

國立交通大學
機械工程學系碩士班
碩士論文

反對稱指叉電極的壓電纖維複材導波換能器
Piezoelectric Fiber Composite Guided Wave Transducer
Excited by Anti-symmetric Interdigitated Electrodes



研究生：黃室維

指導教授：尹慶中 博士

中華民國一〇〇年九月

反對稱指叉電極的壓電纖維複材導波換能器

Piezoelectric Fiber Composite Guided Wave Transducer
Excited by Anti-symmetric Interdigitated Electrodes

研究生：黃室維

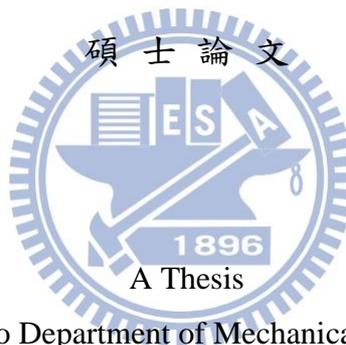
Student : Shih-Wei Huang

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



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

September 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇〇九年九月

反對稱指叉電極的壓電纖維複材導波換能器

研究生：黃室維

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

本文發展出一種具反對稱指叉電極的壓電纖維複材(簡稱 APFC)，可以激發固定波長的撓性板波。單一方向排列的壓電纖維黏著於兩片軟性指叉電極之間，形成三明治結構。反對稱排列指叉電極的電力線與纖維方向成一夾角，提供斜向極化及撓曲致動所需的電場。APFC 的質量輕、柔軟度適中，黏貼於具有曲率的結構表面，可作為嵌入式導波換能器，是超音波檢測及結構健康監測研究的關鍵元件。

本文採用有限元素法進行數值模擬，探討電極間距對於 APFC 頻率響應的影響。並成功製作 APFC，測試自由狀態及黏貼於平板基材的動態特性，APFC 的工作頻率與電極間距及基材的材料性質與厚度相關。APFC 的撓曲共振不因黏貼於基材而消失，惟聲波的工作頻率會稍微改變，激發的板波聲場有高度指向性，訊號強度隨著波傳距離增加呈線性遞減，不同電極間距之 APFC 具有相似的衰減性。

關鍵字：壓電纖維複材、指叉電極、撓性板波、聲場指向性

Piezoelectric Fiber Composite Guided Wave Transducer Excited by Anti-symmetric Interdigitated Electrodes

Student: Shih-Wei Huang

Advisor: Dr. Ching-Chung Yin

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

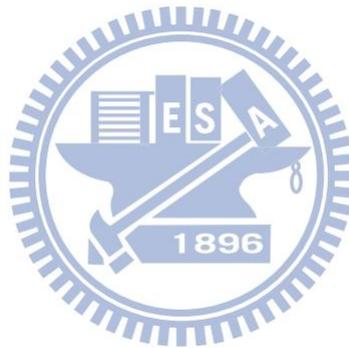
ABSTRACT

This thesis develops a new acoustic wave transducer constructed from the anti-symmetric interdigitated electrode piezoelectric fiber composite (APFC). It can be used as a key component to generate fixed-wavelength flexural plate waves for ultrasonic inspection and structural health monitoring applications. The APFC is formed with unidirectional piezoelectric fibers sandwiched between two thin flexible sheets printed with interdigitated electrodes (IDE). The electric field lines induced by anti-symmetrically aligned electrodes are inclined to the piezoelectric fibers. The IDE provides necessary electric field for polling and excitation of flexural plate waves. Because of light mass and moderate flexibility, APFC is ideally conformable to the curved surface of the host structures.

The numerical simulation for understanding the dynamic characteristics of APFC was carried out using finite element analysis. The frequency responses of APFC are explored as a function of the electrode pitch. This study also successfully fabricated prototype APFC, and the performance tests were conducted. The operating frequency of APFC is relevant to the

electrode pitch as well as the material properties and thickness of the host structures. The flexural resonances of APFC still remain when it is adhered to an aluminum host plate. The acoustic field induced by APFC has high directivity and small energy dissipation. The amplitude linearly decreases with increasing travel distance. The similar attenuation characteristics can be found in the APFC with different electrode pitches.

Keywords: piezoelectric fiber composite, interdigitated electrode, flexural plate wave, directivity of acoustic field



誌謝

在此感謝我的指導教授 尹慶中博士，在我就學的這段期間，給予室維的肯定與指導，並在研究過程中不斷的提攜與指正，更讓我在生活及待人處事上有所成長，再次由衷地感謝您。同時感謝金大仁與蕭國模老師撥冗擔任口試委員，給予指教與建議，使論文能更完整的呈現，對此深感謝意。感謝學長游泰和、王多聞、許世明、溫子達、劉育翔、鄭博毅、賴佑年、學姐吳昱瑾提供學習上的寶貴意見與生活經驗，感謝同學蔡慶芳、鄭智遠、吳家宇、湯士杰、王裕太、蔡旻軒於修課與研究上的協助與琢磨，讓我們彼此間更加成長及認識，以及學弟妹吳旻修、李劭遠、梁均帆、郇心慧在這短暫一年相處中的幫助與分享，在此也祝福你們研究順利。

最後，特別要將此刻的心情與感動獻給我最敬愛的家人，因為你們的支持與陪伴，讓室維能毫無後顧之憂的順利完成學業，在此表示衷心的感謝，也感謝一路陪伴的未婚妻黃伊蕾，在我徬徨無助時，總是給予精神上的支持與鼓勵，伴我渡過這兩年的求學生涯。

僅以此論文

獻給父母、家人及所有關愛我的人

目錄

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 前言.....	1
1.2 研究背景.....	1
1.3 文獻回顧.....	2
1.4 研究目的.....	4
1.5 內容簡述.....	5
第二章 理論說明.....	7
2.1 壓電纖維複材.....	7
2.1.1 壓電效應.....	7
2.1.2 壓電材料的本構方程式.....	8
2.1.3 壓電纖維複材的構造.....	9
2.2 有限元素分析法.....	10
2.2.1 時諧分析.....	10
2.2.2 阻尼設定.....	12
2.3 等向性平波的板波波傳.....	13
2.3.1 藍姆波的相速度.....	13
2.3.2 藍姆波的群速度.....	16

第三章 數值模擬分析與討論.....	18
3.1 三維有限元素之網格與元素型態.....	18
3.2 時諧分析.....	19
3.2.1 改變電極對數.....	19
3.2.2 四種電極間距的頻率響應.....	20
3.3 實驗模型的分析.....	20
3.4 小結.....	20
第四章 實驗量測與討論.....	21
4.1 反對稱壓電纖維複材的製作.....	21
4.1.1 指叉電極設計與製作.....	21
4.1.2 反對稱壓電纖維複材製作程序.....	22
4.2 反對稱壓電纖維複材的阻抗響應量測.....	23
4.2.1 阻抗量測.....	23
4.2.2 自由狀態之 APFC 阻抗.....	24
4.2.3 黏貼於鋁板之 APFC 阻抗.....	25
4.2.4 小結.....	25
4.3 反對稱壓電纖維複材的頻率響應.....	26
4.3.1 散射參數量測.....	26
4.3.2 自由狀態之 APFC.....	27
4.3.3 黏貼於鋁板之 APFC.....	28
4.3.4 小結.....	28
4.4 鋁板的板波量測.....	29
4.4.1 實驗架構.....	29
4.4.2 激發與感測的板波特性.....	29
4.4.3 小結.....	31

4.5 反對稱壓電纖維複材的聲場與衰減.....	32
4.5.1 雷射都卜勒振動量測.....	32
4.5.2 聲場量測.....	33
4.5.3 衰減量測.....	34
第五章 結論與未來展望.....	35
5.1 結論.....	35
5.2 未來展望.....	37
參考文獻.....	38
附表.....	41
附圖.....	45



表目錄

表 3.1 數值分析採用之壓電陶瓷 PZT-5A 的材料參數[11].....	41
表 3.2 參考模型的各项幾何尺寸.....	41
表 3.3 各電極間距所對應極化方向.....	42
表 3.4 各電極間距所對應最大振幅頻率.....	42
表 4.1 指叉電極設計尺寸.....	42
表 4.2 熱壓參數表.....	43
表 4.3 散射參數之特性.....	43
表 4.4 APFC 於不同邊界條件的工作頻率.....	44
表 4.5 聲場原始訊號極值與電極間距對照表.....	44
表 5.1 自由狀態之 APFC 頻率響應的數值分析值與實驗值.....	44



圖目錄

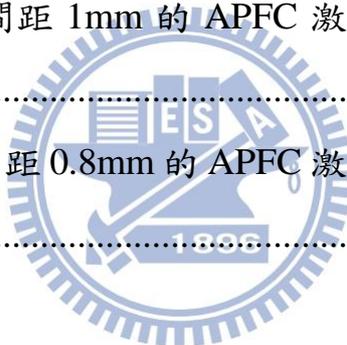
圖 1.1 對稱壓電纖維複合材料示意圖.....	45
圖 1.2 對稱壓電纖維複材的纖維極化過程示意圖.....	45
圖 1.3 反對稱壓電纖維複材極化過程示意圖.....	46
圖 2.1 壓電效應示意圖.....	47
圖 2.2 MFC 構造示意圖.....	47
圖 2.3 波群波傳示意圖.....	48
圖 2.4 (a)對稱及(b)反對稱板波變位的示意圖.....	48
圖 2.5 鋁板的 A_0 與 S_0 板波之頻散曲線[14].....	49
圖 3.1 反對稱壓電纖維複材模型示意圖.....	49
圖 3.2 反對稱壓電纖維複材網格圖.....	50
圖 3.3 反對稱壓電纖維複材電極示意圖.....	50
圖 3.4 以兩 APFC 間的距離 C 為變數之頻率響應， $C=$ (a) 20mm、(b) 25mm、(c) 35mm.....	51
圖 3.5 增加 APFC1 長度 L (即增加電極對數)的頻率響應，.....	52
圖 3.6 四種電極間距之 APFC 的頻率響應，.....	53
圖 3.7 模擬實驗之數值分析，電極間距 1mm 之 APFC 的頻率響應.....	54
圖 3.8 模擬實驗之數值分析，電極間距 0.8mm 之 APFC 的頻率響應... ..	54
圖 3.9 長度 40mm，電極對數 10 對之 APFC 的頻率響應計算值.....	55
圖 3.10 APFC 在交流電場作用下的靜態變形圖.....	55
圖 4.1 兩種電極間距的反對稱指叉電極佈置圖.....	56
圖 4.2 軟性印刷電路板之指叉電極成品.....	56
圖 4.3 依所需寬度及長度，將 PZT-5A 壓電纖維排列於低黏性膠布上.....	57
圖 4.4 使用熱壓製程及真空幫浦黏合壓電纖維與下指叉電極.....	57

圖 4.5 高電壓極化 APFC 的照片	58
圖 4.6 APFC 的成品照片	58
圖 4.7 APFC 製作程序示意圖	59
圖 4.8 阻抗響應量測實驗示意圖	59
圖 4.9 電極間距 1mm 之 APFC 於自由狀態的寬頻阻抗響應	60
圖 4.10 電極間距 1mm 之 APFC 於自由狀態的低頻阻抗響應	60
圖 4.11 電極間距 1mm 之 APFC 於自由狀態的高頻阻抗響應	61
圖 4.12 電極間距 0.8mm 之 APFC 於自由狀態的寬頻阻抗響應	61
圖 4.13 電極間距為 0.8mm 之 APFC 於自由狀態的低頻阻抗響應	62
圖 4.14 電極間距為 0.8mm 之 APFC 於自由狀態的高頻阻抗響應	62
圖 4.15 進行兩次極化之電極間距 1mm 的 APFC 寬頻阻抗響應	63
圖 4.16 進行兩次極化之電極間距 1mm 的 APFC 低頻阻抗響應	63
圖 4.17 具有 21 對指叉電極且間距 1mm 的 APFC 阻抗響應	64
圖 4.18 具有 11 對指叉電極且間距 1mm 的 APFC 阻抗響應	64
圖 4.19 電極間距 0.5mm 之 PFC 於自由狀態的低頻阻抗響應	65
圖 4.20 電極間距 0.5mm 之 PFC 於自由狀態的高頻阻抗響應	65
圖 4.21 電極間距 1mm 之 APFC 黏貼於鋁板的寬頻阻抗響應	66
圖 4.22 電極間距 1mm 之 APFC 黏貼於鋁板的低頻阻抗響應	66
圖 4.23 電極間距 1mm 之 APFC 黏貼於鋁板的高頻阻抗響應	67
圖 4.24 電極間距 0.8mm 之 APFC 黏貼於鋁板的寬頻阻抗響應	67
圖 4.25 電極間距 0.8mm 之 APFC 黏貼於鋁板的低頻阻抗響應	68
圖 4.26 電極間距 0.8mm 之 APFC 黏貼於鋁板的高頻阻抗響應	68
圖 4.27 電極間距 0.5mm 之 PFC 黏貼於鋁板的低頻阻抗響應	69
圖 4.28 電極間距 0.5mm 之 PFC 黏貼於鋁板的高頻阻抗響應	69
圖 4.29 散射參數量測示意圖	70

圖 4.30	反射及傳輸功率比值量測的示意圖.....	70
圖 4.31	由指叉電極換能器所激發之聲導波頻率響應[17].....	71
圖 4.32	電極間距 1mm 之 APFC 於自由狀態的插入損失 S_{21} 之頻率響應	71
圖 4.33	電極間距 0.8mm 之 APFC 於自由狀態的插入損失 S_{21} 之頻率響應	72
圖 4.34	黏貼於鋁板之 APFC 的插入損失 S_{21} 頻率響應量測實驗示意圖	72
圖 4.35	電極間距 1mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之寬頻響應	73
圖 4.36	電極間距 1mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之低頻響應	73
圖 4.37	電極間距 1mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之低頻響應	74
圖 4.38	電極間距 1mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之高頻響應	74
圖 4.39	電極間距 0.8mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之寬頻響應	75
圖 4.40	電極間距 0.8mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之低頻響應	75
圖 4.41	電極間距 0.8mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之低頻響應	76
圖 4.42	電極間距 0.8mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之高頻響應	76
圖 4.43	暫態訊號量測實驗架構示意圖.....	77
圖 4.44	電極間距 1mm 之 APFC 感測 350kHz 正弦單脈衝激發之鋁板板 波，板緣(a)未黏貼、(b)黏貼高阻尼吸收條的暫態訊號比較	78
圖 4.45	自由狀態之 APFC 的暫態訊號量測實驗示意圖.....	78
圖 4.46	電極間距 1mm 之 APFC 於自由狀態接收 730kHz 正弦單脈衝激 發的板波(a)暫態訊號及(b)頻譜.....	78
圖 4.47	黏貼於鋁板之兩組 APFC 激發及量測暫態訊號實驗示意圖	79
圖 4.48	350kHz 之正弦單脈衝的(a)暫態訊號及(b)頻譜.....	79

圖 4.49	電極間距 1mm 之 APFC 接收 350kHz 正弦單脈衝激發之鋁板板波的(a)暫態訊號、(b)訊號局部放大及(c)頻譜	80
圖 4.50	800kHz 之正弦單脈衝的(a)暫態訊號及(b)頻譜	81
圖 4.51	電極間距 1mm 之 APFC 接收 800kHz 正弦單脈衝激發之鋁板板波的(a)暫態訊號、(b)訊號局部放大及(c)頻譜	82
圖 4.52	2MHz 之正弦單脈衝的(a)暫態訊號及(b)頻譜	83
圖 4.53	電極間距 1mm 之 APFC 接收 2MHz 正弦單脈衝激發之鋁板板波的(a)暫態訊號、(b)訊號局部放大及(c)頻譜	84
圖 4.54	電極間距 1mm 之 APFC 接收 2MHz 正弦單脈衝激發之鋁板板波傳遞路徑加水滴的(a)暫態訊號、(b)訊號局部放大及(c)頻譜	85
圖 4.55	450kHz 之正弦單脈衝的(a)暫態訊號及(b)頻譜	86
圖 4.56	電極間距 0.8mm 之 APFC 接收 450kHz 正弦單脈衝激發之鋁板板波的(a)暫態訊號、(b)訊號局部放大及(c)頻譜	87
圖 4.57	1MHz 之正弦單脈衝的(a)暫態訊號及(b)頻譜	88
圖 4.58	電極間距 0.8mm 之 APFC 接收 1MHz 正弦單脈衝激發之鋁板板波的(a)暫態訊號、(b)訊號局部放大及(c)頻譜	89
圖 4.59	2.5MHz 之正弦單脈衝的(a)暫態訊號及(b)頻譜	90
圖 4.60	電極間距 0.8mm 之 APFC 接收 2.5MHz 正弦單脈衝激發之鋁板板波的(a)暫態訊號、(b)訊號局部放大及(c)頻譜	91
圖 4.61	黏貼於鋁板之 PFC 的暫態訊號量測試片示意圖	92
圖 4.62	4MHz 之正弦單脈衝的(a)暫態訊號及(b)頻譜	92
圖 4.63	長度 40mm 之 PFC 接收 4MHz 正弦單脈衝激發之鋁板板波的(a)暫態訊號、(b)訊號局部放大及(c)頻譜	93
圖 4.64	雷射都卜勒量測實驗示意圖	94
圖 4.65	APFC 黏貼於鋁板的頻率響應量測點示意圖	94

圖 4.66	電極間距 1mm 之 APFC 激發板波於 5 個波長遠處的頻率響應	95
圖 4.67	電極間距 0.8mm 之 APFC 激發板波於 5 個波長遠處的頻率響應	95
圖 4.68	都卜勒振動儀量測(a)APFC 激發板波聲場、 (b)衰減量測點位置 示意圖。	96
圖 4.69	具有 21 對電極間距 1mm 之 APFC 於距離 5L 處的聲場極圖....	96
圖 4.70	具有 21 對電極間距 1mm 之 APFC 於距離 8L 處的聲場極圖....	97
圖 4.71	具有 21 對電極間距 1mm 之 APFC 於距離 10L 處的聲場極圖..	97
圖 4.72	具有 21 對電極間距 0.8mm 之 APFC 於距離 5L 處的聲場極圖.	98
圖 4.73	具有 21 對電極間距 0.8mm 之 APFC 於距離 8L 處的聲場極圖.	98
圖 4.74	具有 21 對電極間距 0.8mm 之 APFC 於距離 10L 處的聲場極圖	99
圖 4.75	具有 21 對電極間距 1mm 的 APFC 激發板波在中軸線上的訊號 衰減	99
圖 4.76	具有 21 對電極間距 0.8mm 的 APFC 激發板波在中軸線上的訊號 衰減	100



第一章 緒論

1.1 前言

近年來，非破壞檢測(non-destructive testing, 簡稱 NDT)普遍應用於結構製造業，在設計結構性或功能性構件之初，即融入非破壞檢測的需求，此一構思已漸為設計主流，即所謂 NDT in Design 的概念。以內嵌於結構之壓電致動器與感測器，定期檢查結構的整體性及損壞情形，不僅可大幅減少傳統檢測所需拆卸與組裝構件的經濟成本及時間，並可配合網路通訊技術等，發展出結構健康監測系統(structure health monitoring, 簡稱 SHM)。

台灣四面環海，具有優良的風力資源，但因位處多颱風的地區，因此風機葉片損壞的機率增加許多。颱風過後，啟用風機之前，得先檢測葉片的完好性，故需耗費大量的經濟成本及檢測時間，故企需發展出一套內嵌式結構健康監測系統。壓電纖維複材有纖薄與撓曲性高的特色，具有結構健康監測系統的發展潛能。

1.2 研究背景

壓電材料(piezoelectric material)具有機械能與電能互相轉換之耦合效應，其能量密度高、能量衰減慢、反應快，故被廣泛應用於精準度較高的感測器、致動器及定位控制器。在非破壞檢測及評估、航太、汽車工業與通訊系統等領域中，具有極高的應用性。

鉛鈦酸鋯(PZT)為一種人造壓電材料，材質堅硬且脆，不易進行二次加工，耐衝擊性差，使其應用受到限制。壓電複合材料為壓電陶瓷與聚

合物按固定的體積或質量比，以固定之空間配置製作而成的功能性材料。因為加入環氧樹脂等高分子材料，具有聲阻(acoustic impedance)低、柔性好等優點，擴充了傳統壓電材料的應用性。在 1997 年 Bent 與 Hagood [1]發展出壓電纖維複合材料(piezoelectric fiber composites, 簡稱 PFC)，如圖 1.1 所示，由中間一層壓電陶瓷纖維材料與上下兩層互相對稱的指叉電極(interdigitated electrode)，以環氧樹脂黏合成三明治結構，提升其形變能力與可撓曲性，可服貼黏著於曲面結構體表面，有利於結構健康監測。

在現有市售壓電纖維複合材料中，壓電纖維透過高電壓極化過後，其壓電纖維排列方式如圖 1.2(c)所示，完成極化後，施加電場於壓電纖維複材，由於壓電材料的電偶極距排列為週期性，一區段向左，一區段向右，故壓電纖維複材會隨著電場變化而整體伸長或縮短，在軸向會有明顯的形變量。若施加電場為交流電，則整體變形為軸向延性模態(extensonal mode)，波長大小取決於纖維的長度。

1.3 文獻回顧

Hagood *et al* [2]在 1993 年將指叉電極作為平板壓電陶瓷的驅動電極，分別以 Rayleigh-Ritz method 及有限元素法(finite element method)分析平板壓電陶瓷的致動能力，探討電極厚度及間距對於致動的影響。指叉電極可使面內(in plane)應變大於傳統電極驅動壓電塊的 1.53 倍，明顯增強了平面致動的異向性(anisotropy)。

Bent 與 Hagood [1]於 1997 年首度將壓電複合材料及指叉電極結合發展出新式壓電纖維複材(piezoelectric fiber composite, 簡稱 PFC)，建立

均質材料模型，探討壓電相與聚合相之間不同體積比(7-58%)與巨觀材料係數的關係，實驗量測結果與數值分析相符，並指出以壓電複合材料取代塊狀壓電材料，可產生較大的面內應變。

Janos 與 Hagood [3]於 1998 年將指叉電極驅動的 PFC 結構又稱為主動式纖維複材(active fiber composites, 簡稱 AFCs), 將之應用於致動器, 並總結其軸向致動能力比傳統壓電塊材強, 強度比傳統塊狀壓電材料高, 且可撓性大, 適合應用於各種曲面結構上。

Rossetti *et al* [4]於 2000 年發現主動纖維複材的指叉電極間距與纖維直徑之比值影響主動纖維複材的驅動電壓大小, 實驗結果指出當比值較小, 所需驅動電壓較小, 應變也較小; 相對地, 當比值較高, 則需較高的驅動電極, 產生的應變較大, 即效率較好。此外, 壓電纖維的截面形狀對其致動性能亦有明顯影響, 透過實驗量測, 結果顯示帶狀(ribbon)纖維可提高與指叉電極的接觸面積, 亦能提高纖維的體積比(fiber volume fraction), 致動效果優於圓形截面的纖維。

Datta *et al* [5]於 2003 年將 AFCs 內嵌於玻璃複合材料中, 探討在週期性負載下的結構振動量測, 並偵測鉛筆折斷產生的模擬音洩訊號, 試驗結果顯示在纖維方向具有較佳的靈敏度, 可應用於音洩訊號源定位。

Huber *et al* [6]在 2005 年對 AFCs 的製作程序與極化過程, 提出最佳化的方法, 加大指叉電極與壓電纖維間的接觸面積可提高應變量, 並詳細探討如何增加電極與壓電纖維的接觸與極化程序的優化。

Nelson *et al* [7]於 2003 年採用四種不同方法製成的 PZT-5A 纖維, 製作組成纖維體積比由 0.02 至 0.72 的 1-3 型壓電纖維複材, 量測不同纖維體積比之試件的材料係數, 與解析解比對, 求出纖維的性質。此外, 也探討指叉電極寬度、間距與複材厚度的比值對於致動能力的影響, 指出

當指叉電極的寬度為 PFC 厚度的一半，壓電纖維複材有最佳的致動效果。

Bowen *et al* [8]於 2006 年以數值模擬方法，將壓電纖維簡化為一塊壓電基材，結果指出當指叉電極的寬度為基材的一半，壓電纖維複材有最大應變，指叉電極間距(electrode separation)與基材厚度(substrate thickness)的比值大於 4 時，壓電纖維複材可產生最大 d_{33} 應變量的 80%。

Barbezat *et al* [9]在 2004 年比較 AFCs 與市售音洩探頭於平板上的各項感測表現，發現 AFCs 在平行纖維方向具有較好的靈敏度，AFCs 可以振動方式產生擾動訊號的能力。

Bruner *et al* [10]在 2005 年指出 AFCs 在致動與感測方向性具有相當優異的表現，可應用於 AE 監測及聲波-超音波(acousto ultrosomics, 簡稱 AU)的感測，具有執行結構健康監測的潛能。

PFC 應用於結構健康監測時，因 PFC 感測元件面積較傳統探頭大，若感測元件與被監測結構之間發生脫層現象，則監測效果必定打折。Wang [11]於 2010 年以阻抗頻譜法量測 PFC 於結構體表面發生脫層的情況。根據解析解、有限元素模擬與阻抗量測，確認面內基本共振頻率與脫層大小成反比，並以電子光斑干涉證實脫層部分的振動為面內共振。

1.4 研究目的

市售音洩探頭受限於幾何形狀因素，使其無法長期應用於結構健康監測。Schulz *et al* [12]於 2000 年提出將壓電纖維複材內嵌於待測結構，以模擬數值運算及實驗探討其應用於 SHM 的可行性，並且提到壓電纖維複材可感測縱波及振動的應變。結構監測對象大多為板狀結構，板結

構的彈性波傳遞形式主要為藍姆波(Lamb wave)，對稱式壓電纖維複材的作動原理為振動，不對特定波長敏感，受限於尺寸因素，對稱式壓電纖維複材無法接收波長較短之訊號。

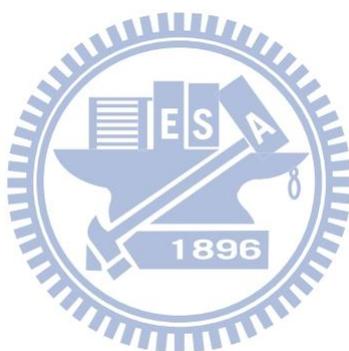
本研究將壓電纖維複合材料置於上下反對稱排列的指叉電極中，如圖 1.3 所示，壓電纖維的極化方向與纖維夾一角度，使壓電纖維複材不只是在纖維方向伸長或縮短，厚度方向也可以產生週期形變，使其為撓曲變形之振動模態(flexural mode)，使之成為一種波長取決於電極間距的導波換能器，並自行製作 APFC 及測試其性能。

本研究分成分析與實驗兩部份進行。分析部份以有限元素法模擬 APFC 在時諧激振下，模型相關幾何尺寸對於 APFC 頻率響應的影響。實驗部份可分為兩部份進行，第一部分製作 APFC 試片，製作完成後，量測 APFC 的阻抗響應，得知 APFC 的自身共振頻率。第二部份以不同邊界條件的頻率響應、暫態訊號量測、聲場及衰減性，探討 APFC 作為導波換能器的性能。

1.5 內容簡述

本文分為五章，第一章為前言、研究背景、文獻回顧及研究目的。第二章為理論說明，介紹壓電材料的特性與其本構方程式、有限元素時諧分析的數值理論背景及板波的波導理論。第三章為數值模擬分析與討論，以有限元素法進行時諧分析，討論不同的指叉電極間距及對數對於 APFC 頻率響應的影響。第四章為實驗量測與討論，製作反對稱壓電纖維複材所需相關組件及製作流程，實驗量測包括 APFC 的阻抗響應、頻率響應、黏貼於鋁板上的板波波傳及 APFC 激發的聲場與衰減性。第五

章為結論及未來展望。



第二章 理論說明

本章先介紹材料的壓電效應及壓電材料的本構方程式，接著描述市售壓電纖維複材的構造及其基本工作原理。解釋時諧分析的數值理論，並說明本研究於 ANSYS 套裝軟體時諧分析中的阻尼設定，最後簡述藍姆波在均質等向性平板中傳遞的相速度與群速度(能量速度)。

2.1 壓電纖維複材

2.1.1 壓電效應

壓電材料特有的壓電效應(piezoelectricity)，是材料中一種機械能與電能互換的現象，此現象最早是 1880 年由皮埃爾·居里(Pierre Curie)和雅克·居里(Jacques Curie)兄弟發現。壓電材料之所以會有壓電效應是因晶格內原子間特殊排列方式，使得材料有應力場與電場耦合的效應。壓電效應有兩種，分別為正壓電效應(direct piezoelectric effect)及逆壓電效應(converse piezoelectric effect)。施加一物理力於壓電材料體上時，材料體內之電偶極矩會因壓縮而變短，此時壓電材料為抵抗這變化會在材料表面產生與壓力大小成比例的電荷，當作用力相反時，其電荷極性亦會隨之改變，如圖 2.1(a)所示，此效應稱為正壓電效應，壓電感測器(sensor)的工作原理即是正壓電效應。在壓電材料表面施加電場(電壓)，若電場作用使電偶極矩會被拉長或縮短，壓電材料極化方向的長度，會隨著電場大小及方向做伸長或縮短的改變，如圖 2.1(b)所示，此效應稱為逆壓電效應，市售的壓電致動器(piezoelectric actuator)即是應用此效應製作而成的。

2.1.2 壓電材料的本構方程式

壓電材料具有機電能量轉換特性，當其受電場或機械應力作用時，本構方程式可表示為

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} - \mathbf{d} \mathbf{E} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{d} \mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E} \quad (2.2)$$

式中， \mathbf{S} 、 \mathbf{T} 分別為應變及應力張量矩陣， \mathbf{s}^E 是固定電場下的彈性柔度張量矩陣(matrix of elastic compliance)， \mathbf{d} 是壓電常數矩陣(matrix of piezoelectric constants)， \mathbf{D} 是電位移向量矩陣， \mathbf{E} 是電場矩陣， $\boldsymbol{\varepsilon}^T$ 是固定應力(constant stress)條件下的介電常數矩陣(matrix of dielectric constants)。

本研究的數值分析使用壓電陶瓷纖維材料為 PZT-5A，若纖維方向(x_3 方向)經高電壓極化後，具有橫向等向性，其材料特性可以下列矩陣式表示：

彈性柔度矩陣為

$$\mathbf{s}^E = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

壓電常數矩陣為

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

介電常數矩陣為

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.1.3 壓電纖維複材的構造

上下電極對稱排列的壓電纖維複材(PFC)主要構造如圖 1.1 所示，圓形壓電纖維係由鉛鈦酸鋯(PZT)原料燒結而成。將許多直徑、長度相同的壓電纖維，在同一平面上整齊排列，再以環氧樹脂填注於纖維之間，使之成為一片由壓電纖維與環氧樹脂所構成的薄片，在薄片上下兩面黏貼軟性印刷電極，PFC 的上下指叉電極為互相對稱，左右相鄰之指叉電極極性相反。施加高電壓於指叉電極使壓電纖維複材極化，壓電纖維沿軸向產生正負相間的極性，如圖 1.2 所示。經過極化程序後，再對指叉電極通電產生正負相間的電場，壓電纖維複材將產生伸長或縮短。若主結構致使表面黏著的壓電纖維產生形變，可轉換成為電訊號，測出結構的變形。

現有的壓電纖維複材成品有兩種，分別為 PFC 與 macro fiber composite, 簡稱 MFC，其基本構造與作用原理均相同，唯一的差別在於 MFC 的壓電纖維是將 PZT 單體晶片切割成矩形截面的纖維，主要構造如圖 2.2 所示。

2.2 有限元素分析法

有限元素法(finite element method, FEM)的基本概念是將連續場變數(field variables)以多個不連續函數近似表示。透過分佈函數(distribution function)或形狀函數(shape function)之假設，配合網格(mesh)與節點(node)的建立，利用結構的平衡與邊界條件，建立整體力學系統之節點外力與節點變位關係，求得節點變位的函數，包括變位場(displacement field)、應變場(strain field)及應力場(stress field)。

2.2.1 時諧分析

時諧分析通常用於求解施加週期外力負載的結構振動問題，如轉動的葉片或馬達等情況。分析時會將外力與位移假設為具有同頻率的時諧因子 $\exp(i\omega t)$ ，在頻率域(frequency domain)計算結構的響應。

本研究採用時諧分析，計算一組反對稱壓電纖維複材，以一端激振、一端感測的型式，探討不同幾何尺寸對頻率響應的影響。

結構系統的運動方程式如下

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (2.6)$$

其中 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分別為系統之質量、阻尼以及剛性矩陣， \mathbf{u} 為位移向量， \mathbf{F} 則代表作用在系統的外力向量。

假設振動之位移和外力都具相同頻率的時諧因子，故位移向量 \mathbf{u} 與外力向量 \mathbf{F} 可表示成如下兩式：

$$\mathbf{u} = \left\{ u_{\max} e^{i\phi} \right\} e^{i\omega t} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{F} = \left\{ F_{\max} e^{i\psi} \right\} e^{i\omega t} \quad (2.8)$$

其中 ω 代表角頻率， ϕ 和 ψ 分別為位移與外力之相位角， u_{\max} 與 F_{\max} 則分別為位移與外力之振幅大小。(2.7)與(2.8)式可改寫成

$$\mathbf{u} = (\mathbf{u}_1 + i\mathbf{u}_2)e^{i\omega t} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{F} = (\mathbf{F}_1 + i\mathbf{F}_2)e^{i\omega t} \quad (2.10)$$

其中

$$\mathbf{u}_1 = \{u_{\max} \cos \phi\} \quad , \quad \mathbf{u}_2 = \{u_{\max} \sin \phi\} \quad (2.11a)$$

$$\mathbf{F}_1 = \{F_{\max} \cos \psi\} \quad , \quad \mathbf{F}_2 = \{F_{\max} \sin \psi\} \quad (2.11b)$$

\mathbf{u}_1 與 \mathbf{F}_1 為實部的位移向量與外力向量， \mathbf{u}_2 與 \mathbf{F}_2 為虛部的位移向量與外力向量。經過簡化及代換後，(2.6)式可以表示如下：

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K})(\mathbf{u}_1 + i\mathbf{u}_2) = \mathbf{F}_1 + i\mathbf{F}_2 \quad (2.12)$$

(2.12)式可表示成

$$\mathbf{K}_c \mathbf{u}_c = \mathbf{F}_c \quad (2.13)$$

其中

$$\mathbf{K}_c = -\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K} \quad (2.14a)$$

$$\mathbf{u}_c = \mathbf{u}_1 + i\mathbf{u}_2 \quad (2.14b)$$

$$\mathbf{F}_c = \mathbf{F}_1 + i\mathbf{F}_2 \quad (2.14c)$$

\mathbf{K}_c 代表結構中阻抗的分佈狀態， \mathbf{u}_c 為穩態(steady state)反應的振幅向量，

\mathbf{F}_c 則為外力的振幅向量。(2.13)式的解為

$$\mathbf{u}_c = \mathbf{K}_c^{-1} \mathbf{F}_c \quad (2.15)$$

(2.15)式即為每個自由度的穩態反應。

2.2.2 阻尼設定

本研究使用 ANSYS 套裝軟體作為模擬反對稱壓電纖維複材的數值分析工具，ANSYS 有多種設定結構阻尼的方式，下式為 ANSYS[13]的阻尼方程式

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + (\beta + \beta_c) \mathbf{K} + \sum_{j=1}^{N_m} \left[\left(\beta_j^m + \frac{2}{\Omega} \beta_j^\xi \right) \mathbf{K}_j \right] + \sum_{k=1}^{N_e} (\mathbf{C}_k + \mathbf{C}_\xi) \quad (2.16)$$

其中 \mathbf{C} 代表整體結構的阻尼矩陣， \mathbf{M} 為整體結構的質量矩陣， \mathbf{K} 為整體結構的剛度矩陣， α 與 $(\beta + \beta_c)$ 分別表示整體結構的庫倫阻尼與結構阻尼，兩者合稱為雷利阻尼(Rayleigh damping)，又稱為比例阻尼(proportional damping)， j 代表材料的編號， \mathbf{K}_j 代表整體結構中，以編號 j 材料所構成的部分剛度矩陣， N_m 則為材料的總數， β_j^m 與 β_j^ξ 為編號 j 材料的結構阻尼， Ω 為激振角頻率， \mathbf{C}_k 與 \mathbf{C}_ξ 為阻尼元素的阻尼矩陣。其中

$$\beta_c = \frac{2}{\Omega} \xi \quad (2.17)$$

ξ 為定值阻尼比(constant damping ratio)，與激振頻率無關。本研究僅設定 ξ 與 β_j^ξ ，故阻尼方程式可簡化為

$$\mathbf{C} = \frac{2}{\Omega} \left[\xi \mathbf{K} + \sum_{j=1}^{N_m} \beta_j^\xi \mathbf{K}_j \right] \quad (2.18)$$

利用此設定，可給定整體結構一固定阻尼值，再針對不同的材料額外給予不同的阻尼值。

2.3 等向性平波的板波波傳

板波的波動受到平板上下表面自由邊界的拘束，在板厚方向形成共振者方能沿著平板傳遞至遠處，若無法在厚度方向形成共振，則會很快地衰減消散掉。板厚方向不同振動模態或振頻的板波具有不等的相速度，這種現象即稱為頻散或色散(dispersion)。

2.3.1 藍姆波的相速度

為簡化表示式，以下推導的場變數皆省略時諧因子 $e^{i\omega t}$ ，平板上下表面邊界條件為

$$S_{xy} = S_{yy} = 0 \quad y = \pm H, \quad -\infty < x < \infty \quad (2.19)$$

此處， H 為板厚的一半。採用赫姆霍茲分解法(Helmholtz decomposition)，將勢函數(potential functions)依分離變數法(separation of variables)，假設為

$$\Phi(x, y) = F(y)e^{ikx} \quad (2.20a)$$

$$\Psi(x, y) = G(y)e^{ikx} \quad (2.20b)$$

其中， k 為未知的實數波數， $F(y)$ 、 $G(y)$ 為待定函數，兩者必須滿足

$$F''(y) - \eta_1^2 F(y) = 0 \quad (2.21a)$$

$$G''(y) - \eta_2^2 G(y) = 0 \quad (2.21b)$$

其中， $\eta_j = \sqrt{k^2 - k_j^2}$ 。考慮 η_1 、 η_2 為單一函數(single valued function)，假設

$$\text{Re}(\eta_j) \geq 0 \quad (2.21c)$$

在平板內部($-H < y < H$)，(2.21a)及(2.21b)式的通解為

$$F(y) = A \sinh(\eta_1 y) + B \cosh(\eta_1 y)$$

$$G(y) = C \sinh(\eta_2 y) + D \cosh(\eta_2 y)$$

其中 A 、 B 、 C 、 D 為常數，則勢能函數可以寫為

$$\Phi(x, y) = [A \sinh(\eta_1 y) + B \cosh(\eta_1 y)] e^{ikx} \quad (2.22a)$$

$$\Psi(x, y) = [C \sinh(\eta_2 y) + D \cosh(\eta_2 y)] e^{ikx} \quad (2.22b)$$

因此應力分量可表示為

$$S_{xy} = \mu(2\Phi_{,xy} + 2\Psi_{,xx} + k_2^2 \Psi) \quad (2.23a)$$

$$S_{yy} = \mu[-(2\Phi_{,xx} + k_2^2 \Phi) + 2\Psi_{,xy}] \quad (2.23b)$$

將(2.20)式至(2.23)式整理後，代入(2.19)式的邊界條件中，可解出 k 、 A 、 B 、 C 、 D ，表示如下

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 2ik\eta_1 \cosh(\eta_1 H) & -(2k^2 - k_2^2) \cosh(\eta_2 H) \\ \pm(2k^2 - k_2^2) \sinh(\eta_1 H) & \pm 2ik\eta_2 \sinh(\eta_2 H) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ D \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \pm 2ik\eta_1 \sinh(\eta_1 H) & \mp(2k^2 - k_2^2) \sinh(\eta_2 H) \\ (2k^2 - k_2^2) \cosh(\eta_1 H) & 2ik\eta_2 \cosh(\eta_2 H) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} B \\ C \end{Bmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (2.24)$$

若 $B = C = 0$ ，(2.22)式代表反對稱板波，因此 A 、 D 及 k 必須滿足下式

$$\begin{bmatrix} 2ik\eta_1 \cosh(\eta_1 H) & -(2k^2 - k_2^2) \cosh(\eta_2 H) \\ (2k^2 - k_2^2) \sinh(\eta_1 H) & 2ik\eta_2 \sinh(\eta_2 H) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ D \end{Bmatrix} = 0 \quad (2.25)$$

