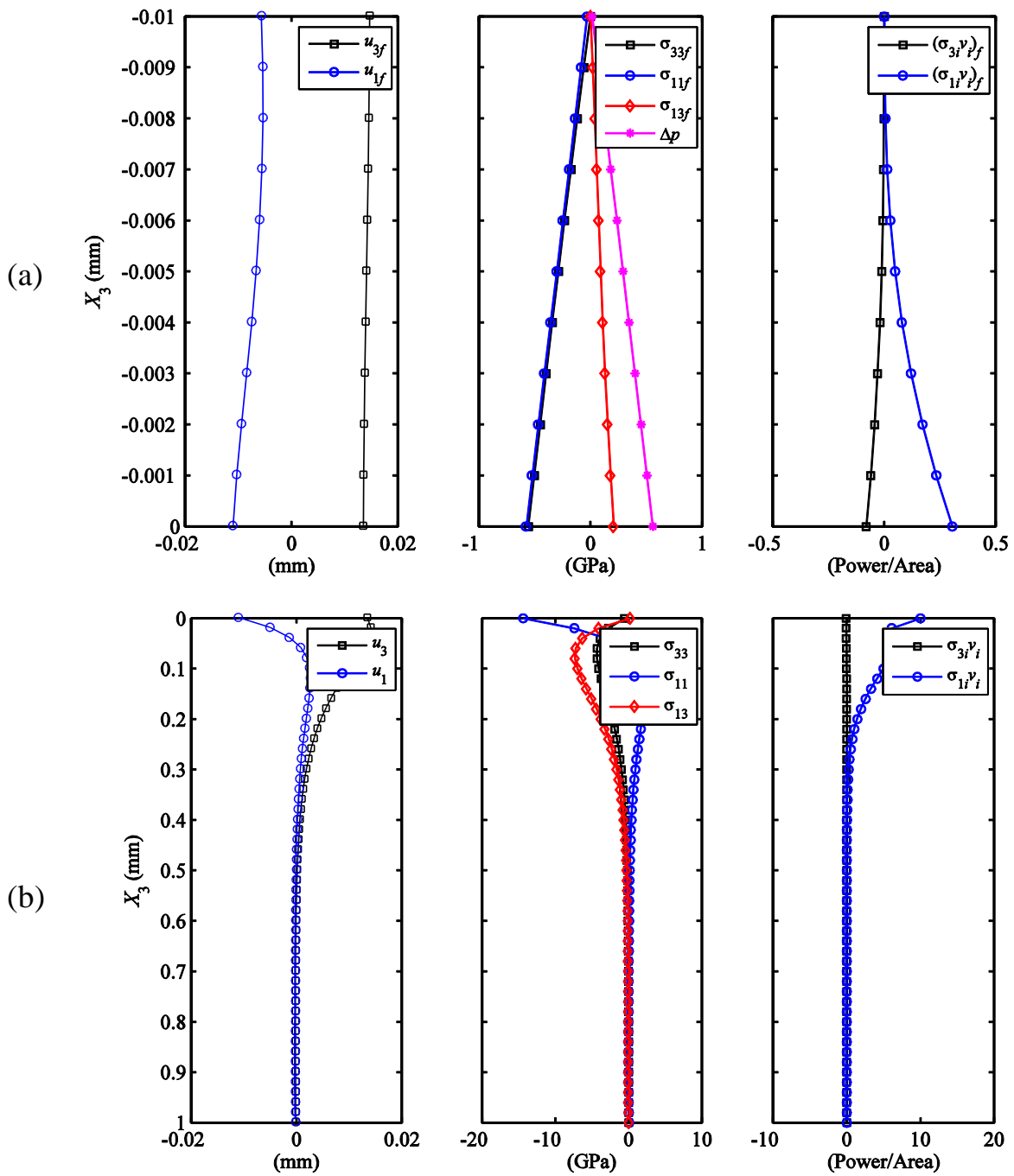


圖 3.31 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A_0 模態之
(a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差與時間平均功率流密度分佈

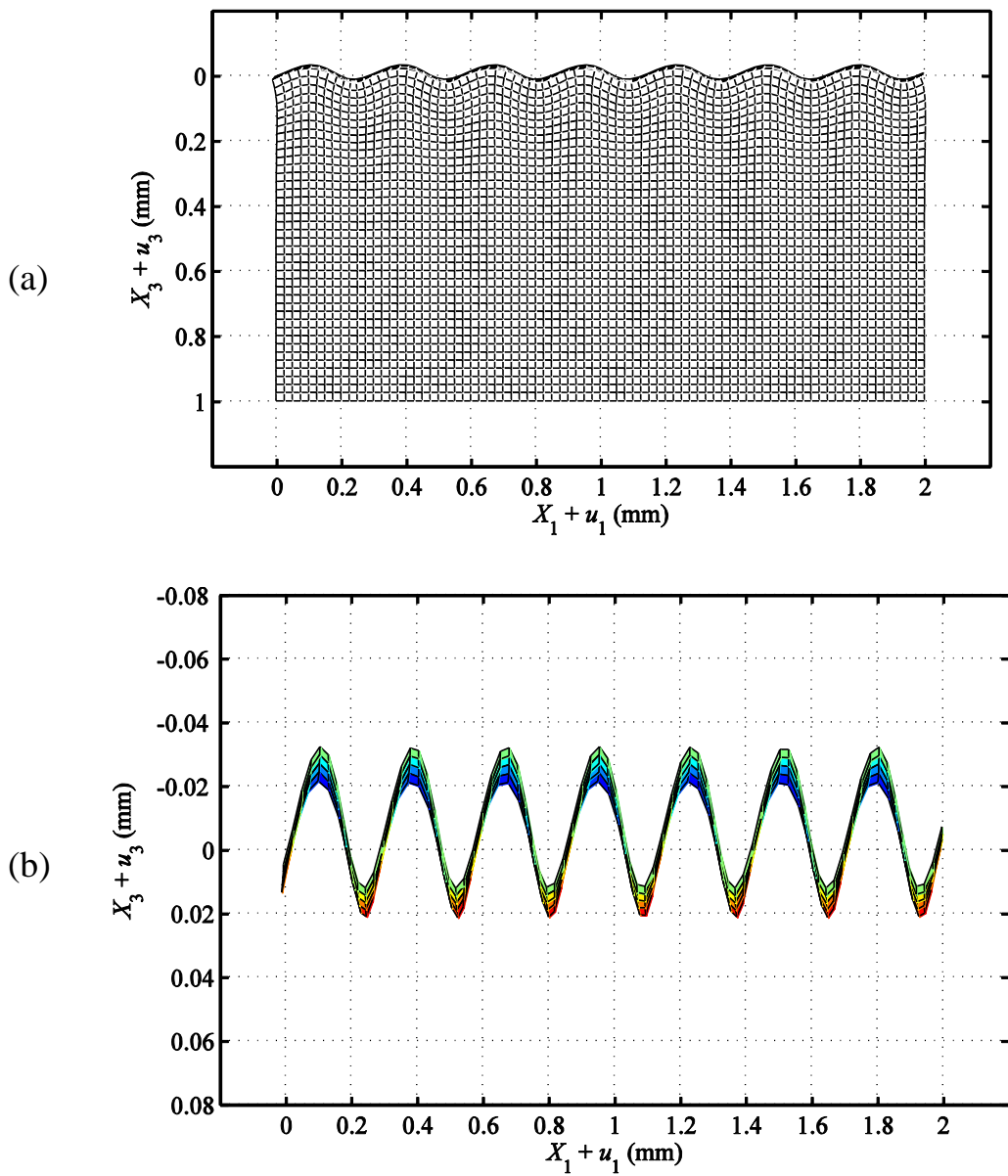


圖 3.32 fluid ($10 \mu\text{m}$, $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A_0 模態之
 (a)液體層與固體層、(b)液體層之位移模態

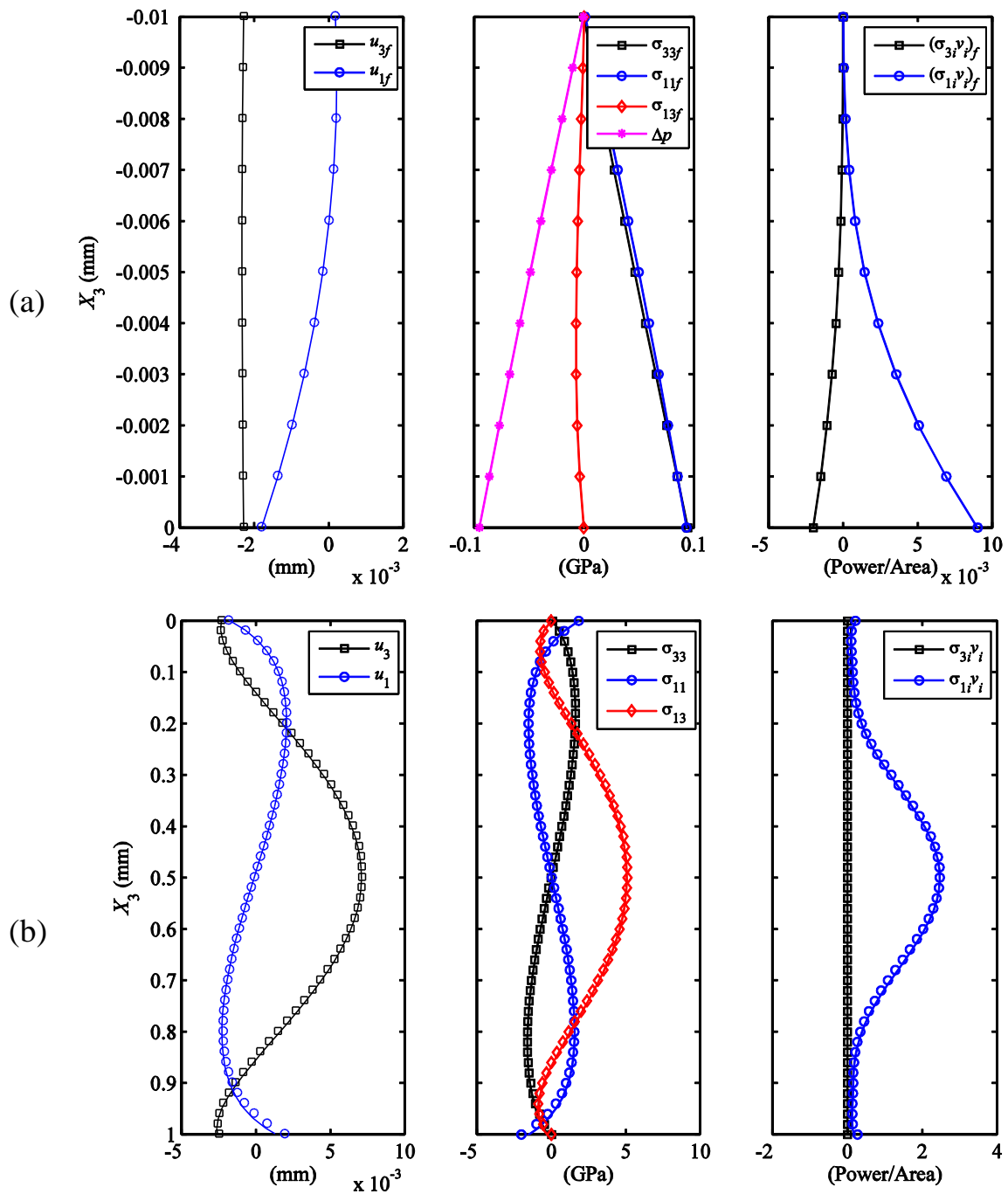


圖 3.33 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A_1 模態之
 (a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差與時間平均功率流密度分佈

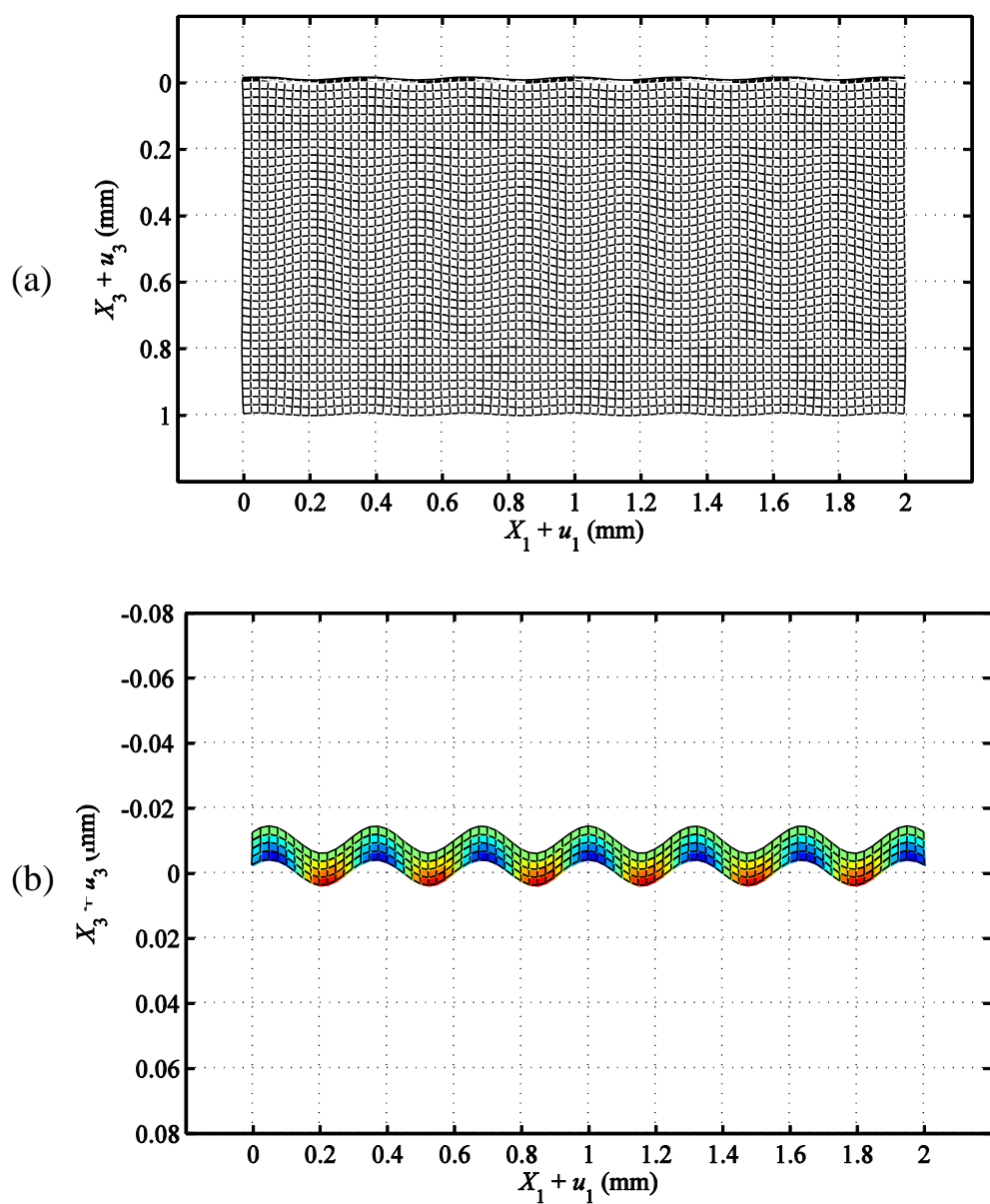


圖 3.34 fluid ($10 \mu\text{m}$, $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A_1 模態之
 (a)液體層與固體層、(b)液體層之位移模態

