

國立交通大學
機械工程學系碩士班
碩士論文

具反對稱指叉電極之壓電纖維複材的模型分析與實驗評



Modeling and Experimental Evaluation of Antisymmetrical
Interdigitated Electrode Piezoelectric Fiber Composites

研究生：吳雨倩

指導教授：尹慶中 博士

中華民國一零二年七月

具反對稱指叉電極之壓電纖維複材的模型分析與實驗評估

Modeling and Experimental Evaluation of Antisymmetrical Interdigitated
Electrode Piezoelectric Fiber Composites

研究生：吳雨倩

Student : Yu-Chien 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
September 2013
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年九月

具反對稱指叉電極之壓電纖維複材的模型分析與 實驗評估

研究生：吳雨倩

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

本文以數值模型極實驗探討研發之反對稱排列指叉電極驅動壓電纖維複材(AE-PFC)的特性。AE-PFC 是以兩片具有指叉電極的軟性電路板，上下夾持著環氧樹脂黏合的單向排列壓電纖維，形成三明治複材結構。金屬條狀之指叉電極與壓電纖維的軸向垂直，提供極化與致動電場。黏貼 AE-PFC 於平板結構，施以週期電壓，可激發固定波長的撓性板波。本研究證實 AE-PFC 是具備低電壓驅動能力的導波換能器，具有結構健康監測的應用潛力。

數值分析的結果有助於改善低電壓驅動 AE-PFC 的能力，提高指叉電極寬度與兼具比例可增加極化電場強度，對稱排列的指叉電極能夠提供兩倍於反對稱者引致的極化電場強度，增加壓電纖維高分子母材之介電係數可以改善極化電場的均勻性。實驗量測 AE-PFC 激發之近場範圍與活塞探頭激發固定波長的菲涅耳區相當，但是大於數值分析獲得之附加值量影響驅的尺寸。

關鍵字：聲導波感測器、反對稱指叉電極、壓電纖維複材、結構健康監測

Modeling and Experimental Evaluation of Antisymmetrical Interdigitated Electrode Piezoelectric Fiber Composites

student : Yu-Chien Wu

Advisor : Dr. Ching-Chung

Yin

Department of Mechanical Engineering

National Chaio Tung University

Abstract

This thesis studies the characteristics of a novel guided wave transducer using numerical investigation and experimental measurement. The acoustic transducer called antisymmetric interdigitated electrode piezoelectric fiber composite (AE-PFC) is formed with a number of unidirectional piezoelectric fibers embedded in epoxy resin and sandwiched between two thin flexible sheets printed with interdigitated electrodes (IDE). The metal stripes of IDE perpendicular to the fibers provide the poling and actuating electric field. Constant wavelength flexural waves can be transmitted if the AE-PFC is adhered to a host plate and exerted by periodic voltages. This study indicates that the AE-PFC can be used as a low-voltage drive guided wave transducer with very good potential in application of structural health monitoring.

Numerical exploration benefits the improvement of low-voltage drive capability of AE-PFC. The induced poling electric field intensity increases as decreasing the space between two adjacent electrodes to the electrode width ratio. The intensity of electric field generated by the IDE aligned

symmetrically is twice as many as that placed anti-symmetrically. Increasing the dielectric constant of polymer matrix surrounding piezoelectric fibers will improve the homogeneity of electric field. Experimental evidence indicates that the measured acoustic near field transmitted from AE-PFC is approximate to the Fresnel zone formula of a piston transducer. It remains greater than of the influenced zone determined by added mass effect resulted from the transducer on the host plate.

Keywords: guided wave transducer, anti-symmetric interdigitated electrode, piezoelectric fiber composite, structural health monitoring



誌謝

非常感謝我的指導教授 尹慶中博士，在這兩年研究所求學過程中的細心教導與指點，使我在待人接物與做人處事上有十足成長，謝謝您。另外，十分感謝蕭國模教授、楊哲化教授與廖駿偉教授撥冗擔任口試委員，並給予我在研究與學習上的指點和建議，使論文得更完整的呈現，深表謝意。

感謝劉育翔學長不僅給予實驗上的鼎力相助，也在我碰到研究困難時給予各種建議。感謝許世明學長的時時叮囑與鞭策，和在研究瓶頸時給予我指點建議和幫助。

感謝學長姐吳旻修、李劭遠、鄒心慧與梁均帆給予我研究上的幫助與指導。感謝同學黃仲平、李柏勳與何家豪給予我修業與研究上的協助，也給予彼此鼓勵和協助，並帶給實驗室歡樂融洽的氣氛。感謝學弟妹羅憶青、張維霖、陳勁希與彭鈺原給予各種實驗上的協助與輔助，祝你們研究順利無礙。最後感謝我的家人在這兩年給予我精神上的支持與輔助，讓我能更專心致志於研究，由衷感謝各位。

僅以此論文

獻給所有關心我的人

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 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 文獻回顧.....	3
1.3.1 PFC 與 MFC 的發展演進.....	3
1.3.2 指叉電極的優化.....	4
1.4 內容簡述.....	5
第二章 理論說明.....	7
2.1 壓電材料.....	7
2.1.1 壓電效應.....	7
2.1.2 壓電材料的本構方程式.....	8
2.2 單向波傳的指叉電極佈置.....	9
2.2.1 波傳的建設性干涉.....	10
2.3 有限元素分析法.....	11
2.4 正交性平板之板波波傳.....	13
2.5 小波轉換.....	16