反之，若 $A = D = 0$ ，則(2.22)式代表對稱板波， B 、 C 、 k 必須滿足下式

$$\begin{bmatrix} 2ik\eta_1 \sinh(\eta_1 H) & -(2k^2 - k_2^2) \sinh(\eta_2 H) \\ (2k^2 - k_2^2) \cosh(\eta_1 H) & 2ik\eta_2 \cosh(\eta_2 H) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} B \\ C \end{Bmatrix} = 0 \quad (2.26)$$

當 $B = C = 0$ 時，位移場假設為下列形式

$$U(x, y) = [ikA \sinh(\eta_1 y) - \eta_2 D \sinh(\eta_2 y)] e^{ikx} \quad (2.27a)$$

$$V(x, y) = [\eta_1 A \cosh(\eta_1 y) + ikD \cosh(\eta_2 y)] e^{ikx} \quad (2.27b)$$

若(2.25)式及(2.26)式存在非零解，可分別獲得特徵方程式

$$\begin{aligned} (2k^2 - k_2^2)^2 \sinh(\eta_1 H) \cosh(\eta_2 H) \\ - 4k^2 \eta_1 \eta_2 \cosh(\eta_1 H) \sinh(\eta_2 H) = 0 \end{aligned} \quad (2.28)$$

及

$$\frac{D}{A} = - \frac{(2k^2 - k_2^2) \sinh(\eta_1 H)}{2ik\eta_2 \sinh(\eta_2 H)} \quad (2.29)$$

由(2.27)至(2.29)式可以得到平板反對稱波的波傳行為。在 x 為定值的截面， U 是 y 的奇函數，而 V 是 y 的偶函數，這個板波的變形對 x 軸呈反對稱，(2.28)式可以整理為

$$\frac{\tanh(\eta_2 H)}{\tanh(\eta_1 H)} = \frac{(2k^2 - k_2^2)^2}{4k^2 \eta_1 \eta_2} \quad (2.30)$$

上式的解為波數 k ，則波速 c 可以經由 $k = \omega/c$ 計算得之。(2.30)式是一個超越函數(transcendental equation)，可以得知 k 及 c 是 ω 的函數。(2.30)式稱為反對稱板波的頻散方程式(dispesion equation)。

若 $A = D = 0$ 時，則位移場可表示成

$$U(x, y) = [ikB \cosh(\eta_1 y) - \eta_2 C \cosh(\eta_2 y)] e^{ikx} \quad (2.31a)$$

$$V(x, y) = [\eta_1 B \sinh(\eta_1 y) + ikC \sinh(\eta_2 y)] e^{ikx} \quad (2.31b)$$

這種板波運動對稱於 x 軸。若(2.26)式存在非零解，則 k 必須滿足下列對稱板波的頻散方程式，

$$\frac{\tanh(\eta_1 H)}{\tanh(\eta_2 H)} = \frac{(2k^2 - k_2^2)^2}{4k^2 \eta_1 \eta_2} \quad (2.32)$$

依據位移對於平板中平面的對稱性，板波可分為反對稱波及對稱波兩類，前者稱為撓性波(flexural waves)，後者則稱為延性波(extensional waves)。

2.3.2 藍姆波的群速度

通常所見的板波都不是由單頻波源(monochromatic sources)所生成，考慮一組振幅相等，頻率與波數都具有些微差異的波動，沿著 x 軸的正向波傳，則其合成波的位移可以下列的數學式予以描述，

$$u = A\{\sin(k_1 x - \omega_1 t) + \sin(k_2 x - \omega_2 t)\} = C \sin(\bar{k}x - \bar{\omega}t) \quad (2.33)$$

其中，調制(modulation)振幅 $C = 2A \cos(\delta k \cdot x - \delta \omega \cdot t)$ ，且 $\delta k = (k_1 - k_2)/2$ 、 $\delta \omega = (\omega_1 - \omega_2)/2$ 。而載波(carrier wave)的頻率為 $\bar{\omega} = (\omega_1 + \omega_2)/2$ ，其波數則為 $\bar{k} = (k_1 + k_2)/2$ 。參考圖 2.3 所示，整個波群(group wave)的調制振幅 $C(x, t)$ 即為載波的包絡線，波群的速度稱為群速度(group velocity)，又稱為能量速度(energy velocity)，波群的群速度 c_g 為

$$c_g = \lim_{\delta k \rightarrow 0} \frac{\delta \omega}{\delta k} = \frac{d\omega}{dk} \quad (2.34)$$

對於板波而言，其相速度具有頻散特性且相速度、角頻率 ω 、波向量 k 為內隱式函數關係，由頻散方程式(2.30)與(2.32)式，可分別計算反對稱板波與對稱板波的群速度

$$c_g = -\frac{\partial \Omega / \partial k}{\partial \Omega / \partial \omega} \quad (2.35)$$

其中，反對稱板波的特徵函數 $\Omega(k, \omega)$ 為

$$\Omega(k, \omega) = 4k^2 \eta_1 \eta_2 \tanh(\eta_2 H) - (2k^2 - k_2^2)^2 \tanh(\eta_1 H) \quad (2.36)$$

而對稱板波的特徵函數 $\Omega(k, \omega)$ 為

$$\Omega(k, \omega) = 4k^2 \eta_1 \eta_2 \tanh(\eta_1 H) - (2k^2 - k_2^2)^2 \tanh(\eta_2 H) \quad (2.37)$$

板波的波速是頻率(或波長)的函數，依據板波在板厚方向的共振模式，可以繪成許多支相速度頻散曲線(dispersion curves)。圖 2.4 所示為對稱及反對稱板波變位的示意圖。圖 2.5 所示為鋁板的基本反對稱(A_0)及基本對稱(S_0)板波相速度與群速度的頻散曲線。一般而言，較低頻的板波比較容易被激發，波動的振幅也比較明顯，其中又以 A_0 板波的振幅最大。



第三章 數值模擬分析與討論

當壓電纖維複材受到上下表面反對稱排列指叉電極的交流電場作用，會產生時諧振動(time harmonic vibration)。本研究採用有限元素分析套裝軟體 ANSYS 作為工具，以時諧分析(harmonic analysis)模組模擬反對稱壓電纖維複材的頻率響應。

3.1 三維有限元素之網格與元素型態

反對稱壓電纖維複材模型的示意圖如圖 3.1 所示，圖中 A、B、C 及 L 分別為模型總長度、總寬度、兩 APFC 的間距及 APFC1 長度，分別令兩 APFC 間距、APFC1 長度及電極間距為單一變數，來探討指叉電極幾何尺寸對頻率響應的影響。在數值模擬中，省略環氧樹脂基材部分，直接以一片均質的薄壓電陶瓷材料 PZT-5A 取代壓電纖維，其材料參數如表 3.1 所列，可有效減少有限元素模型的網格數目，並縮短電腦的運算時間。參考初始的各項幾何尺寸如表 3.2 所列，將模型的長度方向切割成 400 等份的網格，厚度方向切割成 2 等份的網格，寬度方向切割成 16 等份的網格，如圖 3.2 所示，元素數目共 12,800。壓電材料使用 8 節點之三維耦合元素(3-D coupled-field solid)SOLID5，每個節點具有 x、y、z 三個方向的位移自由度及一個電位自由度。模型內所有撓性常數及密度設定與 PZT-5A 相同，但是僅有 APFC1 及 APFC2 給定非零的壓電參數，極化方向依電極間距不同而有所改變，建立 4 種不同電極間距的模型，其極化方向如表 3.3 所列。此外，將外圍邊界材料設為高阻尼材料，作為吸收層。施加於 APFC1 的電位差為 400 伏特，即正負 200 伏特，其反對稱電極配置、電極間距及極化角度如圖 3.3 所示。

3.2 時諧分析

本節主要探討指叉電極的電極對數及電極間距對 APFC 頻率響應的影響，以電極間距 1mm 為主，再分別令兩個 APFC 間距 C 及 APFC1 長度 L 參數為單一變數，其餘幾何參數均設為參考模型尺寸，如表 3.2 所列。分析的頻率範圍由 1kHz 至 1,000kHz 的頻率範圍，每 2kHz 為一點，共 500 個點，施加於 APFC1 的電位差振幅為 400 伏特，輸出 APFC2 上的節點電壓值。再以指叉電極的電極間距為變數，探討其對頻率響應的影響。

3.2.1 改變電極對數

首先改變兩 APFC 的間距 C ，探討訊號傳遞距離是否會影響 APFC 的頻率響應。設變數 C 為 20mm、25mm、35mm，刻意使間距 C 不為電極間距的整數倍，其頻率響應結果如圖 3.4 所示。當 C 等於 20mm 與 25mm 時，頻率響應分佈大致相同，無明顯差異，當 C 為 35mm 時，頻率響應分佈有明顯地差異性。三者的最大振幅發生頻率差異甚小，分別為 718、718、720kHz，故增加訊號傳遞距離不影響頻率響應。接著探討增加電極對數的影響，即 APFC1 長度 L 增加，指叉電極對數亦會增加，令 L 變數為 30mm、34mm 及 40mm，頻率響應如圖 3.5 所示。增加電極對數，可加強指叉電極產生訊號的獨特性，當 L 等於 30mm 時(有 7.5 對電極數)，在 200~400kHz 範圍內有兩個最低點；當 L 等於 34mm 時(共有 8.5 對電極)，在相同範圍內，輸出響應強烈跳動，有 3 個最低點；當 L 等於 40mm 時(共有 10 對電極)，有 5 個最低點，由此可知頻率響應與電極對數有關。

3.2.2 四種電極間距的頻率響應

以表 3.3 所列的電極間距與所對應的極化方向為變數，分別建立四個模型，探討其在 1~1,000kHz、201~1,200kHz、501~1,500kHz 及 701~1,700kHz 範圍內的頻率響應，如圖 3.6 所示，當電極間距改變，其振幅最大值所對應的頻率也會有所改變，如表 3.4 所列。隨電極間距的遞減，最大振幅頻率呈非線遞增，頻率響應與電極間距大小有關。

3.3 實驗模型的分析

實際製作之 APFC 與前幾節模擬的 APFC 模型幾何不同，為了分析與實驗結果的比對，依照實際製作的 APFC 幾何尺寸建立有限元素模型，使用相同的材料係數設定與邊界設定，分析自由狀態下的頻率響應。圖 3.7 及圖 3.8 所示分別是電極間距為 1mm 及 0.8mm 的頻率響應，得知電極間距為 1mm 之 APFC 在自由狀態下的工作頻約為 800kHz，電極間距為 0.8mm 之 APFC 則約為 1MHz。

3.4 小結

頻率響應不隨著兩 APFC 間的距離改變而有所不同，其頻率與振幅的相對位置分佈大致相同。頻率響應會隨著電極對數增加而有規則的變化，圖 3.9 所示是電極間距之 1mm 之 APFC1 長度等於 40mm 的頻率響應，與波傳導的頻率響應極為類似。隨著電極間距減少，其最大振幅所對應的頻率也會往上增加。圖 3.10 所示為 APFC 在靜態電場作用下，厚度方向的應變分佈變形圖，由此可知 APFC 為撓曲變形，其振動模態在動態交流電場作用下形成撓曲模態(flexural mode)。

第四章 實驗量測與討論

本章敘述製作反對稱壓電纖維複材所需相關組件及製作流程，實驗量測包括 APFC 的阻抗響應、頻率響應、鋁板上的板波波導波傳及 APFC 激發的聲場與衰減性。APFC 的阻抗響應主要量測 APFC 自身的共振頻率，APFC 的頻率響應與邊界條件相關。將鋁板黏貼於鋁板上，量測以 APFC 發射、接收的暫態訊號，探討 APFC 在鋁板上產生的導波。最後，採用都卜勒振動量測儀，量測所激發的聲場與衰減性，進一步瞭解 APFC 做為導波換能器的性能。

4.1 反對稱壓電纖維複材的製作

4.1.1 指叉電極設計與製作

壓電纖維複材為一種可撓性高的功能性複合材料，壓電纖維埋藏於環氧樹脂內，上下表面的指叉電極製作於軟性印刷電路板(flexible print circuit board，簡稱 FPCB)，FPCB 是由保護膜(polyimide)、膠(adhesive)及銅箔(copper)所構成。

習用的指叉電極設計，每對電極寬度(d)與間距(pitch)皆相等，但是考量環氧樹脂(epoxy)的介電性較低，為了避免極化過程中施加高電壓，導致擊穿上下電極造成短路的問題，因此加大電極的左右距離，使電極寬度小於間距。習用的表面聲波元件波長間距寬的四倍，即 $\lambda=4p$ ，其中 p 為電極間距。依據此電極間距 p 與導波相速度 v_0 可設計要求之中心頻率，

$$v_0 = f_0 \lambda \quad (4.1)$$

在本研究中，共設計製作了兩種電極間距的指叉電極，如表 4.1 所列，電極間距分別為 1mm 與 0.8mm，將之設計為一對，分別作為激發及感測之用，且兩者的電極對數不等，分別為 21 對及 11 對，如圖 4.1 所示。本研究的 FPCB 指叉電極是委託岳僑漢公司代工製作，成品如圖 4.2 所示。

4.1.2 反對稱壓電纖維複材製作程序

本研究主要參考美國航空太空總署藍利研究中心(NASA Langley Research Center)發表的文獻[15]-[16]，製作壓電纖維複材。大致程序如下：

- (1) 壓電纖維排列：依所需寬度及長度，將 PZT-5A 壓電纖維整齊排列於低黏性膠布上，如圖 4.3 所示。
- (2) 指叉電極前置作業：在進行壓電纖維與指叉電極的黏合之前，為了順利完成 APFC 的極化製程，必需先以低黏性膠帶對指叉電極做部份的覆蓋黏貼。
- (3) 黏合壓電纖維及下電極：以環氧樹脂(epoxy)將已排列完成之壓電纖維與下指叉電極黏合，黏合過程需使用熱壓製程，熱壓參數如表 4.2 所列，並輔以真空幫浦抽氣，減少環氧樹脂中的氣泡殘留，如圖 4.4 所示。
- (4) 黏合上下電極：在已完成部件的表面塗佈環氧樹脂，將它與上指叉電極置放於夾具中，使用熱壓製程黏合，熱壓參數如表 4.2 所列，以真空幫浦抽氣，避免氣泡殘留，導致極化失敗。
- (5) 極化程序：利用高電壓電源供應器 PS325 (Stanford Research Systems) 對 APFC 進行極化，使壓電纖維分子規則排列。極化之前需先檢測

上下電極是否有相通，倘若相通，則不能進行極化。將 APFC 的上指叉電極接正極、下指叉電極接負極，極化電壓設為 2,000V，以 100V 為單位，每增加 100V 維持 15 秒，使壓電纖維內分子的電偶極矩得以旋轉重排，一直增加到最終極化電壓(2,000V)後，則維持 5 分鐘，如圖 4.5 所示。

- (6) APFC 成品：在完成極化程序後，利用銀膠將上下電極導通，並以利刃將 APFC 多餘部位切除，即完成 APFC 的製作，完成品如圖 4.6 所示。

整個製作程序以圖 4.7 表示。

4.2 反對稱壓電纖維複材的阻抗響應量測

反對稱壓電纖維複材具備輕薄的特性，響應無法以傳統加速計量測其振動的特性。因其具備壓電特性，可藉由阻抗響應量測其共振頻率。電阻抗的定義為通過元件的電壓降除以通過元件的電流。壓電元件是電阻與電容構成的元件，電能輸入會轉換成機械運動輸出，壓電元件受到高頻驅動的阻抗與非壓電介質的阻抗有明顯差異。

4.2.1 阻抗量測

量測 APFC 的阻抗響應可獲得其共振頻率。阻抗量測採用網路分析儀 HP 8751A (Hewlett Packard, Palo Alto, CA, USA)，具有產生函數、訊號擷取及分析的功能。APFC 具有兩電極埠，分別為驅動電極埠及感測電極埠，量測時，先設定相關量測參數，由網路分析儀輸出一大小為 1V 的掃頻正弦波訊號至 APFC 的驅動電極埠，再將感測電極埠量測到的阻抗變化訊號回傳至網路分析儀，獲得 APFC 的阻抗響應，如圖 4.8 所示。

4.2.2 自由狀態之 APFC 阻抗

將完成製作的 APFC 以前一小節所述方式進行阻抗量測，圖 4.9 至圖 4.11 所示為在不同頻率範圍量測電極間距等於 1mm、具有 21 對電極之 APFC 自身的阻抗響應。圖 4.9 中，在 720kHz 與 2.13MHz 附近，相位有明顯的變化，推測為 APFC 撓曲振動的共振頻率。圖 4.12 至圖 4.14 所示為不同頻率範圍內量測電極間距等於 0.8mm、具有 21 對電極的 APFC 自身阻抗響應，由圖 4.12 可得知在 928kHz 與 2.63MHz 附近有撓曲振動的共振頻率。比較圖 4.10 及圖 4.13 所示，發現電極間距不管是 1mm 或 0.8mm 的 APFC，兩者的阻抗響應皆不理想，極值非單一最低點，推測原因是尚無法完美反對稱黏合上下指叉電極，造成有電極間距不均勻及指叉電極與壓電纖維接觸造成電性不均勻所致。

在製作 APFC 的程序中，極化是相當重要的步驟。圖 4.15 及圖 4.16 為進行兩次極化後，具有 21 對且間距 1mm 之電極的 APFC 自身阻抗響應，圖 4.9 及圖 4.10 為只進行一次極化程序之 APFC，兩相比較，可發現共振點與反共振點的阻抗差值不等。僅進行一次極化的阻抗差值大約為 2dB，而兩次極化的阻抗差值約為 9dB，兩次極化有利於 APFC 產生較大的響應。

圖 4.17 及圖 4.18 分別為電極對數 21 對及 11 對，電極間距為 1mm 的 APFC 阻抗響應，觀察得知，電極對數與阻抗差值有正關係。再比較共振點與反共振點的頻率範圍，電極對數較多具有較窄的頻寬，原因是當電極對數越多，APFC 所產生的訊號漸趨於窄頻，與模擬分析結果相符。

為了比對自製的 APFC 與市售 PFC 的差異性，本研究採用美國 ACI

(Advanced Cerametrics, Inc., Lambertville, New Jersey, USA)公司製作的電極對稱排列的壓電纖維複材(PFC)，電極間距與電極寬度均為 0.5mm，壓電纖維分佈尺寸為長 40mm、寬 10mm，試片總厚度為 0.4mm。圖 4.19 及圖 4.20 所示為電極間距等於 0.5mm 的對稱壓電纖維複材阻抗響應，PFC 具有數個較低的共振頻率，及一個 3.5MHz 的共振頻率，較低的共振頻率為延性模態，其與 PFC 的幾何尺寸有關，而 3.5MHz 的共振頻率屬於何種共振模態尚待進一步探討，市售 PFC 與自製的 APFC 的共振特性差異甚大。

4.2.3 黏貼於鋁板之 APFC 阻抗

圖 4.21 至圖 4.23 所示為電極間距等於 1mm，圖 4.24 至圖 4.26 則為電極間距等於 0.8mm，皆具有 21 對電極，並黏貼於 1mm 厚之鋁板的 APFC 阻抗響應，其共振頻率分別為 760kHz、2.24MHz，後者為 1.04MHz、2.76MHz。與自由狀態下的 APFC 共振頻率比較，共振頻率皆有提升。因 APFC 與鋁板黏合後，APFC 的下表面邊界條件改變，受到剛性較高的鋁板影響所致，振動模式仍為撓曲振動。共振頻率皆上升約 5%，惟電極間距為 0.8mm 的 APFC 之第一個共振頻上升約 11%。

由圖 4.27 所示得知，當 PFC 黏貼於鋁板上後，在低頻處的數個共振頻率消失不見，是因為 PFC 結構受制於鋁板，使面內軸向振動無法產生。由圖 4.28 得知，原 3.5MHz 的共振頻率提升至將近 3.7MHz，其阻抗性亦受影響。

4.2.4 小結

具有不同電極間距的 APFC，會有不同的共振特性。當電極間距變

小，相對應之波長縮短，若波速固定，由(4.1)式可得知頻率會相對提高，實驗結果與理論相符。APFC 的阻抗響應受電極對數的多寡所影響，對數越多，阻抗越明顯，這是因為較多的電極數目可增加共振響應。

當 APFC 黏貼於鋁板上，仍可在原共振頻率附近量測到阻抗響應，反觀 PFC 黏貼於鋁板上後，數個低頻阻抗響應皆消失，只剩一個在高頻的阻抗響應，代表 APFC 黏貼於鋁板上仍可以多個特定頻率產生共振，而 PFC 僅存厚度振動模態，這是因為 APFC 與 PFC 的振動模態不同，APFC 為撓曲模態，而 PFC 屬於延性模態。

4.3 反對稱壓電纖維複材的頻率響應

本節的頻率響應量測實驗主要探討 APFC 在不同邊界條件下的工作頻率，分別為自由狀態及黏貼於鋁板兩種邊界條件。採用散射參數量測 APFC 的插入損失頻率響應，得知 APFC 作為板波元件的主要工作頻率。

4.3.1 散射參數量測

本研究採用 HP 8751A 網路分析儀搭配 HP 87511A 散射參數模組量測 APFC 的散射參數。散射參數(scattering parameter)又稱為插入損失(insertion loss)，主要是以穿透波(transmitted waves)及反射波(reflected waves)功率與入射波(incident waves)功率的比值表示。將入射訊號傳送至待測元件(device under test, DUT)輸入端的電極埠，量測輸出端接收的穿透波或輸入端電極埠的反射波振幅及相位，描述待測元件的頻率特性。散射參數的標記為 S_{ij} ，第一個標記表示訊號輸出端的埠號，第二個標記代表訊號輸入端的埠號的，如圖 4.29 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。

先選擇適當的測量方式，將待測元件連接至散射參數量測系統 (S-parameter test set)的雙埠之間。量測 S 參數時，訊號由 DUT 的埠一輸入，在埠一及埠二接收訊號，所量到的反射及傳輸功率比分別為 S_{11} 及 S_{21} ，如圖 4.30 所示。若切換散射參數測試組，使訊號由 DUT 的埠二輸入，得到的反射及傳輸功率比為 S_{22} 和 S_{12} ，各散射參數之間的關係可以矩陣表示

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

S_{11} 、 S_{21} 、 S_{22} 及 S_{12} 四個散射參數的特性如表 4.3 所列。

4.3.2 自由狀態之 APFC

將埠一的 a_1 、 b_1 連接至具有 21 對電極的 APFC，埠二的 a_2 、 b_2 接至有 11 對電極的 APFC，兩個 APFC 之間的材質是未極化的 PZT-5A 壓電纖維、環氧樹脂及電極薄膜所組成，長度為 20mm，如圖 4.27 所示。兩 APFC 之間的 S_{21} 散射參數，先輸入埠一的 21 對電極之 APFC 一交流訊號，聲波經中間介質傳遞，再由埠二的 11 對電極之 APFC 接收訊號，經運算後所得到的比值即為 S_{21} 散射參數，由 S_{21} 參數的頻譜得知 APFC 的工作頻率。圖 4.31 所示是由指叉電極換能器所激發之聲導波插入損失頻率響應，圖中曲線的圓形極點是具有波傳特性之頻率響應的特徵，一般的共振頻率響應的特徵為尖形極頭。由圖 4.32 及圖 4.33 發現 APFC 的頻率響應具有圓形極點的特徵，電極間距為 1mm 的 APFC 的工作頻率約為 730kHz 及 2.2MHz，電極間距 0.8mm 的 APFC 工作頻率則約為 950kHz 及 2.7MHz。

4.3.3 黏貼於鋁板之 APFC

將電極間距相同，電極對數不同的兩 APFC 黏貼於厚度為 1mm 的鋁板上，兩 APFC 間的距離為 150mm，如圖 4.34 所示，接線配置與前一小節所述相同。圖 4.35 至圖 4.38 所示為電極間距 1mm 的 APFC 黏貼在鋁板上作用的頻率響應，相較於自由狀態的頻率響應(圖 4.32)，發現在一樣的頻率範圍下，APFC 在鋁板上的頻譜曲線相當平滑，代表 APFC 有波傳特性的圓形極值特徵消失。若資料點數固定，縮小頻率範圍，可提高訊號解析度，避免訊號失真，故進一步縮小探討頻率範圍，在 350kHz、800kHz 及 1.95MHz 附近的頻譜曲線，發現有些許的圓形極值，所以電極間距為 1mm 的 APFC 在鋁板上的工作頻率為 350kHz、800kHz 及 1.95MHz。圖 4.39 至圖 4.42 所示為電極間距等於 0.8mm 的 APFC 黏貼在鋁板上的頻率響應，其工作頻率為 450kHz、1.04MHz 及 2.55MHz。

4.3.4 小結

由 S_{21} 散射參數量測得知 APFC 具有作為導波換能器的能力。APFC 在自由狀態時，由於 APFC 上下表面為無曳力狀態，所以壓電纖維能產生較大的變形量，也就是較大的振幅量，因此能在頻率響應上看到振幅較大的極值。當 APFC 黏於鋁板後，下表面受制於鋁板，壓電纖維能產生的形變量變小許多，再加上傳遞距離變長，所以在頻率響應圖上看到的極值僅有些微起伏的變化。表 4.4 所列為 APFC 於不同邊界條件下的工作頻率，因為邊界條件改變，APFC 的工作頻率也隨之改變，主要是 APFC 的上下表面變形不同所造成的。

4.4 鋁板的板波量測

由頻率響應量測可得到 APFC 的工作頻率，但無法得知 APFC 在鋁板上所產生的板波為何種形式及其特性。因此將 APFC 在鋁板上配置為一組發射、一組接收的型態，擷取暫態的時域訊號，瞭解 APFC 在鋁板上激發何種型態的板波。

4.4.1 實驗架構

以函數產生器產生一振幅為 $1V_{PP}$ 的正弦波單脈衝，透過功率放大器將訊號增益 50dB 驅動 APFC，將接收埠連接至示波器，擷取接收之暫態時域訊號，實驗架構如圖 4.43 所示。實驗試片的邊界條件主要分為兩種，一種為自由狀態，另一種是將 APFC 黏貼於鋁板，鋁板厚度為 1mm。在鋁板邊緣黏上一層高阻尼的矽膠材料，以減少反射波的影響，使 APFC 收到的暫態訊號較易辨別。比較圖 4.44 的圖(a)與(b)，得知高阻尼材料確實有達到吸收反射波的功效。

4.4.2 激發與感測的板波特性的

首先進行自由狀態之 APFC 的暫態訊號量測實驗，由頻率響應實驗得到電極間距為 1mm 之 APFC 的工作頻率為 730kHz，以此頻率激發具有 21 對電極的 APFC，另以一具有 11 對電極的 APFC 接收訊號，APFC 元件的實物照片如圖 4.45 所示。圖 4.46(a)所示為具有 11 對電極的 APFC 擷取的暫態訊號，傳遞距離為 20mm，大約在觸發後 $6.898\mu s$ 開始接收到訊號，所以相速度約為 $2.899\text{mm}/\mu s$ ，將暫態訊號經快速傅利葉轉換(fast fourier transform, FFT)處理，結果如圖 4.46(b)所示，主要頻率約為 725kHz，

利用(4.1)式可知波長約為 4mm，與設計相符。

接著量測黏貼於鋁板之 APFC 的暫態訊號，試片配置如圖 4.47 所示，位於鋁板左端具有 21 對電極的 APFC 激發一導波訊號，再由鋁板右端具有 11 對電極的 APFC 接收訊號，兩組 APFC 間的距離為 150mm。由先前的頻率響應實驗得知，電極間距 1mm 的 APFC 黏貼在鋁板的工作頻率為 350kHz、800kHz 及 1.95MHz。以單一週期、頻率 350kHz 的正弦波脈衝激振發射端之 APFC，激振訊號如圖 4.48(a)所示。將激振訊號進行 FFT 可得到訊號的頻譜，如圖 4.48(b)所示，由訊號頻譜得知其激發 APFC 的頻率範圍。圖 4.49(a)所示為接收端之 APFC 所量測到的暫態訊號，圖 4.49(b)所示則為訊號的局部放大圖，FFT 轉換後的頻譜，如圖 4.49(c)所示。圖 4.50 及圖 5.52 所示分別為激振頻率為 800kHz 與 2MHz 的暫態訊號及頻譜，圖 4.51 及圖 4.53 所示分別為板波訊號及頻譜。圖 4.49、圖 4.51 及圖 4.53 所示之實驗結果顯示，電極間距 1mm 之 APFC 在鋁板上可激發頻率為 350kHz、800kHz 及 1.94MHz 的導波，APFC 率先接收到的板波頻率為 800kHz，緊接著是 1.94MHz，最後抵達的是 350kHz。在兩 APFC 的傳遞路徑中間滴上一直徑約為 10mm 的圓形水灘，若激振訊號頻率為 2MHz 的正弦單脈衝，其暫態訊號及頻譜如圖 4.52 所示，圖 4.54 所示為量測結果。與未滴上水的結果(圖 4.53)作比較，可觀察到頻率為 1.94MHz 的導波振幅受到水的影響衰減，而 800kHz 的導波無明顯的變動，推測是因為前者為 A_1 板波，在低頻範圍的態量衰減值較後者 A_0 板波大，詳細探討可參考許世明[18]。

以相同的試片配置進行電極間距 0.8mm 之 APFC 接收鋁板板波的暫態訊號量測。圖 4.55、圖 4.57 及圖 4.59 所示分別是頻率為 450kHz、1 MHz 及 2.5MHz 之正弦單脈衝激發板波的暫態訊號及頻譜，圖 4.56、圖

4.58 及圖 4.60 所示分別為其量測之板波訊號及頻譜。參考圖 4.56 所示，電極間距 0.8mm 之 APFC 在鋁板上可產生頻率為 450kHz、1.04MHz 及 2.48MHz 的導波，率先接收到的導波頻率為 1.04MHz，緊接著是 2.48MHz，最後則是 450kHz。

在 PFC 的阻抗響應量測實驗中，黏貼於鋁板上的 PFC 在頻率約 3.7MHz 處依然可以產生明顯的共振，推測 PFC 可在鋁板上產生導波，故以實驗驗證之。PFC 黏貼於鋁板上的配置如圖 4.61 所示，兩個 PFC 的長度皆為 40mm，相距 150mm，以單一週期、頻率 4MHz 的正弦脈衝激振 PFC，圖 4.62 所示為激發的脈衝訊號及頻譜，圖 4.63 所示為量測結果，PFC 可在鋁板上激發單一頻率為 3.68MHz 的聲波。因 PFC 的作用長度為 40mm，無法產生如此高頻的訊號，推測此聲波是由 PFC 的厚度模態所產生。由接收到訊號的時間估算，可能是 PFC 在鋁板上產生的微體波，經多次反射傳抵接收之 PFC。

4.4.3 小結

量測自由狀態之 APFC 的暫態波傳訊號，得知所激發的導波波長為 APFC 電極間距的 4 倍。由一發一收的暫態訊號量測結果，確認 APFC 可在鋁板上激發與自身工作頻率相近的導波。電極間距 1mm 之 APFC 在 1mm 厚之鋁板上可產生頻率為 350kHz、800kHz 及 1.94MHz 的板波，電極間距 0.8mm 之 APFC 在上述鋁板上則可產生頻率為 450kHz、1.04MHz 及 2.48MHz 的板波。相同的基本板波模態波長變短，頻率變高，由接收到的訊號抵達時間相近，推測 800kHz 與 1.04MHz 的聲波屬於同一模態的板波，350kHz 與 450kHz 的聲波也屬於同一模態之板波，另外，1.94MHz 與 2.48MHz 的聲波應為同一模態的板波。當 APFC 黏貼於鋁

板表面致動時，受到鋁板主結構的影響，生成的板波波長改變。

4.5 反對稱壓電纖維複材的聲場與衰減

本節以具有 21 對電極的 APFC 導波換能器作為訊號發射器，探討其聲場分佈及衰減的特性。先以都卜勒振動量測儀測得 APFC 在鋁板上生成的頻板波率響應，再以主頻率激振 APFC，量測 APFC 激發鋁板板波的聲場及衰減曲線。

4.5.1 雷射都卜勒振動量測

當觀察者與波源間有相對運動時，觀察者所接收到的頻率會隨兩者間的相對速度變化而改變。雷射都卜勒振動儀(LDV)依據此原理，利用雷射光照射待測物產生的頻率改變量，判斷物體表面移動的位移與速度，屬於非接觸式光學的單點量測系統。當雷射光照射於運動中的待測物表面，物體表面反射的光波頻率會與原先入射的光波頻率產生差異，其頻率差值正比於物體運動的相對速度，近年來廣泛運用於結振動位移與速度的量測。

本研究採用雷射都卜勒振動儀 OFV-5000 (Polytec)、雷射光感測器 OFV-505 (Polytec)、功率放大器 SCCX75 (IFI)及網路分析儀 HP 8751A，量測 APFC 激發之鋁板板波的頻譜響應，實驗架構如圖 4.64 所示。以網路分析儀輸出振幅 1V 的正弦波訊號，掃頻範圍視所探討的頻率而定，以功率放大器將訊號增益，輸出至黏貼於鋁板上的 APFC，再以雷射都卜勒振動儀量測鋁板的面外振動響應，所量測的訊號輸入至網路分析儀，即可獲得 APFC 激發的鋁板板波頻率響應。將雷射光聚焦於 APFC 前方

距離 5 個波長的鋁板上，如圖 4.65 所示，上述波長是以自由狀態之 APFC 板波波長為準。圖 4.66 及圖 4.67 所示分別是電極間距 1mm 及 0.8mm 的 APFC 激發之鋁板板波的頻率響應。由結果可得知電極間距 1mm 的 APFC 在鋁板上產生的板波頻率約為 350kHz 及 790kHz；電極間距 0.8mm 的 APFC 產生的板波頻率則約為 450 kHz 及 1MHz，與前一小節暫態實驗所得到的結果相近。

4.5.2 聲場量測

聲場量測實驗架構與前一小節相同，量測點以 APFC 邊緣中心為基準，等距離畫一半圓，由 0 度開始，每 10 度畫一量測點，直至 180 度，共有 19 個量測點。探討三組 APFC 的聲場分佈時，以自由狀態之 APFC 的波長(L)為單位，量測點分別位於半徑為 5L、8L 及 10L 的半圓，如圖 4.68(a)所示。

Grondel *et al*[19]曾以有限元素法模擬壓電材料黏貼於複材板所激發的聲波，說明 A_0 模態的振幅大於 S_0 模態，並指出當複材受撞擊而產生破壞時， A_0 板波振幅會明顯改變。本研究由暫態訊號的波傳時間，計算出波速，對照鋁板的頻散曲線(圖 2.5)，推測 350kHz 與 450kHz 可能為鋁板的 A_0 模態。遂以 350kHz、450kHz 分別激振電極間距 1mm 及 0.8mm 之 APFC，在鋁板上產生 A_0 板波。表 4.5 所列為聲場強度量測的原始訊號極值，最大值皆在 APFC 的中軸線，即 90 度位置，最小值則無規則可循，隨著距離增加，聲場強度的最大值逐漸減小。比較相等半徑的聲場分佈，電極間距 1mm 較 0.8mm 之 APFC 有較大的聲場強度。將聲場強度分佈予以正規化處理，圖 4.69 至圖 4.71 所示依序是電極間距 1mm 的 APFC 在 5L、8L 及 10L 處的聲場極圖；圖 4.72 至圖 4.74 所示則依序為

電極間距 0.8mm 的 APFC 在 5L、8L 及 10L 處的聲場極圖，不論 APFC 的電極間距及波傳距離，聲場強度在 90 度方向有最大值，偏離 APFC 中軸線的聲場強度呈下降趨勢，並出現側瓣，這是所激發聲場彼此干涉所致。APFC 激發的聲場具有很好的指向性(directivity)，隨著聲場距離的增加，可觀察到主瓣明顯變窄，APFC 的指向性更加顯著，但無法定量計算聲場主瓣及側瓣與波傳距離之間的變化規則。此外，因為 APFC 上下面指叉電極的錯位及量測位置手動定位，都會造成聲場分佈左右不對稱。

4.5.3 衰減量測

衰減量測實驗的波程是以 APFC 邊緣中心為基準點，平行壓電纖維方向，以自由狀態之 APFC 波長的 2 倍為單位增量向外標繪量測點，共畫 15 個量測點，如圖 4.68(b)所示。激振頻率與聲場量測的設定一樣，圖 4.75 與圖 4.76 所示分別是電極間距 1mm 與 0.8mm 之 APFC 的衰減量測結果，不同電極間距之 APFC 所發射的訊號在傳遞 28 個波長後皆衰減約 5dB，訊號振幅與波程距離成線性遞減關係，兩擬合線具有相近的斜率，代表不同的電極間距之 APFC 有相似的衰減性。

第五章 結論與未來展望

壓電纖維複材的製作方式是將壓電纖維以環氧樹脂黏置於上下兩片軟性指叉電極中間，予以高電壓極化。習用之壓電纖維複材的指叉電極呈上下對稱排列，施予交流電場，會產生延性(或稱軸向)振動。本研究採用上下反對稱排列的軟性指叉電極，施予斜向交錯電場驅動壓電纖維複材，成功研發一種能以波長操控工作頻率的 APFC 導波換能器，具有質輕、適合黏貼於曲面的優點。

本文以有限元素法模擬 APFC 在交流電場作用下的時諧分析，探討不同幾何尺寸的指叉電極對自由狀態之 APFC 頻率響應的影響。本研究實際自製 APFC 驗證其可行性，確認 APFC 可以電極間距為變數產生不同頻率的導波。除了量測 APFC 在鋁板生成的導波暫態時域訊號，並以都卜勒振動儀量測 APFC 在鋁板的頻率響應，瞭解 APFC 激發的板波聲場指向性。本章總結數值分析與實驗量測結果，供日後相關研究參考。

5.1 結論

由時諧分析計算可獲得 APFC 於自由狀態下的頻率響應，當電極間距固定，改變兩組 APFC 的距離，不會影響 APFC 的頻率響應，頻率響應會隨著電極對數增加呈現規則的變化。時諧分析計算可得知 APFC 的工作頻率為電極間距的函數，隨著電極間距縮短，頻率響應極值所對應的頻率也會提昇。表 5.1 比較自由狀態之 APFC 的頻率響應的數值解及實驗值，兩者的誤差大約為 7%，推測原因源於數值模型的均質化、材料係數及材料阻尼，導致數值結果與量測值的差異。靜態電場施於 APFC 的變形分析結果顯示 APFC 發生撓曲變形。

以網路分析儀量測 APFC 的阻抗響應，結果顯示自由狀態之 APFC 的共振頻率低於黏貼在鋁板的狀態，兩者相差約 5%。比較 APFC 與 PFC 在自由狀態下的阻抗響應，可推斷兩者所產生的振動模態不同。APFC 發生的撓曲變形模態不因黏貼於主結構(鋁板)而消失，而 PFC 在自由狀態發生的延性共振模態會因黏貼於主結構(鋁板)而消失。PFC 與 APFC 的變形形態不同，故兩者所激發的導波特性和不同。APFC 的阻抗響應受電極對數的多寡所影響，對數越多，阻抗越明顯，顯示較多的電極數目可增強共振響應。

阻抗響應及散射參數的量測結果顯示 APFC 作為導波換能器的能力獲得驗證，在自由狀態及黏貼於鋁板的 APFC 之工作頻率與電極間距相關，在不同邊界條件下，APFC 的工作頻率會發生改變。

自由狀態之 APFC 的波傳暫態訊號量測顯示 APFC 的波長為電極間距的 4 倍，APFC 可在鋁板上激發與自身工作頻率相近的導波。電極間距 1mm 的 APFC 可在 1mm 厚的鋁上激發頻率為 350kHz、800kHz 及 1.94MHz 的導波，電極間距 0.8mm 的 APFC 則可激發頻率為 450kHz、1.04MHz 及 2.48MHz 的導波。電極間距 1mm 之 APFC 在鋁板上激發 1.94MHz 的導波可偵測鋁板上是否有水分佈。

APFC 導波換能器激發的聲場具有高度的指向性，訊號強度與距離成反比，不同電極間距的 APFC 所激發的板波在傳遞 28 個波長後皆衰減約 5dB，電極間距不同之 APFC 有相似的衰減性。

本研究成功研發的 APFC 為一窄頻且具有多個工作頻率之導波換能器，APFC 以電極間距決定波長，相較於 PFC 的波長只與操作頻率相關，APFC 可製作出波長較短的導波換能器，用於偵測尺寸較小的缺陷。

5.2 未來展望

本研究製作兩種電極間距及電極對數之 APFC，因為尚未以儀器量測 APFC 的材料性質，目前無法準確由電極間距估計激發頻率，也未探討 APFC 作為導波換能器的最佳電極對數。未來可先量測自製 APFC 的相關材料係數，使數值分析誤差減小，並進一步探討不同幾何尺寸的反對稱指叉電極對於壓電纖維複材造成的影響。

本研究未以數值分析建立 APFC 黏貼於鋁板後的頻散曲線，故無法精確指出 APFC 在鋁板上所激發的導波屬於何種型態的板波。在未來可應用雷射超音波法，量測相速度及群速度，建立 APFC 的頻散曲線。

本研究將 APFC 黏置在鋁板上，形成一發射、一接收的配置，由暫態時域訊號得知 APFC 在鋁板上可發射與接收聲導波，未來若能探討 APFC 對缺陷的辨識力，可提升 APFC 在結構健康監測的應用潛能，亦可探討 APFC 作為陣列導波換能器的可行性。

本研究僅探討 APFC 導波換能器發射板波訊號的性能，未來可探討 APFC 作為訊號感測器的頻寬及靈敏度等性能，使 APFC 成為可發可收之導波換能器。

參考文獻

- [1] A. A. Bent and N. W. Hagood, "Piezoelectric fiber composites with interdigitated electrodes," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **8**, 903-919, 1997.
- [2] N. W. Hagood, R. Kindel, K. Ghandi, and P. Gaudenzi, "Improving transverse actuation of piezoceramics using interdigitated surface electrodes," *Proc. SPIE*, **1917**, 341-352, 1993.
- [3] B. Z. Janos, and N. W. Hagood, "Overview of active fiber composites technologies," *Proceedings of the 6th International Conference on New Actuators* , 193-197, 1998.
- [4] G. A. Jr. Rossetti, A. Pizzochero, and A. A. Bent, "Recent advances in active fiber composites technology," *Proceedings of the 2000 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics*, **2**, 753-756, 2000.
- [5] S. Datta, G. R. Kirikera, M. J. Schulz, and M. J. Sundaresan, "Active fiber composite continuous sensors," *Proc. SPIE*, **5062**, 669, 2003.
- [6] C. Huber, D. M. Spori, M. M. Melnykowycz, and M. Barbezat, "Active fiber composites: optimization of the manufacturing process and their poling behavior," *Proc. SPIE*, **5761**, 542, 2005.
- [7] L. J. Nelson, C. R. Bowen, R. Stevens, M. Cain, and M. Stewart, "Modeling and measurement of piezoelectric fibers and interdigitated electrodes for the optimization of piezoelectric fibre composites," *Proc. SPIE*, **5053**, 556-567, 2003.
- [8] C. R. Bowen, L. J. Nelson, R. Stevens, and M. G. Cain, "Optimisation of interdigitated electrodes for piezoelectric actuators and active fibre composites," *Journal of Electroceram*, **16**, 263-269, 2006.
- [9] M. Barbezat, A. J. Brunner, P. Flüeler, C. Huber, and X. Kornmann, "Acoustic emission sensor properties of active fibre composite

- elements compared with commercial acoustic emission sensors,” *Sensors and Actuators A: Physical*, **114**(1), 13-20, 2004.
- [10] J. Brunner, M. Barbezat, C. Huber, and P. H. Flüeler, “The potential of active fiber composites made from piezoelectric fibers for actuating and sensing applications in structural health monitoring,” *Materials and Structures*, **38**(5), 561-567, 2005.
- [11] D. W. Wang, *Detection and verification for delamination of active fiber composites*, Ph. D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering National Chiao Tung University, 2010.
- [12] M. J. Schulz, M. J. Sundaresan, A. Ghoshal, and P. F. Pai, “Active fiber composites for structural health monitoring,” *Proc. SPIE*, **3992**, 13, 2000.
- [13] ANSYS, *Release 12.0 Documentation for ANSYS: Structural Analysis Guide, Theory Reference, Damping Matrices*, SAS IP, Inc., USA, 2009.
- [14] 李金福(2002)，平板缺陷的板波散射與主動偵測研究，國立交通大學機械工程學系碩士論文，台灣，新竹市。
- [15] W. K. Wilkie, R. G. Bryant, J. W. High, R. L. Fox, R. F. Heilbaum, A. Jalink, Jr., B. D. Little, and P. H. Mirick, “Low-cost piezocomposite actuator for structural control applications,” *Proc. SPIE, 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, **3991**, 323, 2000.
- [16] J. W. High and W. K. Wilkie, “Method of fabricating NASA-standard macro-fiber composite piezoelectric actuators,” *NASA ARL-TR-2833*, USA, 2003.
- [17] D. Royer and E. Dieulesaint, *Elastic Waves in Solids II*, Springer, New York, pp. 72-84, 2000.
- [18] 許世明(2010)，具額外阻尼之彈性板的導波波傳，國立交通大學機

械工程學系博士論文，台灣，新竹市。

- [19] S. Grondel, C. Delebarre, and J. Assaad, “Modelling of Lamb wave generation for application in health monitoring of composite plates,” *IEEE Ultrasonics Symposium*, 721-724, 2001.