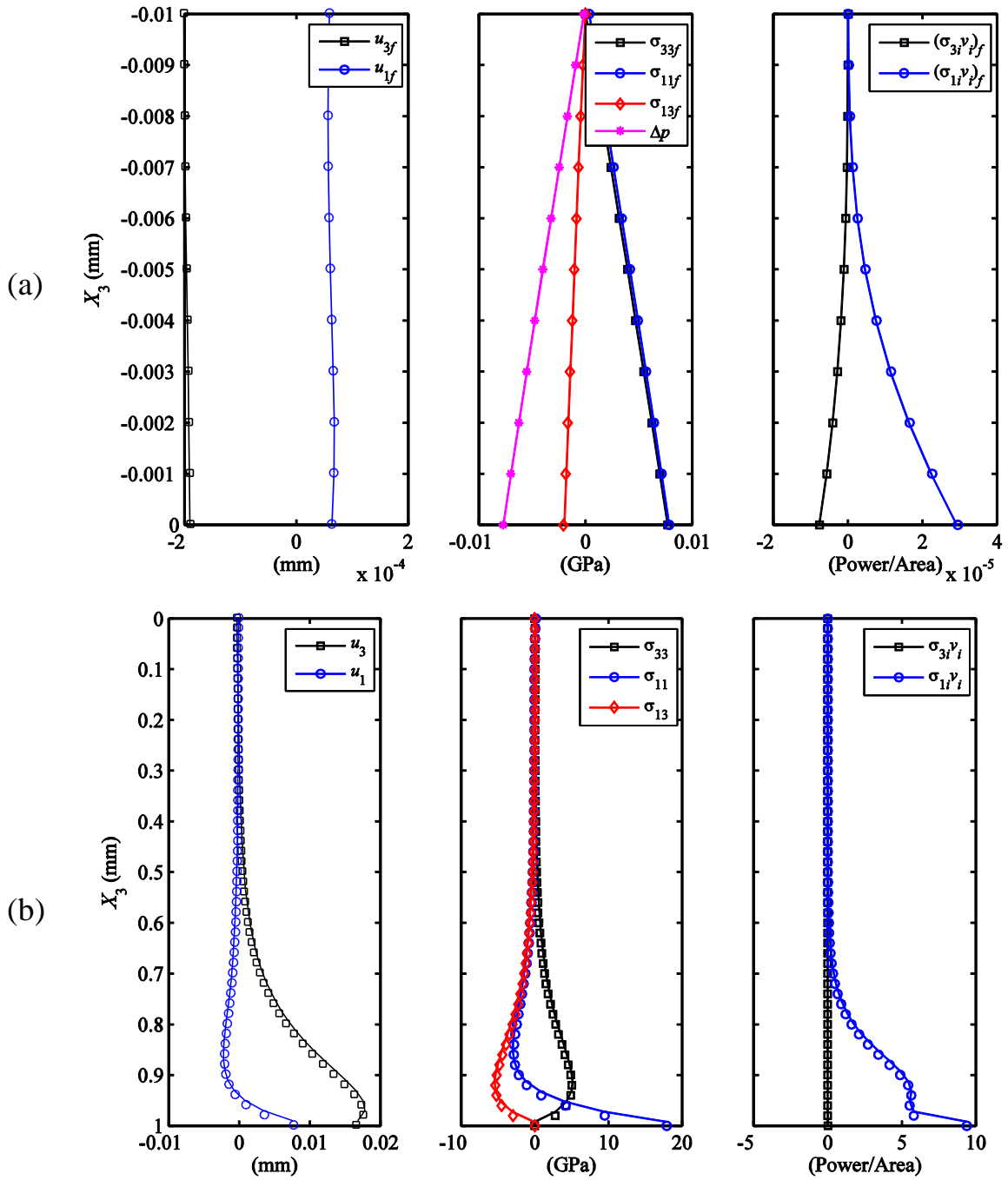


圖 3.35 fluid ($10 \mu\text{m}$, $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_0 模態之
 (a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差與時間平均功率流密度分佈

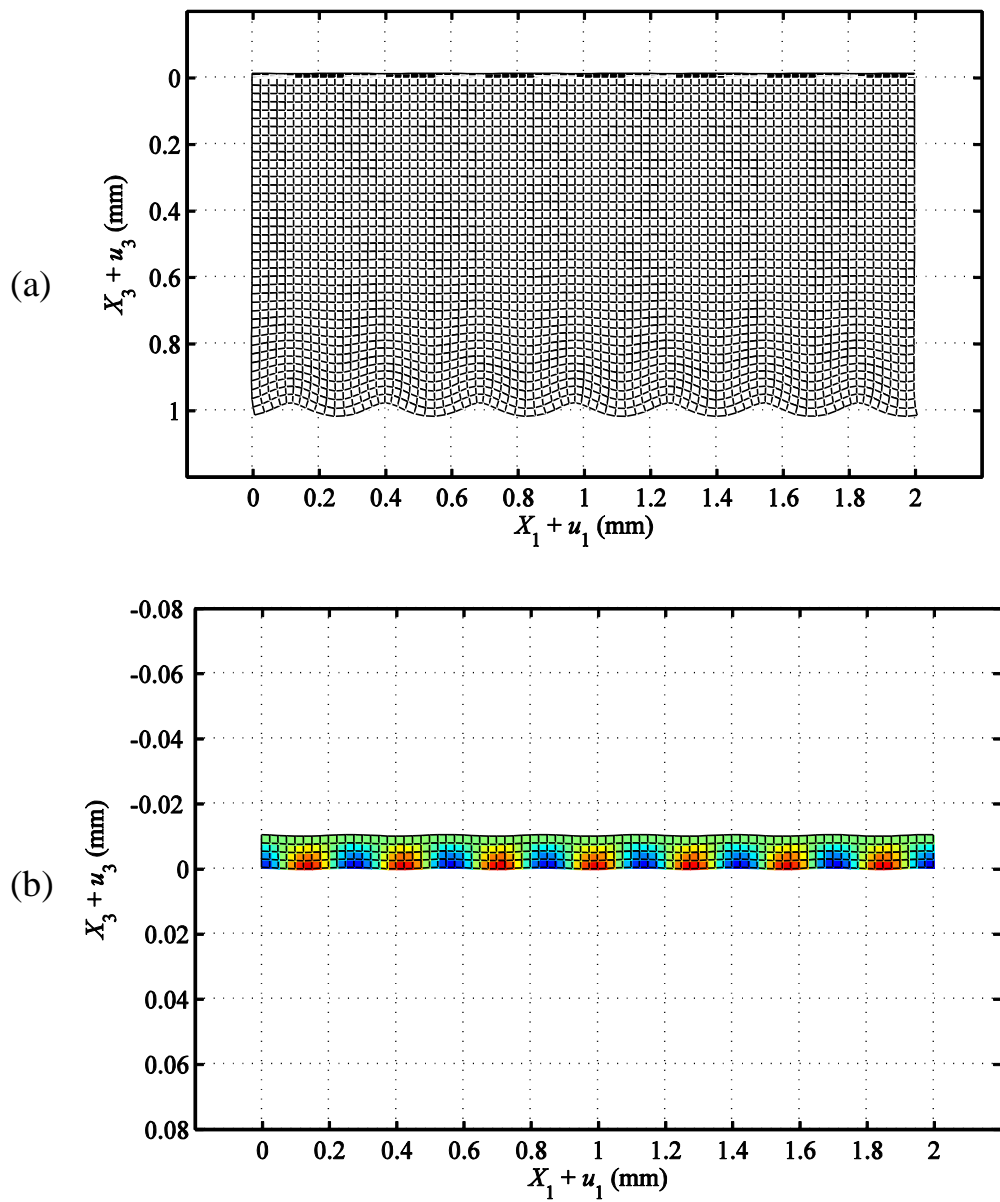


圖 3.36 fluid ($10 \mu\text{m}$, $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_0 模態之
 (a)液體層與固體層、(b)液體層之位移模態

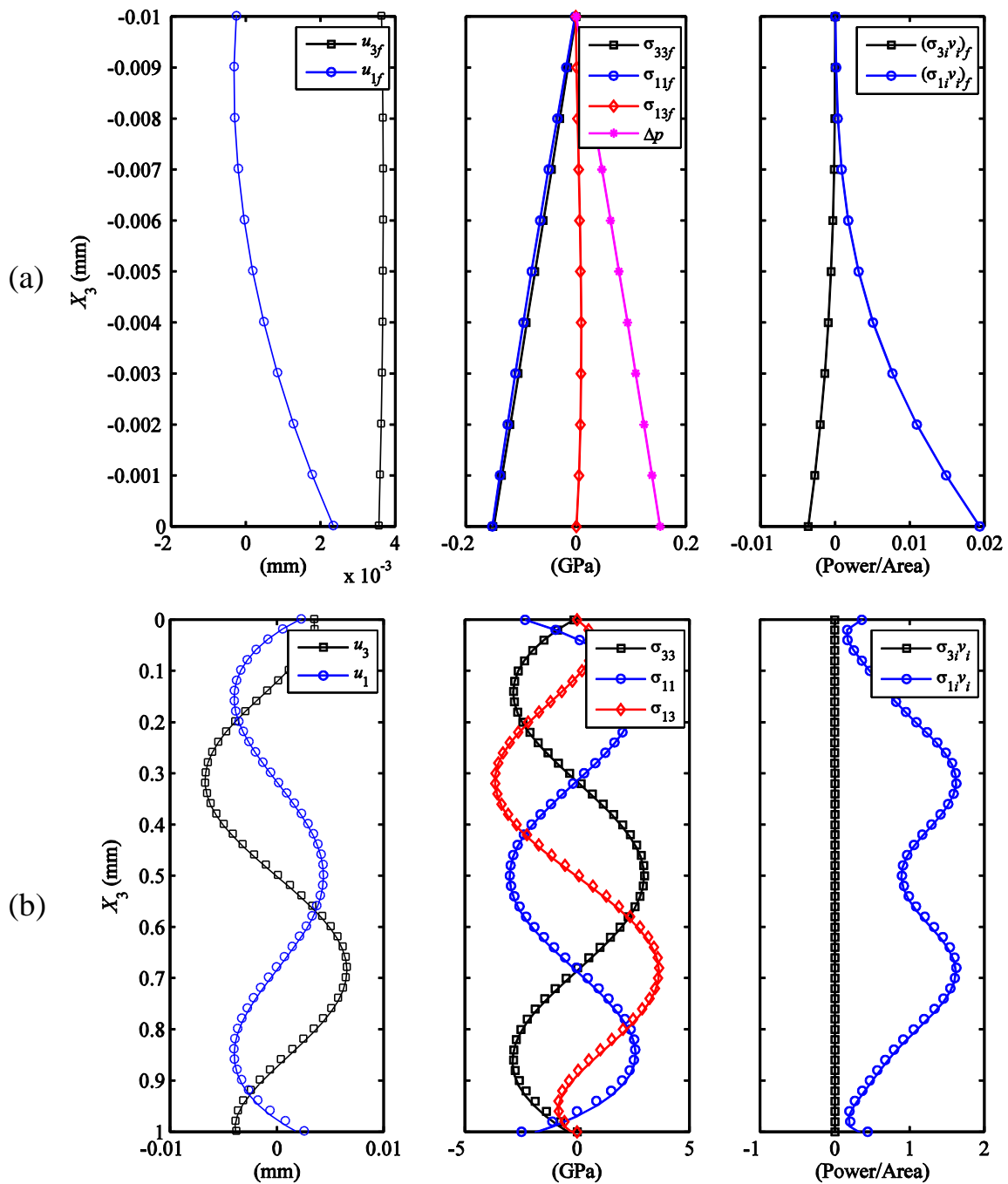


圖 3.37 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_1 模態之
(a)流體層、(b)固體層位移、應力、壓力差與時間平均功率流密度分佈