第三章	實驗模型的分析與討論.....	17
3.1	對稱極化與反對稱極化.....	17
3.1.1	AE-PFC 極化電場模擬.....	17
3.1.2	前處理.....	18
3.1.3	量化結果比較.....	19
3.1.4	電場比較.....	20
3.1.5	改良環氧樹脂之極化電場.....	21
3.2	時諧分析.....	22
3.2.1	電極間距(s)與電極寬度(w)的比較.....	22
3.2.2	AE-PFC 自由狀態阻抗分析.....	24
3.3	AE-PFC 黏於鋁板之阻抗分析.....	25
3.3.1	材料係數量測.....	25
3.3.2	阻抗響應分析結果.....	26
3.3.3	基板對於傳遞板波激發的影響.....	26
3.4	AE-PFC 頻散曲線模擬.....	28
第四章	實驗的量測與討論.....	30
4.1	指叉電極與輔電極的設計.....	30
4.2	AE-PFC 製作程序.....	31
4.3	金相觀察與量測.....	32
4.4	自由狀態之 AE-PFC 共振頻率量測.....	33
4.5	鋁板的板波量測.....	34
4.5.1	實驗架構.....	36
4.5.2	波傳訊號與結果分析.....	36
第五章	結論.....	38

5.1	數值分析	38
5.2	實驗結果	39
5.3	未來工作展望	40
	參考文獻	41
	附表	44
	附圖	50



表目錄

表 1	材料係數 (x_3 方向極化)	44
表 2	波長=1mm, 不同比例電極的共振頻率	45
表 3	波傳方向元素分割量不同之共振頻率比較.....	45
表 4	固定電極比 s:w=1:1 之模擬共振頻率.....	46
表 5	Hostplate 模擬分割數量表	46
表 6	AE-PFC 金相觀測結構尺寸	47
表 7	自由狀態之 AE-PFC 阻抗響應的數值分析與實驗值比較.....	47
表 8	自由狀態之 AE-PFC 插入損失的數值分析與實驗值比較.....	48
表 9	自由狀態之 AE-PFC 實驗量測阻抗響應與插入損失比較.....	48
表 10	聲場訊號極值對照表	49



圖目錄

圖 1.1	壓電纖維複合材料(PFC).....	50
圖 1.2	MFC 爆炸示意圖	50
圖 2.1	壓電效應示意圖	51
圖 2.2	單向波傳示意圖	51
圖 3.1	(a)AE-PFC 極化示意圖與(b)電力線分佈.....	52
圖 3.2	(a) PFC 極化示意圖與(b)電力線分佈	52
圖 3.3	模態分析之電場模擬模型剖面圖	53
圖 3.4	模態分析之電場模擬模型網格圖	53
圖 3.5	對稱極化電場模擬模型	54
圖 3.6	反對稱極化電場模擬模型	54
圖 3.7	電場模擬模型示意圖(a)對稱極化(b)反對稱極化	55
圖 3.8	AE-PFC 壓電 纖維中心剖面電場強度 E_x 分量	56
圖 3.9	電場模擬結果不同縱截面示意圖	57
圖 3.10	於模型寬度(a)0 倍(b) 1/4 倍(c) 1/2 倍(d) 3/4 倍(e) 1 倍 位置之對稱極化 X 方向電場分量	58
圖 3.11	於模型寬度(a)0 倍(b) 1/4 倍(c) 1/2 倍(d) 3/4 倍(e) 1 倍 位置之對稱極化 Z 方向電場分量	59
圖 3.12	於模型寬度(a)0 倍(b) 1/4 倍(c) 1/2 倍(d) 3/4 倍(e) 1 倍 位置之對稱極化 Y 方向電場分量	60
圖 3.13	於模型寬度(a)0 倍(b) 1/4 倍(c) 1/2 倍(d) 3/4 倍(e) 1 倍 位置之反對稱極化 X 方向電場	61

圖 3.14	於模型寬度(a)0 倍(b) 1/4 倍(c) 1/2 倍(d) 3/4 倍(e) 1 倍 位置之反對稱極化 Z 方向電場分量	62
圖 3.15	於模型寬度(a)0 倍(b) 1/4 倍(c) 1/2 倍(d) 3/4 倍(e) 1 倍 位置之反對稱極化 Y 方向電場分量	63
圖 3.16	對稱電極生成之極化電力線(僅顯示模型上半部).....	64
圖 3.17	反對稱電極生成之極化電力線.....	64
圖 3.18	母材為混合 PZT 粉末與環氧樹脂之對稱極化電場(a) $\epsilon_{33}^T = 5\epsilon_0$ (b) $\epsilon_{33}^T = 211.25\epsilon_0$ (c) $\epsilon_{33}^T = 417.5\epsilon_0$ (d) $\epsilon_{33}^T = 623.75\epsilon_0$ (e) $\epsilon_{33}^T = 830\epsilon_0$	65
圖 3.19	電極中央環氧樹脂層之 X 方向電場.....	66
圖 3.20	電極間環氧樹脂層之 X 方向電場.....	66
圖 3.21	AE-PFC 時諧分析模型示意圖	67
圖 3.22	AE-PFC 時諧分析模擬模型圖	67
圖 3.23	AE-PFC 時諧分析模擬網格圖	68
圖 3.24	AE-PFC 時諧分析模型圖	68
圖 3.25	不同電極尺寸比例的單位電壓生成軸向(X-axis)應變響應 .	69
圖 3.26	不同電極寬度時的單位電壓生成軸向(X-axis)應變響應	69
圖 3.27	不同電極尺寸的阻抗分析曲線.....	71
圖 3.28	共振頻率與電極尺寸量化比較.....	72
圖 3.29	指叉電極間距(s)與寬度(w)為 0.4mm 之模擬阻抗響應曲線	72
圖 3.30	共振頻率下之AE-PFC 模態圖(a) U_x (b) U_y	73
圖 3.31	w=0.8mm , s=0.8mm 之 AE-PFC 模擬阻抗響應圖	73
圖 3.32	脈波回音法實驗架構.....	74
圖 3.33	縱波與橫波的回波示意圖.....	74