附表

表 3.1 數值分析採用之壓電陶瓷 PZT-5A 的材料參數[11]

	s_{11}^E	16.4		d_{31}	-171
			壓電常數		
	s_{12}^E	-5.74	($10^{-12} \cdot \text{C/N}$)	d_{33}	374
撓性常數 ($10^{-12} \cdot \text{m}^2/\text{N}$)	s_{13}^E	-7.22		d_{15}	584
	s_{33}^E	18.8		$\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$	1730
	s_{44}^E	47.5	介電常數比	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	1700
	s_{66}^E	44.3		ϵ_0 (F/m)	8.854×10^{-12}
密度(kg/m^3)					7750

表 3.2 參考模型的各项幾何尺寸

A(mm)	100
B(mm)	40
C(mm)	20
L(mm)	30
APFC2 長度(mm)	30
APFC1 及 APFC2 寬度(mm)	30
厚度(mm)	0.25

表 3.3 各電極間距所對應極化方向

電極間距 (mm) (pitch)	極化方向 (度) (與厚度方向之夾角)
1	75.9
0.75	71.6
0.6	67.4
0.5	63.4

表 3.4 各電極間距所對應最大振幅頻率

電極間距(pitch)(mm)	最大振幅頻率(kHz)
1	718
0.75	982
0.6	1300
0.5	1600

表 4.1 指叉電極設計尺寸

NO.	電極間距(pitch)	波長	電極寬	極化方向 (度)
	P (mm)	λ (mm)	d (mm)	(與厚度方向之夾角)
1	1	4	0.2	75.964
2	0.8	3.2	0.2	72.646

表 4.2 熱壓參數表

	溫度(°C)	壓力(kgf/cm ²)	時間(min)
熱壓前抽真空	室溫	-	至少 15
黏合壓電纖維 及下電極	46.11	4.921	3~5
黏合上下電極	121.11	4.921	至少 120

表 4.3 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

表 4.4 APFC 於不同邊界條件的工作頻率

電極間距 P (mm)	邊界 條件	第一個工作頻率	第二個工作頻率	第三個工作頻率
1	自由 狀態	-	730 kHz	2.2 MHz
	黏貼於 鋁板	350kHz	800 kHz	1.95 MHz
0.8	自由 狀態	-	950 kHz	2.7 MHz
	黏貼於 鋁板	450kHz	1.04 MHz	2.55 MHz

表 4.5 聲場原始訊號極值與電極間距對照表

聲場距離 (λ)	5		8		10	
電極間距 (mm)	最大值 (dB)	最小值 (dB)	最大值 (dB)	最小值 (dB)	最大值 (dB)	最小值 (dB)
1	4.38	-29.216	3.74	-28.08	2.88	-30.68
0.8	-2.83	-36.231	-3.44	-40.1	-4.45	-38.12

表 5.1 自由狀態之 APFC 頻率響應的數值分析值與實驗值

pitch (mm)	波長 λ (mm)	工作頻率(kHz) 分析值	工作頻率(kHz) 實驗值	誤差(%)
1	4	780	730	6.85
0.8	3.2	1020	950	7.37

附圖

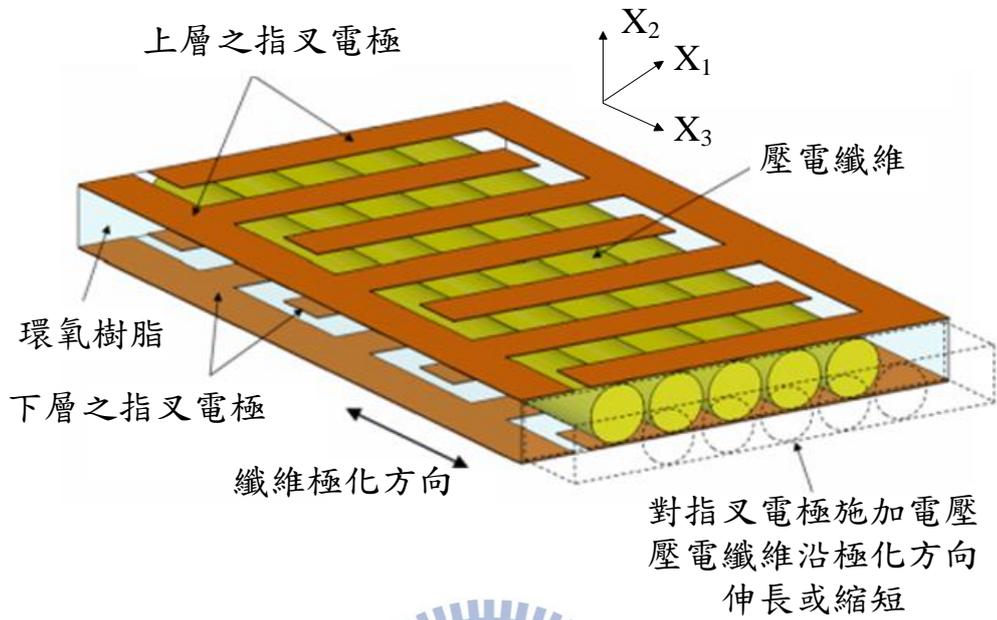


圖 1.1 對稱壓電纖維複合材料示意圖

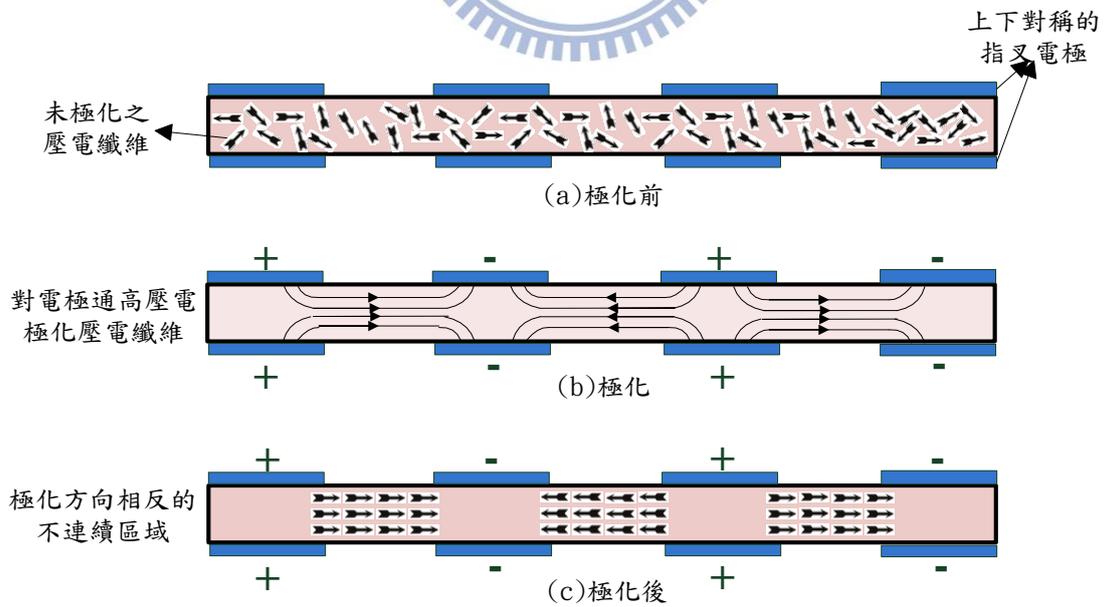


圖 1.2 對稱壓電纖維複材的纖維極化過程示意圖

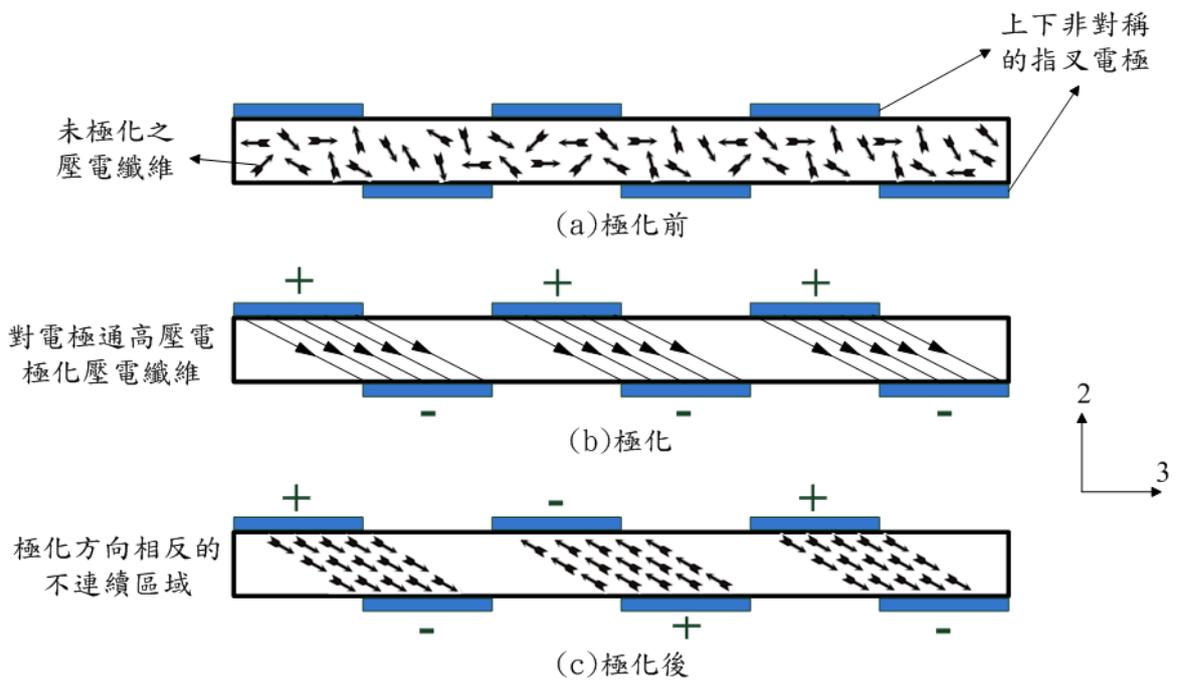


圖 1.3 反對稱壓電纖維複材極化過程示意圖

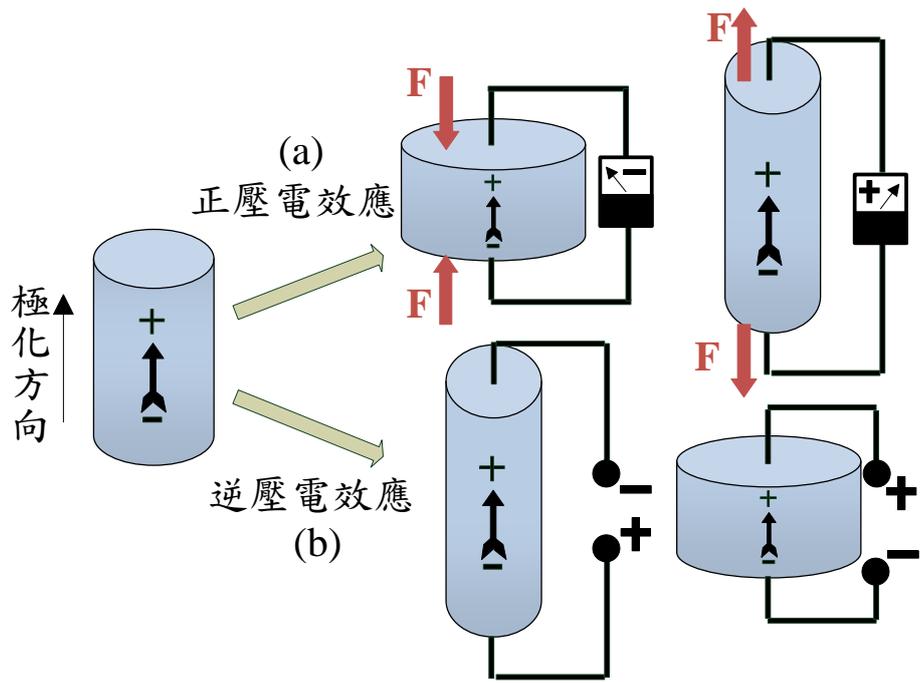


圖 2.1 壓電效應示意圖

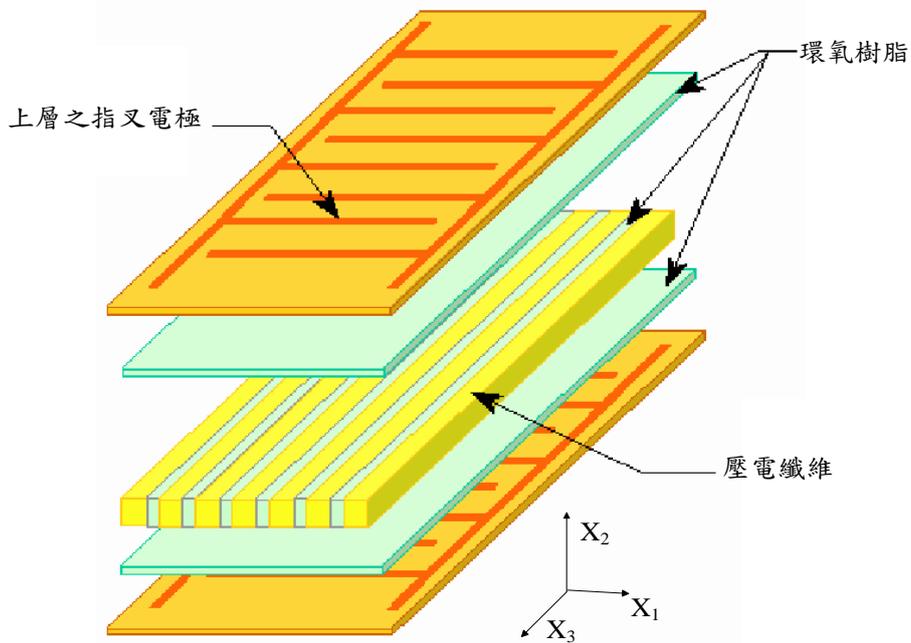


圖 2.2 MFC 構造示意圖

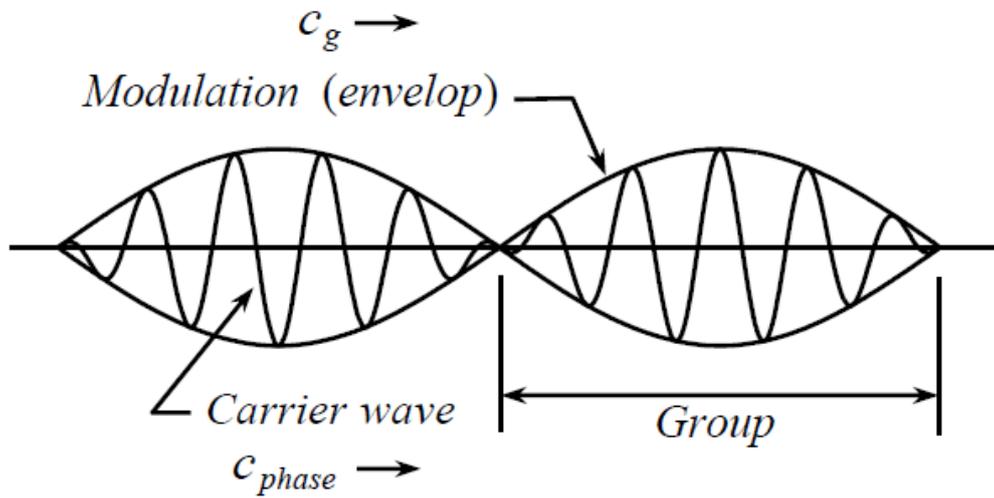
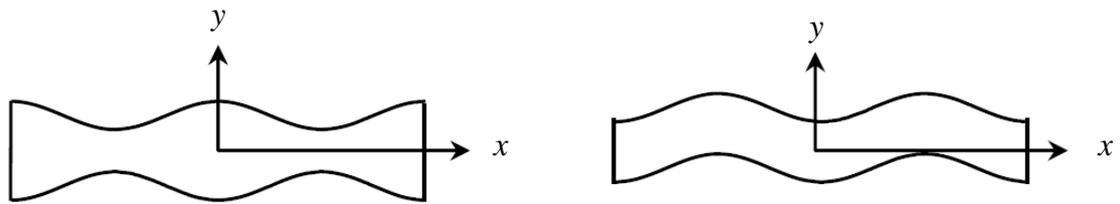


圖 2.3 波群波傳示意圖



(a)對稱板波

(b)反對稱板波

圖 2.4 (a)對稱及(b)反對稱板波變位的示意圖

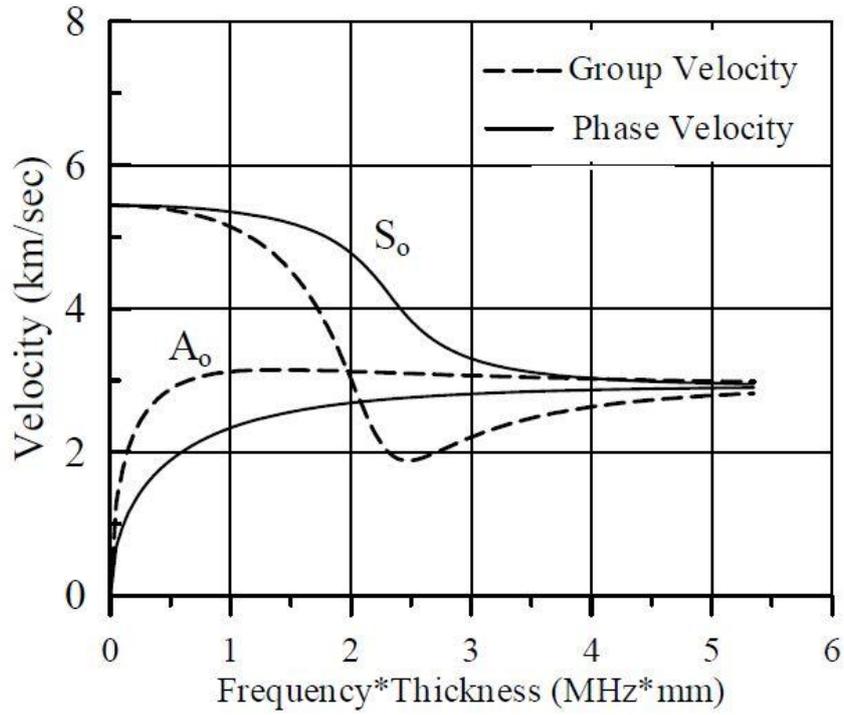


圖 2.5 鋁板的 A_0 與 S_0 板波之頻散曲線[14]

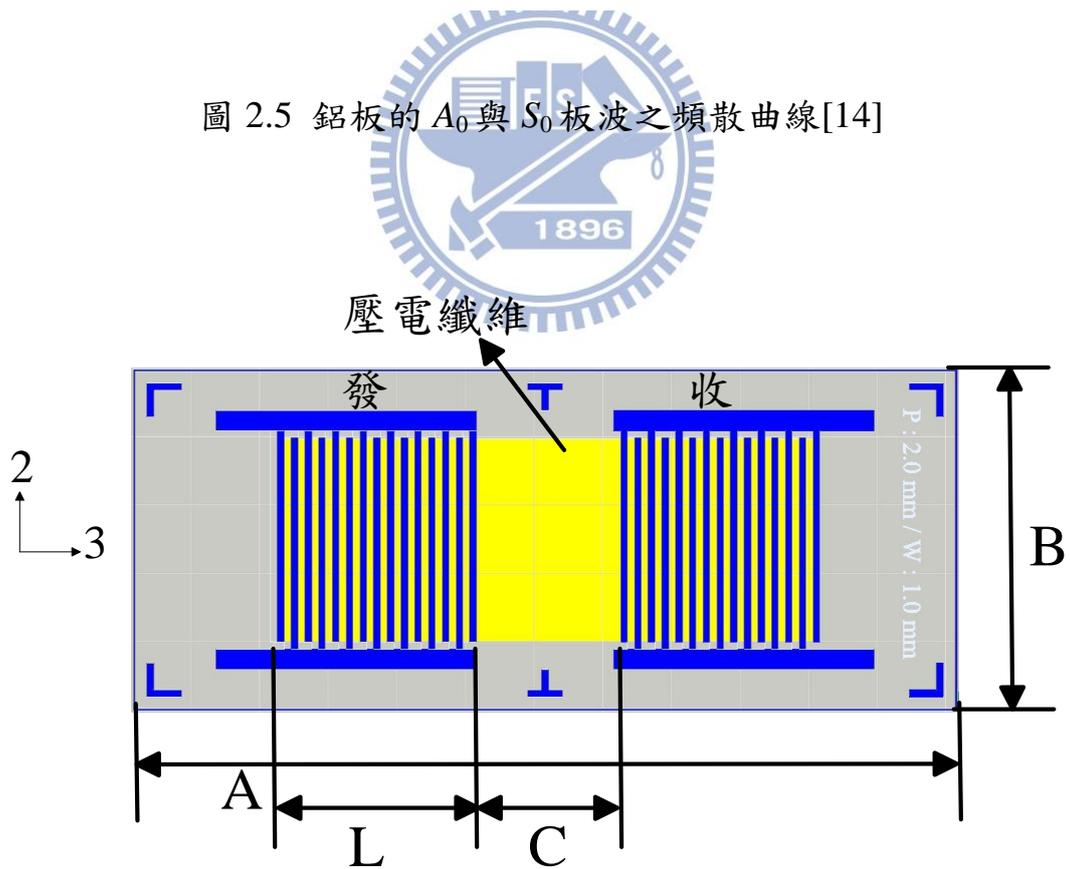


圖 3.1 反對稱壓電纖維複材模型示意圖

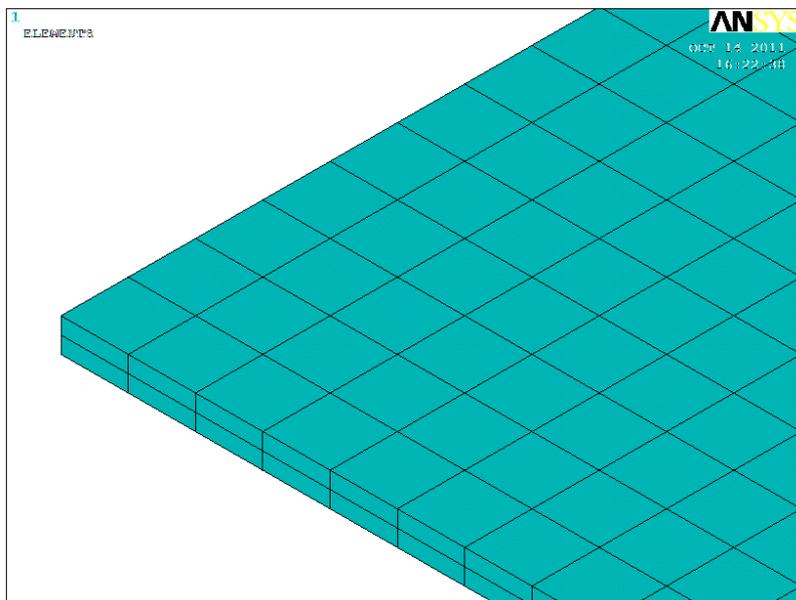


圖 3.2 反對稱壓電纖維複材網格圖

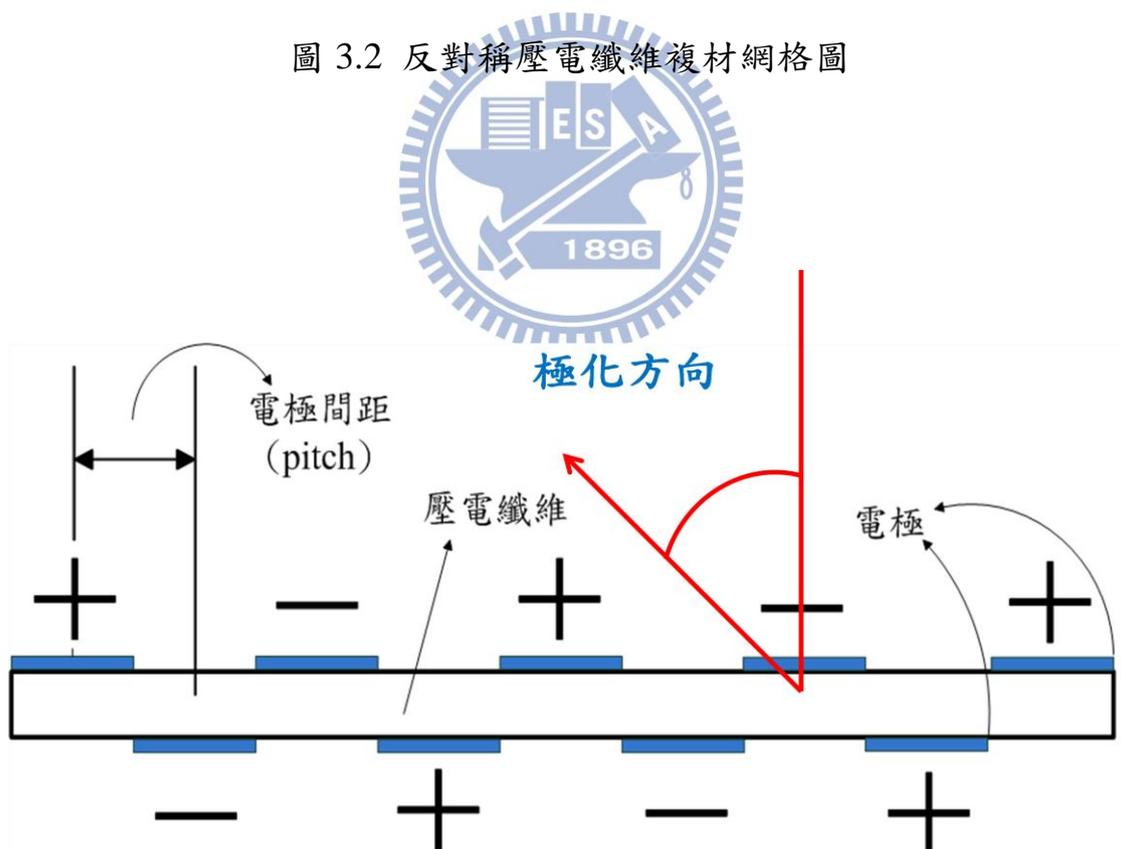
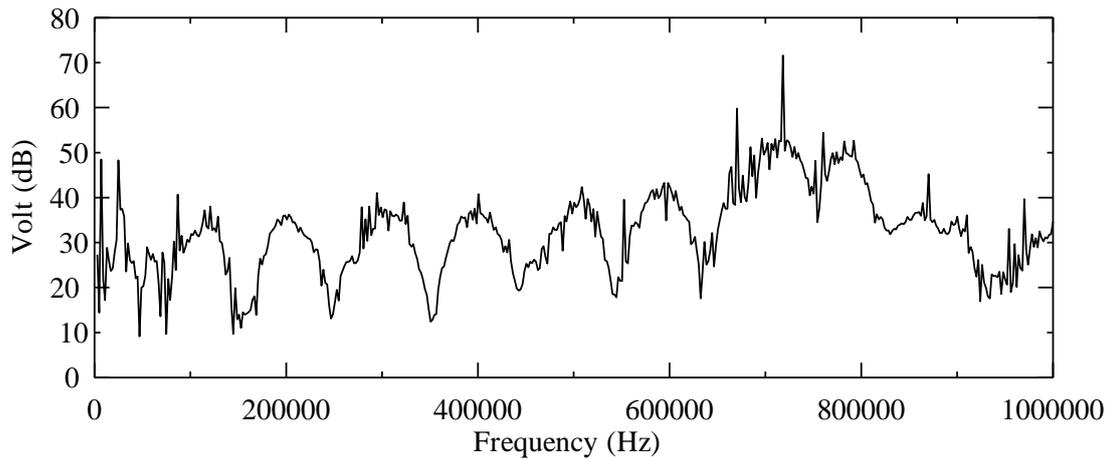
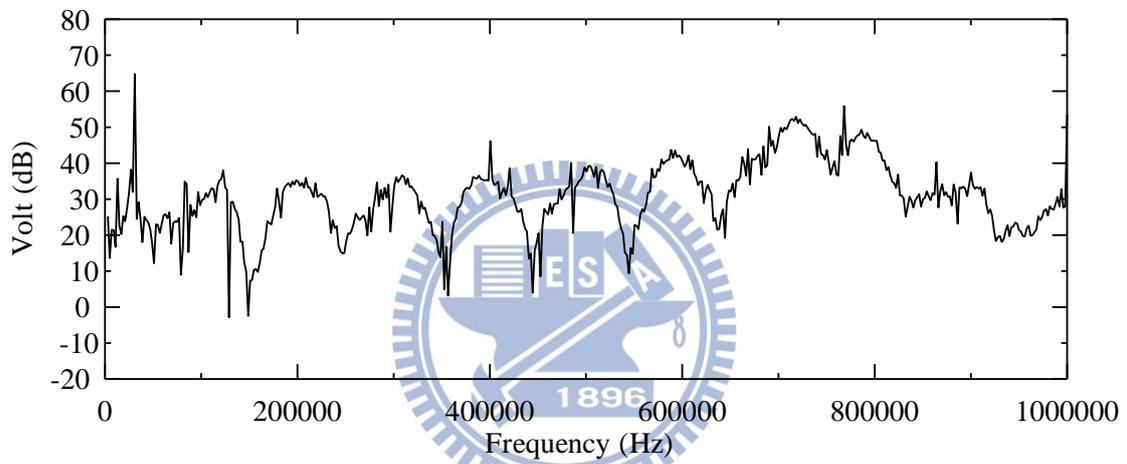


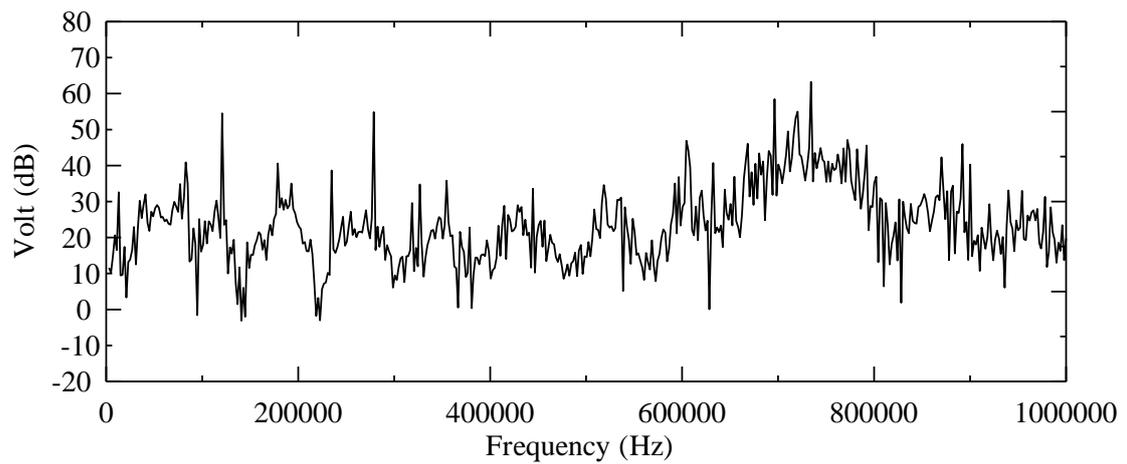
圖 3.3 反對稱壓電纖維複材電極示意圖



(a)

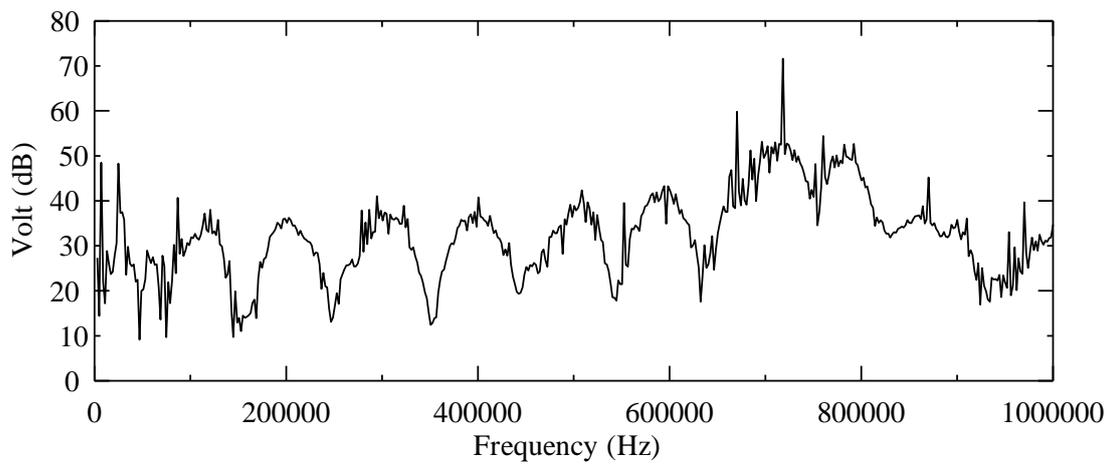


(b)

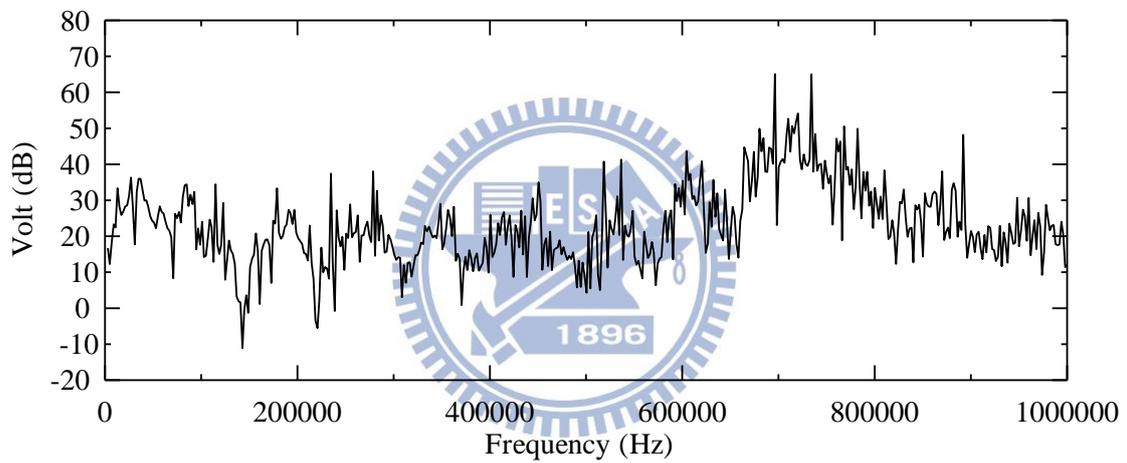


(c)