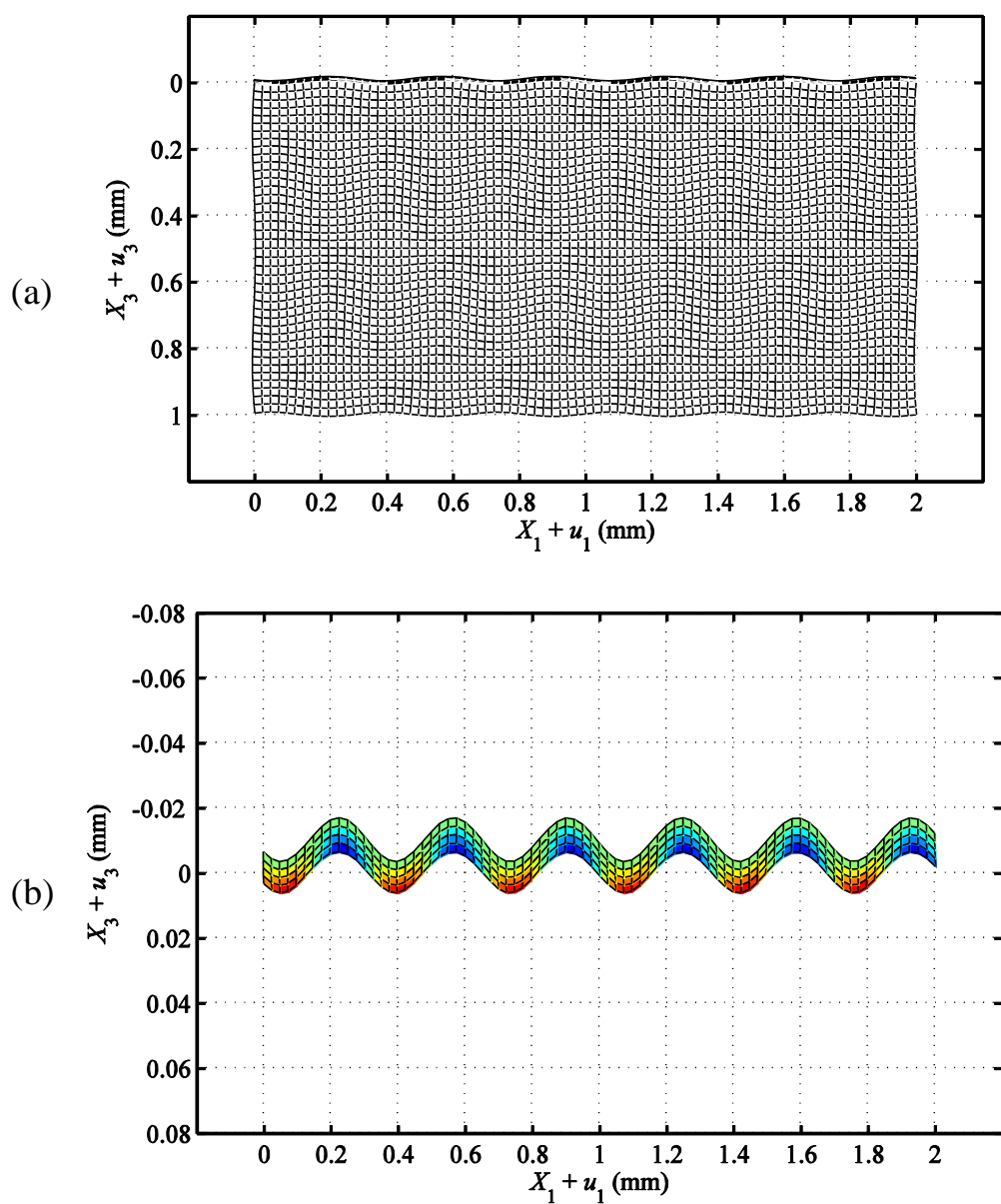


圖 3.38 fluid ($10 \mu\text{m}$, $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_1 模態之
 (a)液體層與固體層、(b)液體層之位移模態

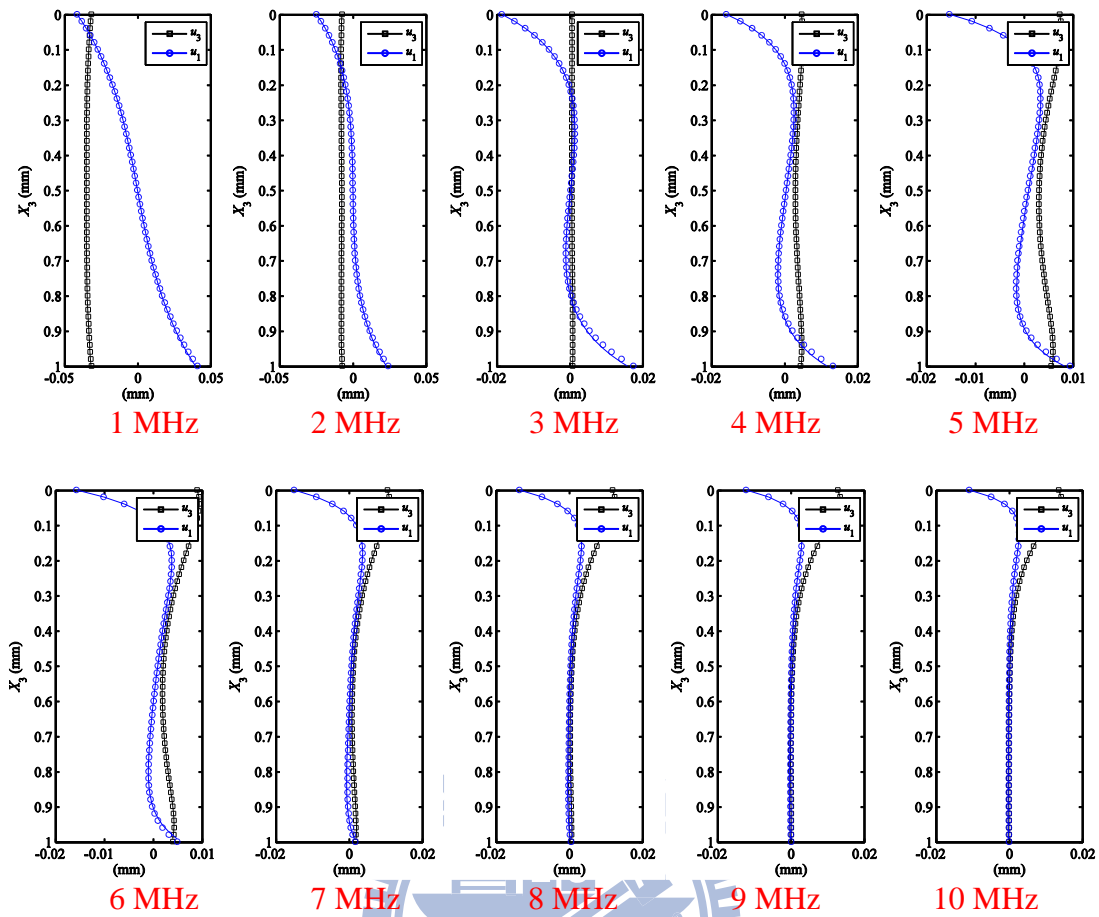


圖 3.39 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1~10 MHz 的 A_0 模態之
固體層位移分佈

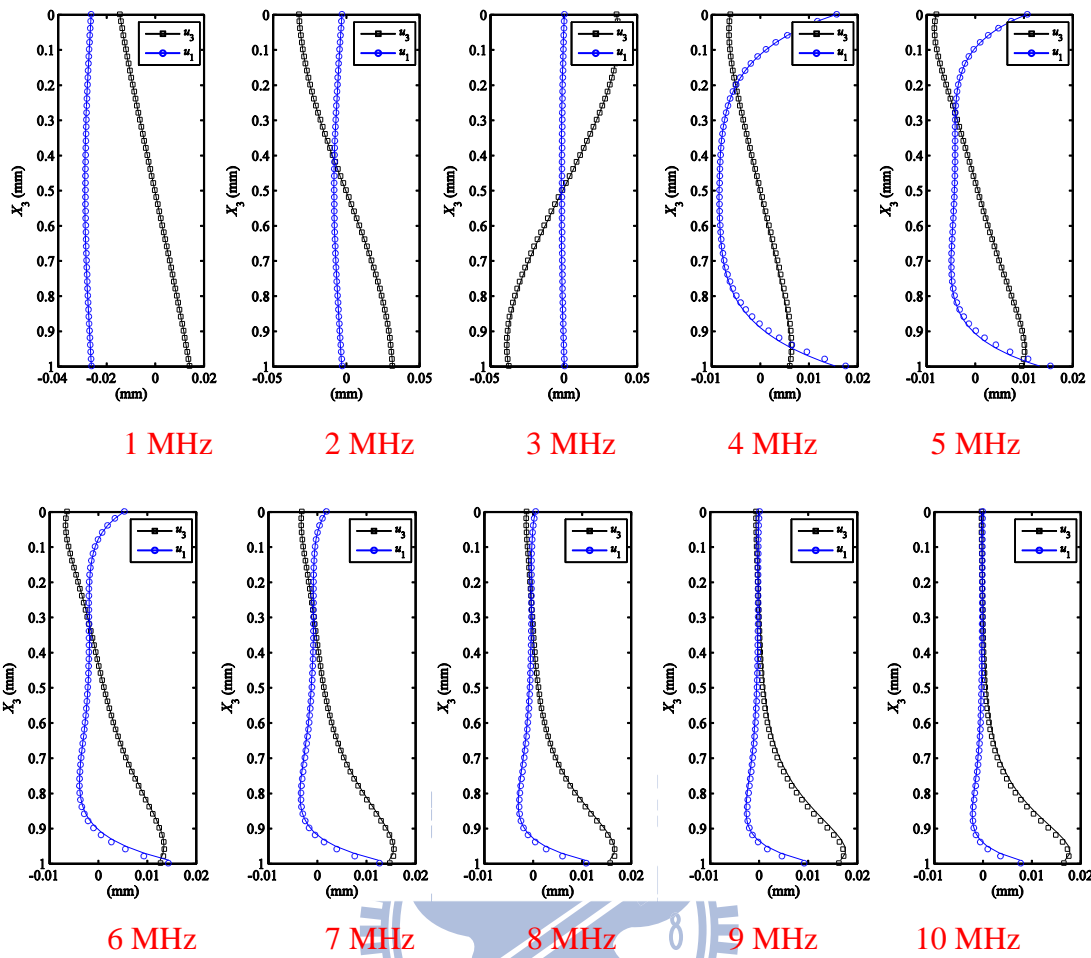


圖 3.40 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1~10 MHz 的 S_0 模態之
固體層位移分佈

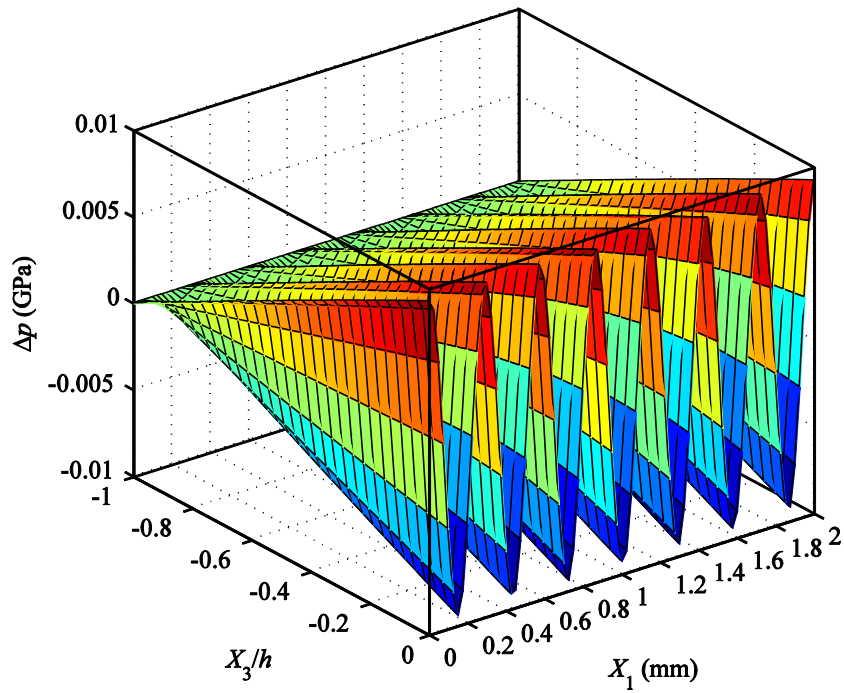


圖 3.41 fluid (10 μm , 0.1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_0 模態之 X_1 與 X_3 構成之二維平面壓力分佈

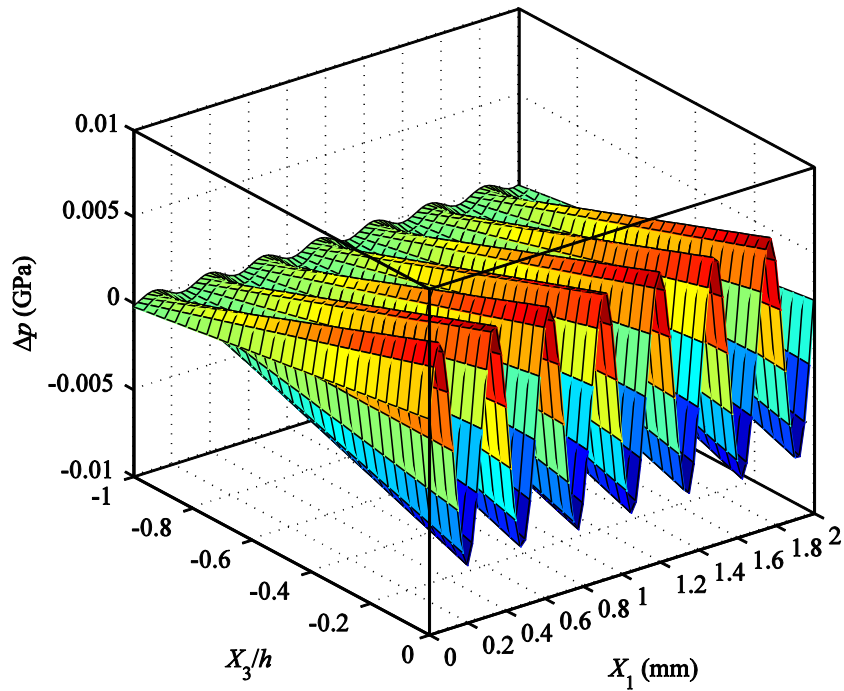


圖 3.42 fluid (1 μm , 0.1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_0 模態之 X_1 與 X_3 構成之二維平面壓力分佈