圖 3.34	AE-PFC 黏貼於鋁板的阻抗分析數值模型	75
圖 3.35	AE-PFC 黏貼於鋁板的 ANSYS 阻抗分析模型	75
圖 3.36	AE-PFC 黏於鋁板週期模型阻抗響應	76
圖 3.37	基板模擬數值模型示意圖	77
圖 3.38	分析節點位置	77
圖 3.39	基板模擬振盪曲線圖	78
圖 3.40	共振長度 $L=(a) 0.98(b) 2.13 (c) 3.29 (d)4.48 (e)5.72 (mm)$ 之 A_0 模態 U_x 位移分量等高線圖	78
圖 3.41	共振長度 $L=(a) 1.93mm (b)4.54mm (c)7.1mm$ 之 S_0 模態 U_x 位移分量等高線圖	79
圖 3.42	鋁板長度 L 與板波模態比較圖	79
圖 3.43	AE-PFC 模擬模型示意圖	80
圖 3.44	實際模擬模型	80
圖 3.45	AE-PFC 網格化模型	81
圖 3.46	2mm 鋁板頻散曲線，(a)ANSYS 數值計算結果及(b) 解析解[2]	81
圖 3.47	ANSYS 數值計算之 AE-PFC 頻散曲線圖	82
圖 3.48	S_0 模態振形圖	82
圖 3.49	A_0 模態振形圖	83
圖 3.50	A_0 的倍頻振動模態	83
圖 4.1	AE-PFC 構造的爆炸圖	84
圖 4.2	AE-PFC 模型與尺寸標示圖	84
圖 4.3	反對稱極化、反對稱驅動之 AE-PFC	85
圖 4.4	對稱極化、反對稱驅動之 AE-PFC	85

圖 4.5	輔電極設計概念.....	86
圖 4.6	單向波傳指叉電極設計.....	87
圖 4.7	壓電纖維排列於低黏性膠布.....	87
圖 4.8	指叉電極前置處理.....	88
圖 4.9	指叉電極與下電極黏貼半成品.....	88
圖 4.10	上電極與半成品黏貼示意.....	89
圖 4.11	AE-PFC 成品.....	90
圖 4.12	AE-PFC 冷鑲埋試片圖.....	90
圖 4.13	AE-PFC 截面金相圖.....	91
圖 4.14	AE-PFC 阻抗響應.....	92
圖 4.15	插入損失量測.....	93
圖 4.16	指叉電極激發之導波插入損失頻率響應.....	93
圖 4.17	AE-PFC 量測插入損失.....	94
圖 4.18	AE-PFC 的插入損失.....	94
圖 4.19	高斯脈波波型圖.....	95
圖 4.20	空間掃描待測元件.....	95
圖 4.21	以低黏性膠帶標示 AE-PFC 黏貼範圍.....	96
圖 4.22	暫態訊號量測實驗架構.....	96
圖 4.23	B-scan 實驗試片.....	97
圖 4.24	AE-PFC 激發之鋁板板波 B 掃描灰階圖.....	97
圖 4.25	X=0 mm 處時域訊號.....	98
圖 4.26	AE-PFC 激發之鋁板 A_0 板波振幅的空間分佈圖.....	98

第一章 緒論

1.1 研究背景

非破壞性檢測(non-destructive testing, NDT)應用於結構製造業及工業安全，在不改變或不破壞試驗對象完整性之下，檢測材料性質及瑕疵。NDT in Design 是在結構設計之初，即將非破壞檢測所需的孔道、空間融入構件的一種概念。逐漸發展成以內嵌於結構之壓電致動器與感測器，透過比較結構材料參與數幾何特徵的改變，定期檢查結構的損傷，可比傳統非破壞性檢測更節省檢測時間與經濟成本，逐漸蔚為主流。後者稱為結構健康監測系統(structural health monitoring, SHM)，透過內嵌感應器的響應分析，定時監測結構的損傷與退化。

鉛鈦酸鋯為一種人造壓電材料，只有質地脆硬及不易加工的特性。但隨著科技進步，壓電材料的成型製造技術有長足的進步，包含凝膠法(sol-gel)及壓電纖維等製造方法。目前製造壓電纖維的技術可分為切割法(dicing)、擠壓法(extruding)與雷射切割法(laser cutting)，其中又以擠壓法的製造成本最低、適合連續製造且可控制纖維線徑，本研究所使用的PZT-5A 纖維是一種以擠壓法製造的壓電纖維材料，壓電材料不僅著優異的致動與感測能力，其壓電係數 d_{33} 的值較大等優點，適合用作致動感測器的材料。

壓電材料若按固定比例與聚合物配置成壓電複合材料，其中的高分子材料環氧樹脂具有柔性好的優點，可以使壓電複合材料不僅限於平面檢測，更可服貼於圓弧形或曲面結構表面，因而擴充了傳統壓電材料的應用性。

初始的壓電纖維複材致動感測器應用範例為 PFC (piezoelectric fiber composites)，是一種以對稱指叉電極驅動壓電陶瓷，同時產生伸縮致動的元件，壓電纖維依其截面形狀可以分成方形及圓形兩類，方形纖維將壓電陶瓷基板切割細條狀而成，稱為 MFC(micro-fiber composite)，製作成本較高。圓柱形壓電纖維適合大量生產，將圓形壓電纖維含浸於環氧樹脂，上下表面貼撓性印刷電路高分子薄膜，形成三明治結構，稱為 AFC(active fiber composite)，是最常見之主動式壓電纖維複材。