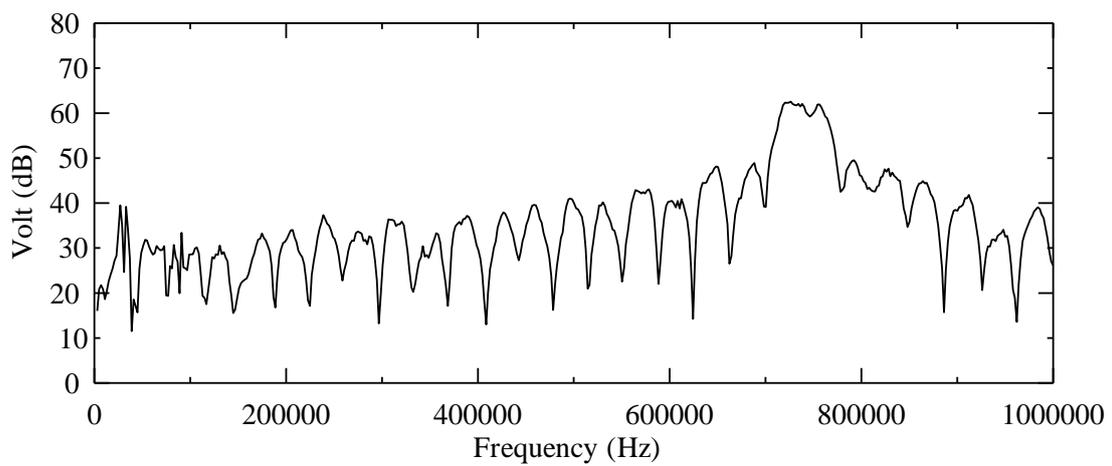
圖 3.4 以兩 APFC 間的距離 C 為變數之頻率響應， $C =$ (a) 20mm、(b) 25mm、(c) 35mm



(a)



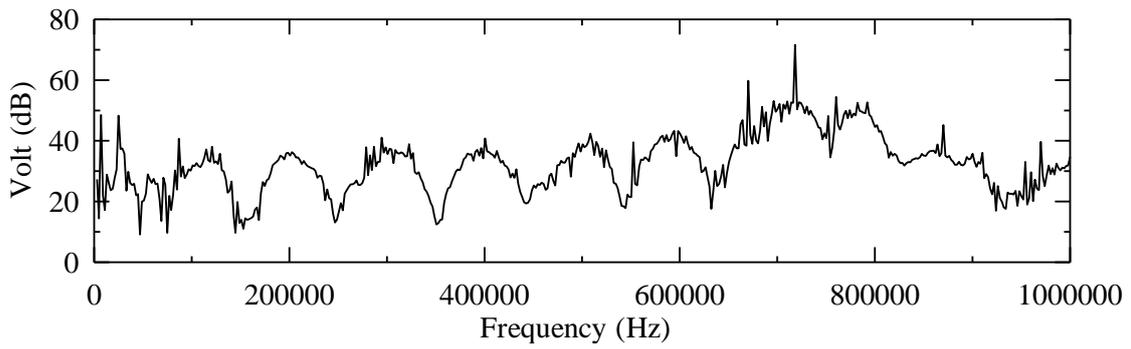
(b)



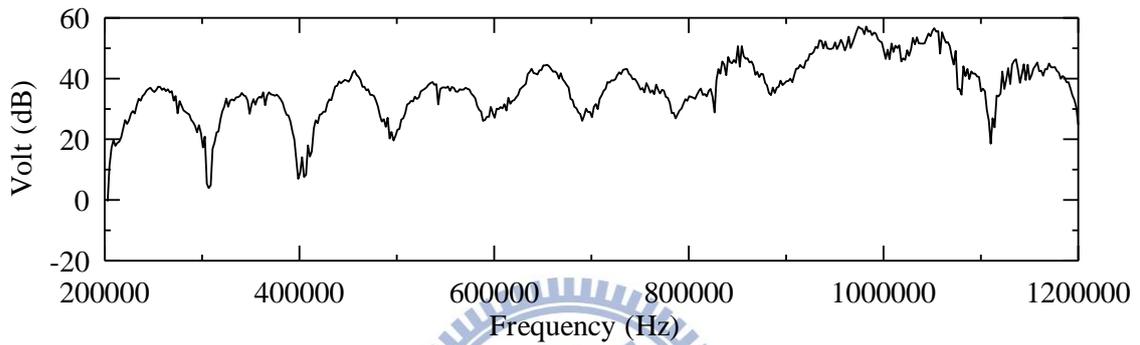
(c)

圖 3.5 增加 APFC1 長度 L (即增加電極對數)的頻率響應, $L =$ (a) 30mm、

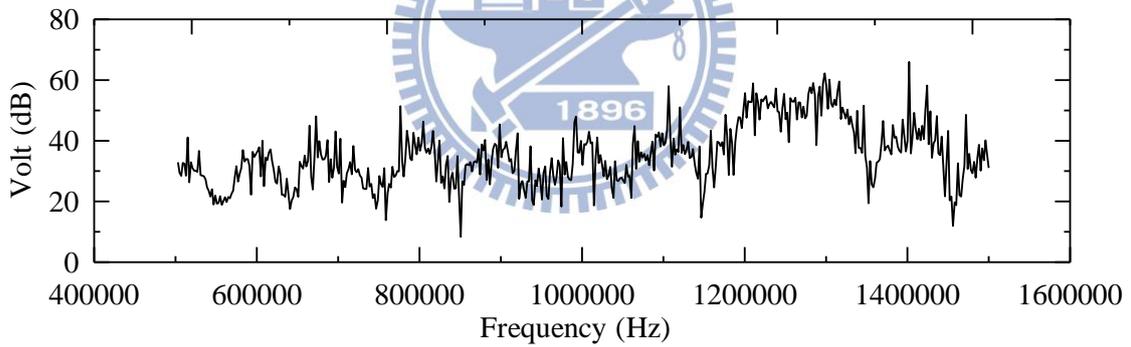
(b) 34mm、(c) 40mm



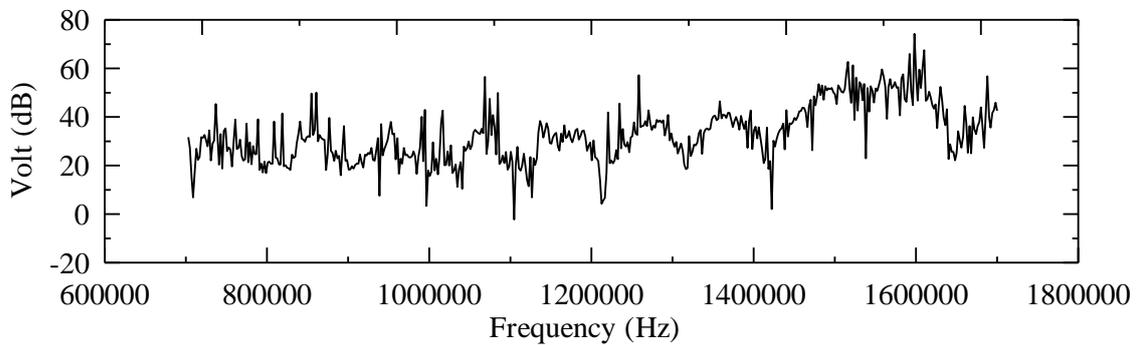
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 3.6 四種電極間距之 APFC 的頻率響應，電極間距為(a) 1mm、(b)