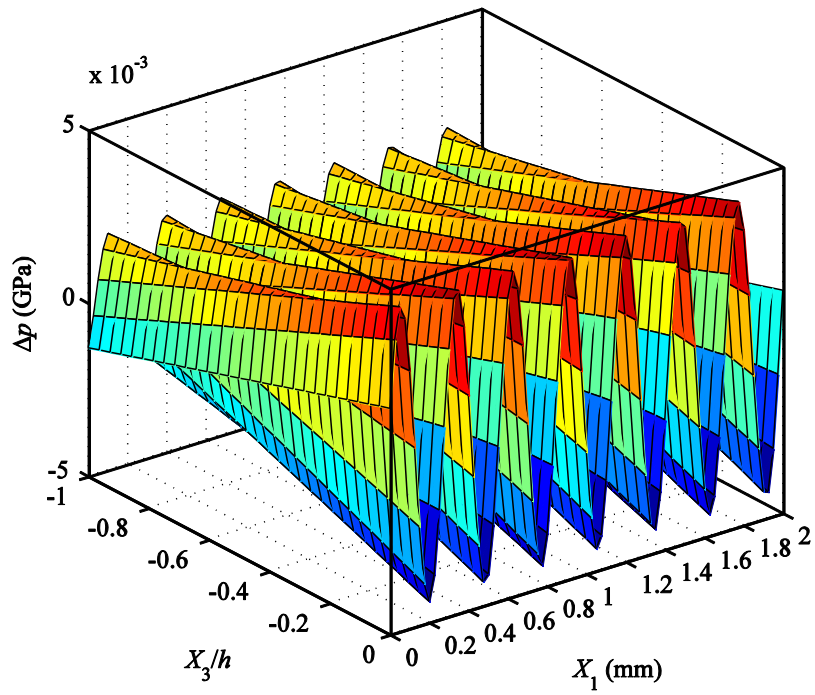


圖 3.43 fluid (0.1 μ m, 0.1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_0 模態之 X_1 與 X_3 構成之二維平面壓力分佈

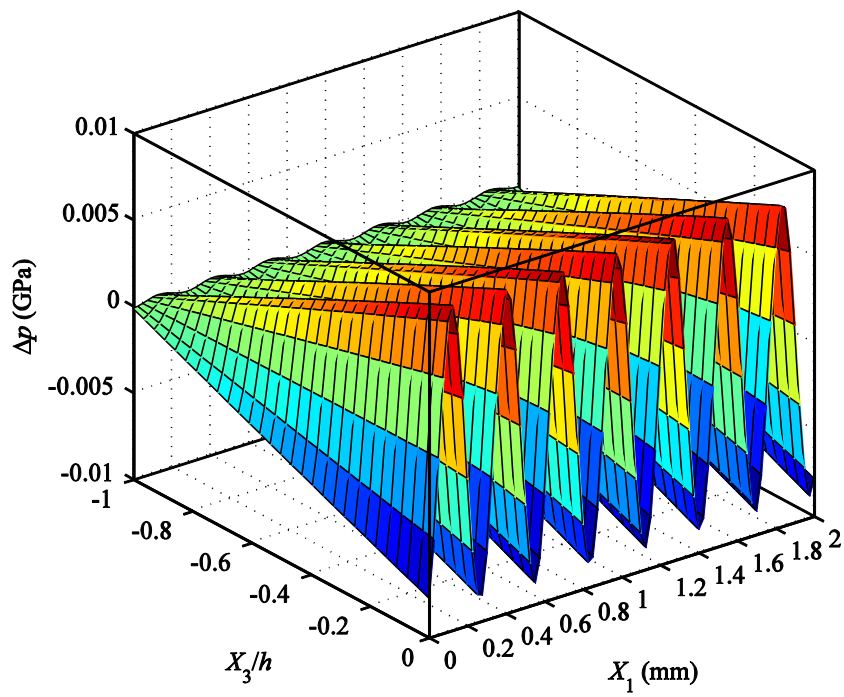


圖 3.44 fluid (10 μ m, 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_0 模態之 X_1 與 X_3 構成之二維平面壓力分佈

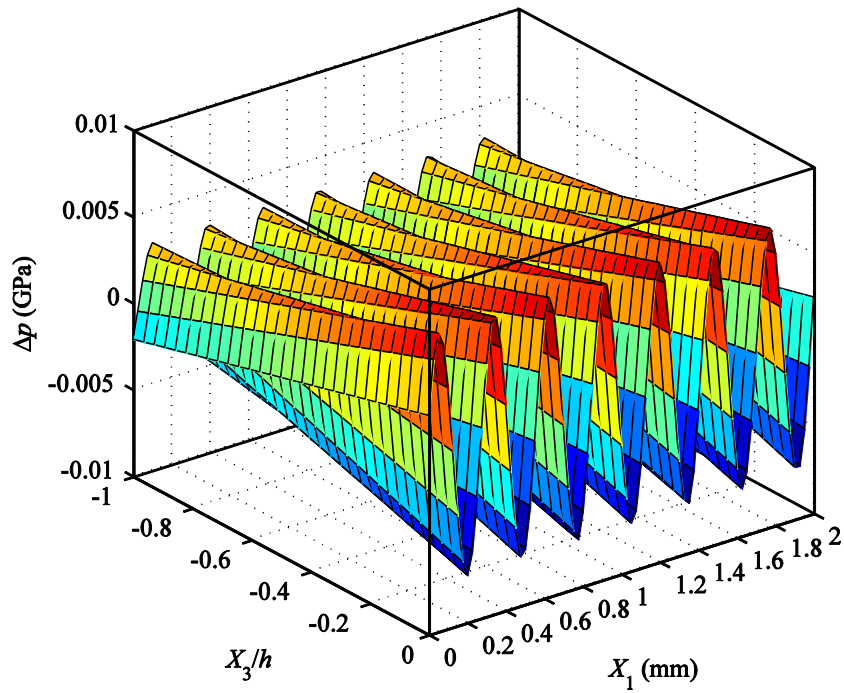


圖 3.45 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_0 模態之 X_1 與 X_3 構成之二維平面壓力分佈

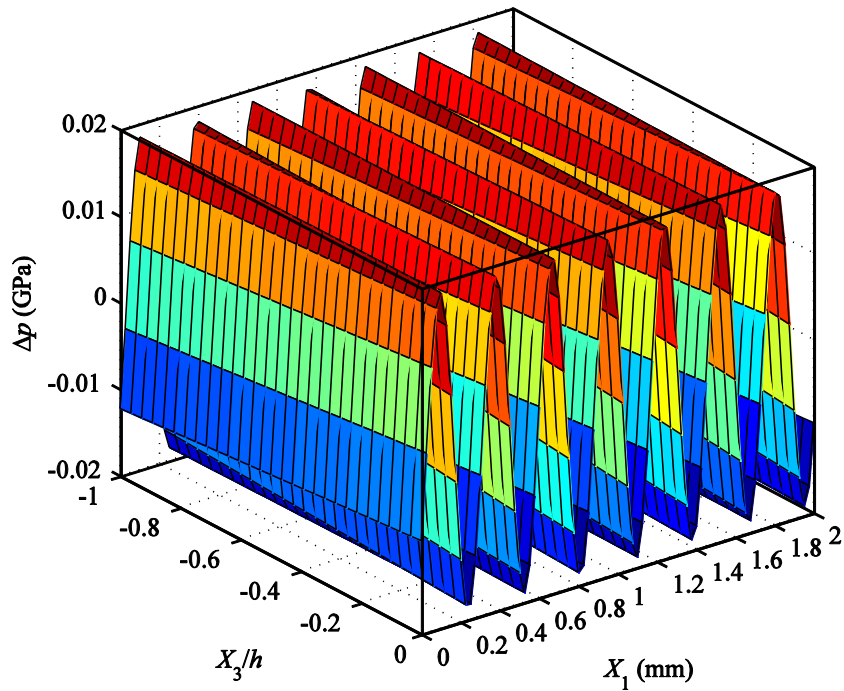


圖 3.46 fluid (0.1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_0 模態之 X_1 與 X_3 構成之二維平面壓力分佈

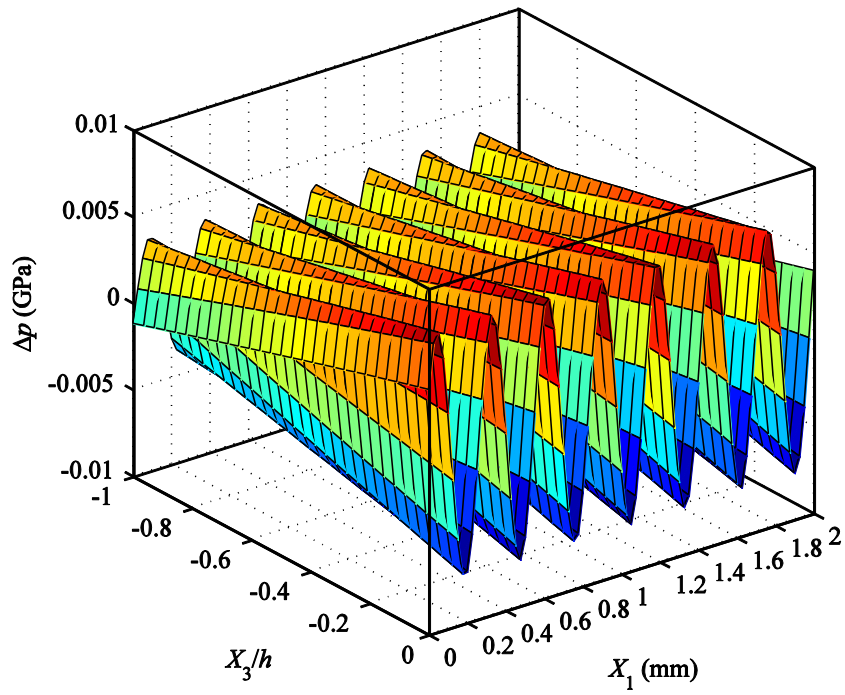


圖 3.47 fluid (10 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_0 模態之 X_1 與 X_3 構成之二維平面壓力分佈

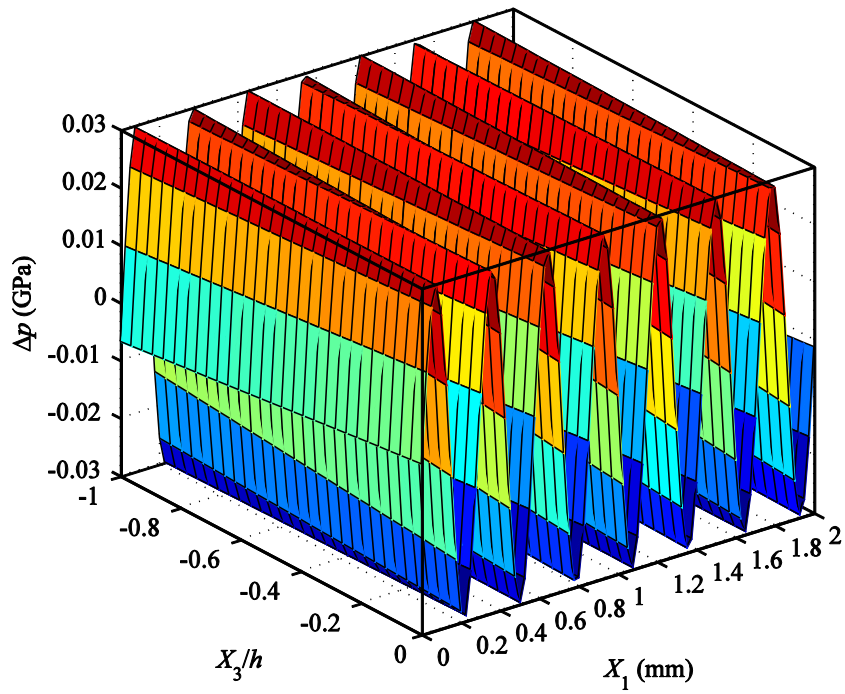


圖 3.48 fluid (1 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_0 模態之 X_1 與 X_3 構成之二維平面壓力分佈

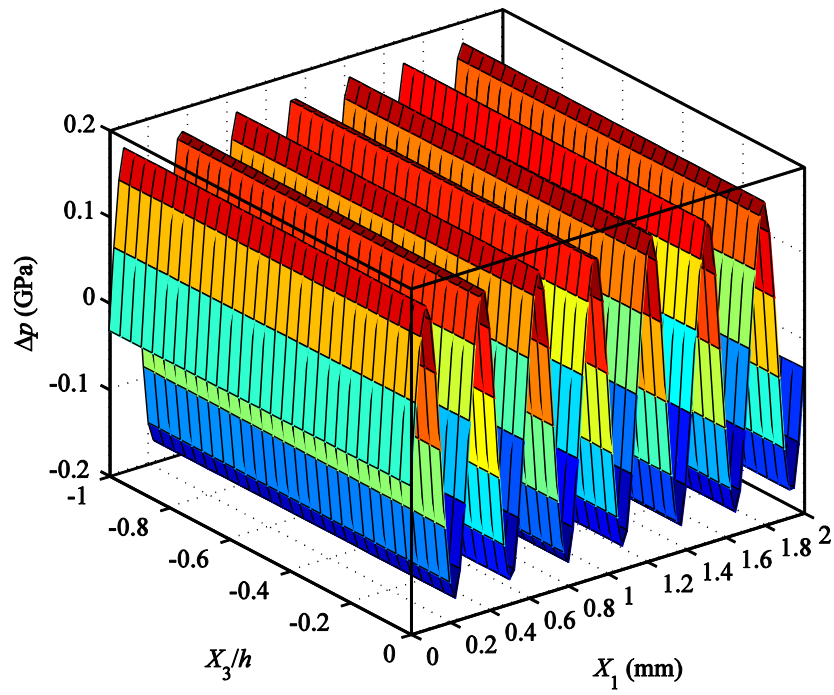


圖 3.49 fluid (0.1 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_0 模態之 X_1 與 X_3 構成的二維平面壓力分佈