AFC 的驅動電極是上下對稱排列的指叉電極，不適合作為波動致動器。反對稱指叉電極壓電纖維複材(anti-symmetric interdigitated electrode piezoelectric fiber composite, AE-PFC)則是一種由兩層反對稱排列指叉電極薄膜夾著壓電纖維，並以環氧樹脂黏合而成的三明治結構的導波換能器，比起 AFC，它仍保留了撓曲變形能力，黏貼於結構表面所激發的模態波長更接近自由板波的波長。此外，其具有質量輕盈與聲場高度指向性等優點，可作為嵌入式導波換能器與感測器。

1.2 研究目的

指叉電極驅動壓電纖維複材所產生的蘭姆波(Lamb wave)具有雙向傳遞的特質，在大尺寸結構上，蘭姆波的反射回波會因為傳遞距離遠而明顯地衰減，所以並不會有太顯著的影響。若 AE-PFC 應用於小尺寸結構的監測時，由於反射波傳遞距離並不遠，反射波干擾感測器接收波的現象就會變得十分明顯。為了增加 AE-PFC 的致動效應，如何藉由改變指叉電極的特徵結構，提高致動端產生的單位電壓應變(microstrain per unit volt)是本文的目的之一。

極化的結果會影響一個指叉電極驅動壓電纖維元件的驅動效應，一般而言，極化時的電壓越高，完成的試片阻抗值就會越低而更容易驅動，但極化電壓若過高則會使得試片直接短路而損壞，因此 AFC 元件的極化電極有其一定上限，從極化程序做改良效果會更為顯著。

透過建設性干涉產生單向波傳波形，驅動能量的需求減少，可以有效節能，故 AE-PFC 致動器產生單向波傳是改良 AE-PFC 導波換能器的重點之一。

1.3 文獻回顧

1.3.1 PFC 與 MFC 的發展演進

Bent 與 Hagood [1] 在 1997 年發展出了壓電纖維複合材料 (piezoelectric fiber composites, PFC)，如圖 1.1 所示，以環氧樹脂黏合單向排列壓電陶瓷纖維，並與上下兩層的指叉電極結合，形成三明治結構，提升了形變能力與撓曲性，可黏貼於各種曲面結構表面上。此外，還建立了均質材料模型，探討不同體積比時材料係數的關係，量測結果與數值分析相近。

Veidt et al. [2] 2002 年，研究單晶壓電陶瓷之指叉換能器在異向性複合材料平板上激發的聲波特性的數值分析結果指出透過改變波數頻譜可以控制蘭姆波模態，採用一些簡單的公式估算出獨立波群的發出與抵達時間。

Henry et al. [3] 在 2003 年利用壓電複合材料致動器的高性能、靈活與耐久性的特色，研究了 MFC 對一個充氣結構的影響，MFC 構造如圖

1.2 所示，是一種方形纖維排列而成的壓電元件的構造，結果顯示 MFC 結合電與機械場的能力比單片壓電陶瓷優秀。也發現了 MFC 的致動與傳感器可以運用於尋找充氣結構的模態參數，並有效減少結構的振動損耗。

Bruner et al.[4]曾於 2004 年比較主動式壓電纖維複材(AFC)與市售音洩探頭的感測能力，結論是 AFC 在纖維方向具有較佳的靈敏度，可以振動方式產生訊號擾動。

Bunner et al.[5]於 2005 年提出主動式壓電纖維複材(AFC)在致動與感測方向上的優異表現，結論提到 AFC 具有結構健康監測的潛力，可用於 AE 監測及聲超音波(acousto ultrasonics, AU)的感測。

2011 年，黃室維 [6]將 PFC 的極化及驅動指叉電極由對稱改為反對稱，發展出具反對稱指叉電極的壓電纖維複材，是一種由兩層反對稱指叉電極夾黏壓電纖維而成的導波換能器。

2012 年，吳旻修 [7]將 AE-PFC 黏貼至燃料電池流道板背面，流道區域的兩端，做為反應生成水量檢測的感測器，發現激發出的導波有兩組波形，不同模態的導波時域訊號會產生干涉，也會發生邊緣反射回波。

1.3.2 指叉電極的優化

Rossetti et al.[8]等在 2000 年曾實驗發現壓電纖維複材的驅動效應受指叉電極和壓電纖維直徑的比例影響。當指叉電極尺寸與壓電纖維直徑的比例值越小，單位電壓所產生的應變值越大，代表致動效應越佳。除了電極的影響外，壓電材料的截面形狀也會對致動效果產生影響，實驗的結果顯示，截面形狀呈寬帶狀(ribbon)的纖維與指叉電極的接觸面積較大，纖維的體積比較高，致動能力較圓形截面的纖維佳。

Nelson et al.[9]在 2003 年製作體積比 0.2~0.72 的主動壓電纖維複材，比較模擬與量測之材料係數，求得纖維的材料性質。除此之外，也探討指叉電極的寬度間距與壓電基材的厚度對於致動能力的影響，結果顯示，當電極寬度為複材基板厚度的 1/2 時，會有最佳的致動效應。

Hube et al. [10]在 2003 年曾對主動式壓電纖維複材(AFC)的製作與極化過程提出最佳化的方法，結論提到極化電壓與 AFC 的自由振動有很大的關係，加大指叉電極與壓電纖維的接觸面積可有效降低能量損耗、提高致動能力。在製作過程中，熱壓的目的是在於增加壓電纖維與指叉電極之間的接觸。