0.75mm、(c) 0.6mm、(d) 0.5mm

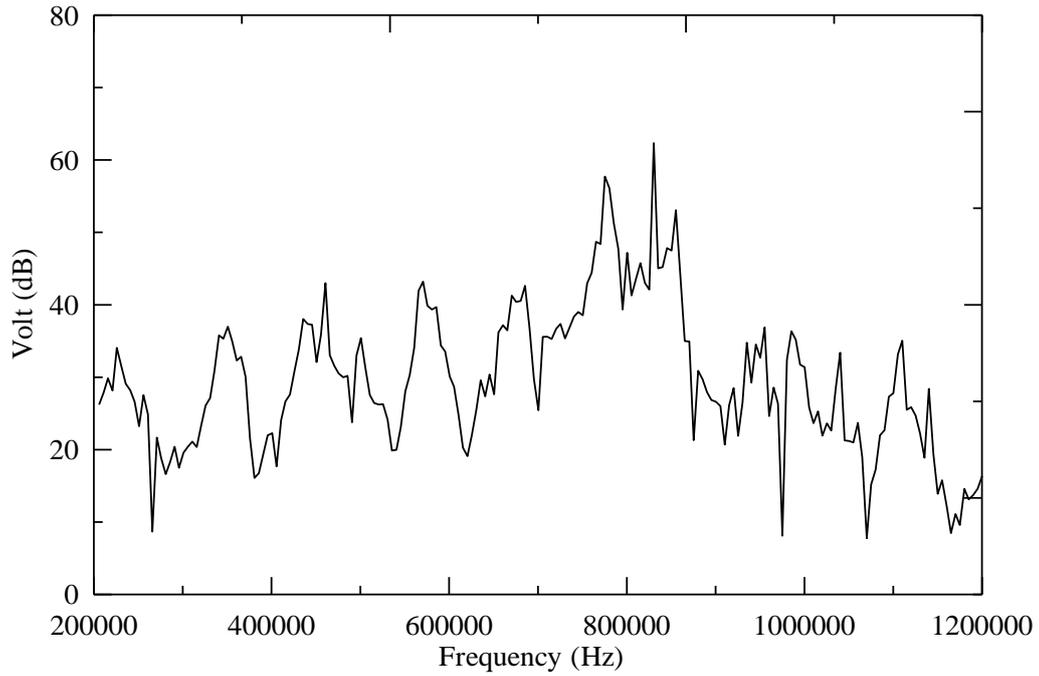


圖 3.7 模擬實驗之數值分析，電極間距 1mm 之 APFC 的頻率響應

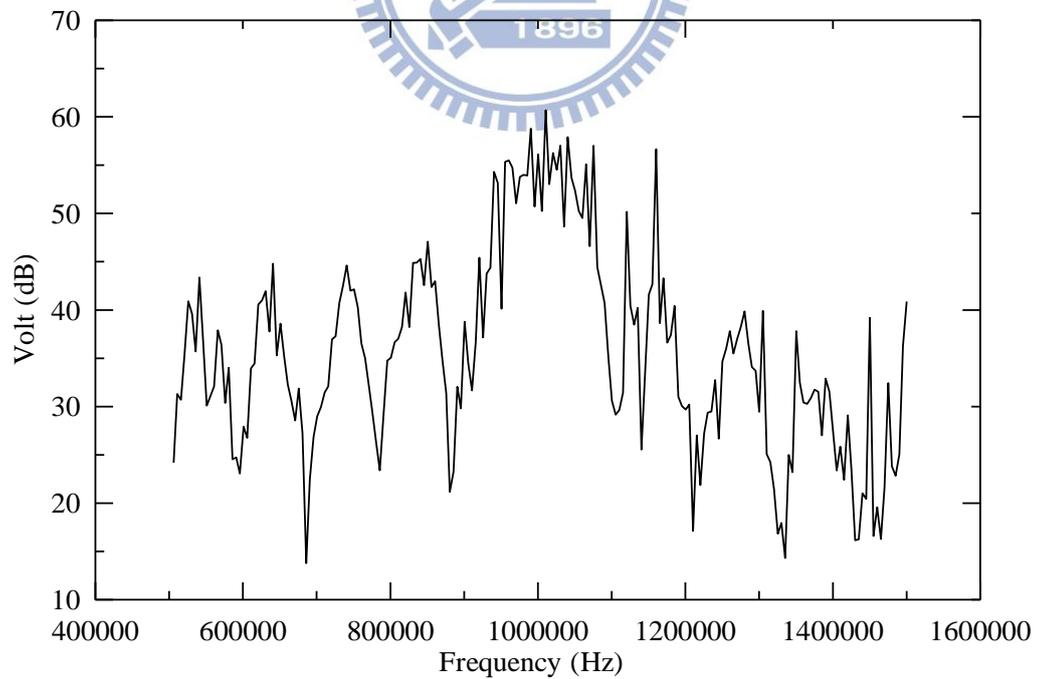


圖 3.8 模擬實驗之數值分析，電極間距 0.8mm 之 APFC 的頻率響應

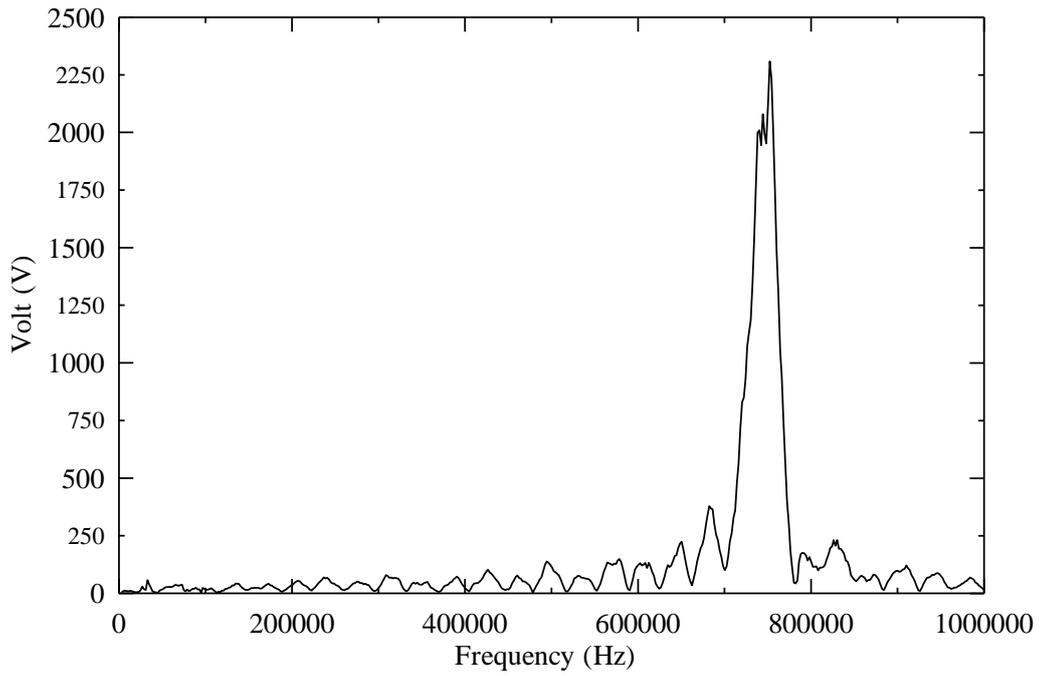


圖 3.9 長度 40mm，電極對數 10 對之 APFC 的頻率響應計算值

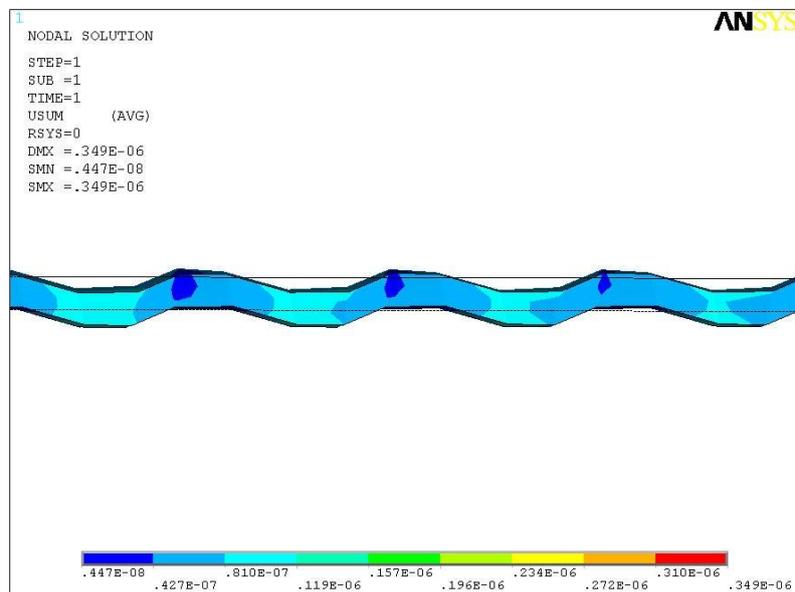


圖 3.10 APFC 在交流電場作用下的靜態變形圖

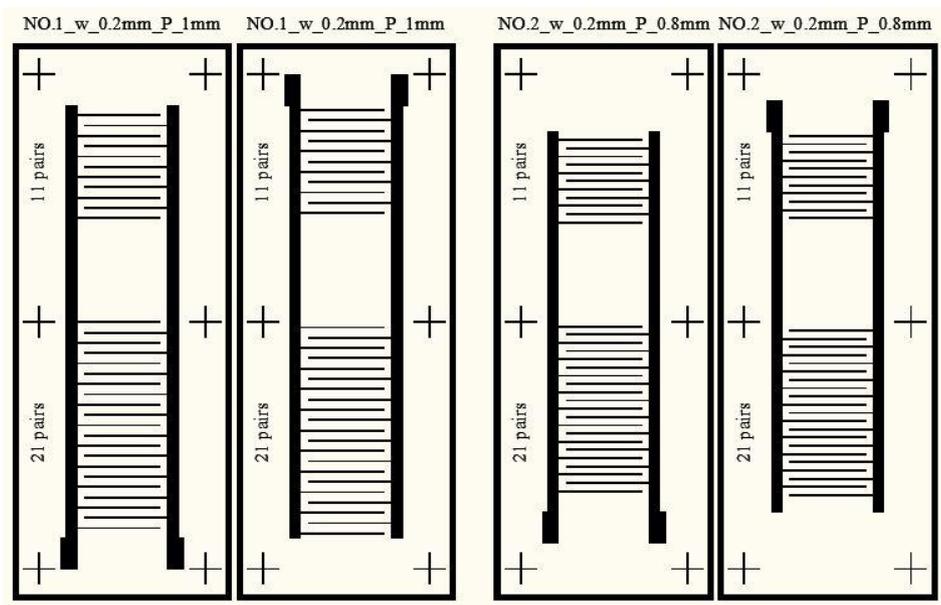


圖 4.1 兩種電極間距的反對稱指叉電極佈置圖

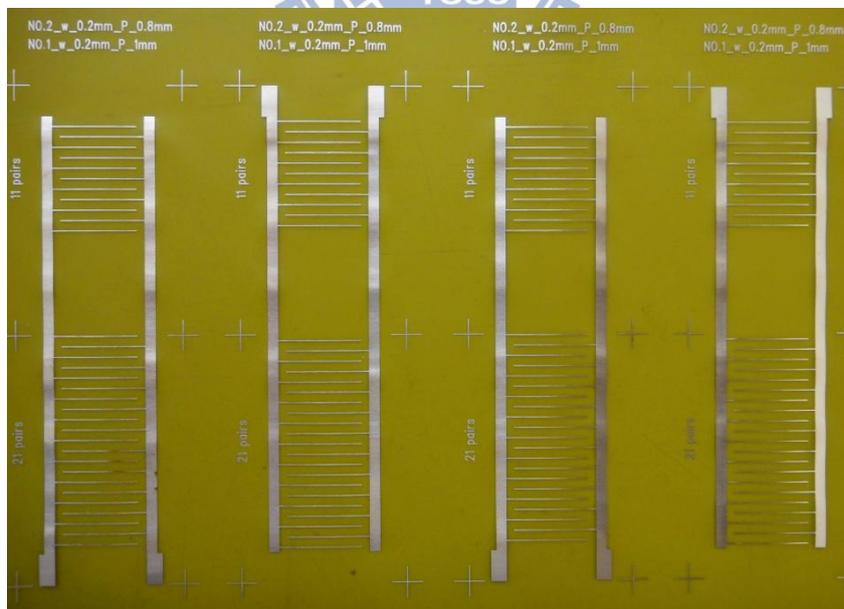


圖 4.2 軟性印刷電路板之指叉電極成品

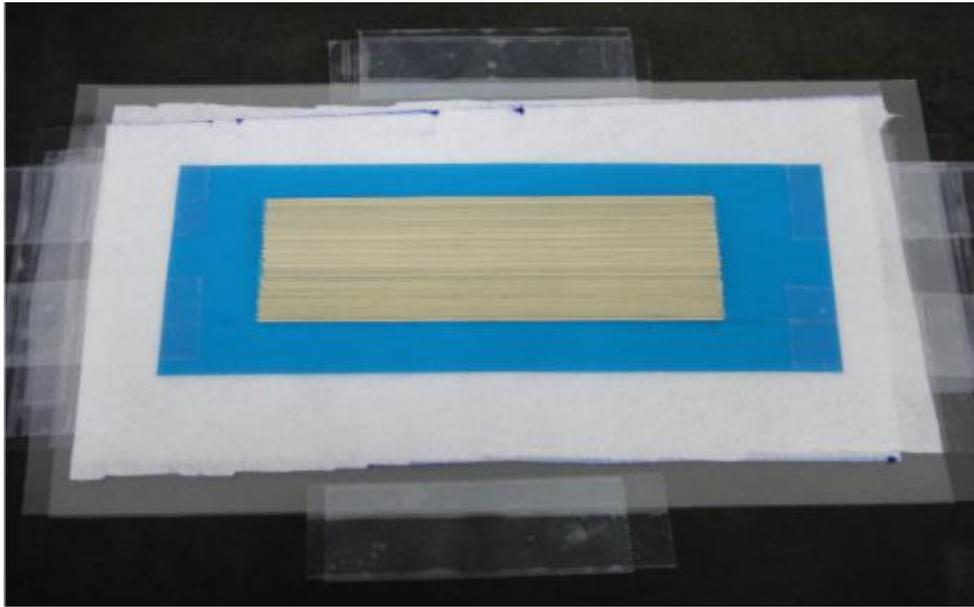


圖 4.3 依所需寬度及長度，將 PZT-5A 壓電纖維排列於低黏性膠布上



圖 4.4 使用熱壓製程及真空幫浦黏合壓電纖維與下指叉電極

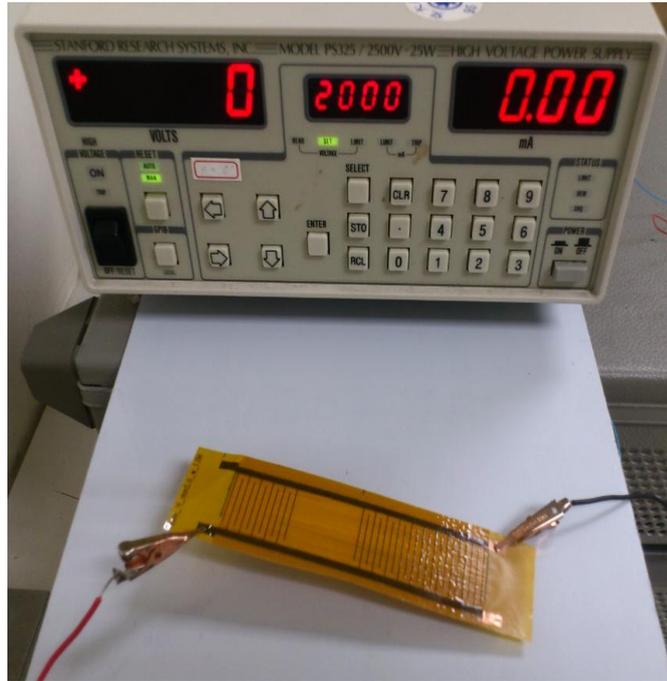


圖 4.5 高電壓極化 APFC 的照片

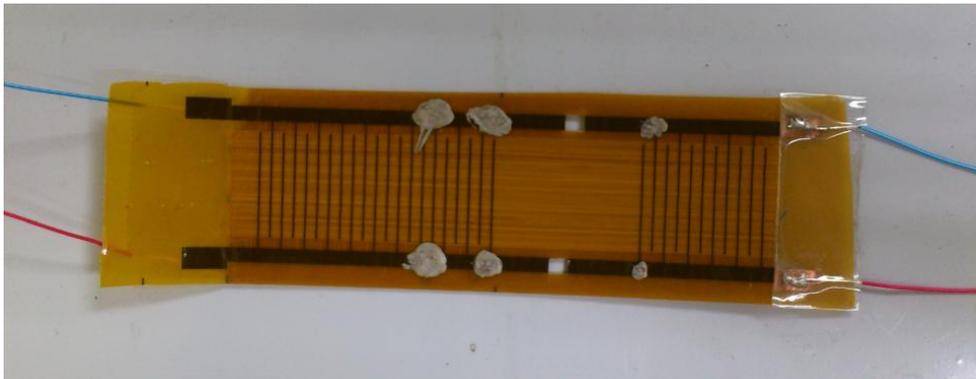


圖 4.6 APFC 的成品照片

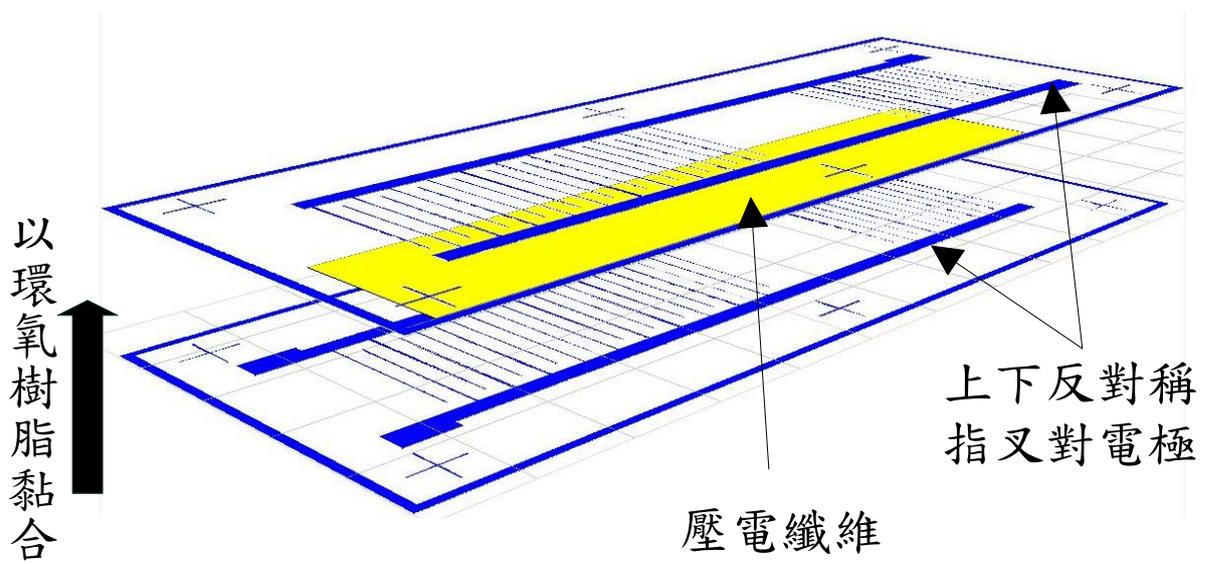


圖 4.7 APFC 製作程序示意圖

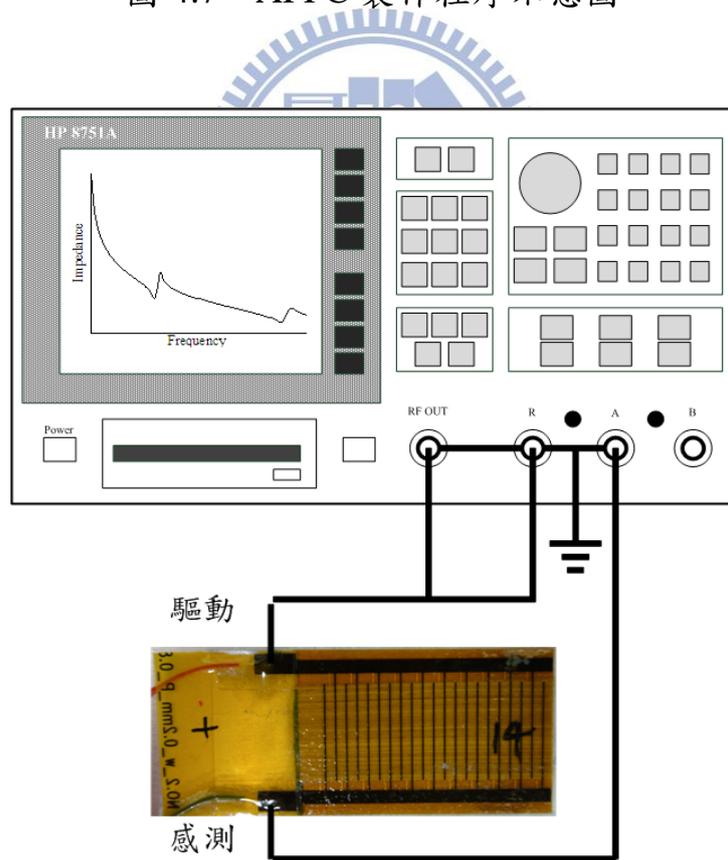


圖 4.8 阻抗響應量測實驗示意圖

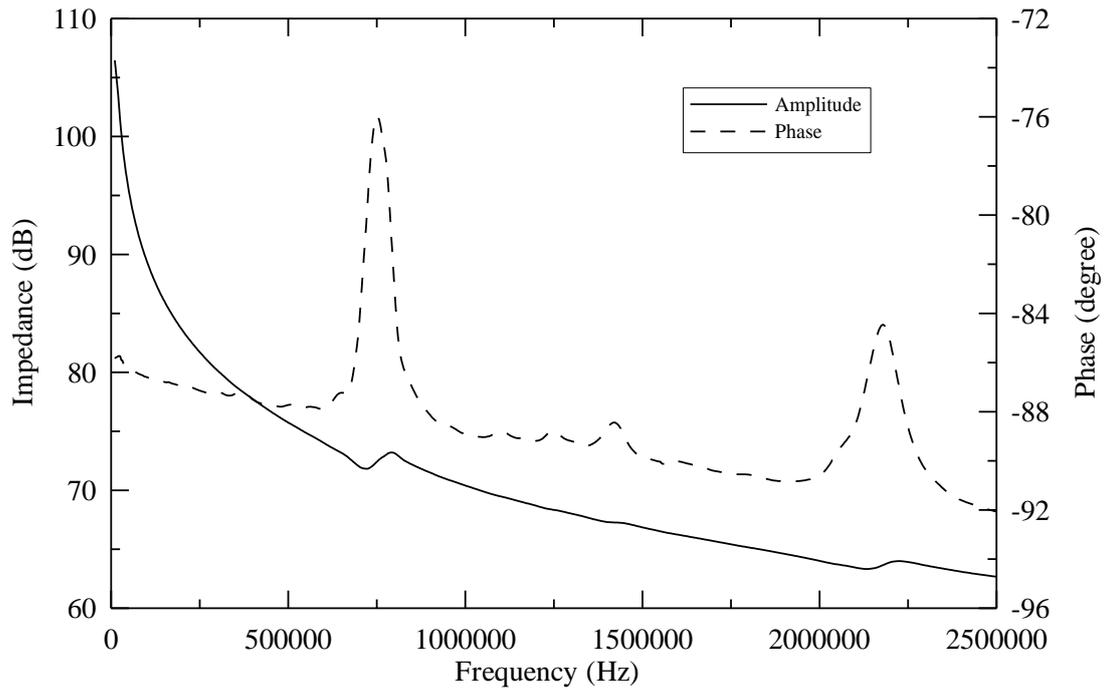


圖 4.9 電極間距 1mm 之 APFC 於自由狀態的寬頻阻抗響應

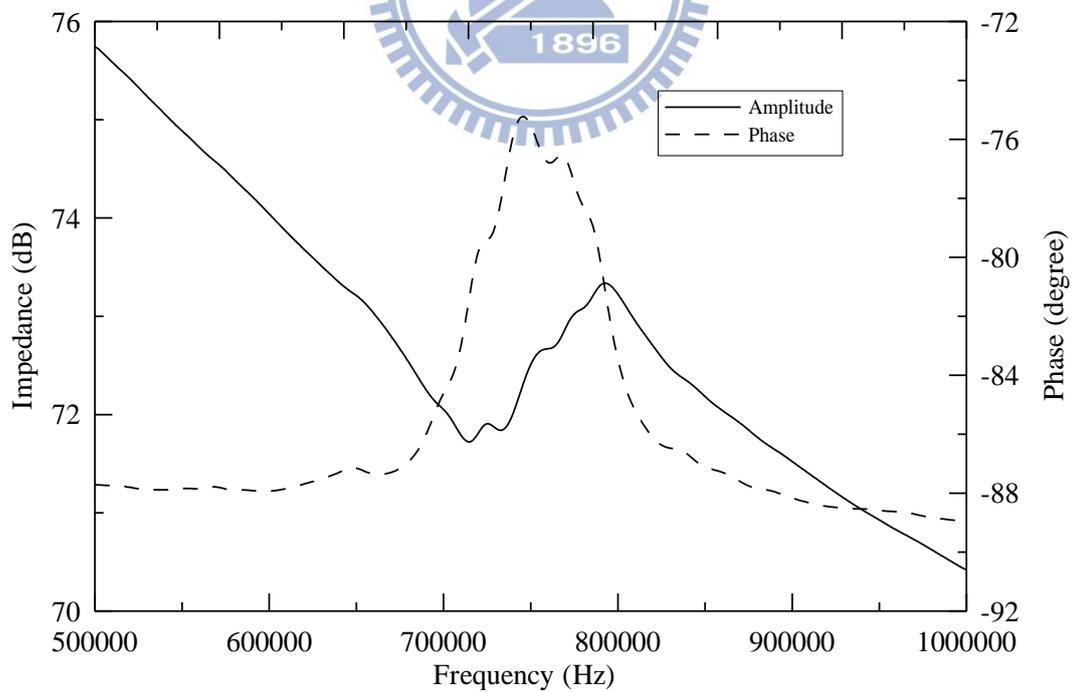


圖 4.10 電極間距 1mm 之 APFC 於自由狀態的低頻阻抗響應

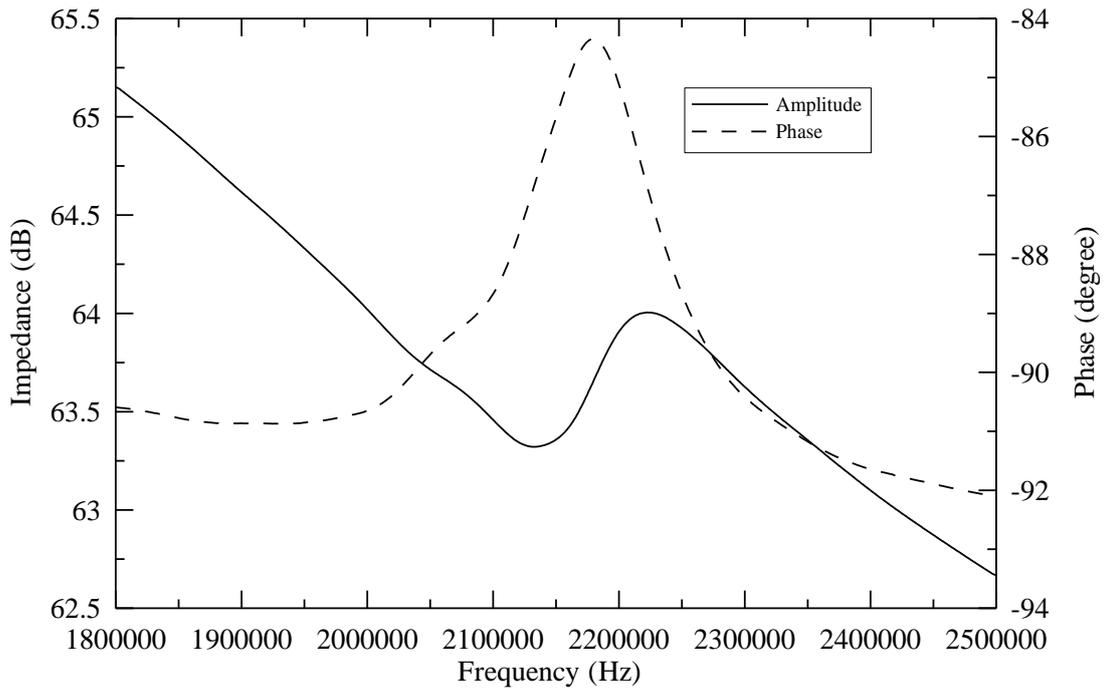


圖 4.11 電極間距 1mm 之 APFC 於自由狀態的高頻阻抗響應

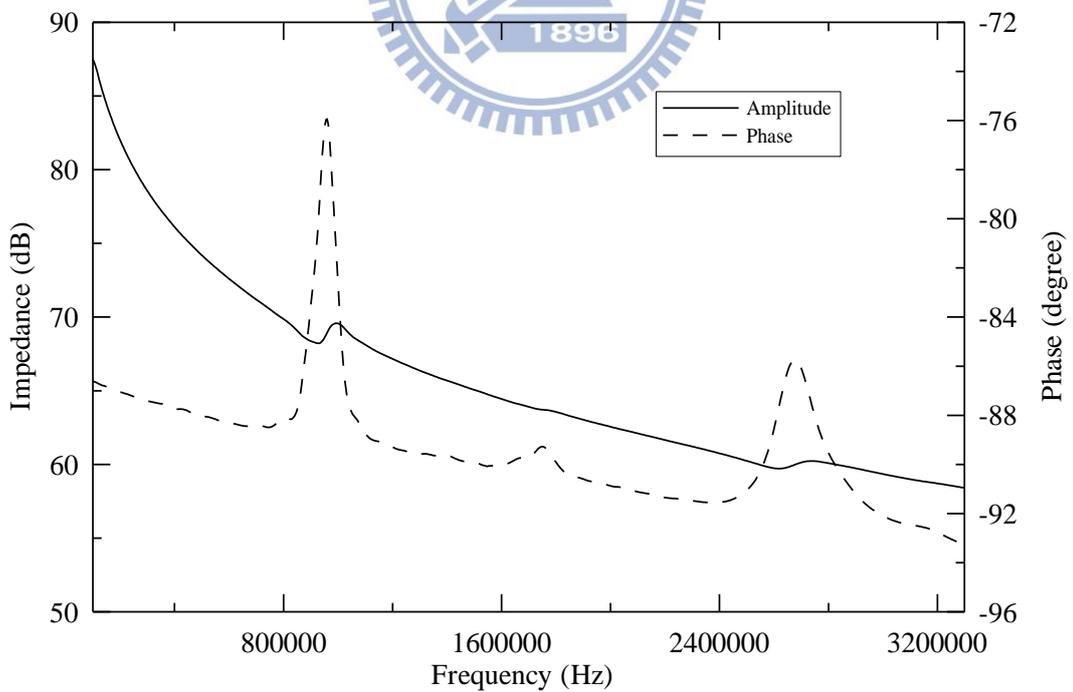


圖 4.12 電極間距 0.8mm 之 APFC 於自由狀態的寬頻阻抗響應

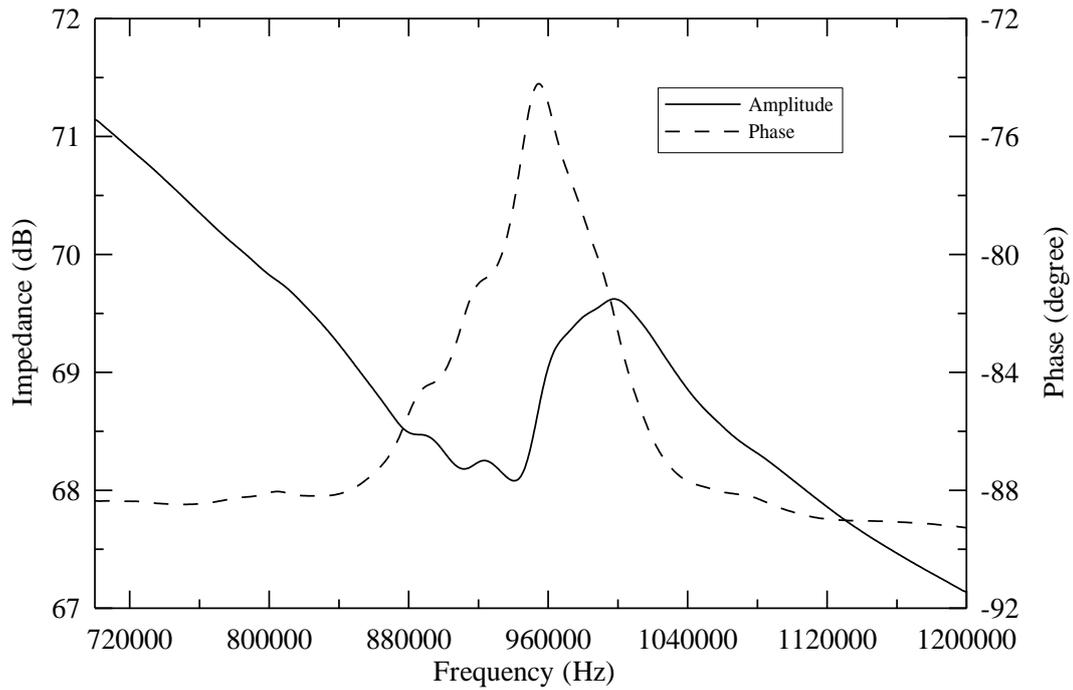


圖 4.13 電極間距為 0.8mm 之 APFC 於自由狀態的低頻阻抗響應

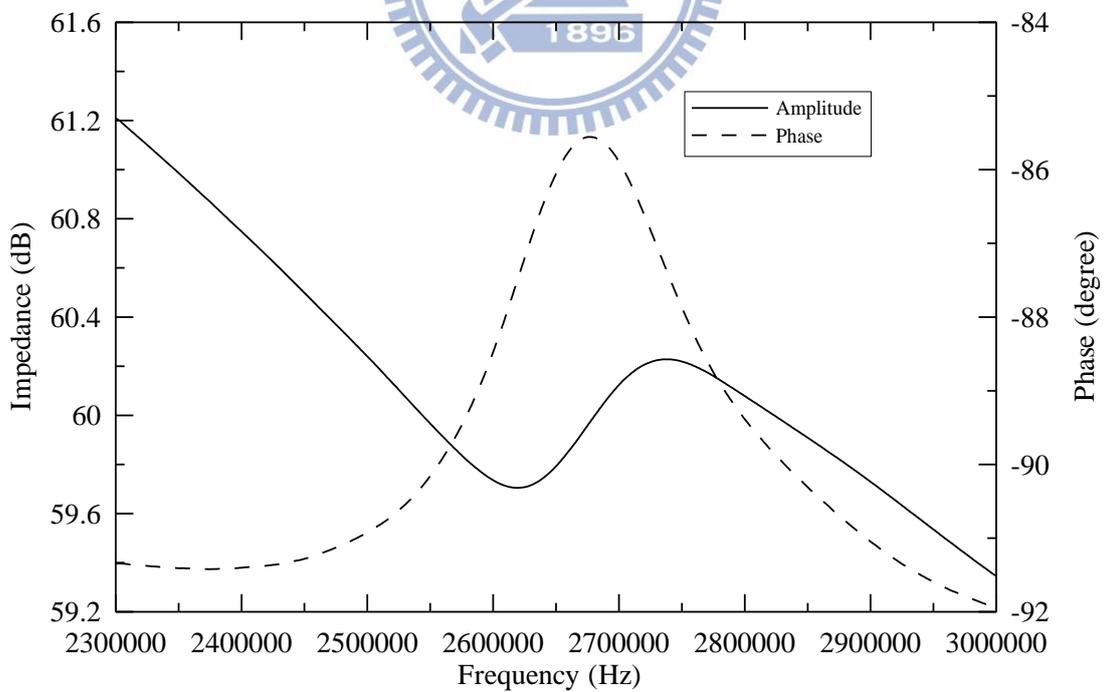


圖 4.14 電極間距為 0.8mm 之 APFC 於自由狀態的高頻阻抗響應

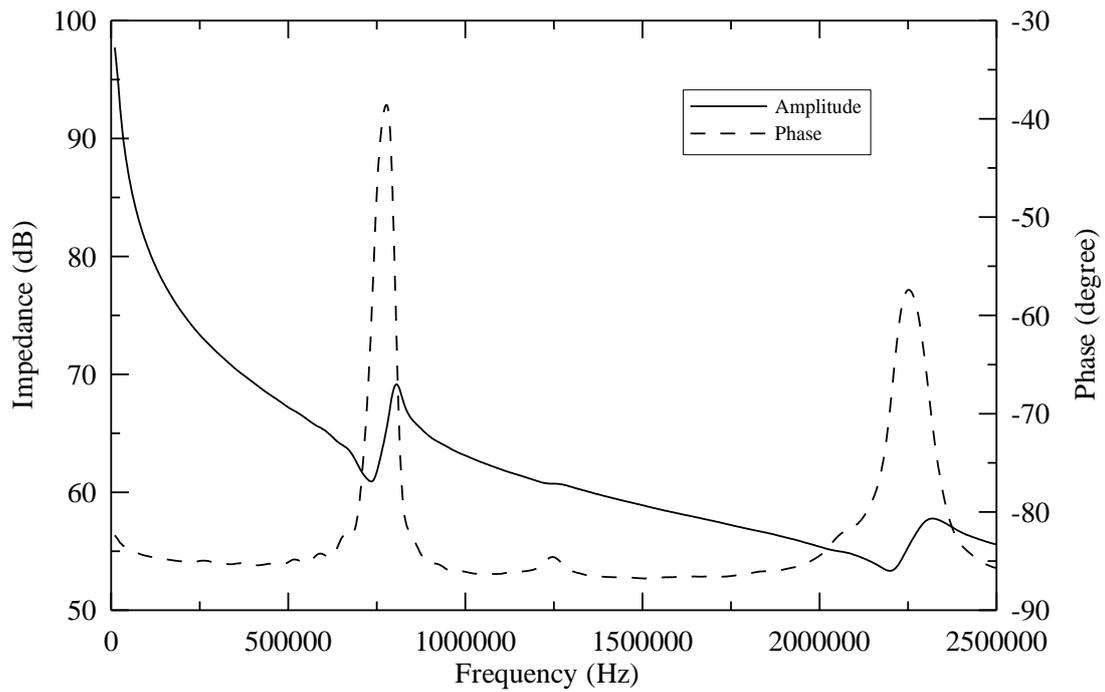


圖 4.15 進行兩次極化之電極間距 1mm 的 APFC 寬頻阻抗響應

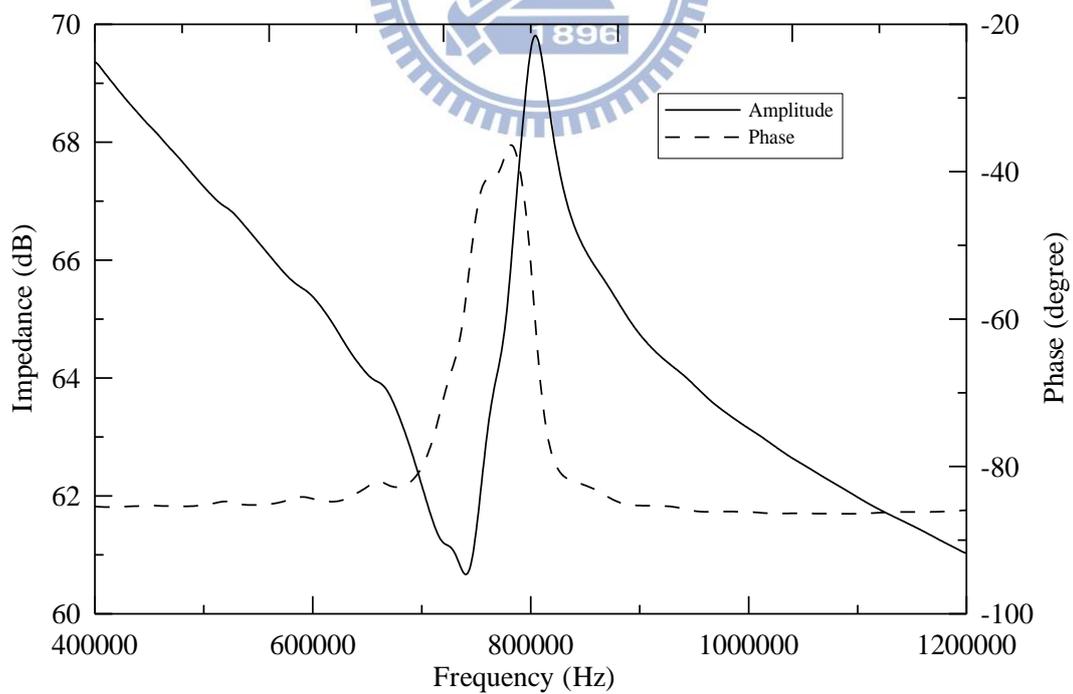


圖 4.16 進行兩次極化之電極間距 1mm 的 APFC 低頻阻抗響應

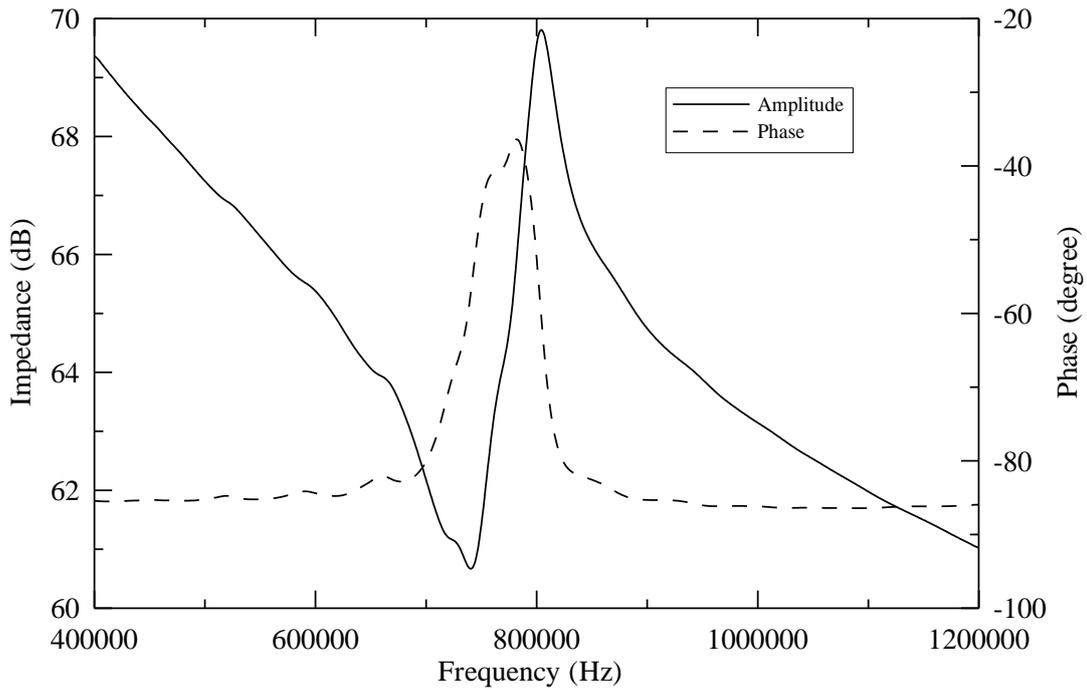


圖 4.17 具有 21 對指叉電極且間距 1mm 的 APFC 阻抗響應

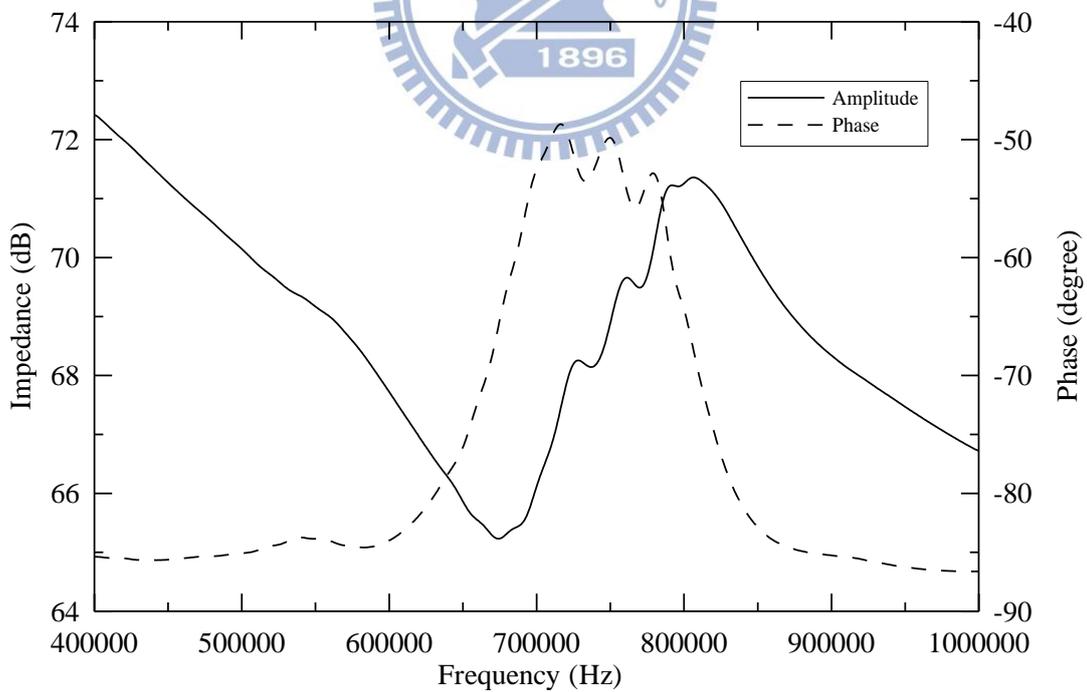


圖 4.18 具有 11 對指叉電極且間距 1mm 的 APFC 阻抗響應

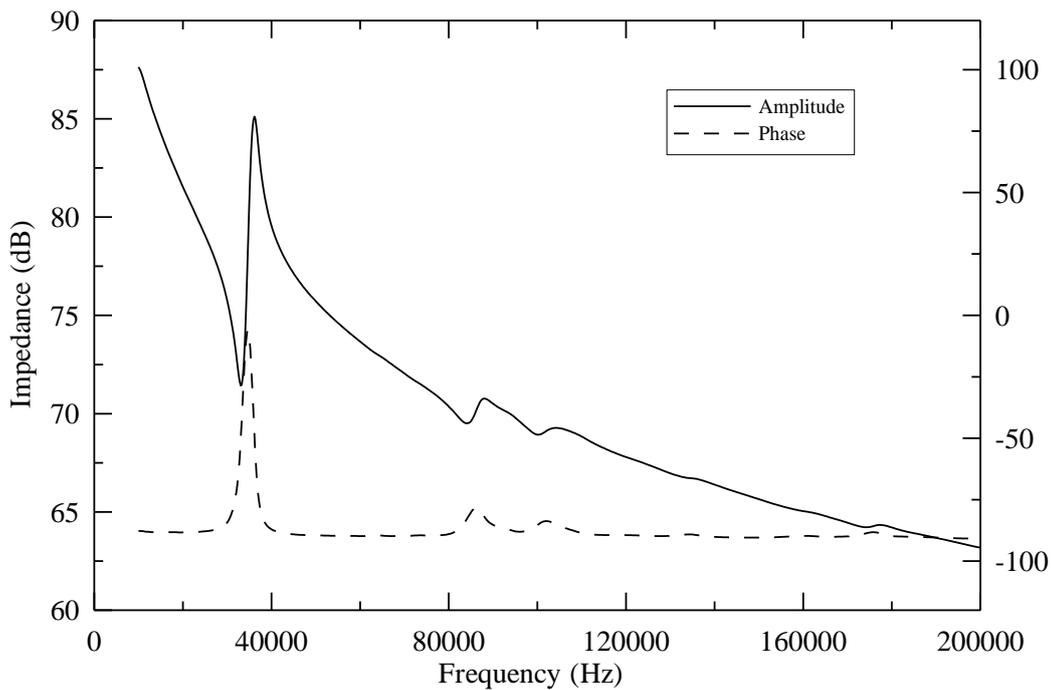


圖 4.19 電極間距 0.5mm 之 PFC 於自由狀態的低頻阻抗響應

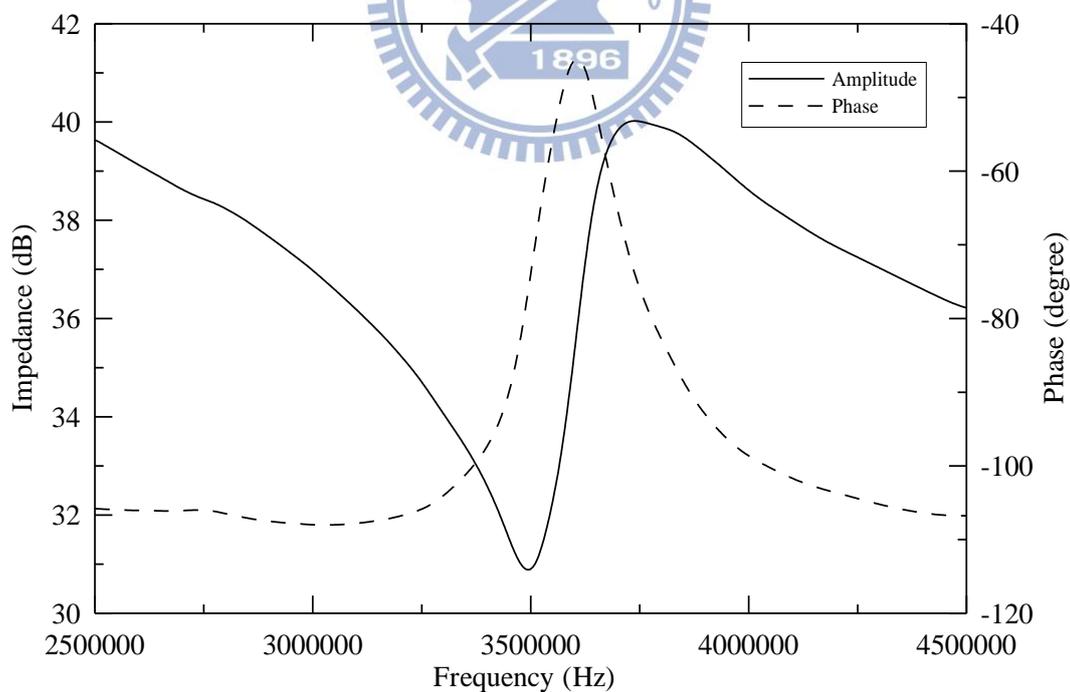


圖 4.20 電極間距 0.5mm 之 PFC 於自由狀態的高頻阻抗響應

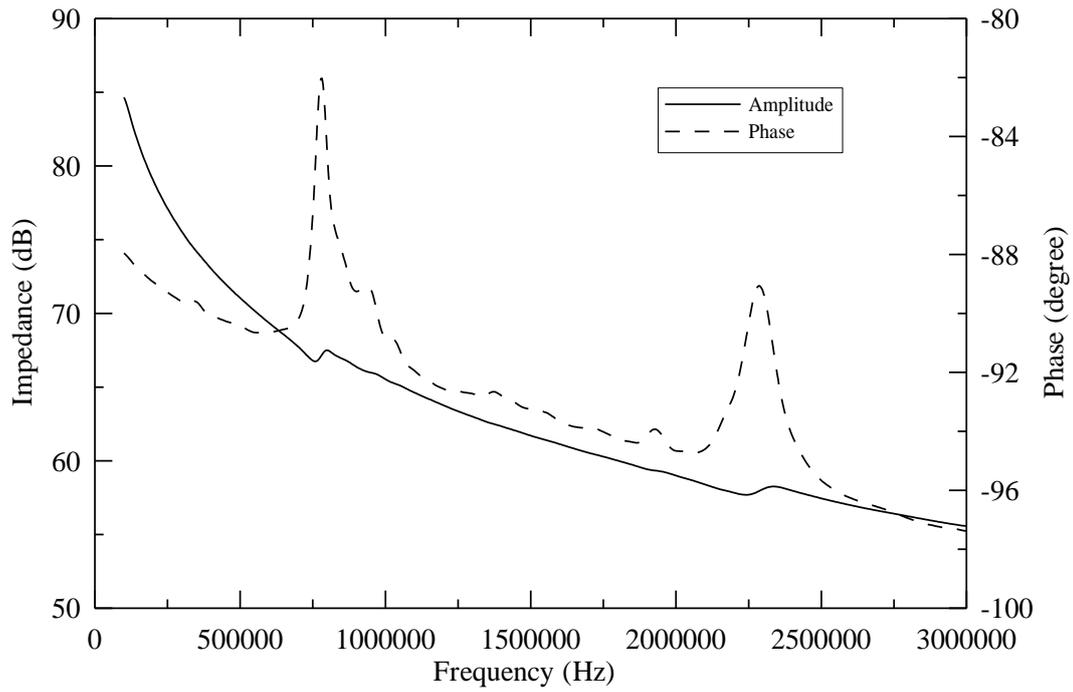


圖 4.21 電極間距 1mm 之 APFC 黏貼於鋁板的寬頻阻抗響應

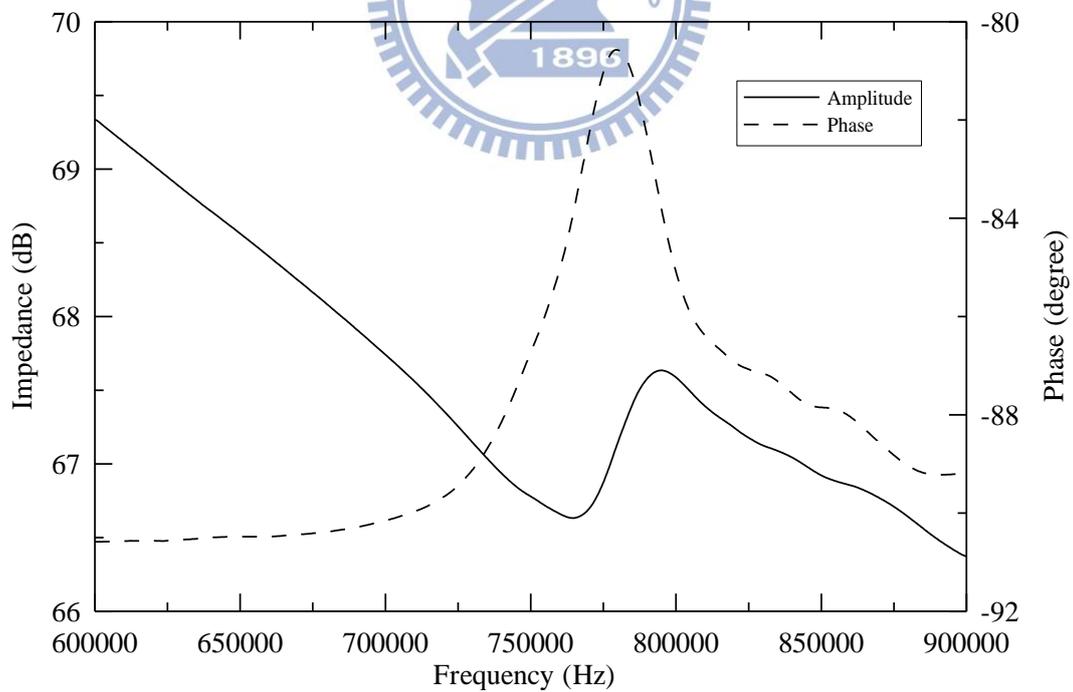


圖 4.22 電極間距 1mm 之 APFC 黏貼於鋁板的低頻阻抗響應

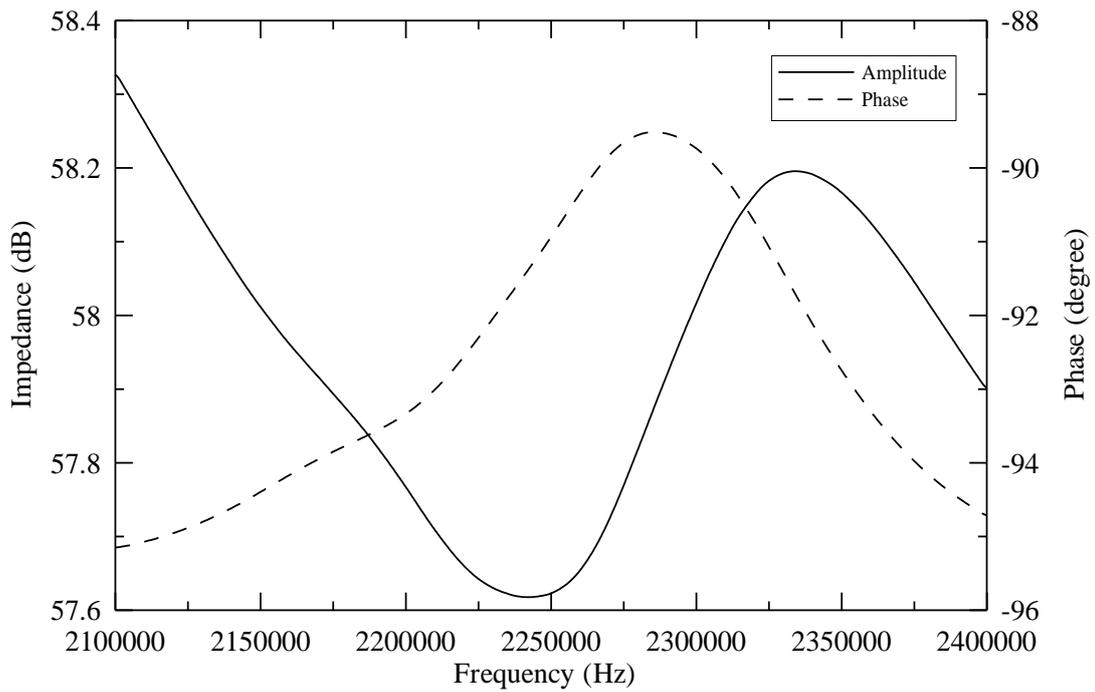


圖 4.23 電極間距 1mm 之 APFC 黏貼於鋁板的高頻阻抗響應

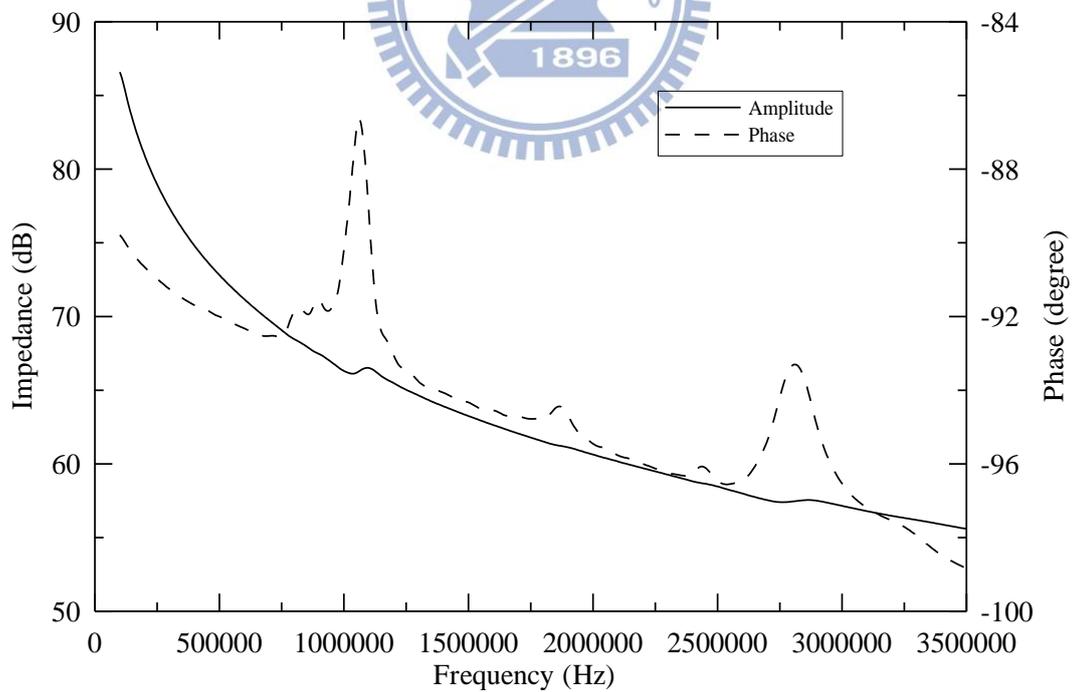


圖 4.24 電極間距 0.8mm 之 APFC 黏貼於鋁板的寬頻阻抗響應

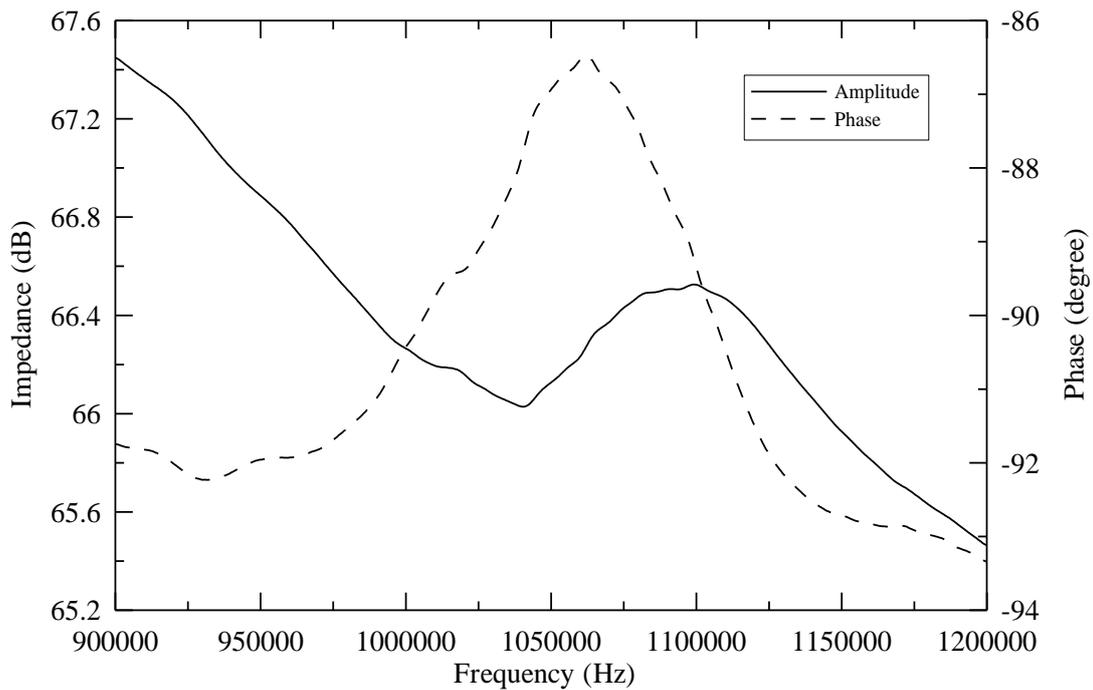


圖 4.25 電極間距 0.8mm 之 APFC 黏貼於鋁板的低頻阻抗響應

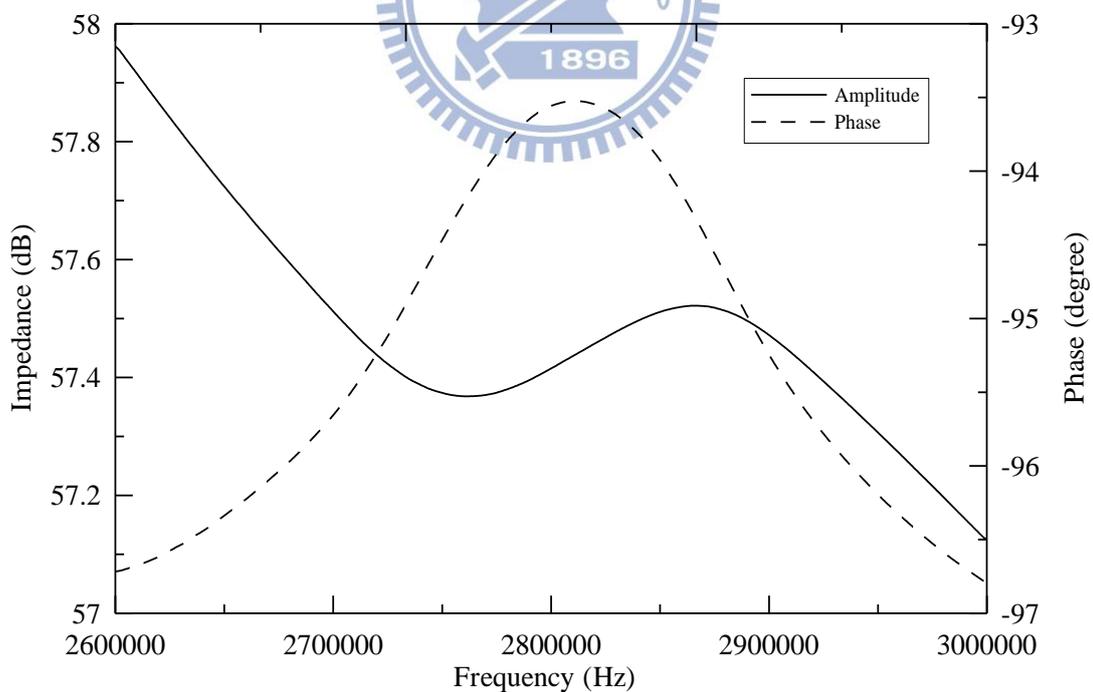


圖 4.26 電極間距 0.8mm 之 APFC 黏貼於鋁板的高頻阻抗響應

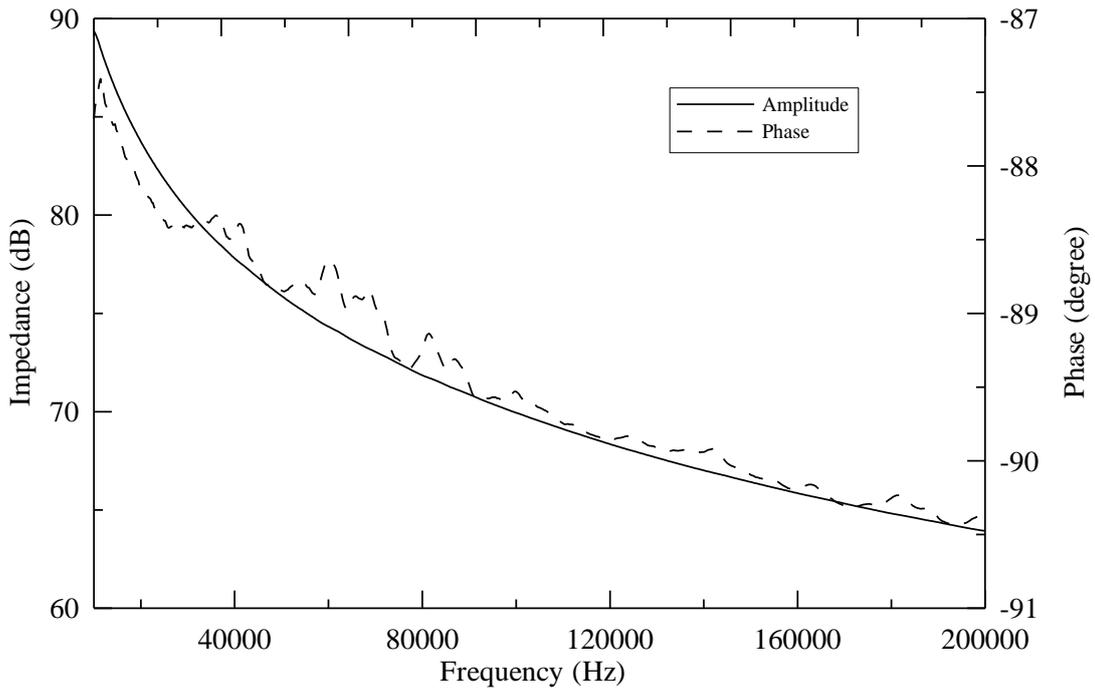


圖 4.27 電極間距 0.5mm 之 PFC 黏貼於鋁板的低頻阻抗響應

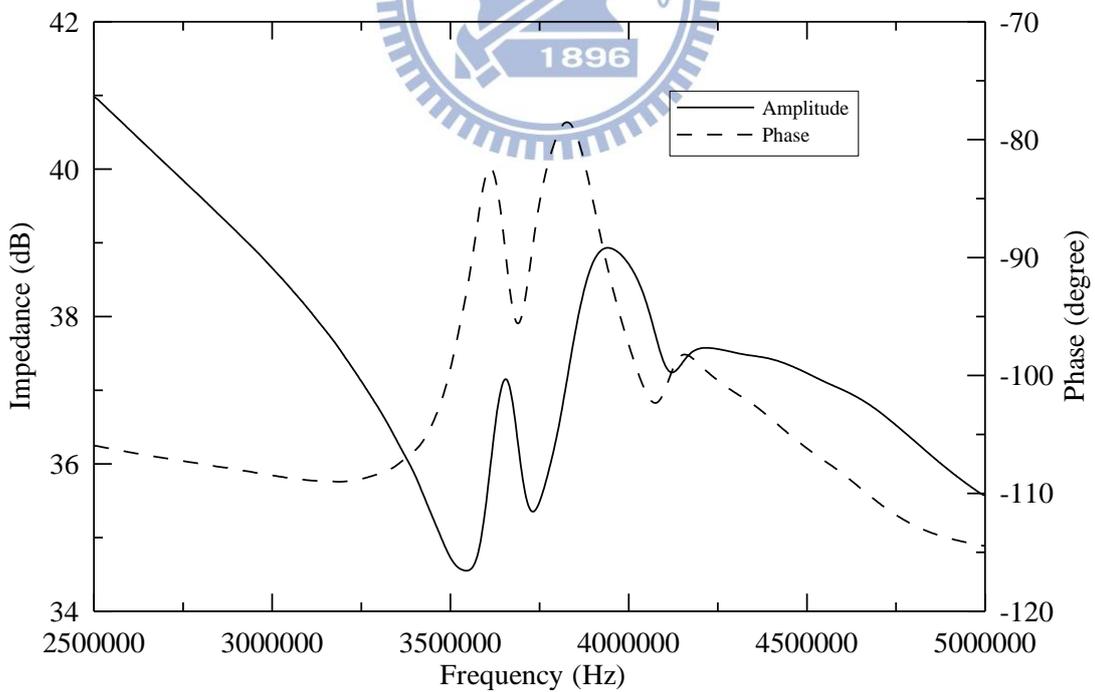


圖 4.28 電極間距 0.5mm 之 PFC 黏貼於鋁板的高頻阻抗響應

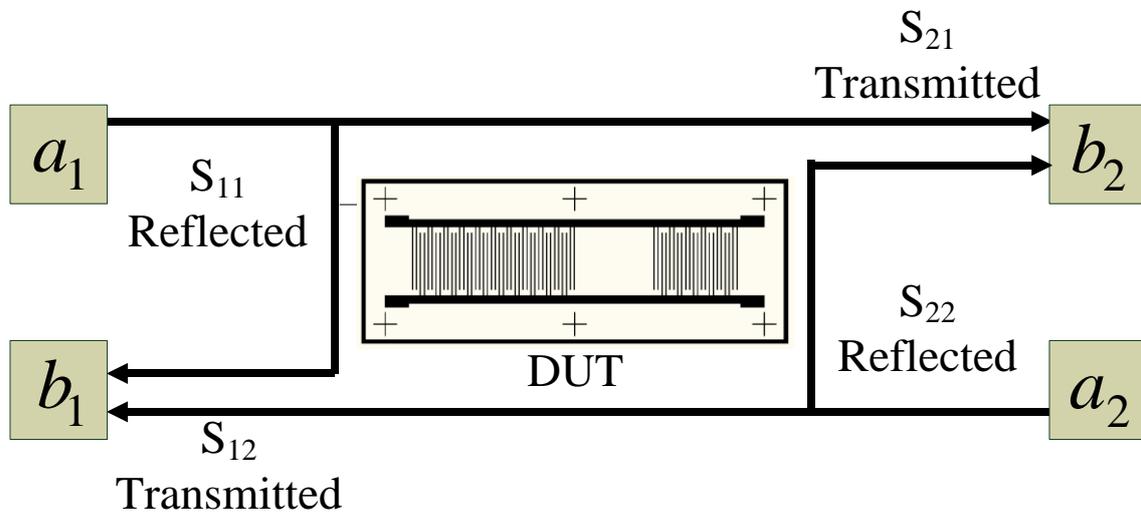


圖 4.29 散射參數量測示意圖

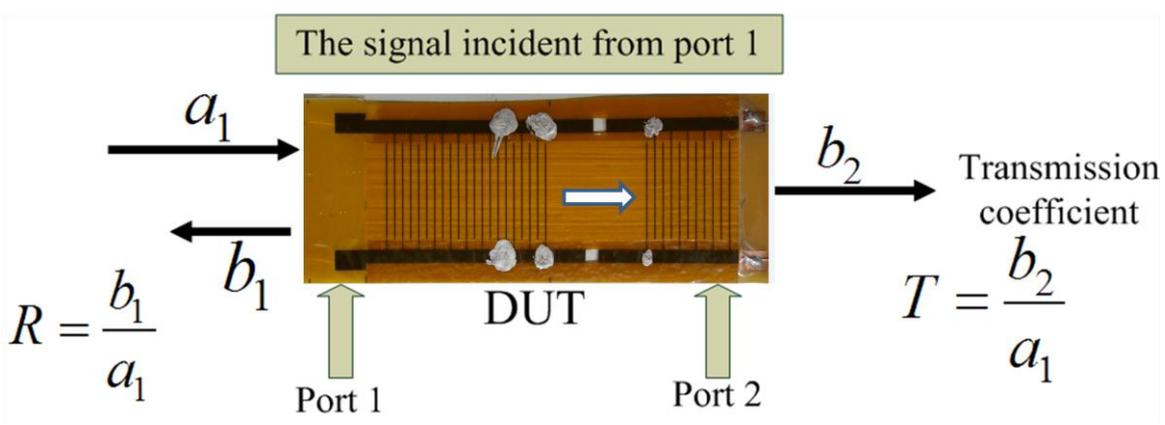


圖 4.30 反射及傳輸功率比值量測的示意圖

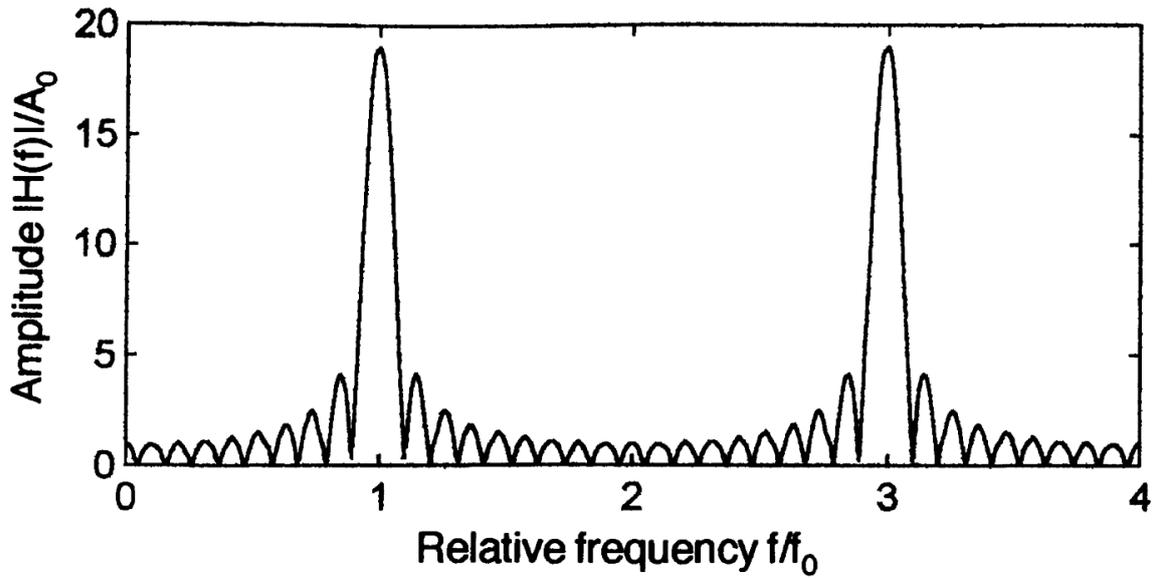


圖 4.31 由指叉電極換能器所激發之聲導波頻率響應[17]