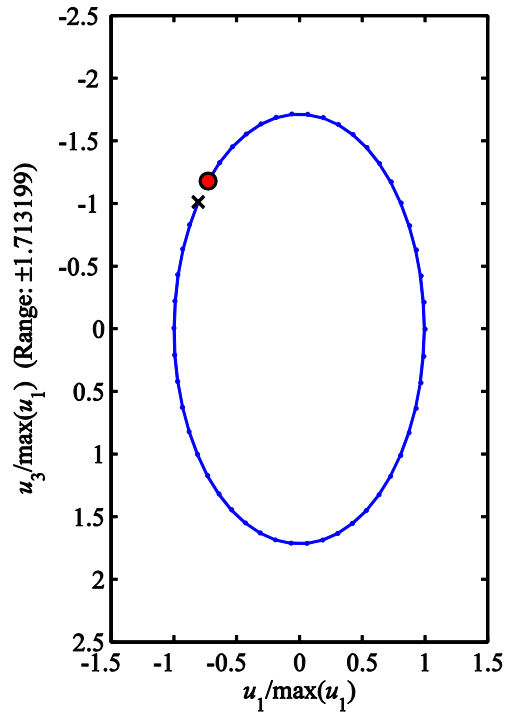


圖 3.50 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 A_0 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

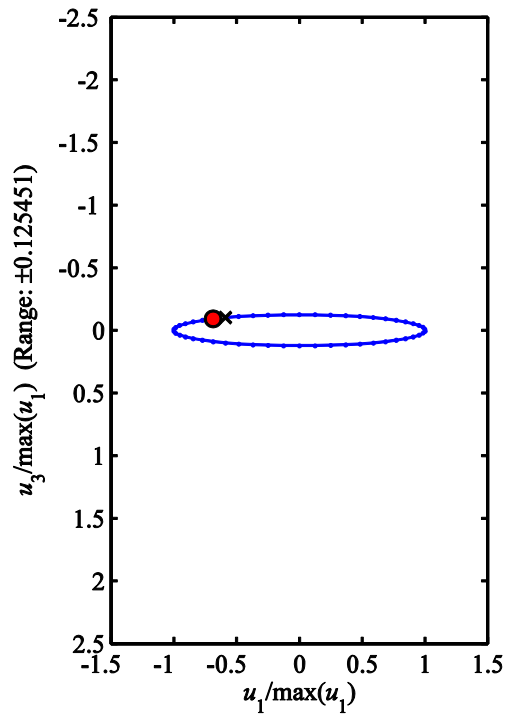


圖 3.51 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 S_0 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

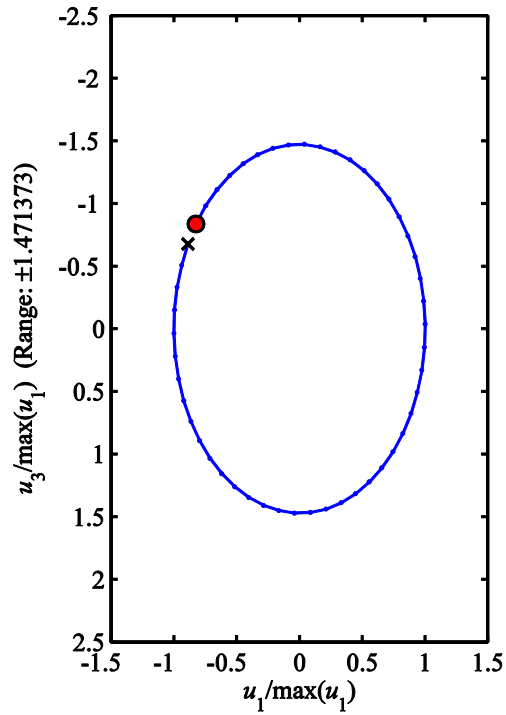


圖 3.52 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 A_0 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

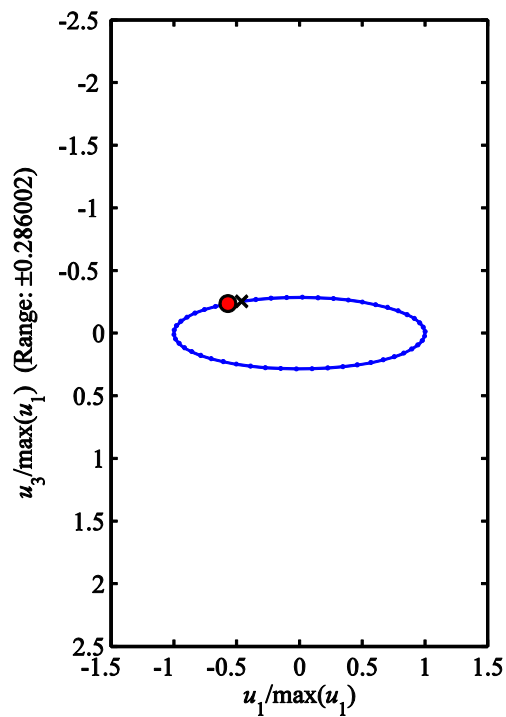


圖 3.53 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 S_0 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

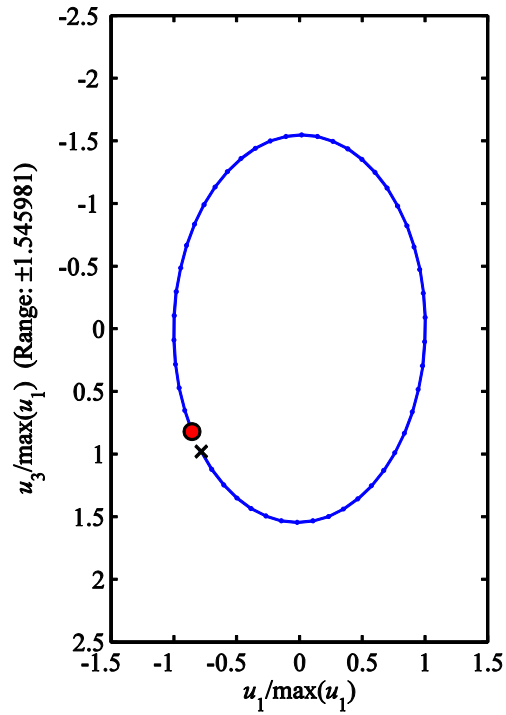


圖 3.54 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A_0 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

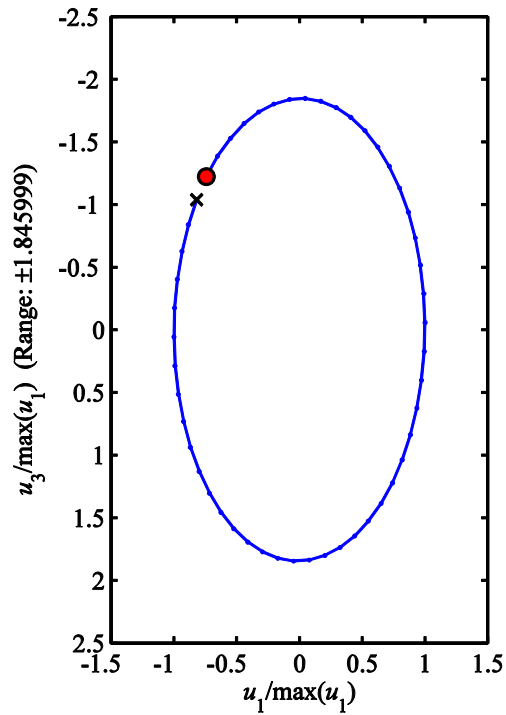


圖 3.55 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A_1 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

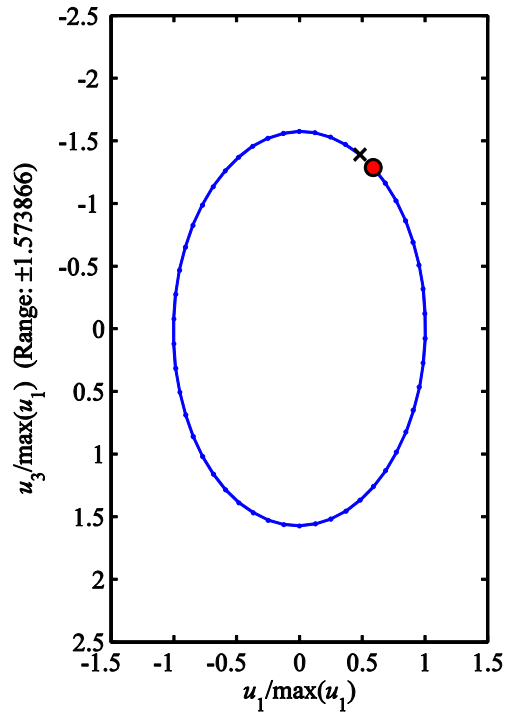


圖 3.56 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_0 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

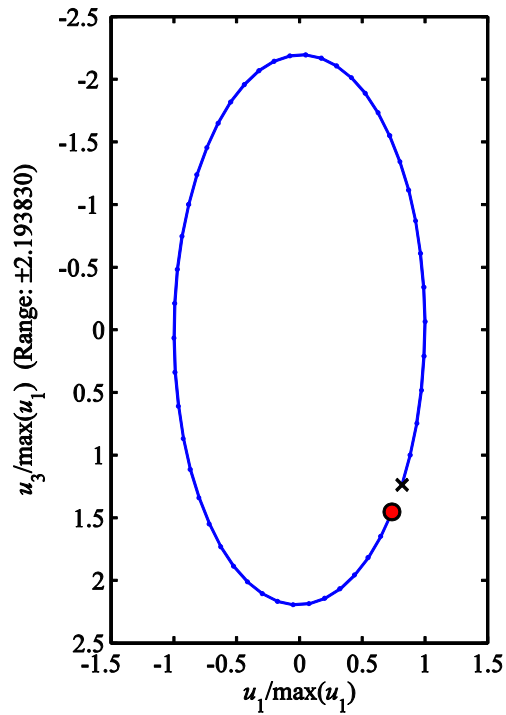


圖 3.57 fluid (10 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_1 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

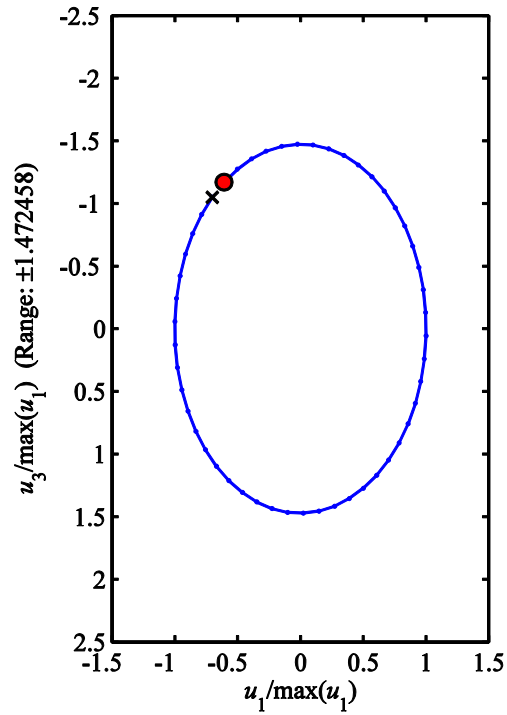


圖 3.58 fluid (10 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 A_0 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

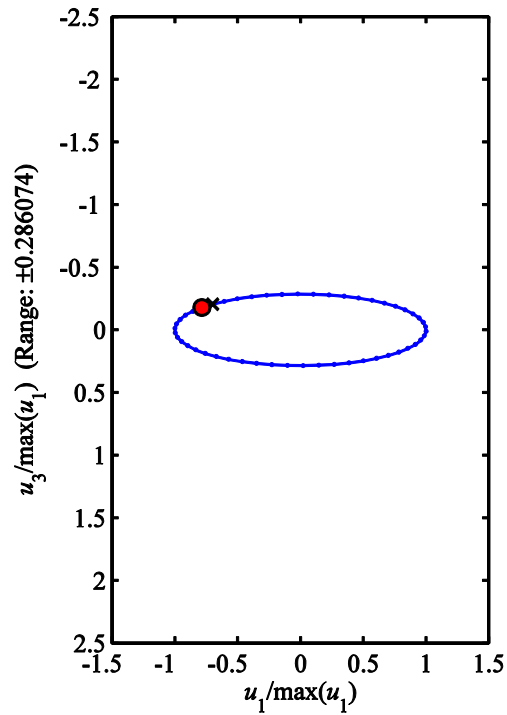


圖 3.59 fluid (10 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 S_0 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

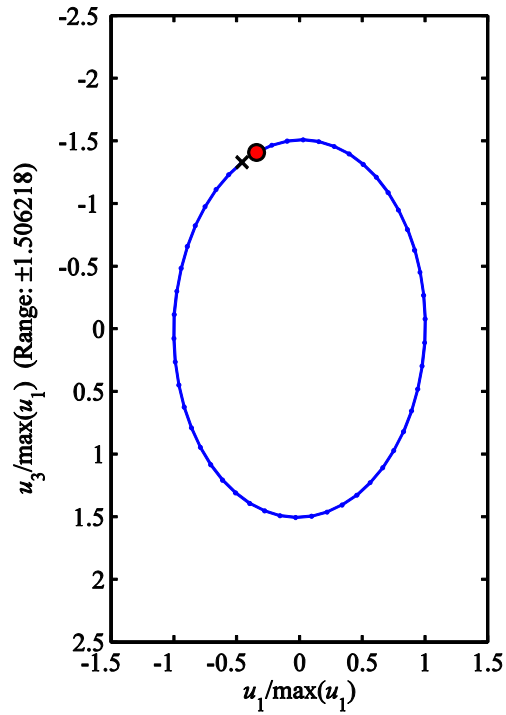


圖 3.60 fluid (10 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A_0 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