Bowen et al [11]在 2006 年針對不同尺寸的 PFC 進行有限元素模擬比較，探討指叉電極的間距、寬度與壓電複材基板的厚度對 PFC 致動效應的影響，除了驗證指叉電極寬度與 PFC 厚度比為 0.5 時有最佳致動 [9]，也發現了在電極間距是 PFC 厚度的四倍時會產生最佳的應變。

2009 年，Deraemaeker et al [12]以 plane stress 與 unifrom field method (UFM)為假設，用混合律(mixture rule)計算壓電複材的等效材料係數，再以等效材料係數做有限元素模擬。結果顯示以混合律計算之壓電系數 d_{31} 與原始振動模態壓電系數 d_{31} 吻合，不受壓電陶瓷與環氧樹脂體積比例的影響。 d_{33} 則因模擬極化方向與實際極化的差異，在壓電陶瓷與環氧樹脂體積比低於 0.5 時，其混合律計算結果略大於實際值。

1.4 內容簡述

內文分為五個章節，第一章介紹研究背景、目的與文獻回顧。第二章則為相關理論說明，分別介紹了壓電材料特性、波傳的建設性干涉與有限元素數值計算方法，與一些計算理論。第三章為數值模擬分析，以

有線元素套裝軟體 ANSYS 分析理想條件下 AE-PFC 的波長頻散曲線與極化電場。第四章為實驗量測，介紹 AE-PFC 的製作方法與細部尺寸的量測，說明聲場激發的實驗架構與結果。第五章則為結論未來的工作方向。



第二章 理論說明

本章介紹壓電材料的壓電效應與其本構方程式、單向波傳 AE-PFC 的設計及 ANSYS 套裝軟體的模態分析原理。

2.1 壓電材料

壓電材料是一種具有應力場與電場耦合作用的材料，壓電材料可以分成壓電單晶體(如石英、氧化鋅)、壓電多晶體（亦稱壓電陶瓷，如鈦酸鋇、鋯鈦酸鉛 PZT）、壓電聚合物(如聚氟乙烯、聚氯乙烯)和壓電複合材料四種，本文研究的 AE-PFC 屬於後者。

常見的壓電複合材料為壓電陶瓷與聚合物（例如環氧樹脂）的兩相複合材料。這種複合材料融合壓電陶瓷及聚合物的優點，具有良好的柔韌性和成型能力，且擁有較低的密度、容易與空氣、水及生物組織等的聲阻(acoustic impedance)匹配。壓電複合材料具有機電偶和因子高的特點，因此在許多領域都有廣泛的應用。

2.1.1 壓電效應

壓電材料所具有的特殊壓電性(piezoelectricity)是一種機械能與電能互換的現象，最早在 1880 年由 Curie 兄弟發現，其產生原因是因為晶格內原子間電偶極矩均勻同向排列，使得材料有應力場與電場耦合的特性。部分天然的壓電材料本身即具均勻排列的電偶極矩，而人工壓電材料則需透過極化(polarization)，也就是施加強大的電場促使電偶極矩循電場方向整齊排列。

壓電效應可分為正壓電效應(direct piezoelectric effect)與逆壓電效應(converse piezoelectric effect)。參考圖 2.1 所示，施加一正向外力於壓電材料上時，材料內部電偶極矩會因壓縮而變短，而材料表面會產生與外力大小成比例的電場，抵抗外力造成的變化，當作用力相反時，則會產生反向電場，此即為正壓電效應；逆壓電效應則相反，當在壓電材料兩端施加電場（電壓），使得電偶極矩變長，壓電材料會沿電場方向伸長。這種通過電場作用而產生機械形變的過程稱為「逆壓電效應」，為一電能轉化為機械能的過程，正壓電效應和逆壓電效應中的材料係數是相等的，具有正壓電效應的材料也具有逆壓電效應。

2.1.2 壓電材料的本構方程式

壓電材料具有機械與電能轉換的特性，依選擇的自變數與應變數不同，本構方程式可以四種不同形態表示，分別為 d-form、g-form、e-form、h-form，此處以 e-form 做代表說明。

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e}^T \mathbf{E} \quad (2.1)$$

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

其中 \mathbf{S} 與 \mathbf{T} 分別表示為應變及應力張量矩陣， \mathbf{c}^E 是固定電場下的彈性勁度矩陣（matrix of elastic stiffness）， $\boldsymbol{\varepsilon}^S$ 是固定應變（constant strain）條件下的介電常數矩陣（matrix of dielectric constants）， \mathbf{e} 是壓電常數矩陣（matrix of piezoelectric constants）， \mathbf{e}^T 是壓電常數矩陣的轉置矩陣， \mathbf{E} 是電場矩陣， \mathbf{D} 則是電位移向量矩陣。

本研究所使用的壓電陶瓷纖維材料極化方向改為 x_3 ，平行於纖維材料的對稱軸，極化後的纖維具有橫向等向性，且其材料性質則以下列矩陣表示。

彈性剛度矩陣：

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^E & c_{11}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^E & c_{13}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^E \end{bmatrix}$$

(2.3)

壓電常數矩陣：

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(2.4)

介電常數矩陣：

$$\boldsymbol{\varepsilon}^S = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^S & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^S \end{bmatrix}$$

(2.5)