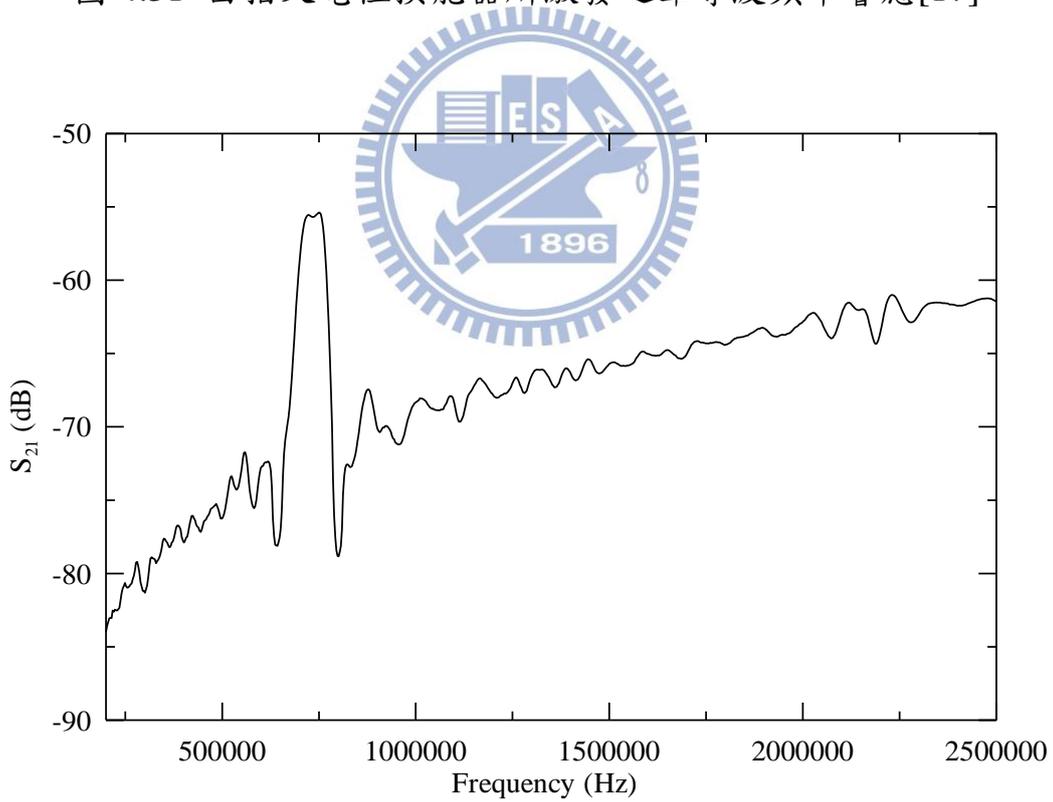


圖 4.32 電極間距 1mm 之 APFC 於自由狀態的插入損失 S_{21} 之頻率響應

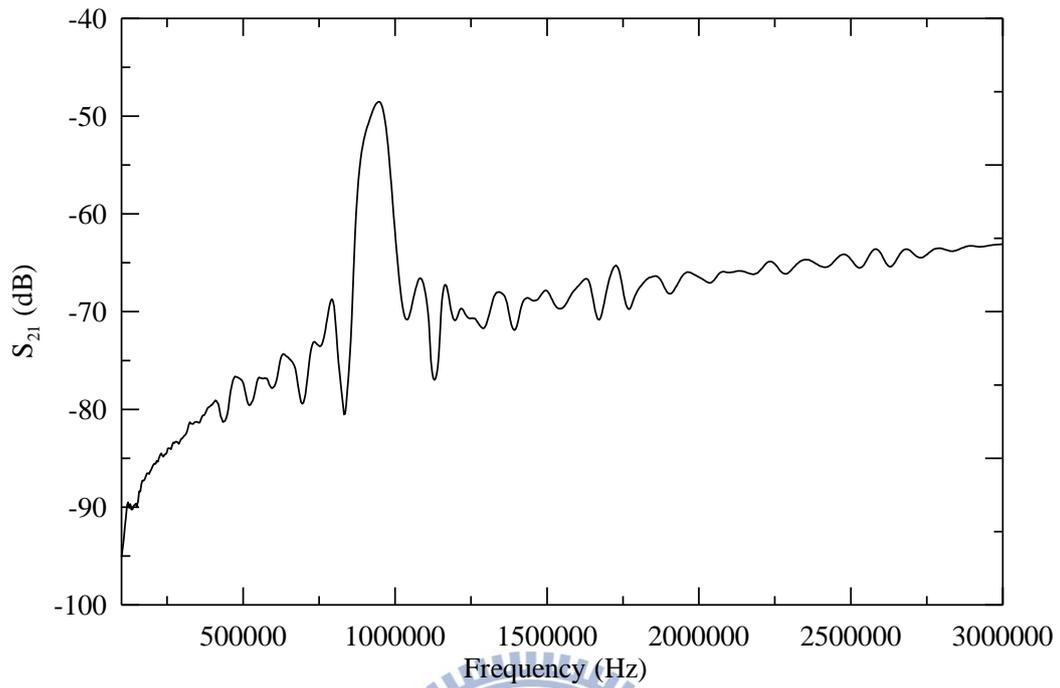


圖 4.33 電極間距 0.8mm 之 APFC 於自由狀態的插入損失 S_{21} 之頻率響應

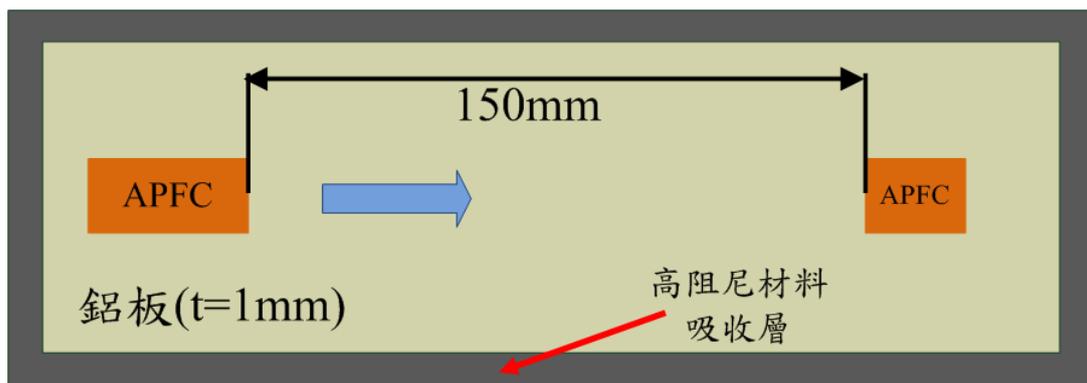


圖 4.34 黏貼於鋁板之 APFC 的插入損失 S_{21} 頻率響應量測實驗示意圖

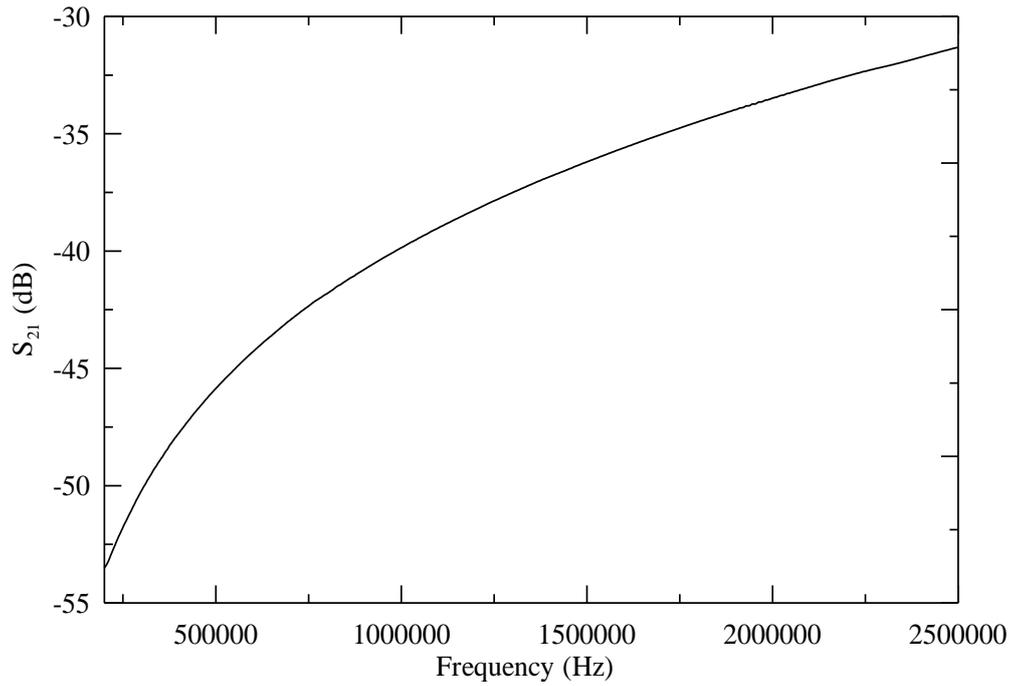


圖 4.35 電極間距 1mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之寬頻響應

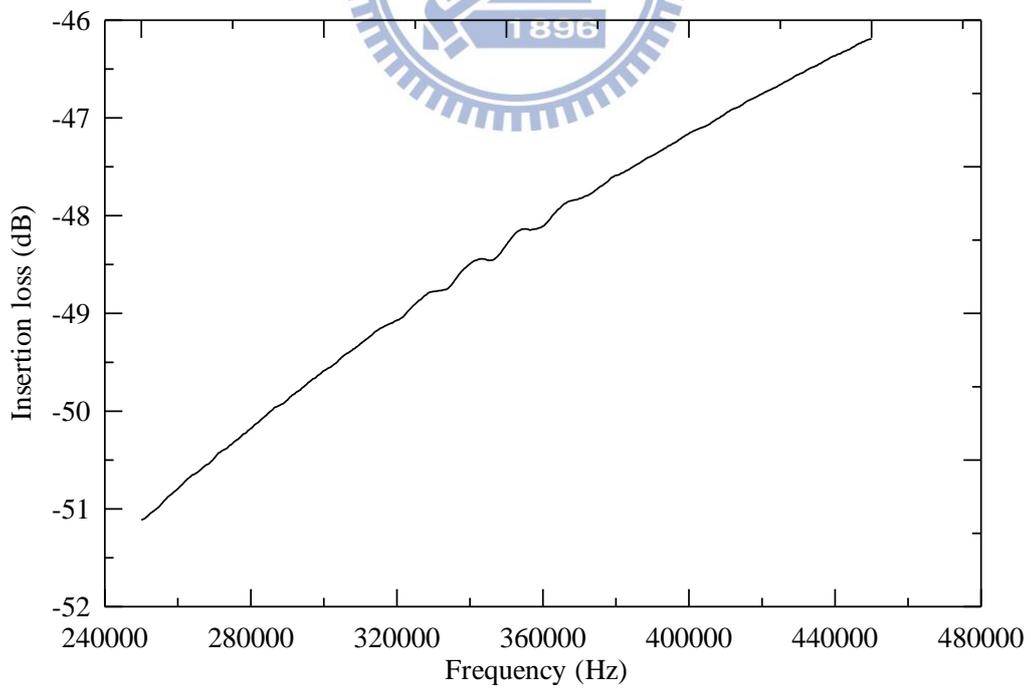


圖 4.36 電極間距 1mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之低頻響應

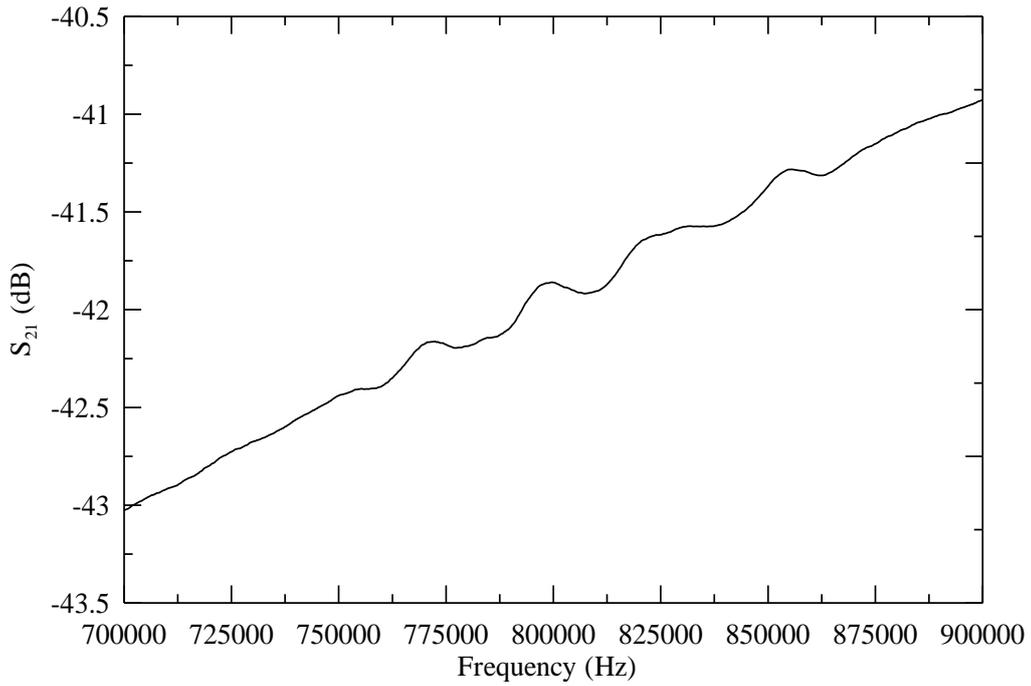


圖 4.37 電極間距 1mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之低頻響應

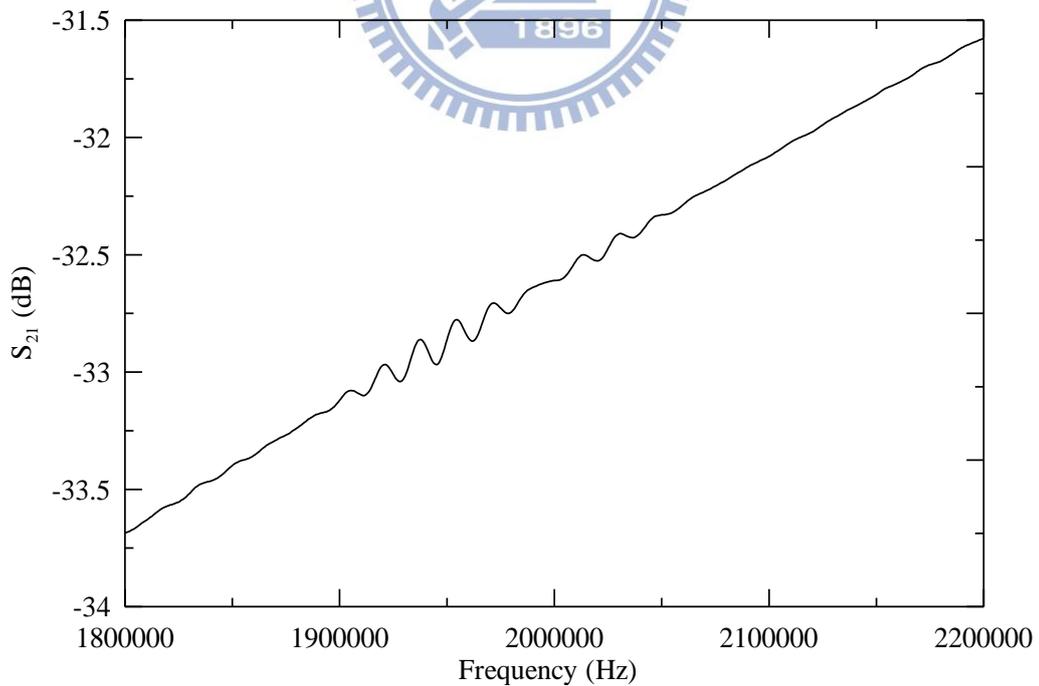


圖 4.38 電極間距 1mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之高頻響應

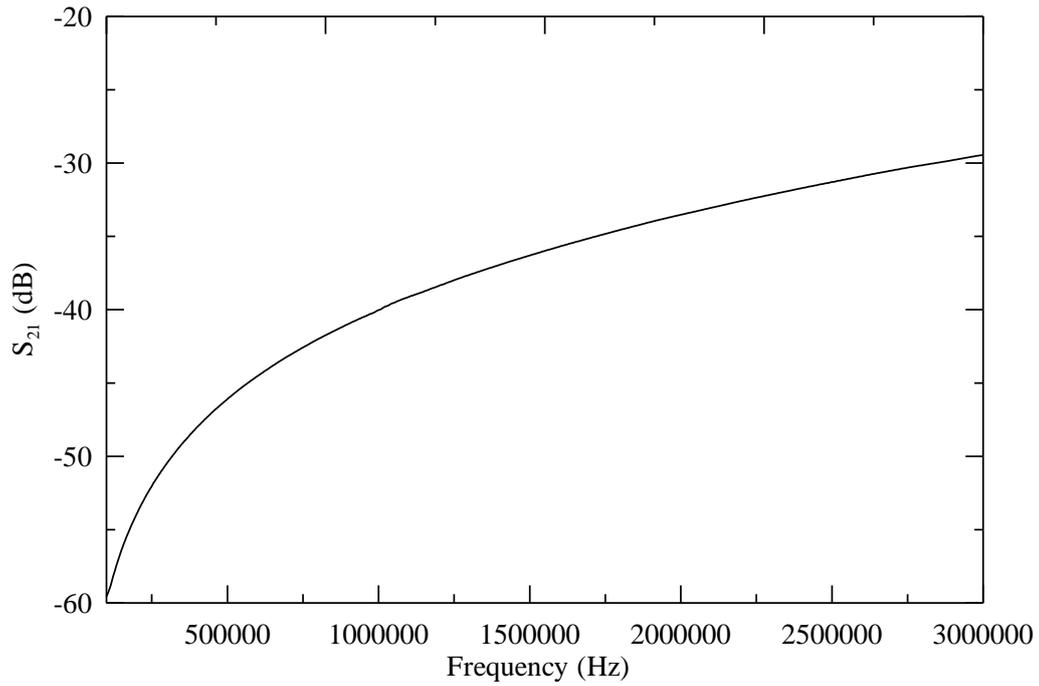


圖 4.39 電極間距 0.8mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之寬頻響應

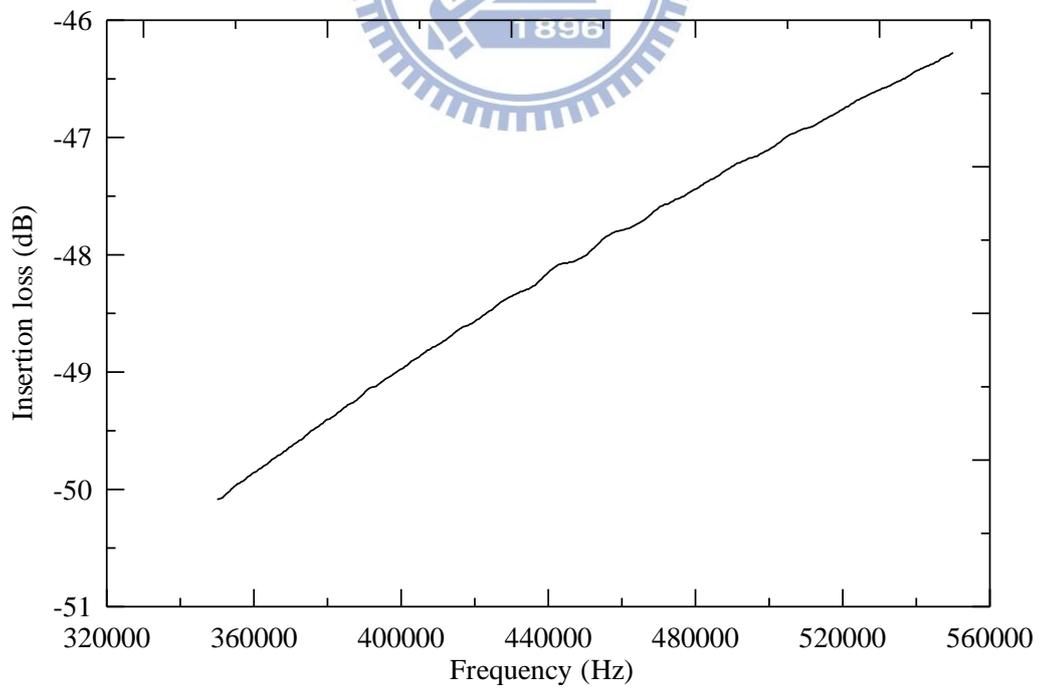


圖 4.40 電極間距 0.8mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之低頻響應

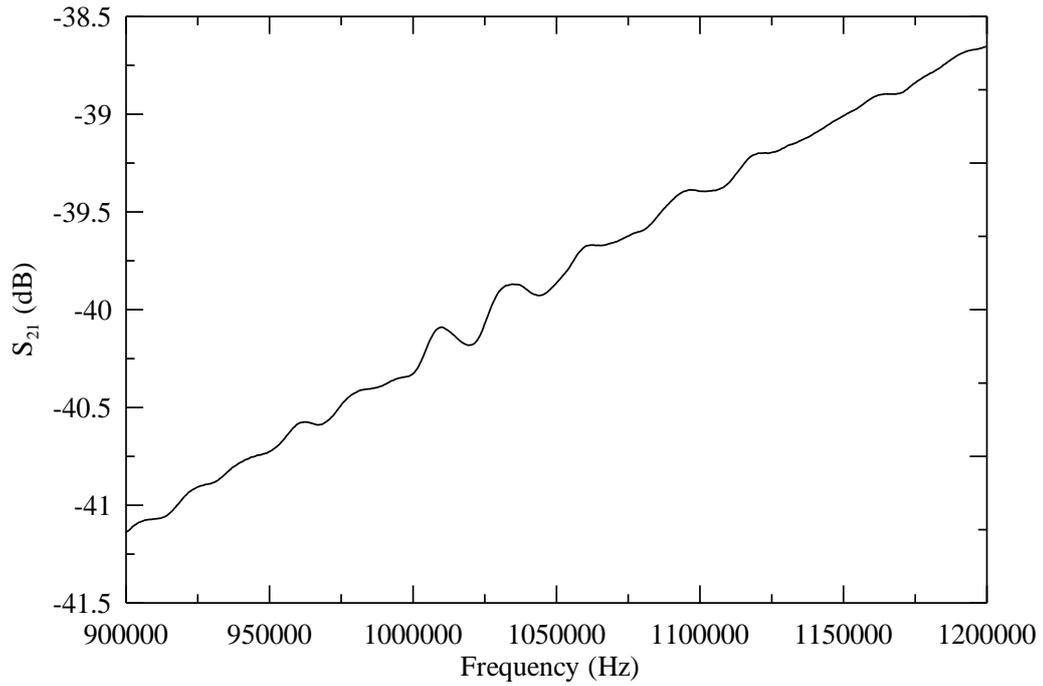


圖 4.41 電極間距 0.8mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之低頻響應

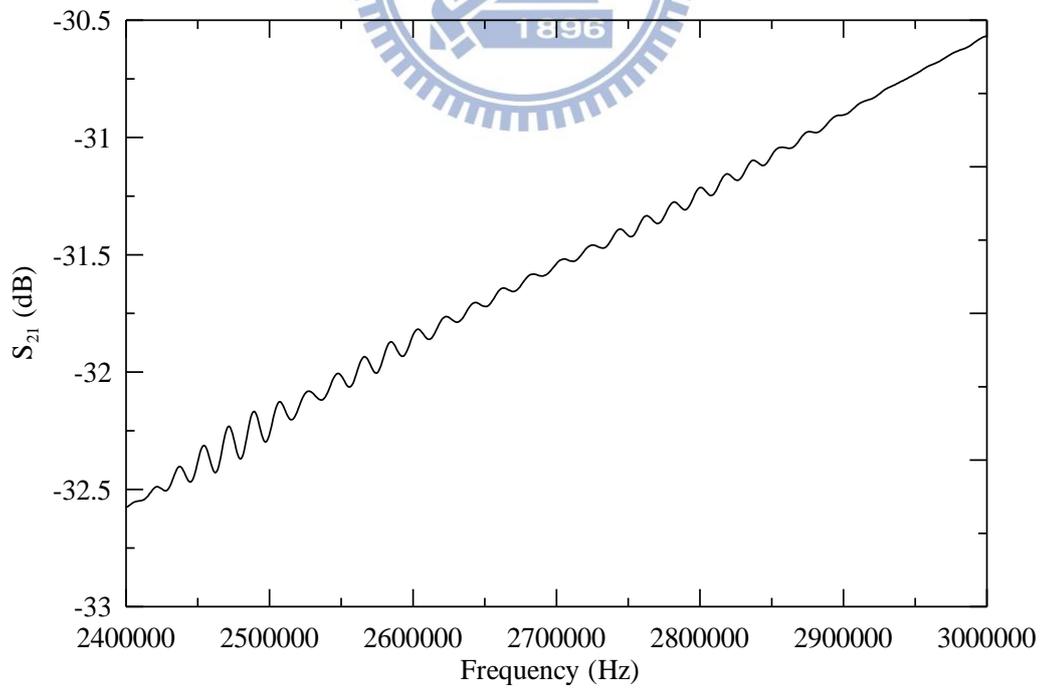


圖 4.42 電極間距 0.8mm 之 APFC 黏貼於鋁板的插入損失 S_{21} 之高頻響應

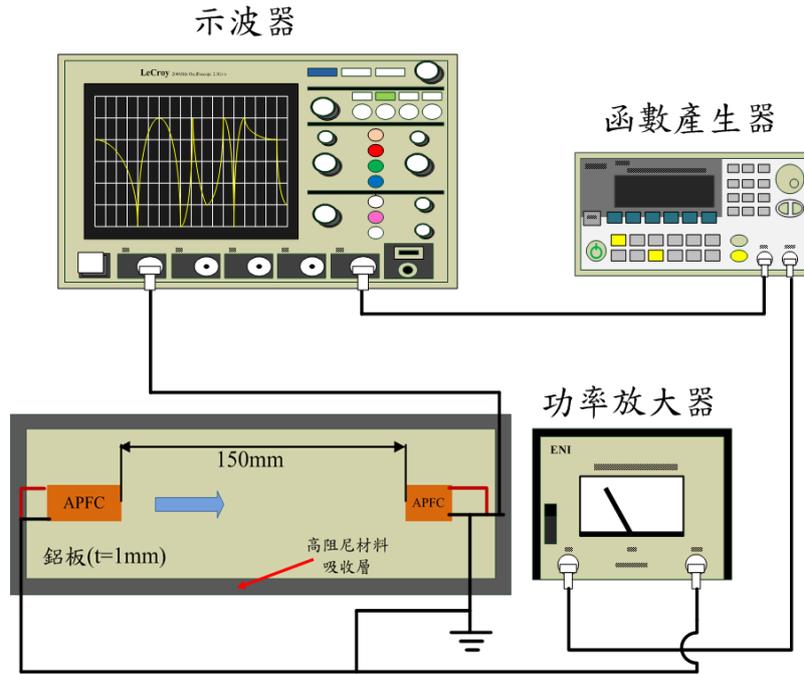
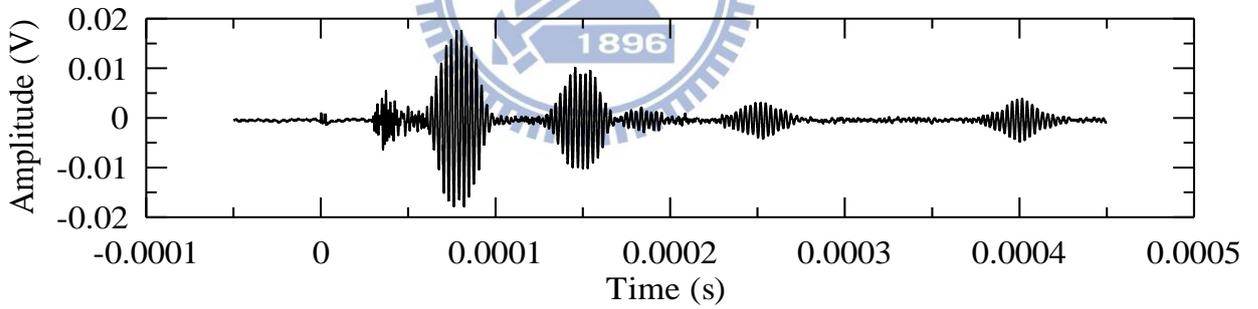
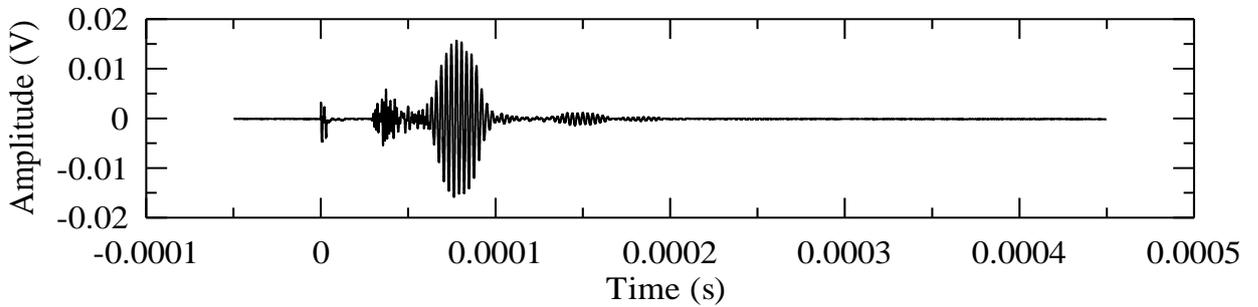


圖 4.43 暫態訊號量測實驗架構示意圖



(a)



(b)

圖 4.44 電極間距 1mm 之 APFC 感測 350kHz 正弦單脈衝激發之鋁板板波，板緣(a)未黏貼、(b)黏貼高阻尼吸收條的暫態訊號比較

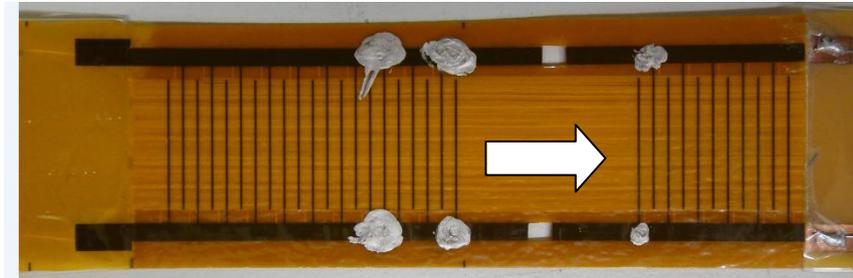
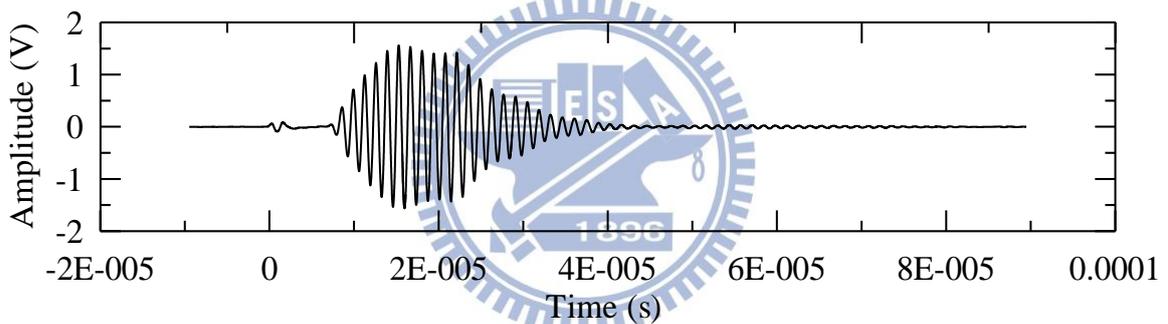
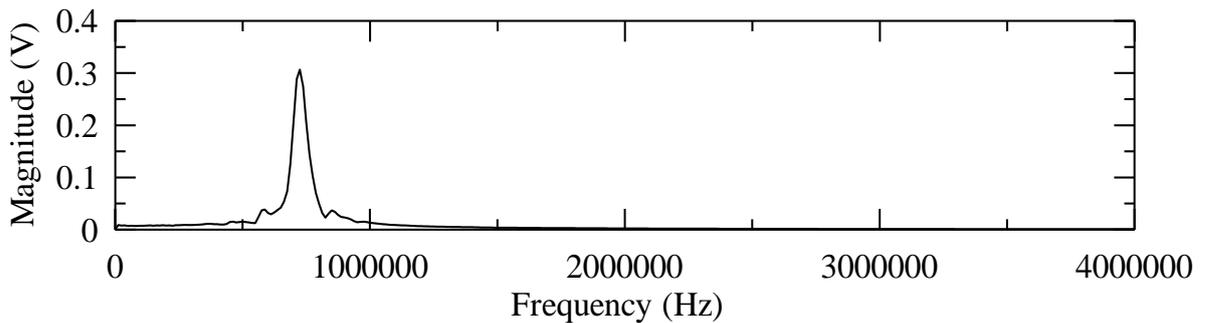


圖 4.45 自由狀態之 APFC 的暫態訊號量測實驗示意圖



(a)



(b)

圖 4.46 電極間距 1mm 之 APFC 於自由狀態接收 730kHz 正弦單脈衝激發的板波(a)暫態訊號及(b)頻譜

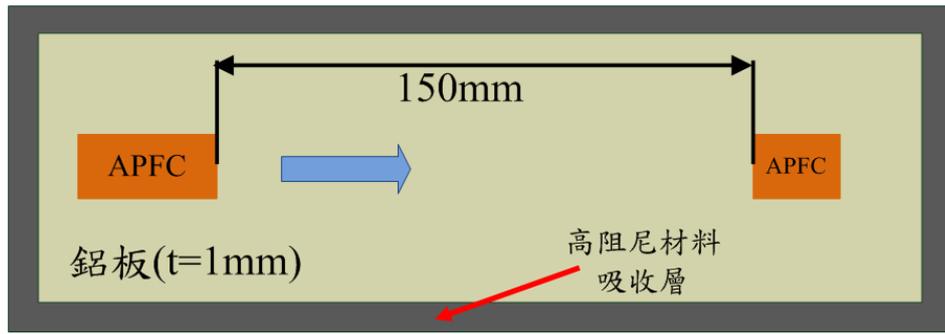
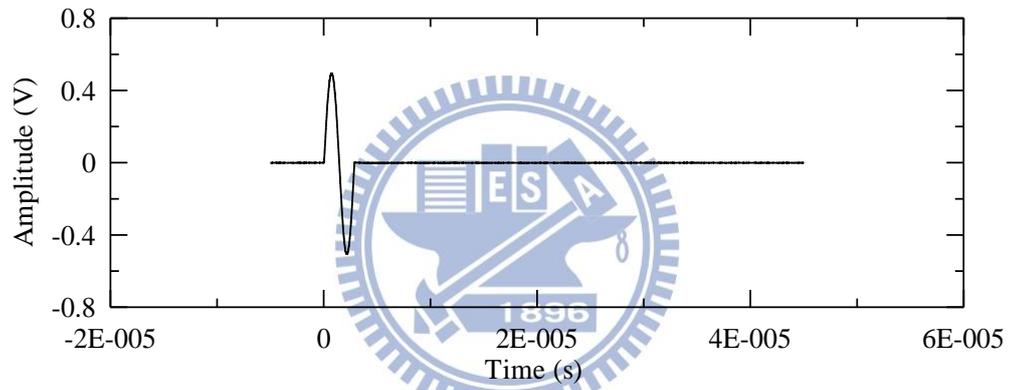
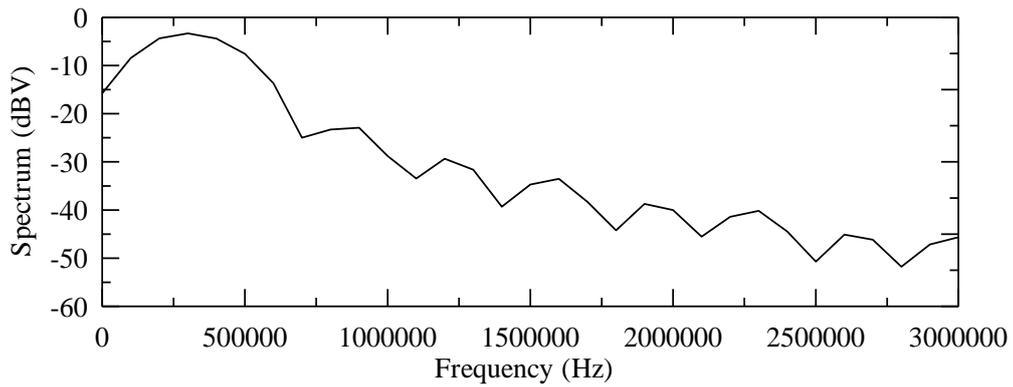