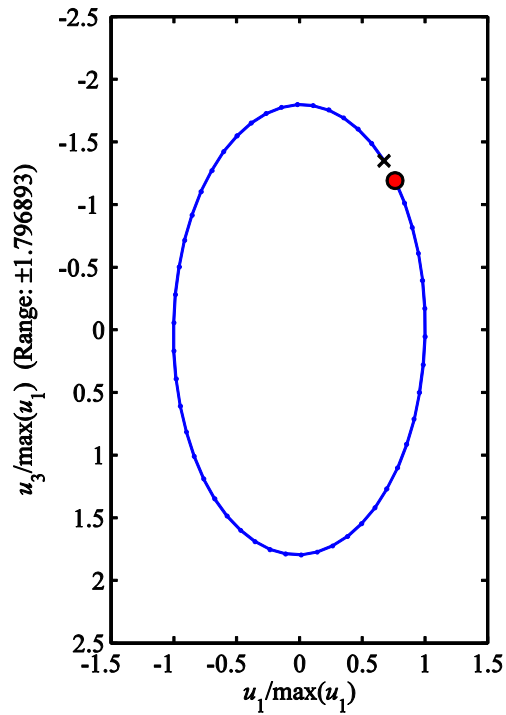


圖 3.61 fluid (10 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A_1 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

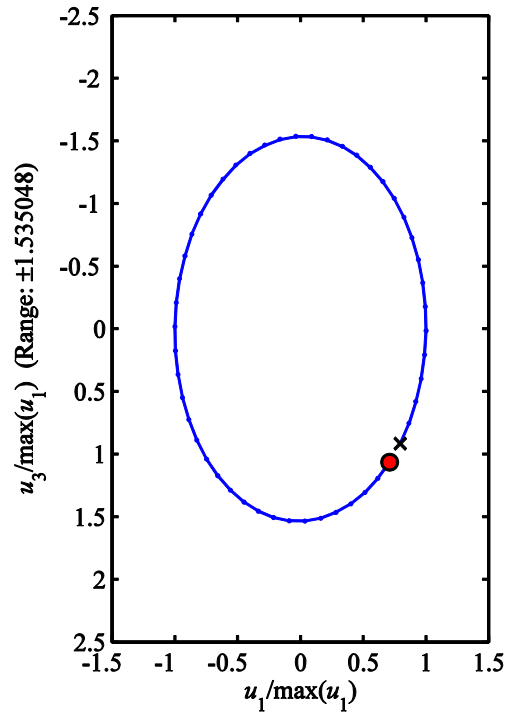


圖 3.62 fluid (10 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_0 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

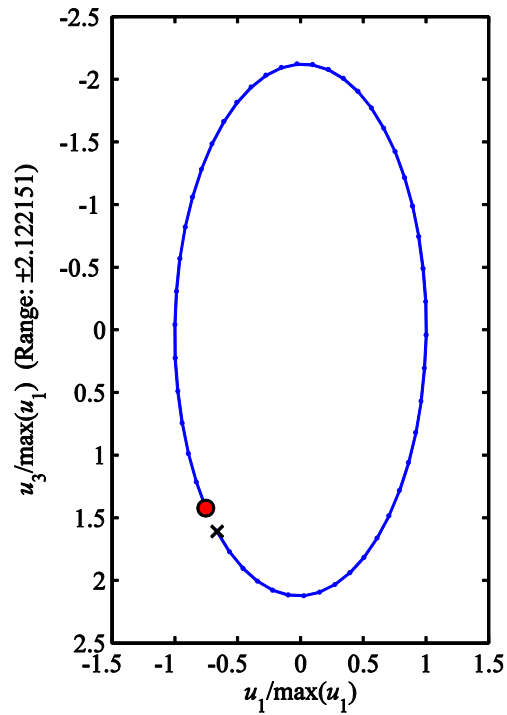


圖 3.63 fluid (10 μm , 10 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_1 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

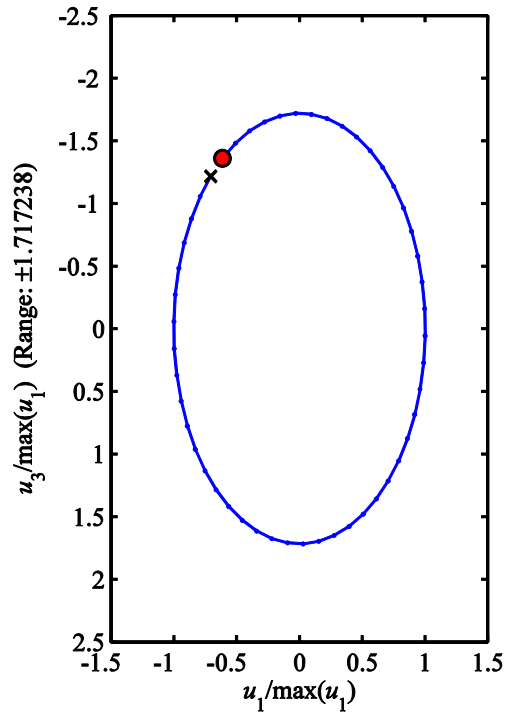


圖 3.64 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 A₀ 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

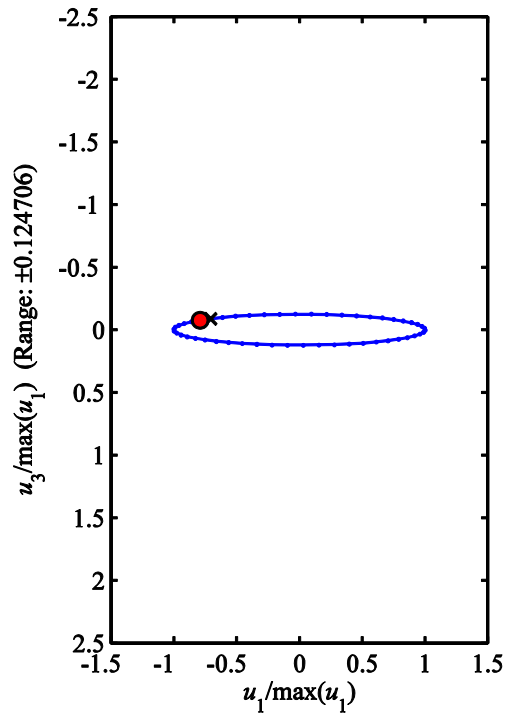


圖 3.65 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 0.5 MHz 的 S₀ 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

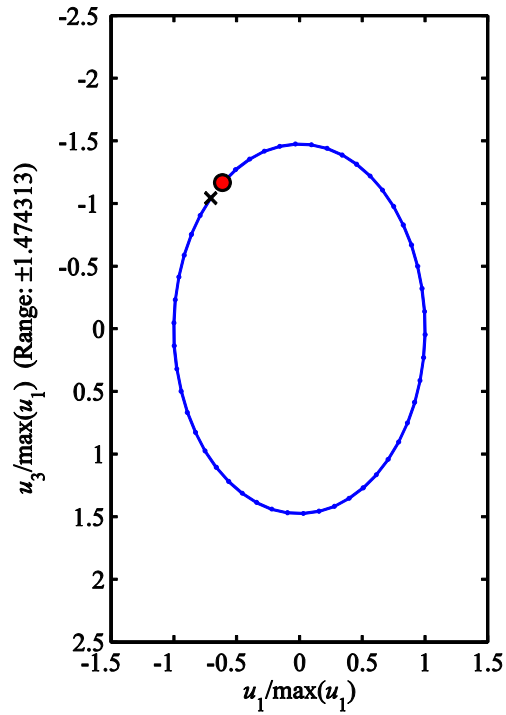


圖 3.66 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 A_0 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

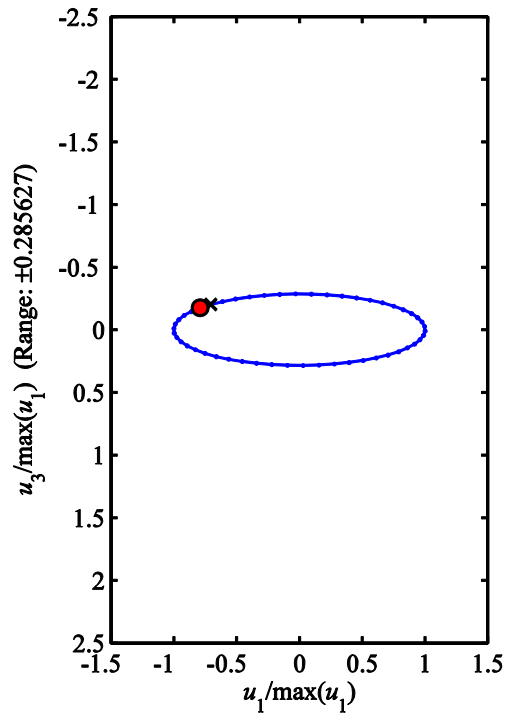


圖 3.67 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 1 MHz 的 S_0 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

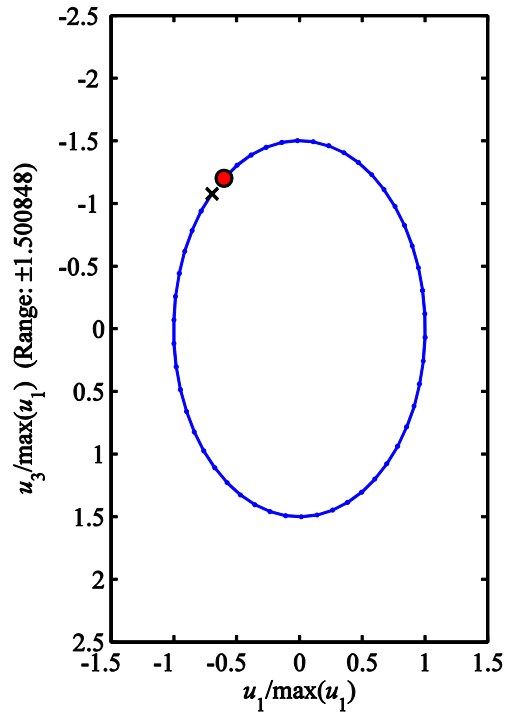


圖 3.68 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A_0 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

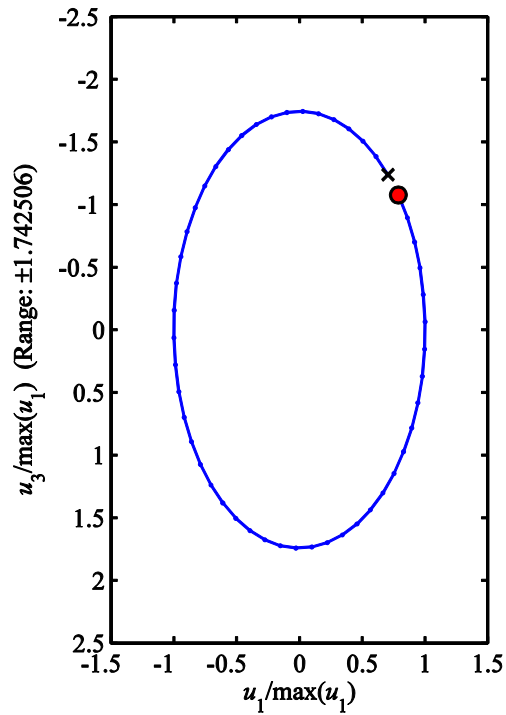


圖 3.69 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 A_1 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

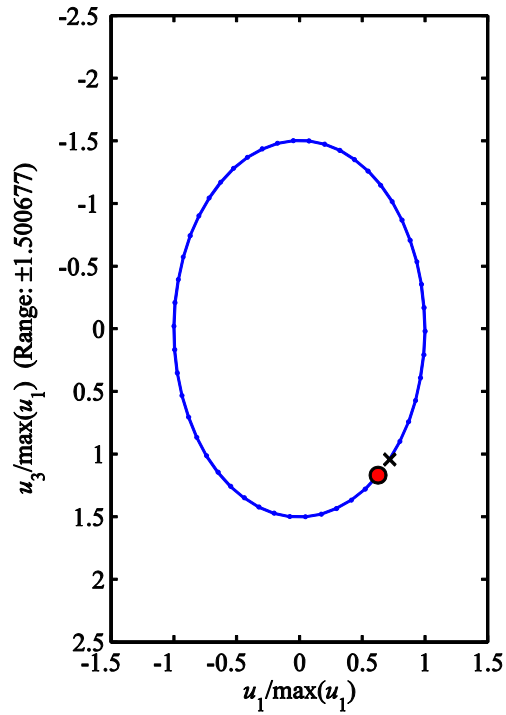


圖 3.70 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_0 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

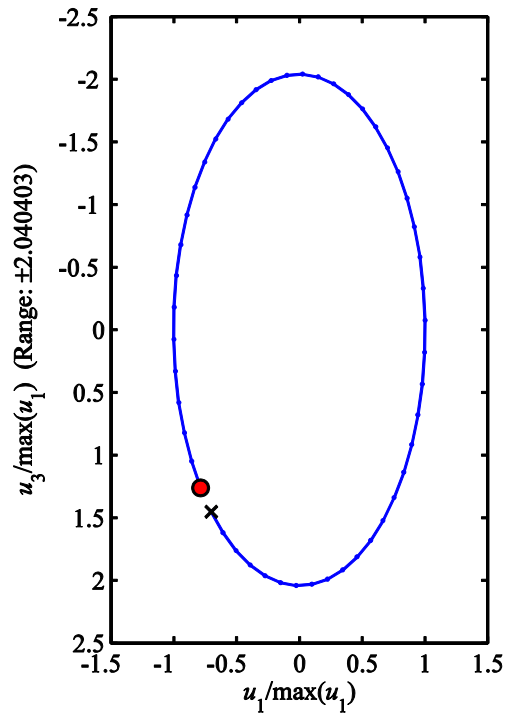
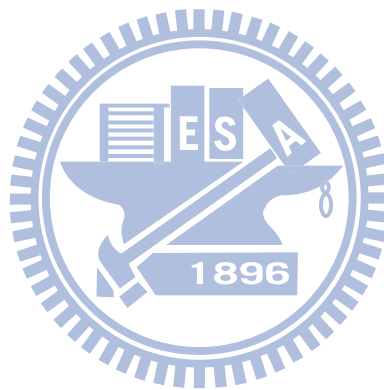


圖 3.71 fluid (1 μm , 1 Pa.s) / glass (1 mm) 於頻率 10 MHz 的 S_1 模態之
界面質點之軌跡(x為起點，○為終點)

表 3.1 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 | 2760 | 86.3 | 33.6 | 26.4 |
| PVA 水溶液 | 1006 | 2.25 | 2.25 | 0 |