2.2 單向波傳的指叉電極佈置

為了減少反射回波對接收回波的影響與干擾，除了將接收端與發射端距離拉遠使不同模式的波分離外，另一個辦法則是在距離 AE-PFC 發

射端前方 $(N+1/4)\lambda$ 處設置另一組 AE-PFC，並以相位角相差 90 度的訊號驅動，形成建設性干涉，以產生單一方向的波傳，其中 N 為任意整數， λ 表 AE-PFC 驅動波長，與電極間距有關。

2.2.1 波傳的建設性干涉

為了求得兩波傳的建設性干涉條件，假設 A、B 兩組 AE-PFC 致動端的 x 方向波傳表示式分別為

$$u_A = e^{i(kx-\omega t)} + e^{i(kx+\omega t)} \quad (2.6)$$

$$u_B = e^{i[k(x-\xi)-\omega(t-\tau)]} + e^{i[k(x-\xi)+\omega(t-\tau)]} \quad (2.7)$$

其中 τ 表示波的延遲時間， ξ 表示 u_A 與 u_B 的初始位置差。

將式(2.6)與式(2.7)相加後即為兩波傳干涉的表示式，並區隔代表向左與向右的波傳如下：

$$u_A + u_B = e^{i(kx-\omega t)} \left\{ 1 + e^{-i(k\xi-\omega\tau)} \right\} + e^{i(kx+\omega t)} \left\{ 1 + e^{-i(k\xi+\omega\tau)} \right\} \quad (2.8)$$

倘若式(2.9)具有條件

$$e^{-i(k\xi-\omega\tau)} = 1 \quad (2.9)$$

與

$$e^{+i(k\xi+\omega\tau)} = -1 \quad (2.10)$$

則可構成波傳的建設性干涉，且其表示式如下：

$$u_A + u_B = 2e^{i(kx-\omega t)} \quad (2.11)$$

條件式(2.9)與(2.10)又可表示成

$$k\xi - \omega\tau = 2n\pi \quad (2.12)$$

與

$$k\xi + \omega\tau = (2n+1)\pi$$

(2.13)

將方程式(2.12)與(2.13)聯立，以波長 λ 與週期 T 代換波數 k 與角頻率 ω ，求解可得

$$\xi = (n + \frac{1}{4})\lambda$$

(2.14)

與

$$\tau = \frac{T}{4}$$

(2.15)

其中 T 與 λ 分別代表週期與波長，而式(2.14)與式(2.15)則為兩組致動器激發之一維時諧波形成建設性干涉，所需的位置條件與時間條件。

圖 2.2 為建設性干涉的簡單示意圖，兩組 AE-PFC 左端參考點的間距為 $(N+1/4)\lambda$ ，左邊紅色發射器激發出的紅色波與右邊藍色發射器激發出的藍色波相位角差 90 度，右傳聲波會透過建設性干涉造成兩倍振幅，同時達成單向波傳與節能的目的。

2.3 有限元素分析法

有限元素法(finite element method, FEM)是一種數值求解微分方程的技術，其基本概念是將連續場變數以多個片段連續函數(piecewisely continuous functions)近似。將微分方程式轉化為代數方程式，以標準的數值方法求解。

本文採用套裝有限元素分析軟體 ANSYS 進行 AE-PFC 致動器的動態特性分析。ANSYS 的模態分析與振動分析所指有區別，後者意指分析的方法，本文中的模態分析採用 ANSYS 的說法，意指模組功能。ANSYS 的模態分析用以分析結構或機械組件的振動特性(固有頻率及其對應的模態形狀)，它可以做為其他有限元素分析的起始點，例如在接觸分析下的非限制性檢測，或暫態分析的步進時間大小。模態分析的結果也可透過模態疊加法(mode-superposition methods)使用在諧波響應分析(harmonic response analysis)、隨機振動分析(random vibration analysis)或頻譜分析(spectrum analysis)等。本研究在此使用模態頻率分析(mode-frequency analysis)，此分析類型用於自然頻率和模態的判定。

考慮一個多自由度線性結構系統的運動方程式

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}$$

(2.16)

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。

在結構系統無阻尼與外力作用的情況下，考慮一個時諧(time harmonic)自由振動，

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\varphi}_i \cos \omega_i t$$

(2.17)

其中 ω_i 表示第 i 個自然頻率， $\boldsymbol{\varphi}_i$ 表示對應的特徵向量，則式(2.16)可表示成

$$(-\omega_i^2 \mathbf{M} + \mathbf{K}) \boldsymbol{\varphi}_i = 0$$

(2.18)

若 $\boldsymbol{\varphi}_i \neq 0$ ，則非零解(non-trivial solution)的充分條件為

$$|-\omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{K}| = 0 \quad (2.19)$$

上式可以求得式(2.16)的 n 個特徵值 ω^2 與其對應的 n 個特徵向量 Φ_i ，其中 n 為自由度。求解所得之角頻率與自然頻率的關係則如下式， f_i 即為自然頻率。

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (2.20)$$

2.4 正交性平板之板波波傳

假設一個板波在正交性材料構成的無窮大平板內傳遞，其位移函數可以表示如下：

$$u_k = U_k \exp[i(\xi_1 x_1 + \xi_2 x_2 + \zeta x_3 - \omega t)] \quad (2.21)$$

其中 U_k 為 x_k 方向的振幅分量， $k=1, 2, 3$ 。 ξ_1 與 ξ_2 分別表示 x_1 與 x_2 方向的波數分量。厚度 x_3 方向的波數為 ζ ，即 $\xi_3 = \zeta$ 。 $\xi_1 = (\omega/c) \cos \theta$ ， $\xi_2 = (\omega/c) \sin \theta$ ，其中 θ 為波傳方向與 x_1 軸的夾角。