圖 4.47 黏貼於鋁板之兩組 APFC 激發及量測暫態訊號實驗示意圖

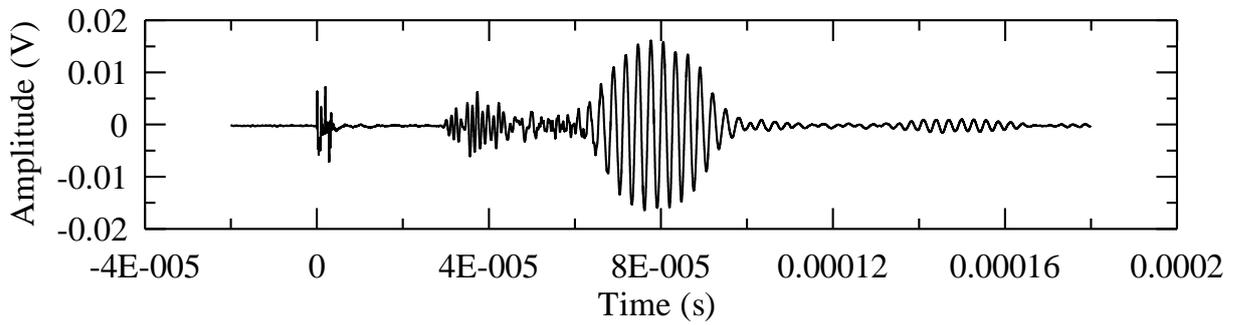


(a)

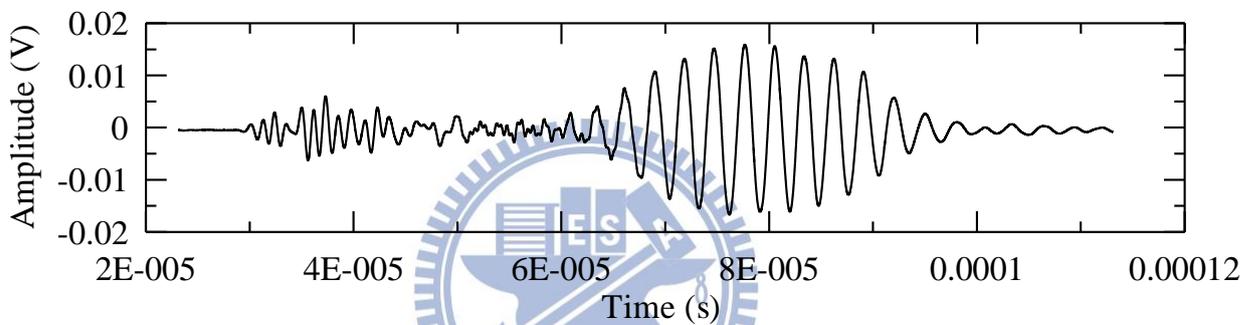


(b)

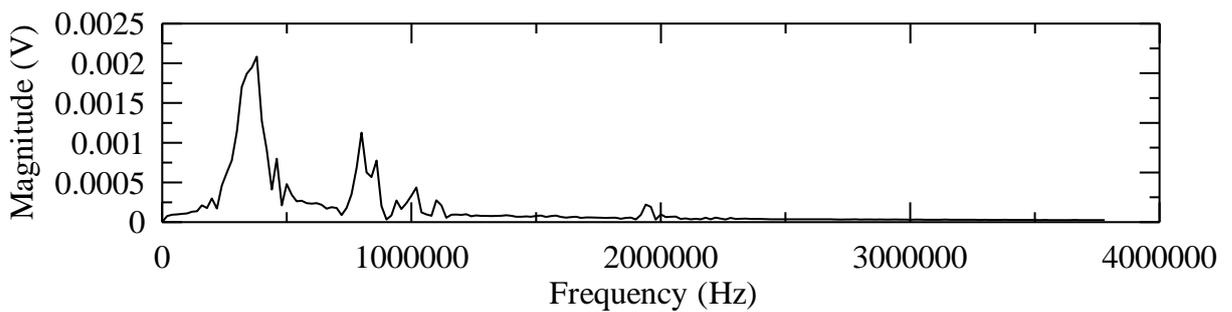
圖 4.48 350kHz 之正弦單脈衝的(a)暫態訊號及(b)頻譜



(a)



(b)



(c)

圖 4.49 電極間距 1mm 之 APFC 接收 350kHz 正弦單脈衝激發之鋁板板的 (a) 暫態訊號、(b) 訊號局部放大及 (c) 頻譜

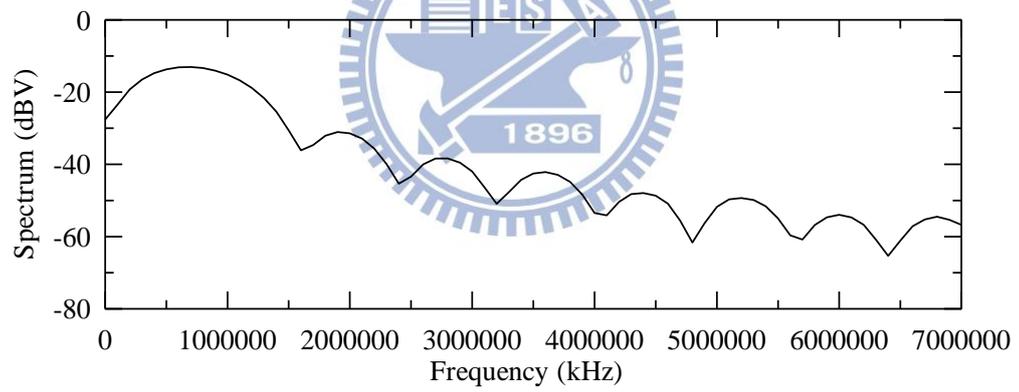
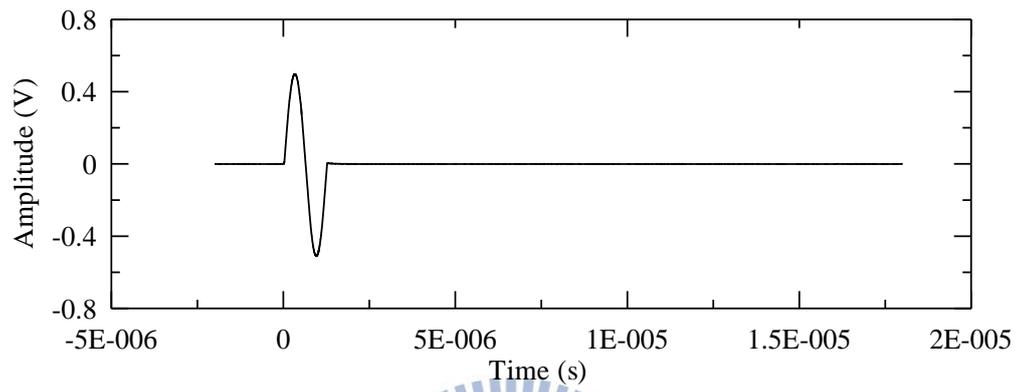
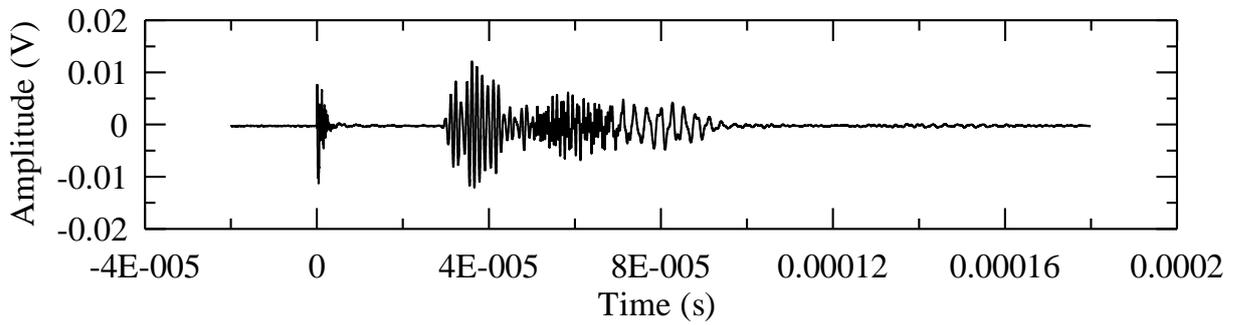
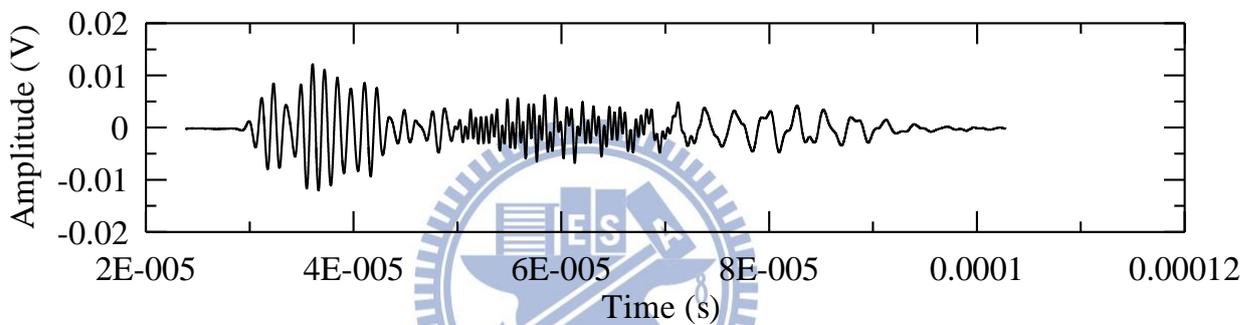


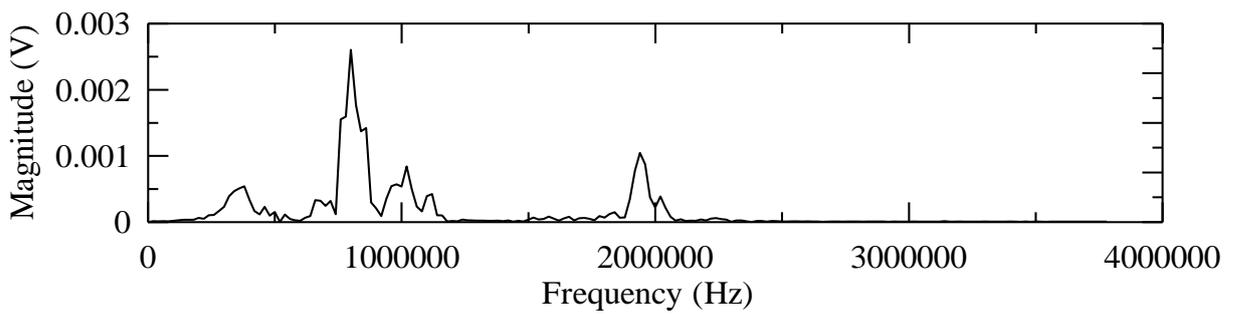
圖 4.50 800kHz 之正弦單脈衝的(a)暫態訊號及(b)頻譜



(a)



(b)



(c)

圖 4.51 電極間距 1mm 之 APFC 接收 800kHz 正弦單脈衝激發之鋁板板的(a)暫態訊號、(b)訊號局部放大及(c)頻譜

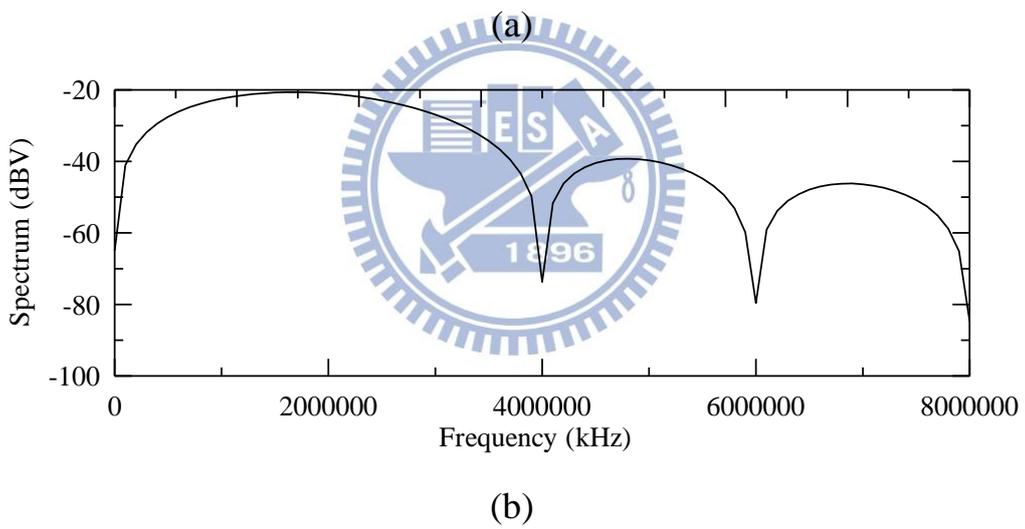
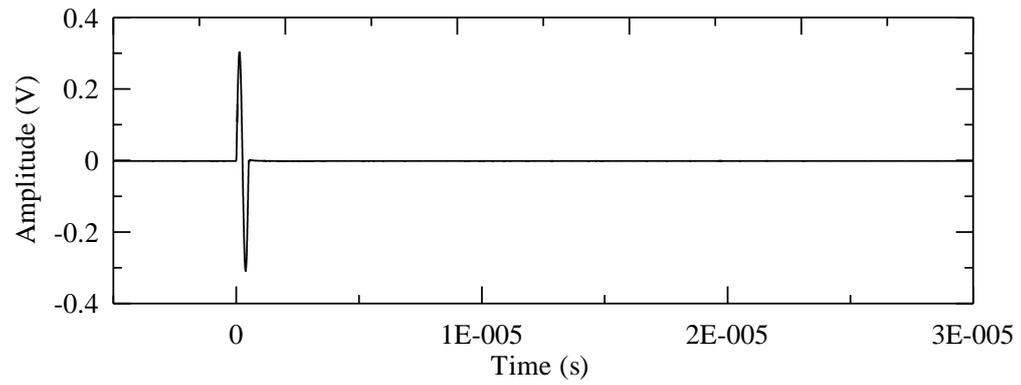
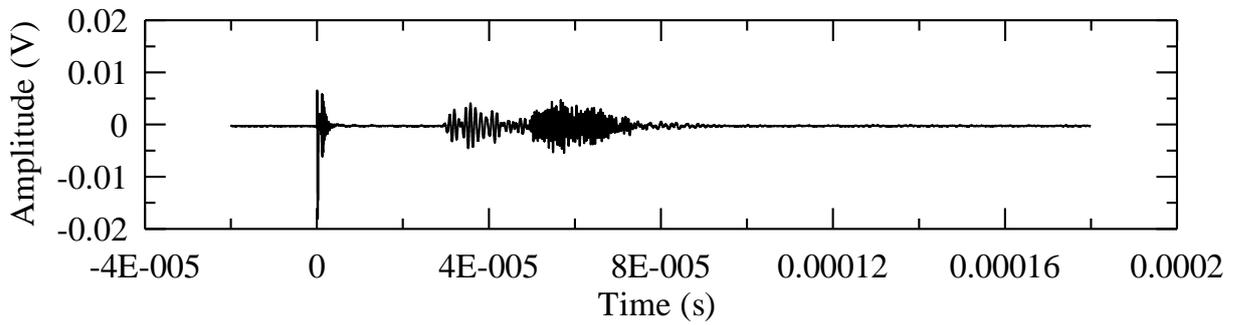
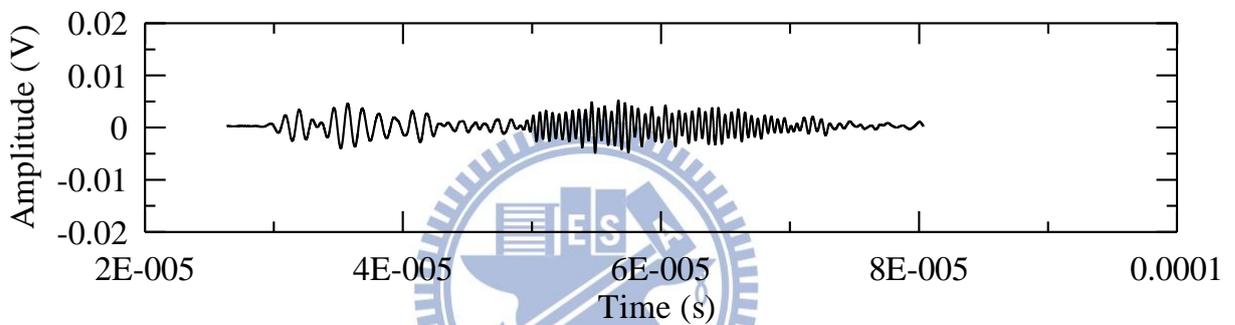


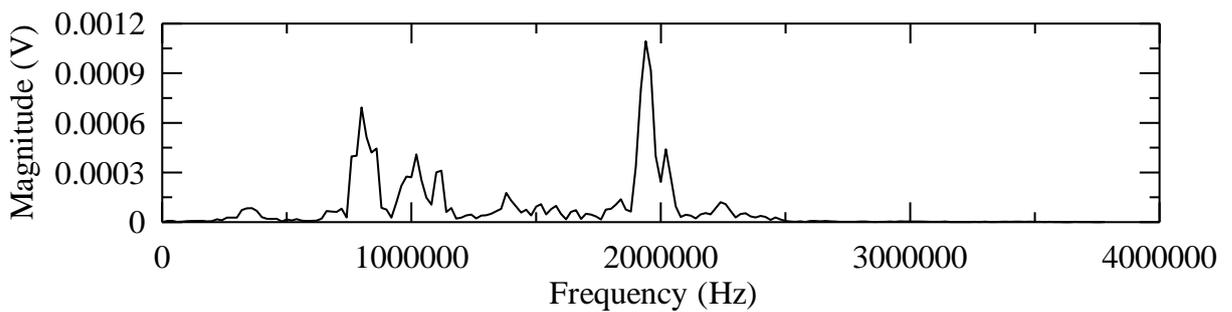
圖 4.52 2MHz 之正弦單脈衝的(a)暫態訊號及(b)頻譜



(a)

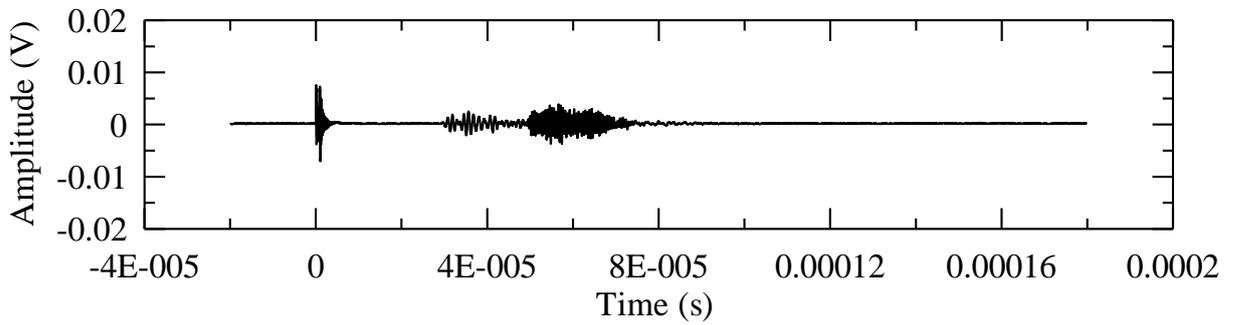


(b)

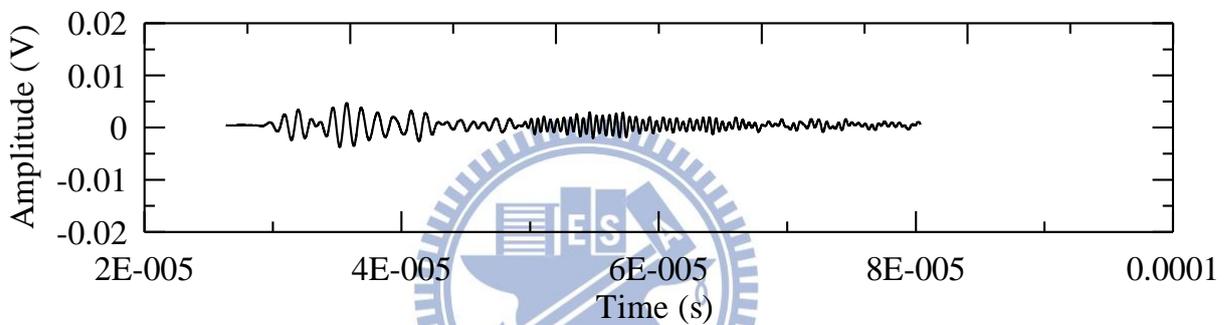


(c)

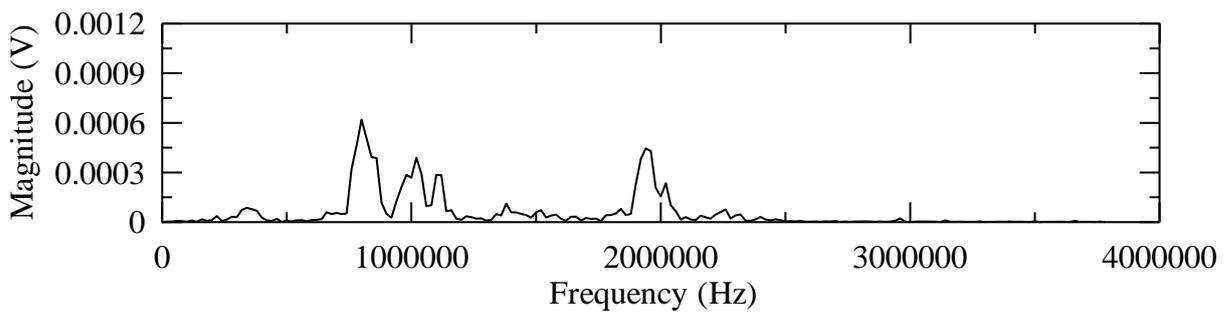
圖 4.53 電極間距 1mm 之 APFC 接收 2MHz 正弦單脈衝激發之鋁板板波的(a)暫態訊號、(b)訊號局部放大及(c)頻譜



(a)



(b)



(c)

圖 4.54 電極間距 1mm 之 APFC 接收 2MHz 正弦單脈衝激發之鋁板板波傳遞路徑加水滴的(a)暫態訊號、(b)訊號局部放大及(c)頻譜

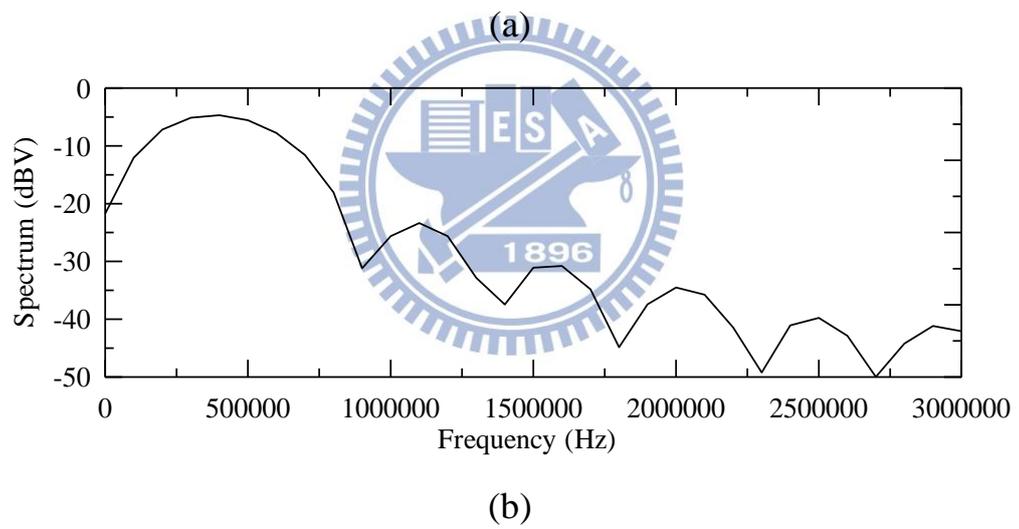
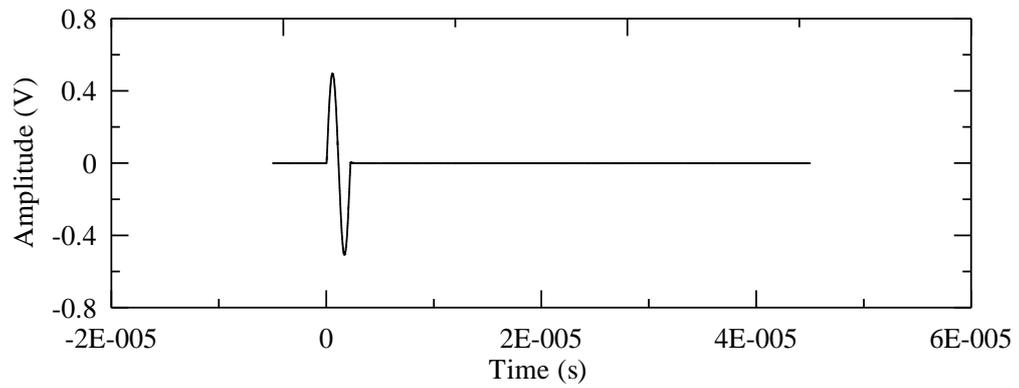
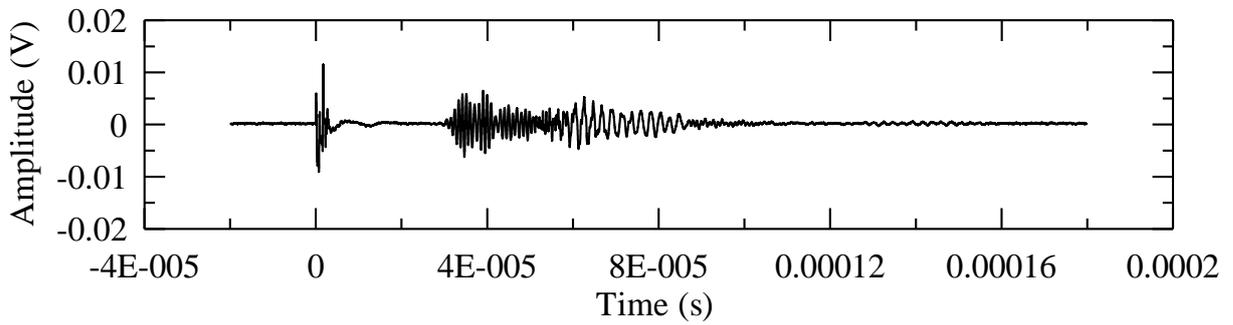
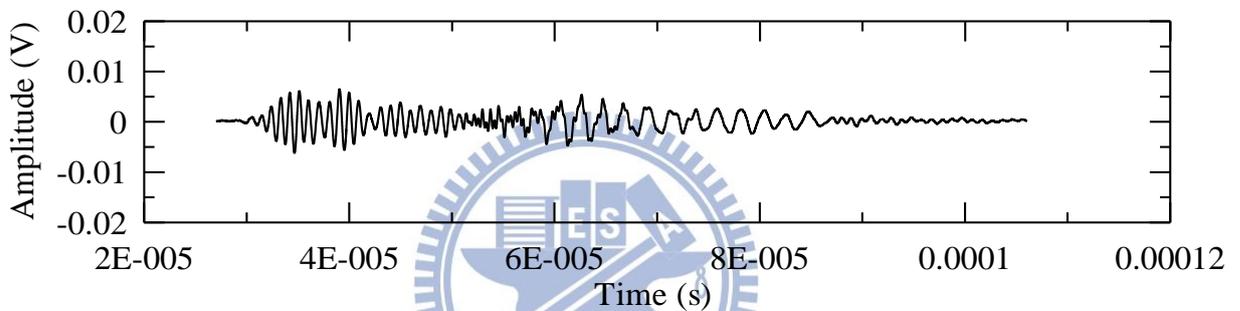


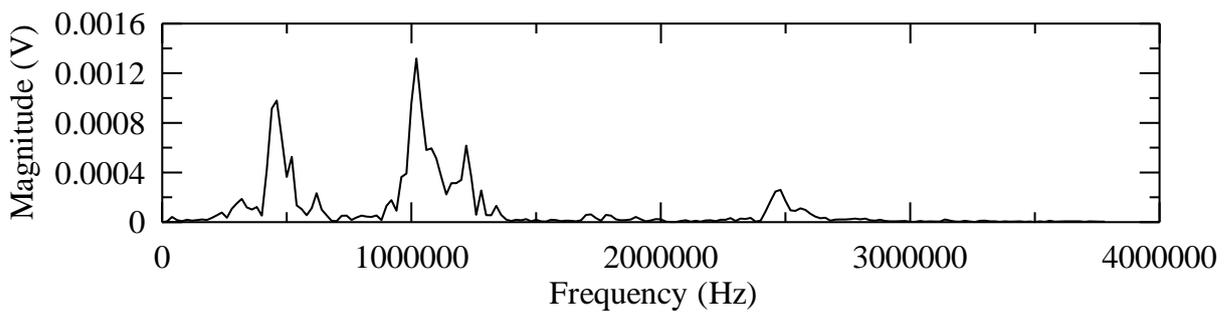
圖 4.55 450kHz 之正弦單脈衝的(a)暫態訊號及(b)頻譜



(a)



(b)



(c)

圖 4.56 電極間距 0.8mm 之 APFC 接收 450kHz 正弦單脈衝激發之鋁板板的 (a) 暫態訊號、(b) 訊號局部放大及 (c) 頻譜

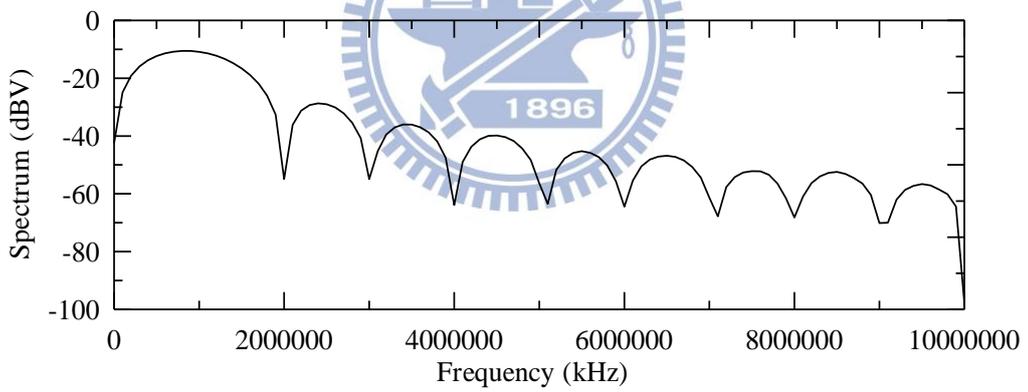
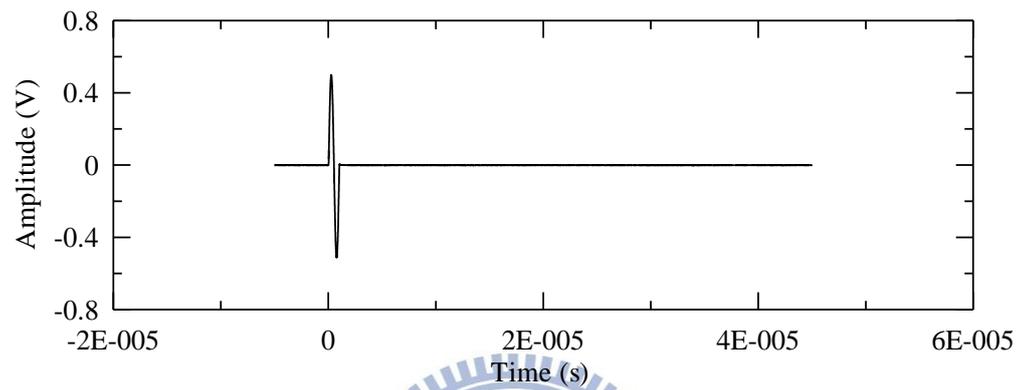
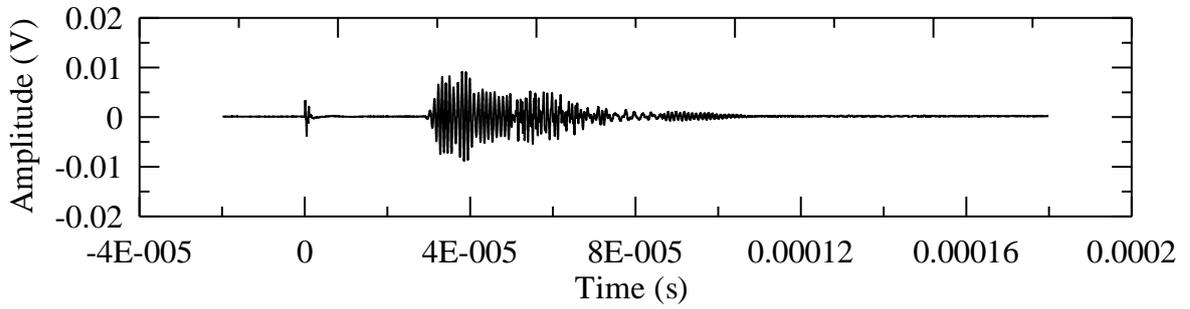
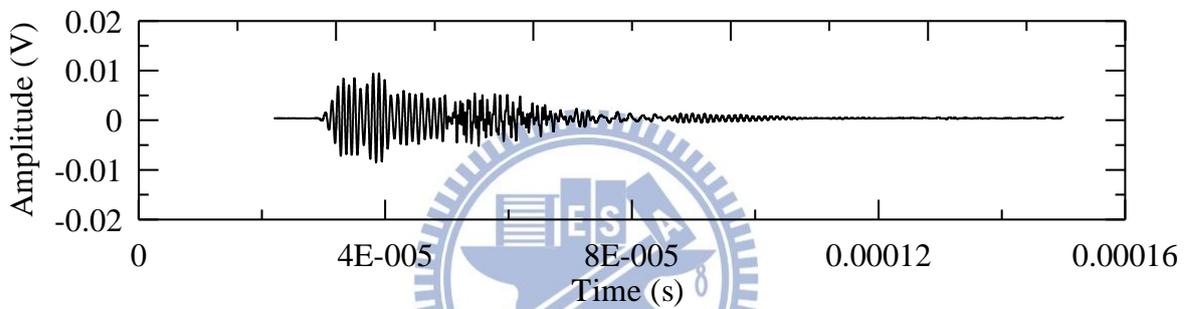


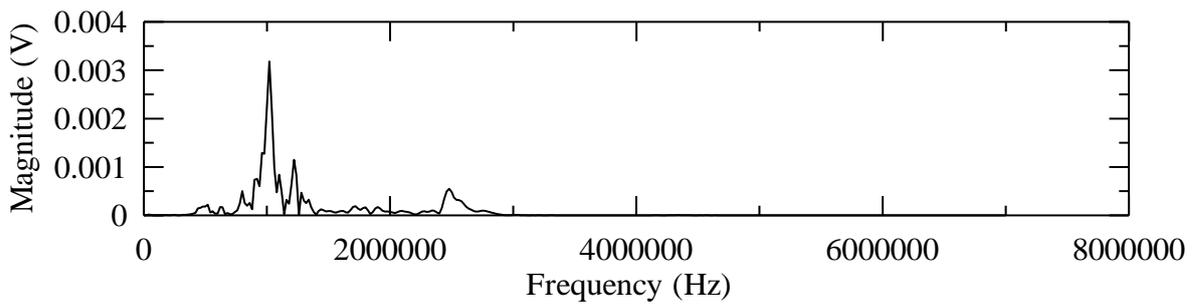
圖 4.57 1MHz 之正弦單脈衝的(a)暫態訊號及(b)頻譜



(a)



(b)



(c)

圖 4.58 電極間距 0.8mm 之 APFC 接收 1MHz 正弦單脈衝激發之鋁板板的(a)暫態訊號、(b)訊號局部放大及(c)頻譜

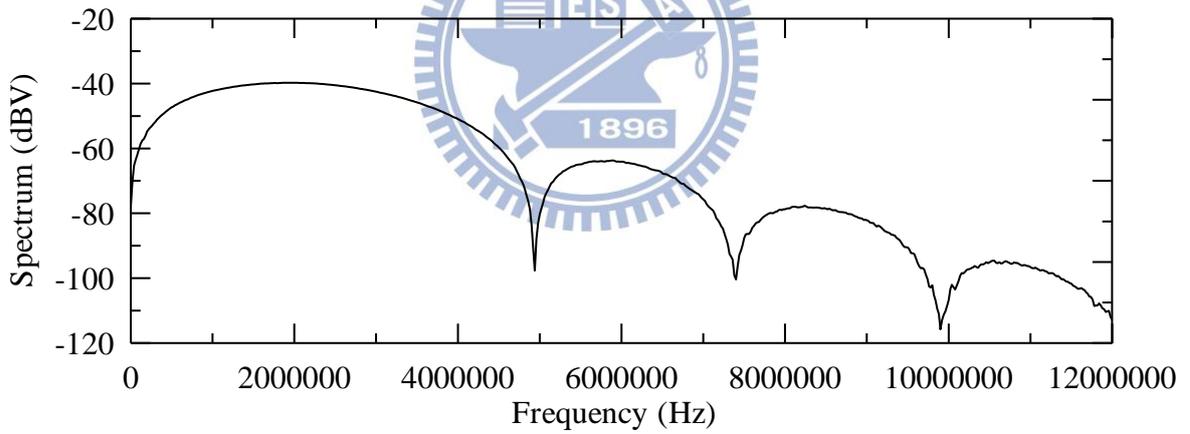
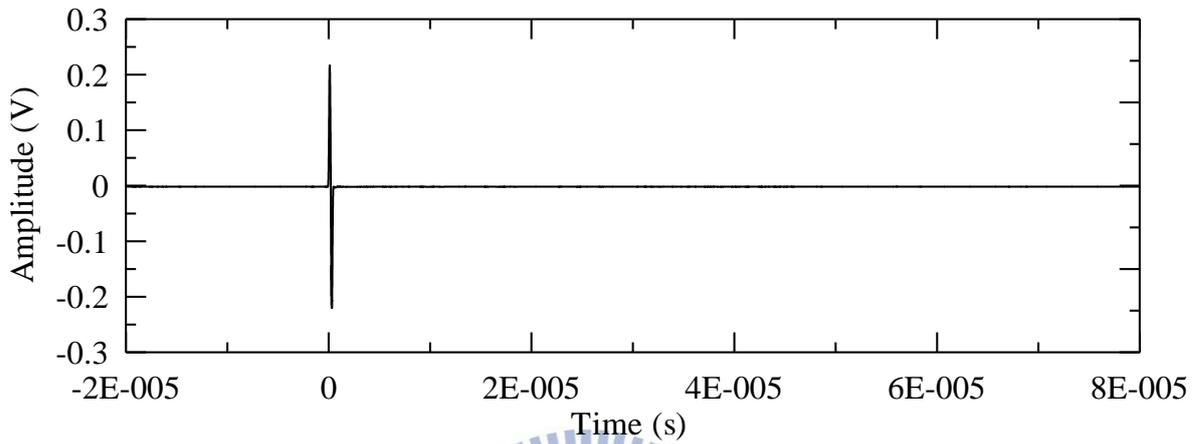
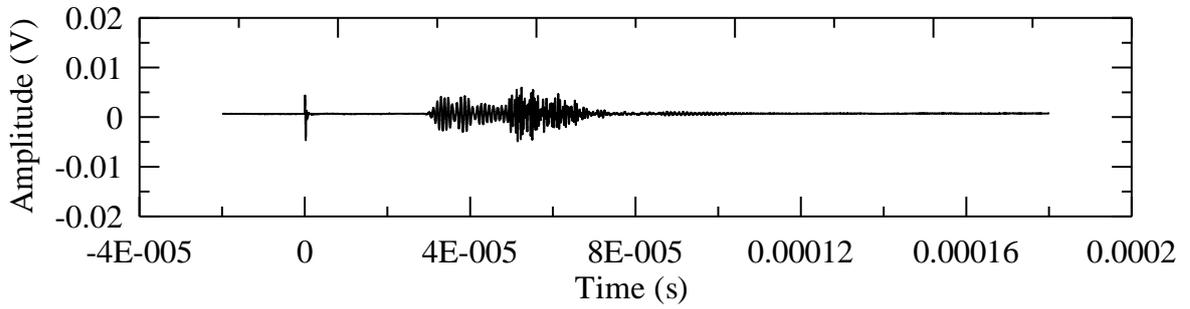
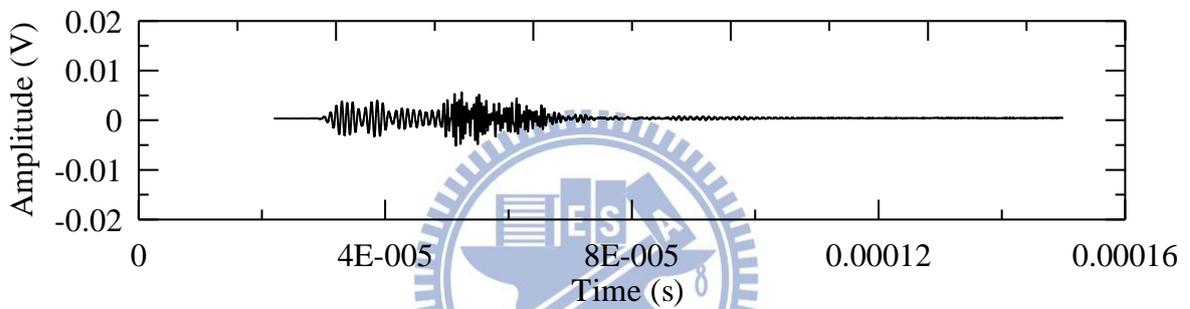