第四章 結論與展望

本研究將聚乙烯醇配向流體層模型化為為具黏滯係數之等向性固體，推導具流體薄層負載之平板結構的聲導波波傳，數值計算聲導波相速度頻散曲線及各模態的位移、應力與流體薄層壓力差之分佈，推估在超音波誘發液晶配向層排列的實驗進行中，聚乙烯醇層之厚度與黏度改變導致不同的壓力梯度，影響聚乙烯醇分子的排列。

4.1 結論

本研究考慮各板波模態通過垂直波傳方向之截面的時間平均能量通量為 1 單位，比較各項參數對於各模態特性的影響。數值分析結果顯示，結構導波影響液晶配向層排列情形有下列原因：

- (1) 流體層厚度：當流體層厚度增加時，其波數衰減值越大，表示結構導波衰減得越快，如欲驅動相同大小試片的配向層分子，需要提供較高的能量。流體層厚度越薄，流體上表層與下表層的壓力差振幅差值越小，也就是流體表層平行界面方向的壓力梯度越大，對配向層分子的平行排列越有利。
- (2) 流體層的黏滯係數：黏度越大時，流體上表層與下表層的壓力差振幅差值越小，流體薄層內平行界面方向的壓力梯度越大，對配向層分子的平行排列越有利。

綜合以上分析結果，配向層溶液厚度越薄，對結構導波驅動大範圍的配向層排列較為有利，否則應提高表面聲波元件的驅動電壓。但在相同驅動電壓下，越高頻的表面聲波元件產生的結構導波能量越低，若欲做大面積的配向，須要更大的驅動電壓，可能超過表面聲波元件能夠承受的範圍。

另外，配向層溶液黏度越大，厚度越薄，配向層水溶液表面平行界面方向的壓力梯度越大，可以越有效的排列配向層分子。本研究數值分析流體厚度參數範圍為 $0.1\sim 10\ \mu\text{m}$ ，黏度參數範圍為 $0.1\sim 10\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ ，根據數值分析所參考的參數範圍，做超音波配向時，若選用黏滯係數為 $10\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ 的配向層溶液，且旋鍍厚度為 $0.1\ \mu\text{m}$ ，可達到最有效配向的效果。

4.2 未來展望

在配向層加熱固化的過程中，流體層厚度漸減且黏度漸增，對配向層排列有益，但是當配向層溶劑逐漸蒸發，配向層分子趨向平貼於玻璃表面，此時配向層分子與玻璃間的分子作用力會大於結構導波對配向層分子的影響，結構導波失去配向作用。目前的數值未考慮分子間作用力的因素，在未來的研究可嘗試討論。

本文數值分析為簡化模型，忽略聲場流對流體覆蓋之平板結構的影響，未來可以探討聲場流。目前研究著重於低頻板波的數值分析，未來可以討論高頻表面聲波對配向層排列的影響。

本研究並無實驗結果佐證分析結果，未來可應用附錄中提到的實驗架構，採用碘染色後的聚乙烯醇，可製作成碘系偏光膜，相對於張逸涵 [1] 論文中將配向層試片製作成液晶盒，間接觀察液晶的配向結果，碘系偏光膜可直接觀察到配向的效果與均勻度。

參考文獻

- [1] 張逸涵 (2009), 表面聲波對於液晶配向層聚亞醯胺排列的影響, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 新竹市, 台灣。
- [2] H. Lamb (1917), "On waves in an elastic plate," *Proc. R. Soc. Lond.*, **A93**, 144-128.
- [3] J. G. Scholte (1948), "On the large displacements commonly regarded as caused by Love waves and similar dispersive surface waves," *Proc. Konink. Ned. Akad. Wetensch.*, **51**, 533-543.
- [4] J. Wu and Z. Zhu (1992), "The propagation of Lamb waves in a plate bordered with layers of a liquid," *J. Acoust. Soc. Am.*, **91**(2), 861-867.
- [5] J. Laperre and W. Thys (1994), "Mode coupling in solid/liquid/solid trilayers," *J. Acoust. Soc. Am.*, **96**(3), 1643-1650.
- [6] A. H. Nayfeh and P. B. Nagy (1997), "Excess attenuation of leaky Lamb waves due to viscous fluid loading," *J. Acoust. Soc. Am.*, **101**(5), 2649-2658.
- [7] W. Hassan and P. B. Nagy (1997), "On the low-frequency oscillation of a fluid layer between two elastic plates," *J. Acoust. Soc. Am.*, **102**(6), 3343-3348.
- [8] B. Hosten and M. Castaings (2003), "Surface impedance matrices to model the propagation in multilayered media," *Ultrasonics*, **41**(7), 501-507.
- [9] L. A. Crum (1971), "Acoustic force on a liquid droplet in an acoustic stationary wave," *J. Acoust. Soc. Am.*, **50**(1), 157-163.
- [10] H. M. Hertz (1995), "Standing-wave acoustic trap for nonintrusive positioning of microparticles," *J. Appl. Phys.*, **78**(8), 4845-4849.

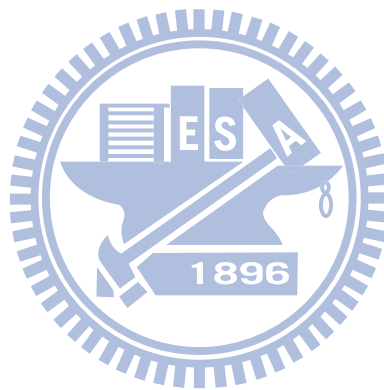
- [11] A. Haake, J. Dual (2003), "Particle positioning by a two- or three-dimensional ultrasound field excited by surface waves," WCU 2003 Conference Paris, 237-240.
- [12] C. J. Strobl, C. Schaefflein, and U. Beierlein (2004), "Carbon nanotube alignment by surface acoustic waves," *Appl. Phys. Letts.*, **85**(8), 1427-1429.
- [13] M. Alvarez, J. R. Friend, and L. Y. Yeo (2008), "Surface vibration induced spatial ordering of periodic polymer patterns on a substrate," *Langmuir.*, **24**(19), 10629-10632.
- [14] J. R. Friend, L. Y. Yeo, D. R. Arifin, and A. Mechler (2008), "Evaporative self-assembly assisted synthesis of polymeric nanoparticles by surface acoustic wave atomization," *Nanotechnology*, **19**, 145301.
- [15] C. D. Wood, J. E. Cunningham, R. O'Rorke, C. Waelti, E. H. Linfield, A. G. Davies, and S. D. Evans (2009), "Formation and manipulation of two-dimensional arrays of micron-scale particles in microfluidic systems by surface acoustic waves," *Appl. Phys. Letts.*, 94(5), 54101.
- [16] P. Yeh and C. Gu (1999), *Optics of Liquid Crystal Displays*, John Wiley & Sons, Inc., Canada.
- [17] 王新久 (2006), 液晶光學與液晶顯示, 科學出版社, 北京。
- [18] K. Takato, M. Hasegawa, M. Koden, N. Itoh, R. Hasegawa, and M. Sakamoto (2005), *Alignment Technologies and Applications of Liquid Crystal Devices*, Taylor & Francis, London and New York.
- [19] D. W. Berreman (1972), "Solid surface shape and the alignment of an adjacent nematic liquid crystal," *Phy. Rev. Letts.*, **28**, 1683-1686.
- [20] J. M. Geary, J. W. Goodby, A. R. Kmetz, and J. S. Patel (1987), "The mechanism of polymer alignment of liquid-crystal materials," *J. Appl.*

Phys., **62** (10), 4100-4108.

- [21] B. Chae, S.W. Lee, B. Lee, W. Choi, S. B. Kim, Y. M. Jung, J. C. Jung, K. H. Lee, and M. Ree (2003) "Sequence of the rubbing induced reorientations of polymer chain segments in nanofilms of a well defined brush polyimide with a fully rodlike backbone as determined by polarized FTIR spectroscopy and two-dimensional correlation analysis," *Langmuir*, **19**(22), 9459-9465.
- [22] S. H. Paek, C. J. Durning, K. W. Lee and A. Lien (1998), "A mechanistic picture of the effects of rubbing on polyimide surfaces and liquid crystal pretilt angles," *J. Appl. Phys.*, **83** (3), 1270-1280.
- [23] C. Y. Lee, Y. L. Liu, K. Y. Wu, M. Y. Chen, and J. C. Hwang (2008), "Argon plasma beam scanning processes on polyimide films for liquid crystal alignment," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47**(1), 226-230.
- [24] K. Weiss, C. Woell, E. Boehm, B. Fiebranz, G. Forstmann, B. Peng, V. Scheumann, and D. Johannsmann (1998), "Molecular orientation at rubbed polyimide surfaces determined with x-ray absorption spectroscopy relevance for liquid crystal alignment," *Macromolecules*, **31**(6), 1930-1936.
- [25] H. Kikuchi, J. A. Logan, and D. Y. Yoon (1996), "Study of local stress, morphology, and liquid-crystal alignment on buffed polyimide surfaces," *J. Appl. Phys.*, **79**(9), 6811-6817.
- [26] X. Liang, J. Liu, L. Han, H. Tang, and S. Y. Xu (2000), "Electric force microscopy study of the surface electrostatic property of rubbed polyimide alignment layers," *Thin Solid Films*, **370**, 238-242.
- [27] E. H. Land and H. G. Rogers (1939), "Light polarizer," *US patent*, 2173304.
- [28] S. Bennett, J. J. Cael, N. S. Kadaba and G. B. Trapani, (1997),

“High-efficiency K-sheet polarizer,” *US patent*, 5666223.

- [29] 呂金山 (1996), 金屬基複合材料次表面性質的超音波研究, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 新竹市, 台灣。
- [30] M. J. S. Lowe (1993), *Plate waves for the NDT of diffusion bonded titanium*, Ph.D. Dissertation, University of London.
- [31] M. J. S. Lowe (1995), “Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **42**, 525-542.



附錄 實驗架構與量測

本研究以表面聲波元件激發結構導波，經由楔型玻璃將能量傳遞至聚乙烯醇配向層內，形成一壓力分布，驅動配向層分子排列發生改變。設計不同的實驗參數進行實驗，並以定性及定量方法檢測表面聲波配向的效果。

A.1 試片的準備

本研究採用的配向層分子為水平配向(homogeneous alignment)，也就是讓液晶分子長軸平行於玻璃基板，配向層分子為聚乙烯醇，製作流程如下：

- (1) 使用鑽石刀切割機於 1.1 mm 厚的玻璃上，切出需要尺寸的切痕後，再透過裂片機於切痕之背面施予均勻壓力，玻璃即可沿著裂痕分開成設計的尺寸。
- (2) 清洗玻璃，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，並可看到均勻光干涉條紋即可。
- (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 ITO 玻璃表面水珠吹除，置於培養皿中，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) 將玻璃置於培養皿中，用 UV 臭氧燈照射 20 分鐘，去除表面的有機物質。
- (6) 將粉末狀聚乙烯醇及純淨水以 0.025 重量百分比混合，再置於加熱攪拌器上加熱至 80°C，以攪拌子持續攪拌至聚乙烯醇顆粒完全溶解，製成水平配向層溶液。
- (7) 將玻璃置於旋轉塗佈機上，旋鍍配向層溶液。

- (8) 將完成旋鍍後之試片放在加熱板上，以溫度 110°C 烘烤 1 小時。
- (9) 以旋轉塗佈機於硬烤後之配向層上，再塗佈一層配向層。

A.2 表面聲波元件的製作

本研究選用長 50.7 mm，寬 25.4 mm，厚 1.04 mm 的 PZT-5A 為聲波元件之壓電基材，所設計的表面聲波元件以參考座標系統之 X 軸正向為波傳方向，PZT-5A 的材料性質詳列於表 3.1。設計單一頻率 1 MHz 的指叉電極，其幾何參數列於表 3.2。

A.2.1 壓電基材的選擇條件

1. 表面波相速度

聲波元件的中心頻率由基材的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電極之線寬較細，需要較嚴格的製程技術。若在相同的製作條件下，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，可選擇聲速較低的基材，延伸應用頻率的下限。

2. 機電耦合係數

機電耦合係數為壓電材料的電能與機械能之間的轉換比例，以高機電耦合係數之基材製作表面聲波元件，較具有操控分子排列的能力，是基材選擇的考量因素之一。

3. 波傳能量角度

在非等向性材料中，聲波之能量速度方向不一定與波前垂直。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。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，亦為設計表面聲波元件之重要因素。

A.2.2 指叉電極製作

因實驗設計的工作頻率僅 1 MHz，指叉電極線寬為毫米程度，不需使用微機電製程，選用成本較低、製程簡單且快速的網版印刷印製電極。網版印刷主要是利用網孔漏墨的原理製成，在其印刷版之印紋部分鏤空，非印紋部份遮蓋保護，將油墨透過鏤空的印紋部份，透印到下方的被印物上，此種印刷方式稱為「網版印刷」。

1. 指叉電極圖型設計

以 CorelDraw 軟體繪製兩組指叉電極，如圖 A.1 所示，頻率為 1 MHz。兩組電極前端相距 $(n + \frac{1}{4})$ 個波長，使該元件加上兩相位相差 90° 的正弦與餘弦波後，如圖 A.2，可消除前端指叉電極激發之向後傳遞的表面聲波。

2. 網版印刷

將繪製圖案製作成網版後，將壓電平板置於網版圖案下方並固定，網版與壓電平板間保持適當間隙，於網版均勻塗上銀膠(Gredmann MS-5000)，將網版下壓後以方型刮刀保持約 75° 傾角均勻地將銀膠刮過，放開網版使網版與壓電平板脫離。將壓電平板連同銀膠圖樣以 130°C 烘烤 10 分鐘去除溶劑與水分。