由於 AE-PFC 所激發的應力波傳遞方向平行於壓電纖維複材的材料主軸， ξ_2 分量為零，將平板模型的矢狀平面(sagittal plane)設於 $x_1 x_3$ 平面，其位移函數為

$$u_k = U_k \exp[i(\xi_1 x_1 + \zeta x_3 - \omega t)] \quad (2.22)$$

已知平板的平衡方程式為

$$C_{ijkl} u_{k,j} - \rho \ddot{u}_i = 0 \quad (2.23)$$

令水平 x_1 方向傳遞的波數為 ξ ，即 $\xi_1 = \xi$ 。考慮壓電纖維複材材料係數具有對稱性，可將(2.23)轉化成

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} - \omega^2 \rho & 0 & \Gamma_{13} \\ 0 & \Gamma_{22} - \omega^2 \rho & 0 \\ \Gamma_{33} & 0 & \Gamma_{33} - \omega^2 \rho \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} = 0 \quad (2.24)$$

$$\Gamma_{11} = C_{11}\xi^2 + C_{55}\zeta^2$$

$$\Gamma_{22} = C_{66}\xi^2 + C_{44}\zeta^2$$

$$\Gamma_{33} = C_{55}\xi^2 + C_{33}\zeta^2$$

$$\Gamma_{13} = (C_{13} + C_{55})\xi\zeta$$

此則為 (ω, ξ) 形式的 Christoffel equation，亦可根據求解需求轉化成其他形式。

由於已將模型簡化為二維模型，此處僅考慮面內波。

$$\begin{bmatrix} \zeta^2 C_{55} + \xi^2 C_{11} - \omega^2 \rho & \zeta^2 \xi (C_{13} + C_{55}) \\ \zeta^2 \xi (C_{13} + C_{55}) & \zeta^2 C_{33} + \xi^2 C_{55} - \omega^2 \rho \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_3 \end{Bmatrix} = 0 \quad (2.25)$$

若向量 U 有非零解，則

$$\det \begin{bmatrix} \zeta^2 C_{55} + \xi^2 C_{11} - \omega^2 \rho & \zeta^2 \xi (C_{13} + C_{55}) \\ \zeta^2 \xi (C_{13} + C_{55}) & \zeta^2 C_{33} + \xi^2 C_{55} - \omega^2 \rho \end{bmatrix} = 0 \quad (2.26)$$

將式(2.26)整理後可得

$$B_1 \zeta^4 + B_2 \zeta^2 + B_3 = 0 \quad (2.27)$$

由式(2.27)可求得 4 個解，令 $\text{Im}(\zeta_k) \geq 0$ 使解的根為單值函數，再將求的根代入原式即，求得對應特徵向量各個分量的比例。

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_3 \end{bmatrix}^{(k)} = C_k \begin{bmatrix} p_{1k} \\ p_{3k} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

其中 C_k 為未知係數，可由平板上下表面的邊界條件求得，分量比例則為

$$p_{1k} = -\zeta_k [\xi (C_{13} + C_{55})]$$

$$p_{3k} = \zeta_k^2 C_{55} + [\xi^2 C_{11} - \omega^2 \rho] \quad (2.28)$$

板波於 $x_1 x_3$ 平面上的波傳位移分量與應力分量分別表示如下：

$$\begin{cases} u_1 \\ u_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{13} \\ p_{31} & p_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\zeta_1 x_3} & 0 \\ 0 & e^{i\zeta_3 x_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \sigma_{13} \\ \sigma_{33} \end{cases} = \mathbf{QC} \quad (2.28)$$

可依板波的位移分量區分為對稱(symmetric)波與反對稱(anti-symmetric)波，其推導如下：

(1) 對稱板波

$$\begin{cases} u_1 \\ u_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} p_{11} \cos(\zeta_1 x_3) & p_{13} \cos(\zeta_3 x_3) \\ p_{31} i \sin(\zeta_1 x_3) & p_{33} i \sin(\zeta_3 x_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \sigma_{13} \\ \sigma_{33} \end{cases} = \mathbf{Q}^S \mathbf{S} \quad (2.29)$$

其中

$$\mathbf{Q}^S = \begin{bmatrix} Q_{11}^S & Q_{13}^S \\ Q_{31}^S & Q_{33}^S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_{55}(p_{11}\zeta_1 + p_{31}\xi_1)\sin(\zeta_1 x_3) & -C_{55}(p_{13}\zeta_3 + p_{33}\xi_3)\sin(\zeta_3 x_3) \\ i(C_{13}p_{11}\xi_1 + C_{33}p_{31}\zeta_1)\cos(\zeta_1 x_3) & i(C_{13}p_{13}\xi_3 + C_{33}p_{33}\zeta_3)\cos(\zeta_3 x_3) \end{bmatrix}$$

(2) 反對稱板波

$$\begin{cases} u_1 \\ u_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} p_{11} i \sin(\zeta_1 x_3) & p_{13} i \sin(\zeta_3 x_3) \\ p_{31} \cos(\zeta_1 x_3) & p_{33} \cos(\zeta_3 x_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \sigma_{13} \\ \sigma_{33} \end{cases} = \mathbf{Q}^S \mathbf{A} \quad (2.30)$$

其中

$$\mathbf{Q}^A = \begin{bmatrix} Q_{11}^A & Q_{13}^A \\ Q_{31}^A & Q_{33}^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} iC_{55}(p_{11}\zeta_1 + p_{31}\xi_1)\cos(\zeta_1 x_3) & iC_{55}(p_{13}\zeta_3 + p_{33}\xi_1)\cos(\zeta_3 x_3) \\ -(C_{13}p_{11}\xi_1 + C_{33}p_{31}\zeta_1)\sin(\zeta_1 x_3) & -(C_{13}p_{13}\xi_1 + C_{33}p_{33}\zeta_3)\sin(\zeta_3 x_3) \end{bmatrix}$$