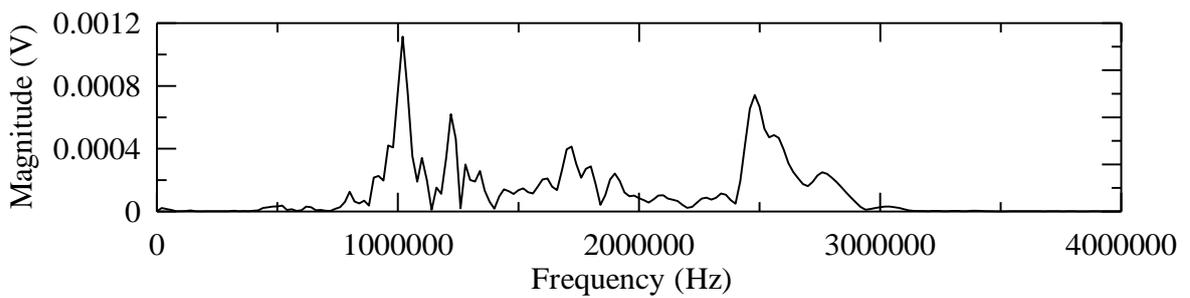
圖 4.59 2.5MHz 之正弦單脈衝的(a)暫態訊號及(b)頻譜



(a)



(b)



(c)

圖 4.60 電極間距 0.8mm 之 APFC 接收 2.5MHz 正弦單脈衝激發之鋁板板波的(a)暫態訊號、(b)訊號局部放大及(c)頻譜

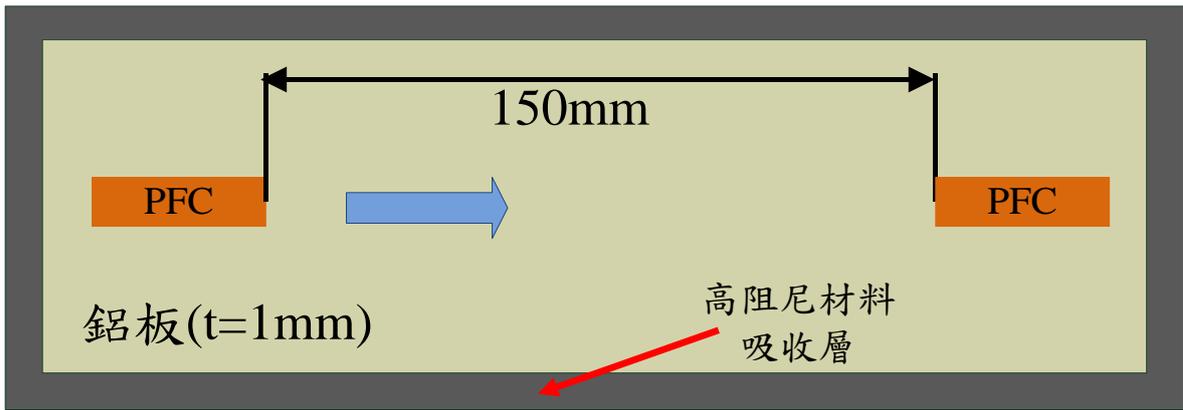


圖 4.61 黏貼於鋁板之 PFC 的暫態訊號量測試片示意圖

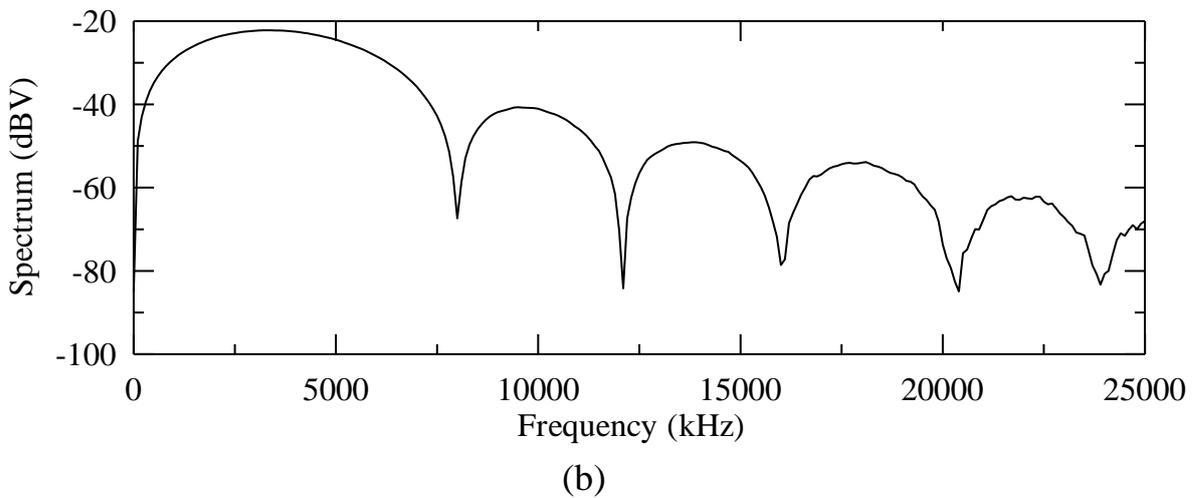
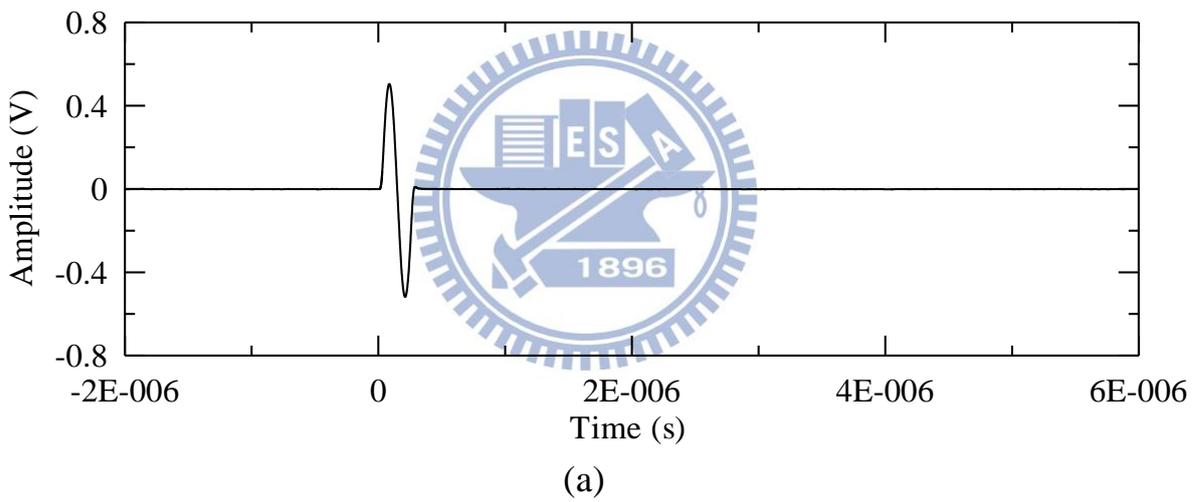
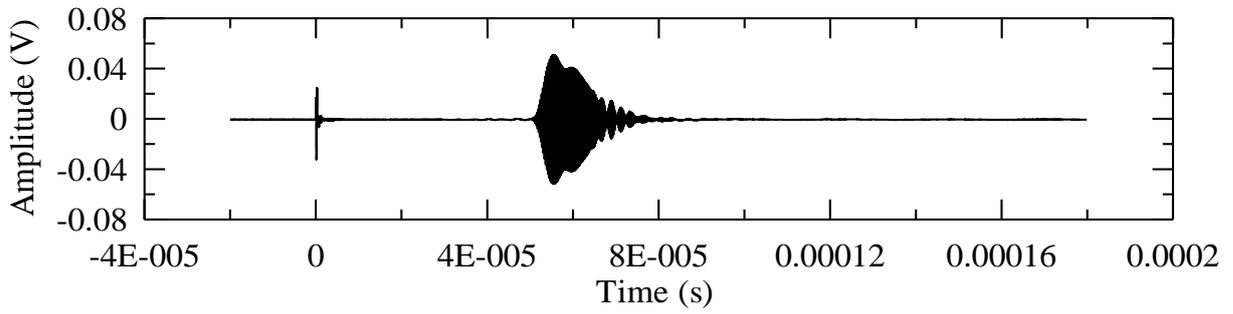
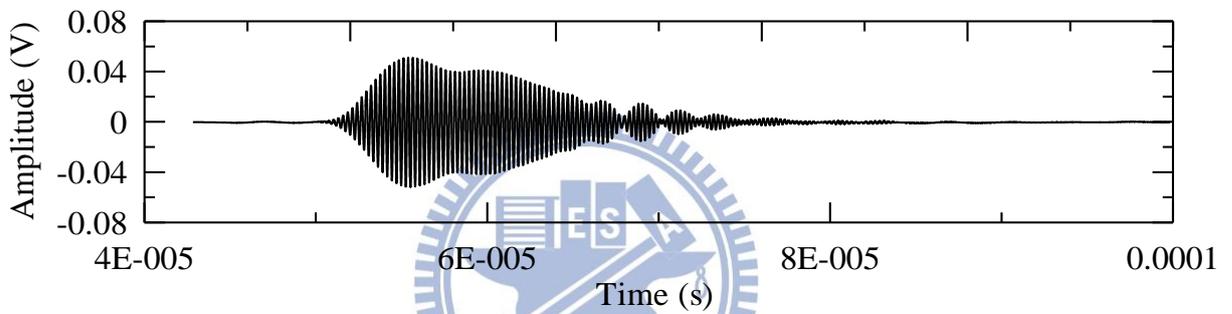


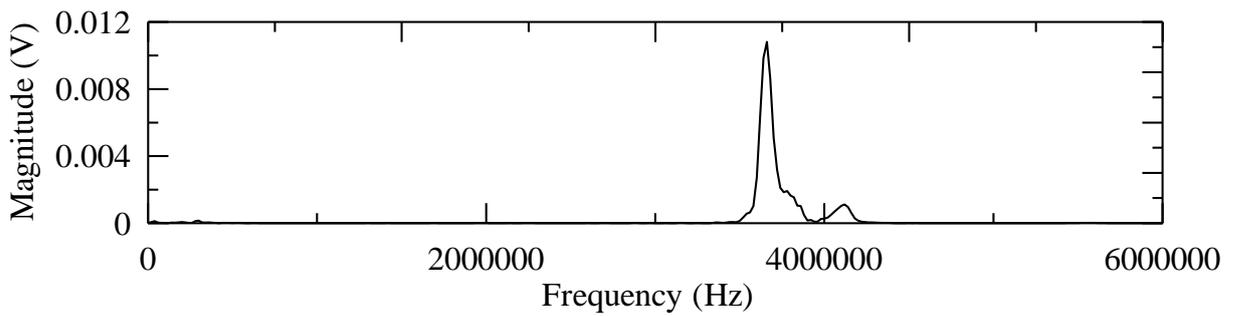
圖 4.62 4MHz 之正弦單脈衝的(a)暫態訊號及(b)頻譜



(a)



(b)



(c)

圖 4.63 長度 40mm 之 PFC 接收 4MHz 正弦單脈衝激發之鋁板板波的(a) 暫態訊號、(b)訊號局部放大及(c)頻譜

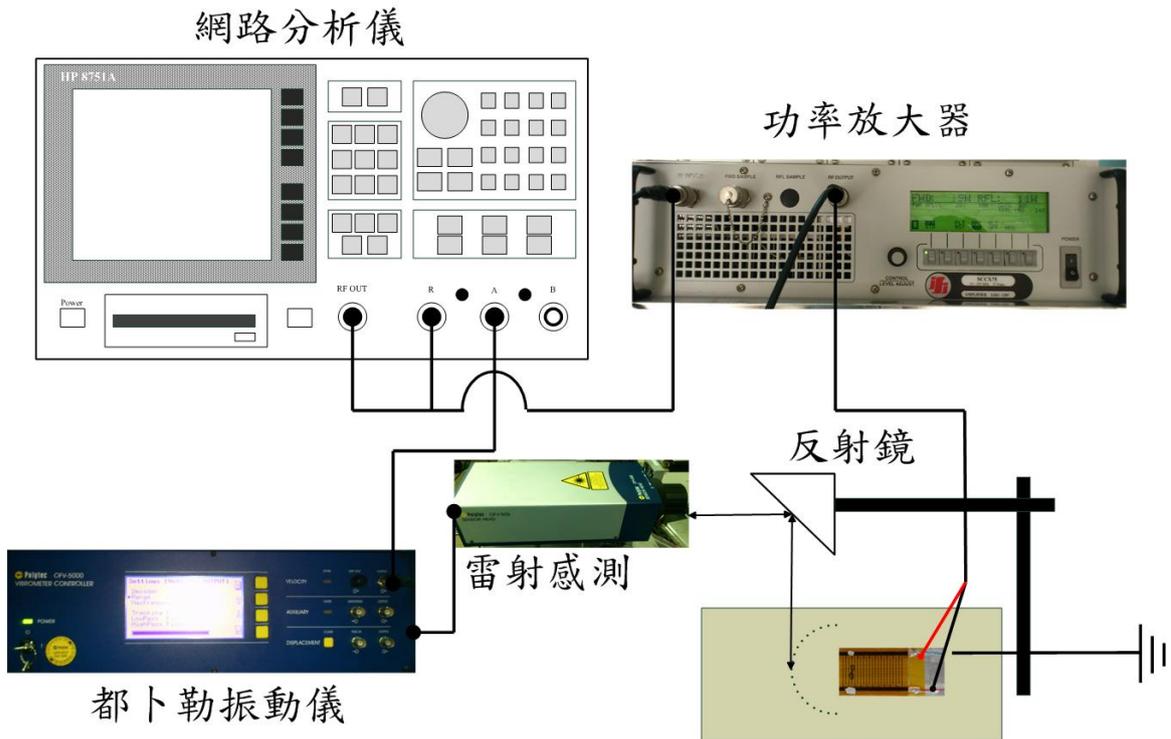


圖 4.64 雷射都卜勒量測實驗示意圖

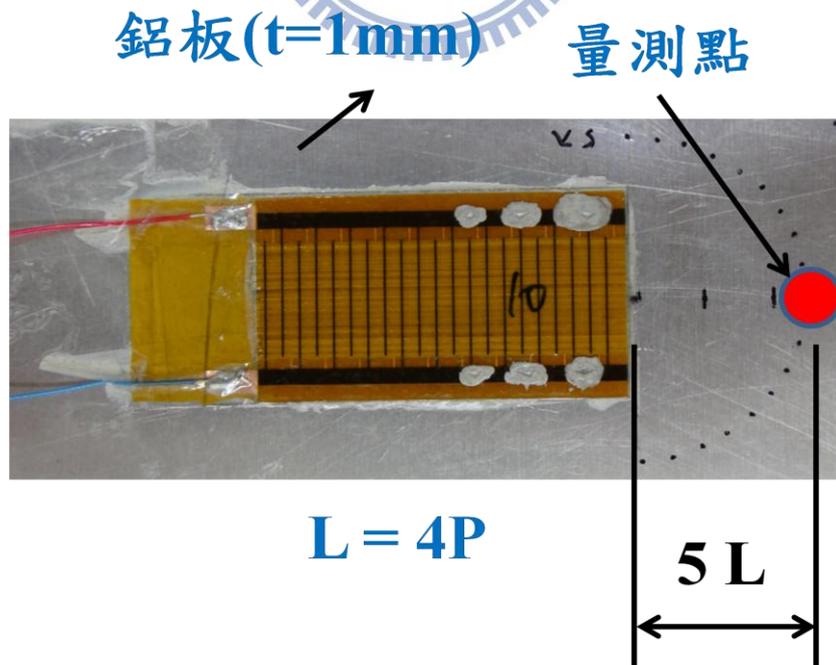


圖 4.65 APFC 黏貼於鋁板的頻率響應量測點示意圖

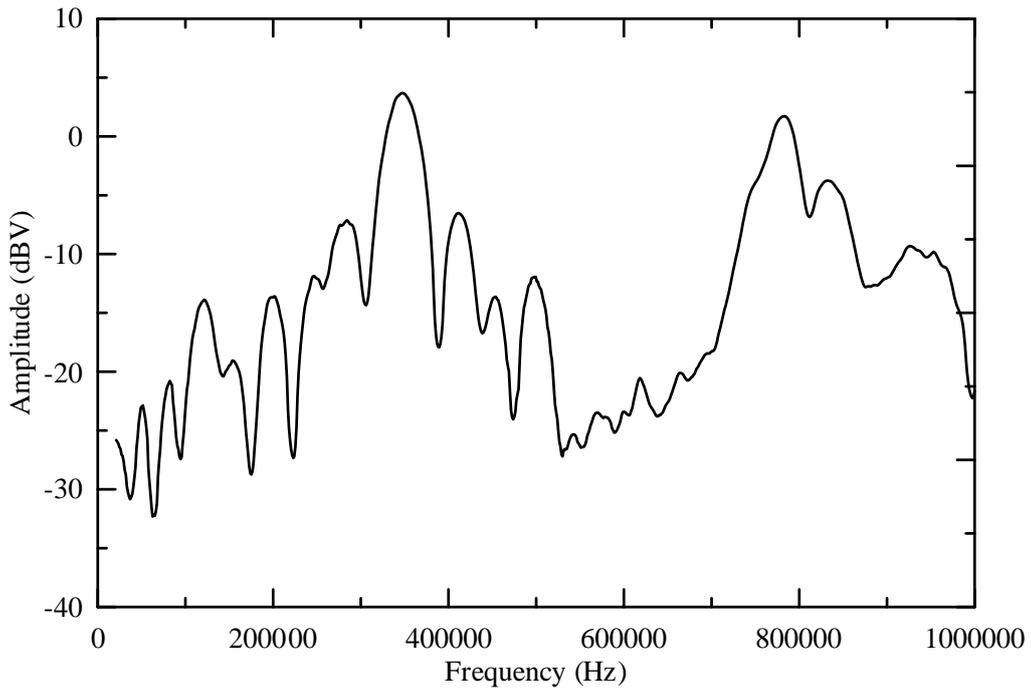


圖 4.66 電極間距 1mm 之 APFC 激發板波於 5 個波長遠處的頻率響應

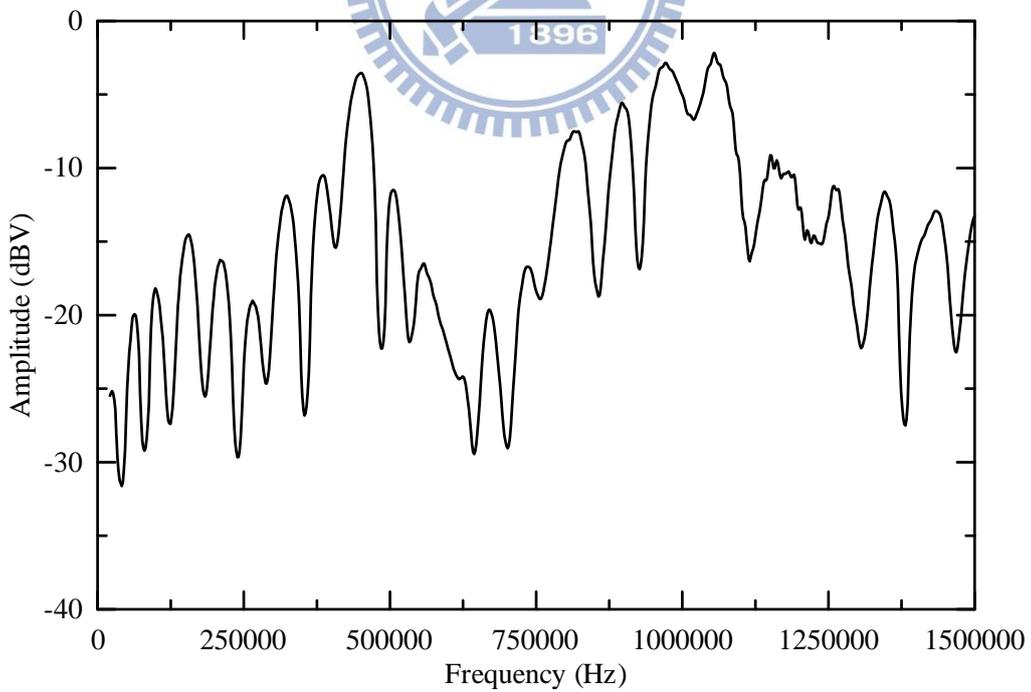


圖 4.67 電極間距 0.8mm 之 APFC 激發板波於 5 個波長遠處的頻率響應

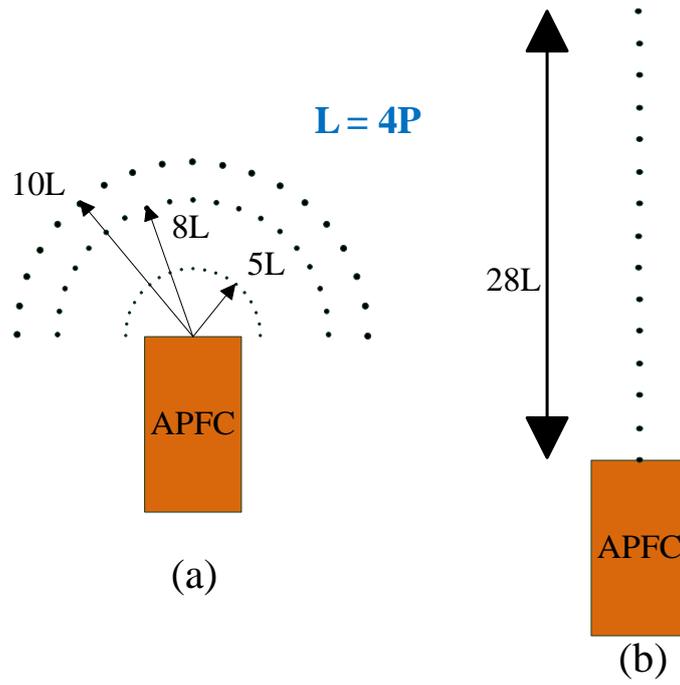


圖 4.68 都卜勒振動儀量測(a)APFC 激發板波聲場、(b)衰減量測點位置示意圖。

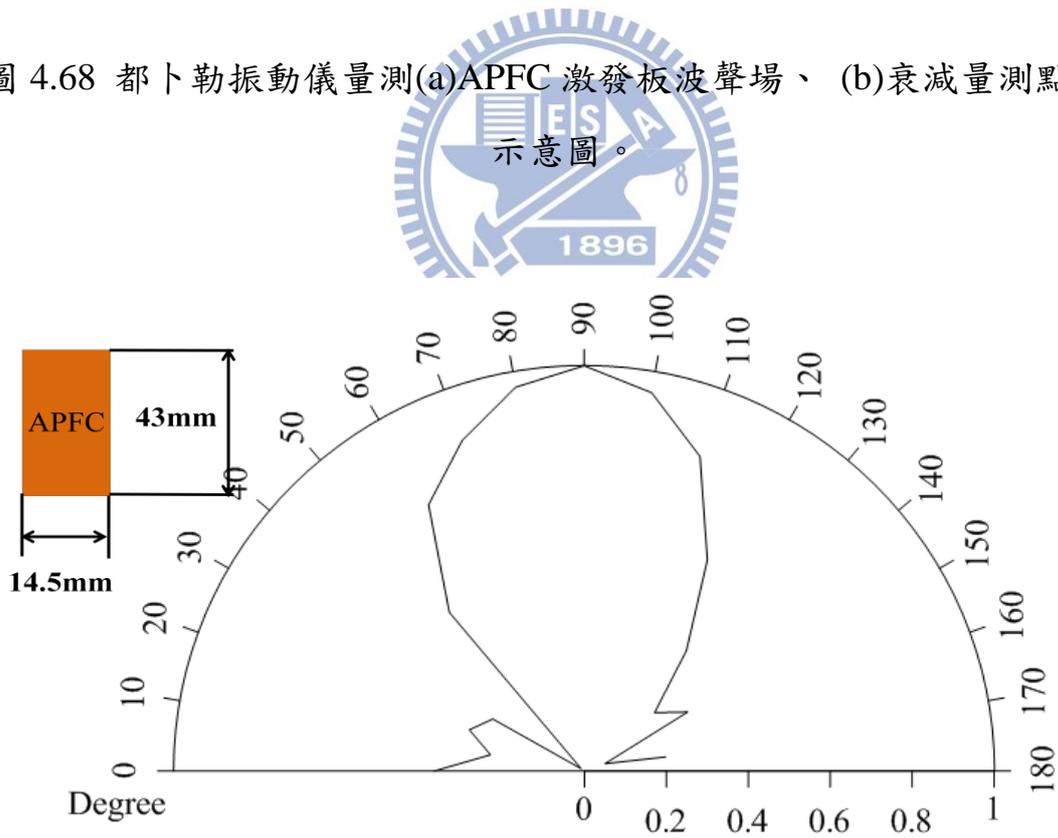


圖 4.69 具有 21 對電極間距 1mm 之 APFC 於距離 $5L$ 處的聲場極圖

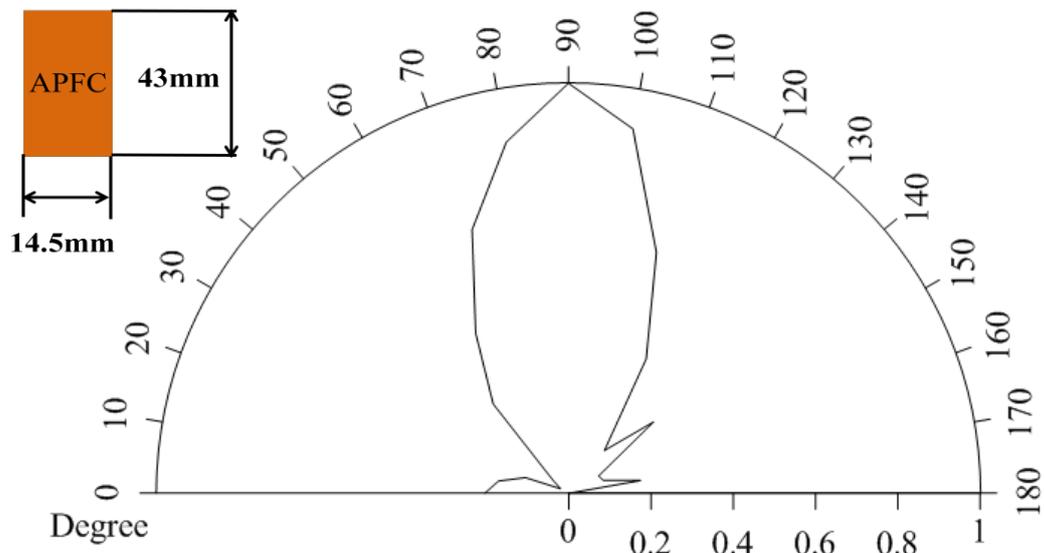


圖 4.70 具有 21 對電極間距 1mm 之 APFC 於距離 8L 處的聲場極圖

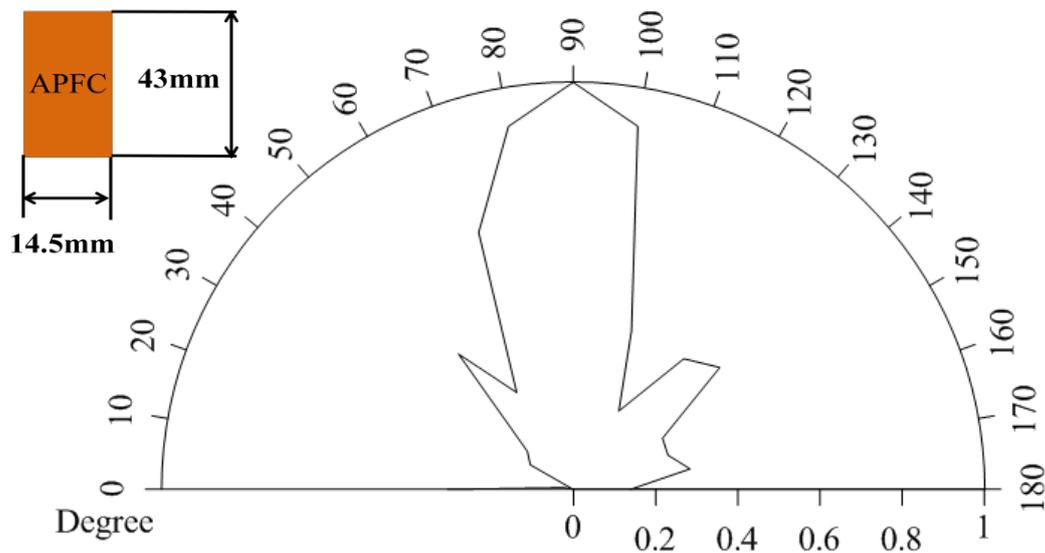


圖 4.71 具有 21 對電極間距 1mm 之 APFC 於距離 10L 處的聲場極圖

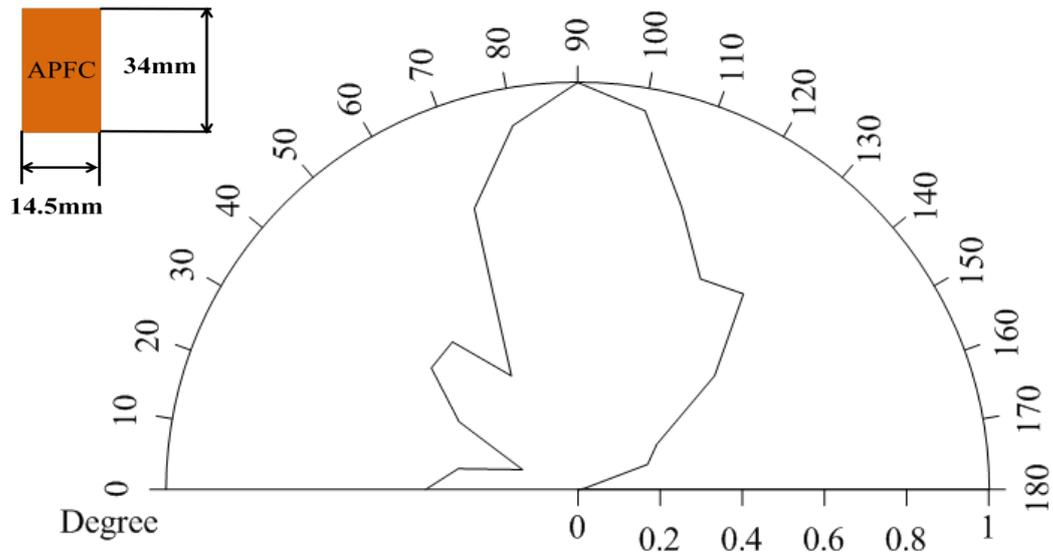


圖 4.72 具有 21 對電極間距 0.8mm 之 APFC 於距離 5L 處的聲場極圖

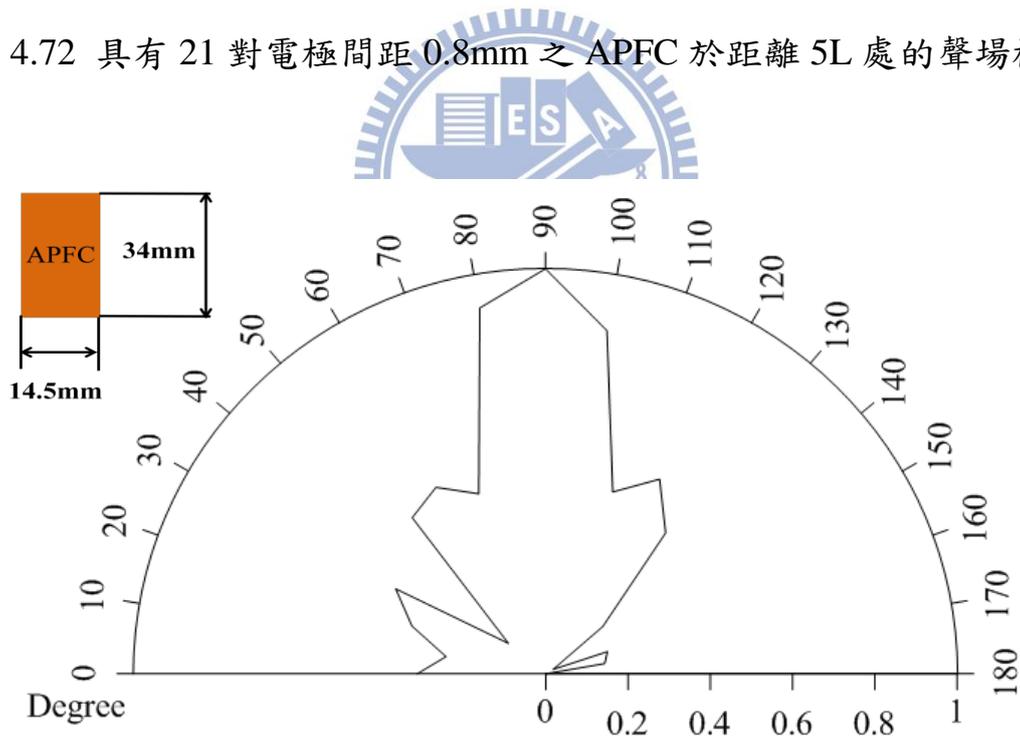


圖 4.73 具有 21 對電極間距 0.8mm 之 APFC 於距離 8L 處的聲場極圖

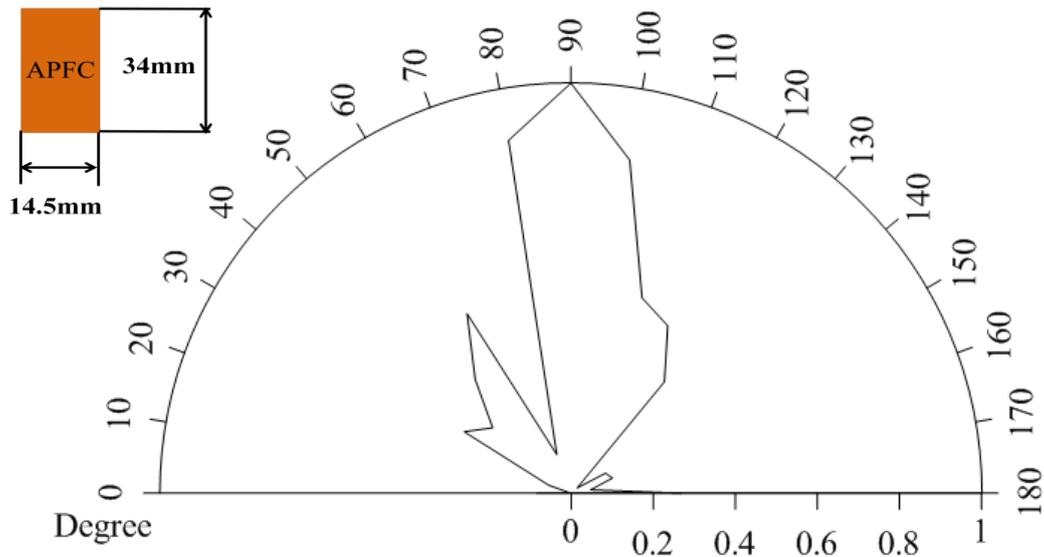


圖 4.74 具有 21 對電極間距 0.8mm 之 APFC 於距離 10L 處的聲場極圖

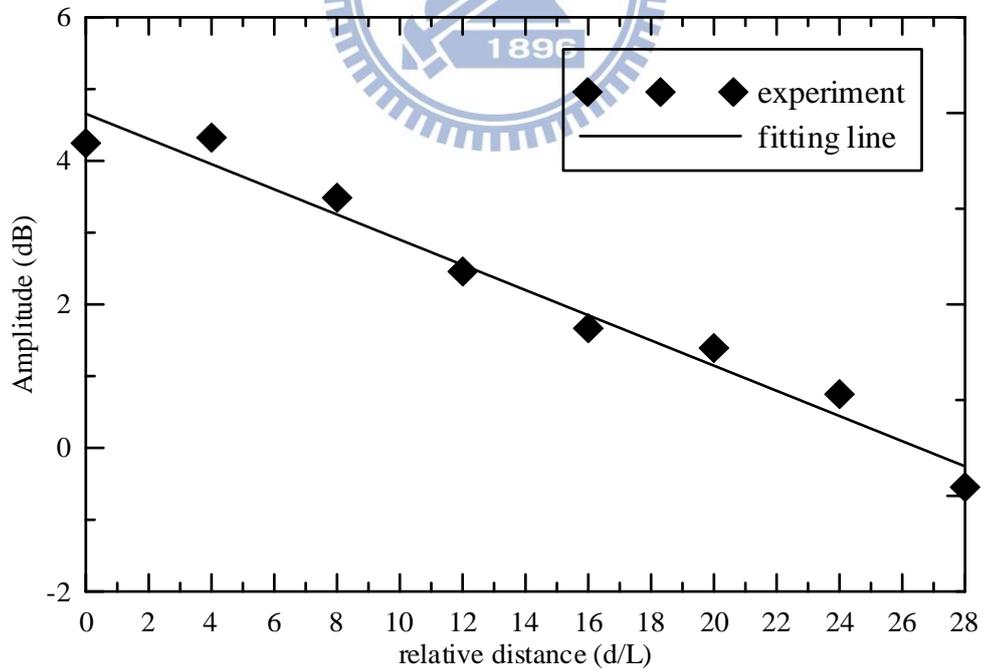


圖 4.75 具有 21 對電極間距 1mm 的 APFC 激發板波在中軸線上的訊號

衰減

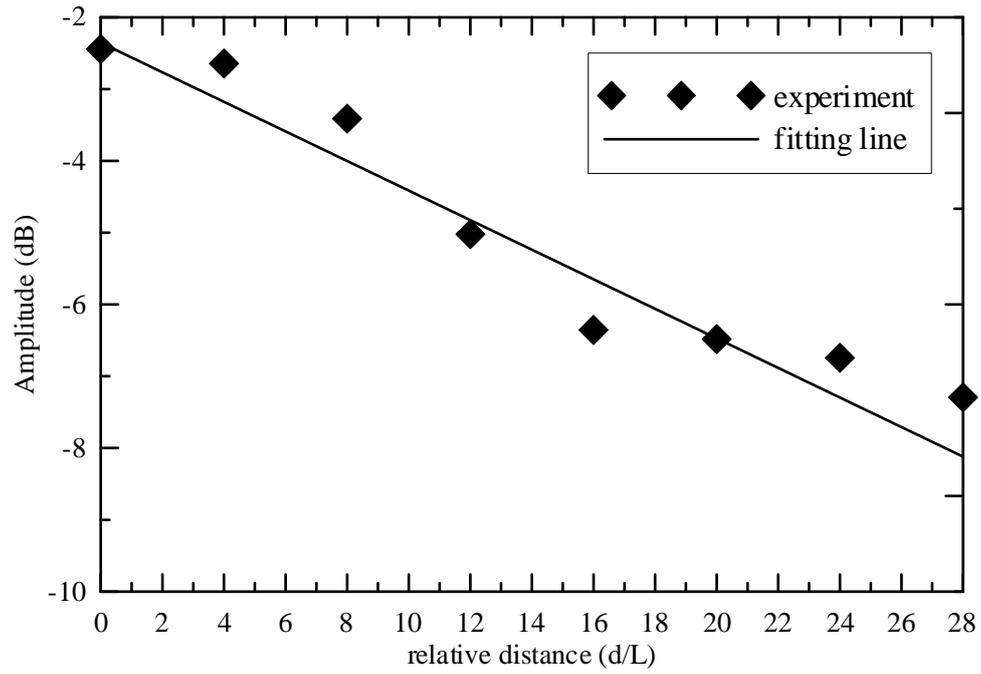


圖 4.76 具有 21 對電極間距 0.8mm 的 APFC 激發板波在中軸線上的訊號