A.3 實驗平台設計

圖 A.3 為本研究之整體實驗架構。其中，將壓電平板以環氧樹脂(Loctite E-120HP)黏貼於楔型玻璃波導(waveguide)之上，放大示意圖如圖 A.4 所示。玻璃波導的寬度為 30 mm，左方之 15° 尖角是以研磨方式成型。玻璃波導的頂面與試片間的夾角太大或太小都會使波形訊號變弱甚至於消失 [29]，其範圍須介於 $25\sim 35^\circ$ 之間，本研究是採用 30° 為頂面與試片間的夾角。為配合功率放大器的電阻匹配，須在此換能器的雙埠各並聯一 50 歐姆的電阻，此裝置如圖 A.5 所示。最後，玻璃波導放置於耐熱材料鐵氟龍的凹槽上方，以雙面膠固定，避免滑移。

採用玻璃波導的原因有以下三點：

1. 以線接觸的方式傳遞彈性波，試片會獲得較大的振幅。
2. 移除玻璃波導較容易。
3. 此裝置可供同一表面聲波元件驅動不同的試片。

本研究以函數產生器產生一頻率為 1 MHz、振幅為 200 mV 的弦波，經功率放大器增益 316 倍後，輸出至表面聲波元件，進行超音波誘發配向層分子排列的實驗。

A.4 配向層檢測方法

A.4.1 液晶分子之觀察

液晶分子為單光軸材料，具有雙折射之光學性質，在兩互相垂直的偏振片下，當液晶分子與偏振片的夾角不同，會造成通過的光強不一致。液晶分子與配向層分子間的作用力會使液晶分子順著配向層分子主鏈方向排列。可藉以製作液晶盒試片，灌入向列型液晶分子，在偏光顯微鏡下，如

圖 A.6 所示，觀察穿透光的亮暗情形，間接得知配向層中液晶分子之排列均勻度。

A.4.2 碘系偏光膜觀察

將 0.002 重量百分比的碘(I_2)與 0.03 重量百分比的碘化鉀(KI)加入 2.5 wt%的聚乙烯醇水溶液，再使用此染色過的溶液做超音波配向。經配向後的染色聚乙烯醇薄膜，成為碘系偏光膜。其偏光方向垂直於波傳方向，使用偏光顯微鏡，可觀察試片之配向均勻度。



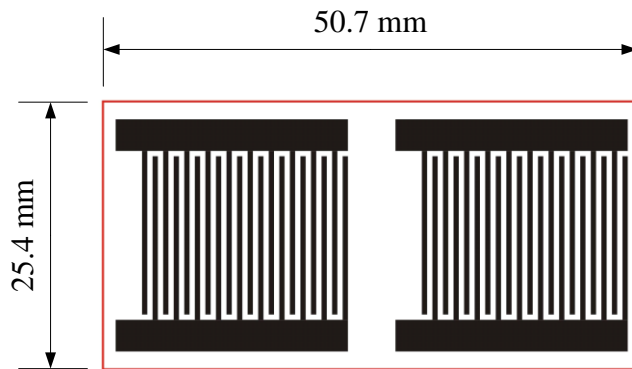


圖 A.1 1 MHz 表面聲波元件設計圖

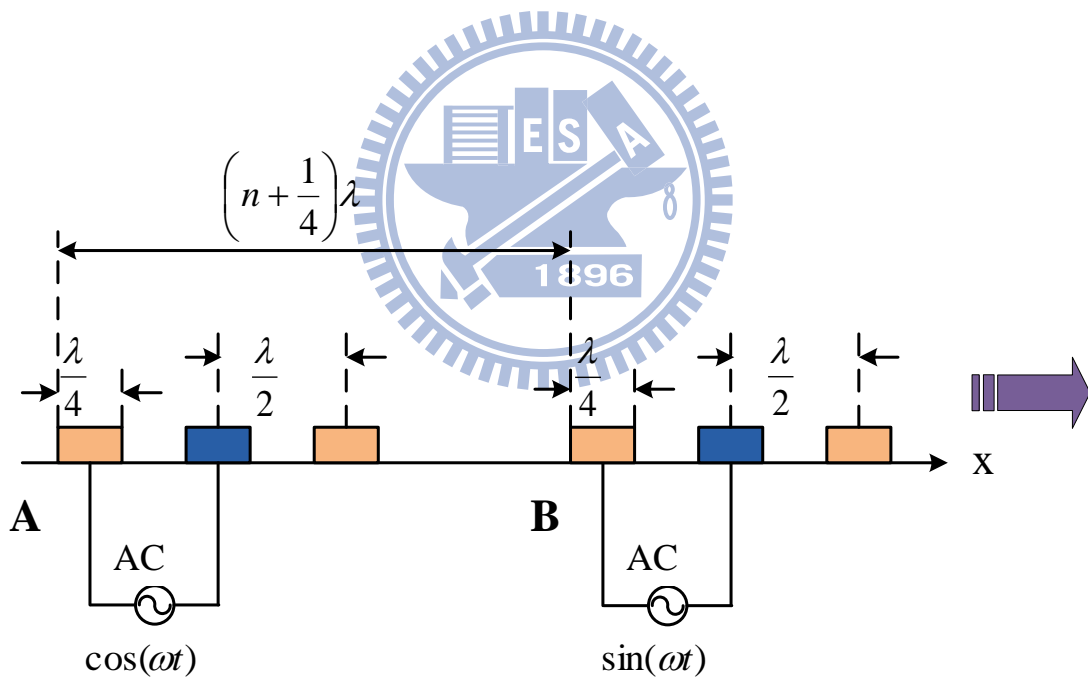


圖 A.2 相位相差 $\frac{\pi}{2}$ 之兩組指叉電極示意圖

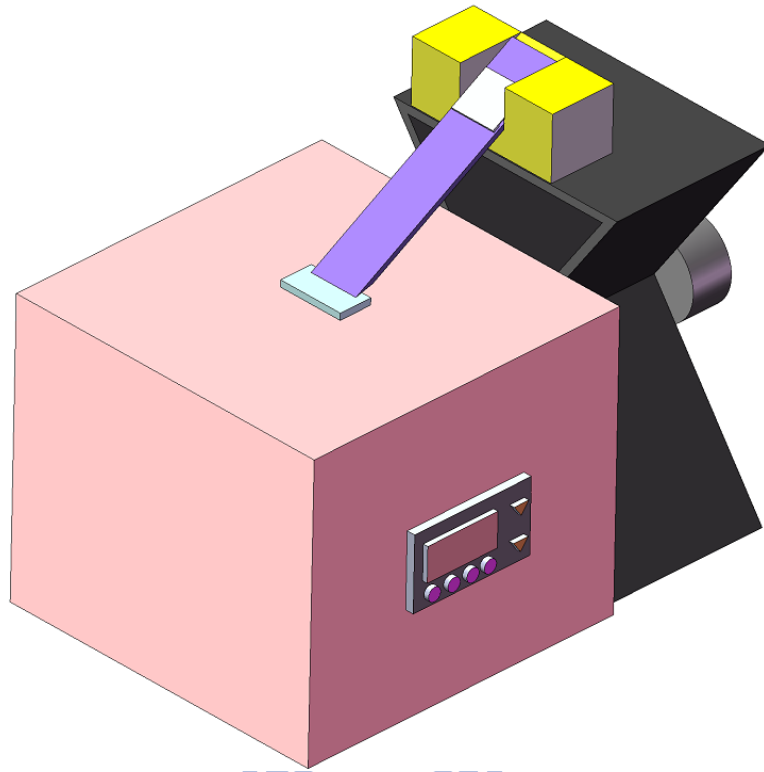


圖 A.3 實驗架構示意圖

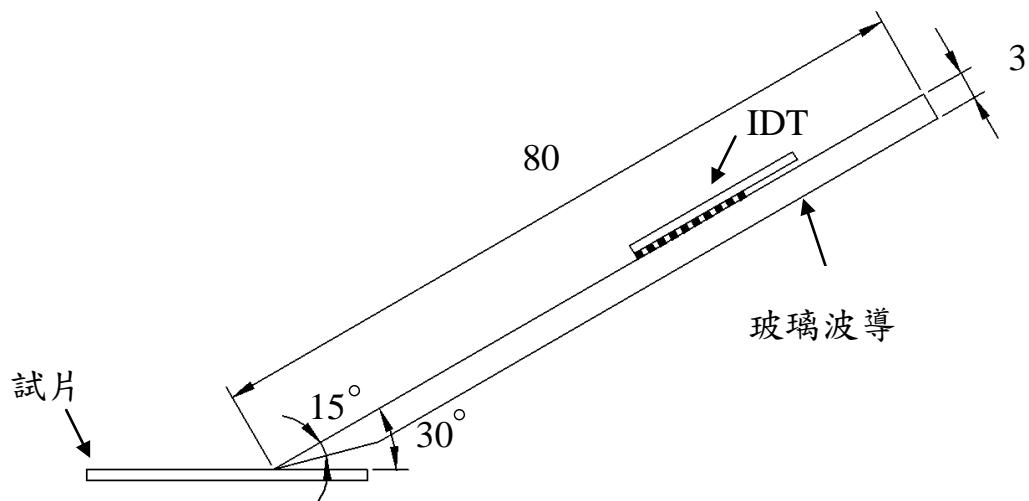


圖 A.4 表面聲波驅動元件及玻璃波導的結合示意圖

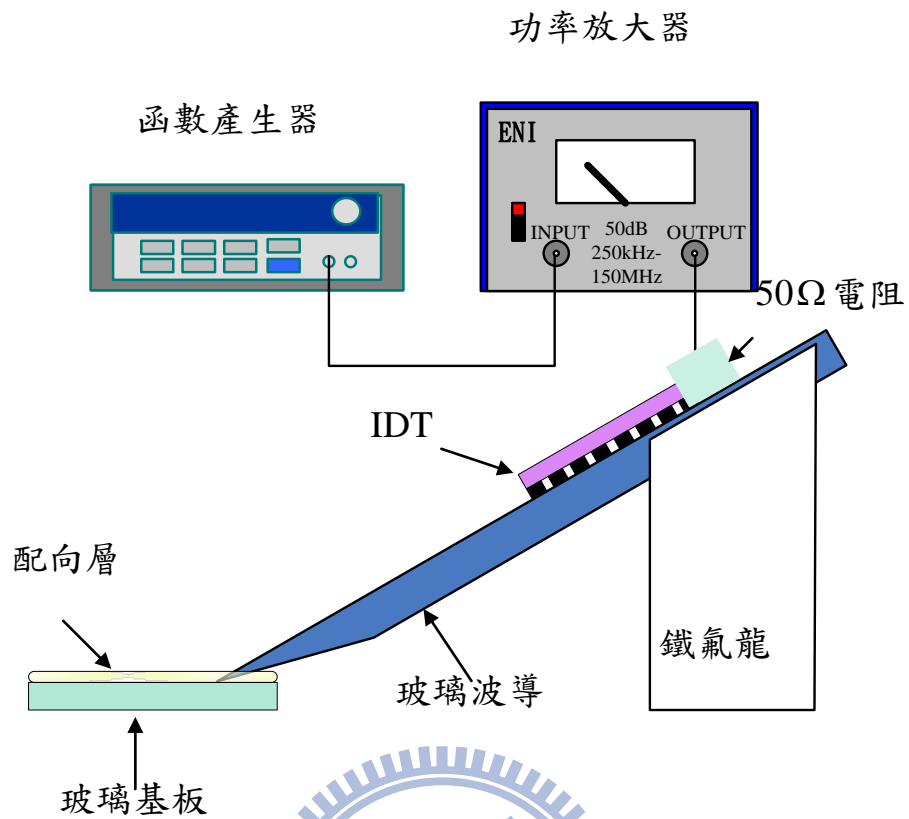


圖 A.5 表面聲波誘發配向層分子排列之實驗架構示意圖

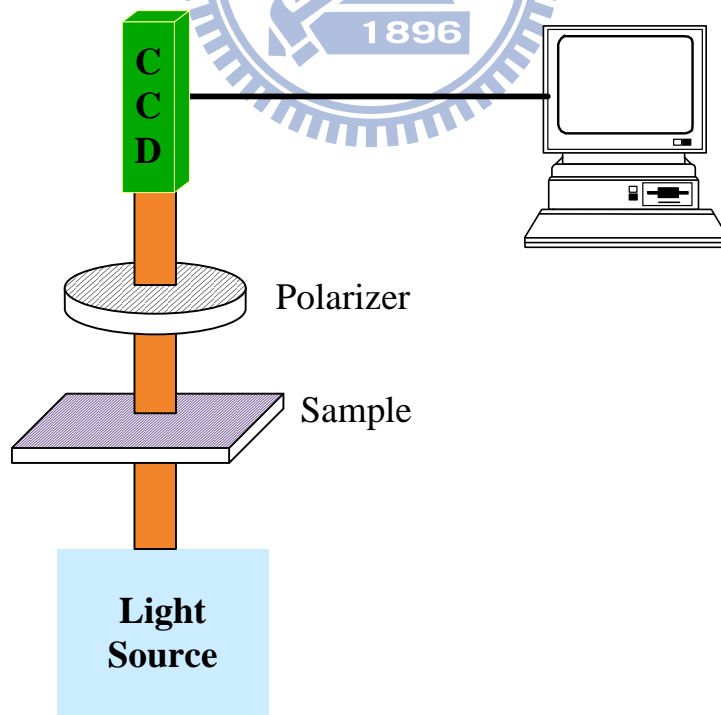


圖 A.6 試片配向結果觀察之實驗架構示意圖

表 A.1 PZT-5A 之材料係數

| 剛性係數(GPa) | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| C_{11}^E | C_{33}^E | C_{12}^E | C_{13}^E | C_{44}^E |
| 138.3 | 131.3 | 93.16 | 95.06 | 21.05 |

註： $C_{66}^E = (C_{11}^E - C_{12}^E)/2$

| 壓電係數(C/m ²) | | | 介電係數 | | 密度(g/cm ³) |
|-------------------------|----------|----------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| e_{15} | e_{31} | e_{33} | $\epsilon_{11}^S / \epsilon_0$ | $\epsilon_{33}^S / \epsilon_0$ | ρ |
| 12.32 | -4.019 | 16.58 | 917.2 | 844.4 | 7.75 |

註：真空中介電常數 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m

表 A.2 指叉電極幾何參數

| | |
|-----------|--------|
| 聲波元件之設計頻率 | 1MHz |
| 電極寬度 | 0.5 mm |
| 電極對數 | 10 |