考慮平板厚度為 h ，假設上下表面 $x_3 = \pm h/2$ 的邊界條件為自由狀態 (traction-free)，將邊界條件代入式(2.29)與(2.30)中，若待定係數 \mathbf{A} 及 \mathbf{S} 存在非零解，即可推算出具有頻散與衰減關係對稱板波及反對稱板波的頻散曲線。

2.5 小波轉換

小波轉換(wavelet analysis)是一種廣泛用於時域與頻域的訊號分析方法，採用有限長度或快速衰減之母小波(mother wavelet)振盪波形來表示訊號。小波轉換可分為離散小波(DWT)與連續小波(CWT)轉換兩大類，本研究將使用連續小波轉換來計算實驗訊號的包絡線，以尋找時域訊號之固定時窗內的波峰，以便進行後續處理。

連續小波轉換(continuous wavelet transform)是一種用來處理連續時間函數並將其轉變為數個小波的組合，其表示式如為

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_0^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2.31)$$

其中 $\psi(t)^*$ 為母小波函數之共軛複數， b 表示訊號的平移(time shift)， a 是訊號波包的縮放因子(scaling factor)。常用的母小波函數則有墨西哥帽、Morlet、Meyer 與高斯脈波等。本研究所使用的母小波維高斯脈波，函數形式如下

$$\psi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (2.32)$$

其中 $\omega_0 = 5.3 \text{ Mrad/sec}$ ，縮放因子 a 與小波轉換頻率 f ，即訊號欲求取之頻率的關係為 $f = \omega_0 / 2\pi a$ 。

第三章 實驗模型的分析與討論

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時，會產生時諧運動(time harmonic vibration)。本章以有限元素分析套裝軟體 ANSYS 分析 AE-PFC 的指叉電極尺寸配置，比較不同尺寸驅動效應與 AE-PFC 共振頻率響應。

3.1 對稱極化與反對稱極化

吳旻修[7]設計之 AE-PFC 的極化與驅動電極使用相同的電極對，圖 3.1，極化電場方向與纖維方向夾角約 70 度，非水平的電偶極矩排列會稍微降低壓電纖維的致動能力。一般的 PFC 電極為上下對稱排列，圖 3.2，電偶極矩的平均分布方向比反對稱極化更趨近水平，且由於電極數目是反對稱極化的兩倍，其極化電場強度亦比反對稱極化大。此章節將對兩種極化電場的差異做模擬比較。

3.1.1 AE-PFC 極化電場模擬

壓電纖維複合材料是一種具高度可撓性的功能性複合材料，壓電纖維包覆於環氧樹脂內，指叉電極印刷於軟性印刷電路板(flexible print circuit board, FPCB)上，後者是一種由聚醯亞胺(polyimide)、膠(adhesive)與銅箔(copper)所構成的材料，並黏貼於環氧樹脂外層、壓電纖維複材上下方，作為極化驅動壓電纖維複材的電極。

為了比較不同尺寸電極驅動壓電纖維複材的致動能力與效應，本研究將針對指叉電極寬度(width, w)與電極間距(spacing, s)之尺寸比例、極化強度等關係做量化比較，以設計出較佳之電極尺寸比例。

3.1.2 前處理

本研究所設計之 AE-PFC 的波長為指叉電極單位寬的 4 倍，即 $\lambda = 4(w + s)$ ，如圖 4.2 所示。為了減少計算時間與網格分割數目，電場模擬只分析 AE-PFC 的一個代表元素(representative element)，結構包含一對電極與一條纖維。建立電極尺寸為 $s=0.4\text{ mm}$ ， $w=0.4\text{ mm}$ 的 AE-PFC 週期模型，模型整體包含一個長度 w 之正電極與兩個長度為 $w/2$ 之負電極，總長為 $2(w+s)=2\text{ mm}$ 。為了方便觀察纖維的電場變化(圖 3.3)，將週期模型中的纖維設計為兩個半圓弧，兩纖維半圓間填充環氧樹脂，上下層為銅電極，材料係數列於表 1。

考慮到數值分析的收斂性，分割的元素間距小於十六分之一波長，除此之外，元素的分割亦須考量到施加外部驅動之區域節點數量的平均性，因此將長度為 1 個波長的模型長度分割成 200 個單元，寬度分割 10 個單元。圖 3.5 所示為對稱極化模型，全部使用了 45,400 個元素，51,991 個節點。圖 3.6 所示是反對稱極化模型，總共使用了 46,600 個元素，53,330 個節點。

邊界條件設定模型的長度(X-axis)與寬度(Z-axis)方向兩端相對座標位置之場變數相同，高度方向則不做任何限制，構成週期模型的邊界條件。極化電壓範圍則設定為 $\pm 1,000\text{V}$ 的直流電壓，模型的中央電極施加 $+1,000\text{V}$ 靜電壓，兩側電極則施予 $-1,000\text{V}$ 靜電壓。

3.1.3 量化結果比較

AE-PFC 是透過 PFC 纖維的壓電效應產生形變而致動，後續分析皆以纖維的中心截面為探討對象，參考圖 3.7 所示，分別 Z 座標於纖維圓心，0.5 倍與 1 倍半徑處。

圖 3.8 中的 X 軸為正負電極間相對位置的量化值，X 軸的 0 值表示兩電極間的中央處， $X/S=-5$ 位於空間最接近負電極處， $X/S=5$ 則代表最接近正電極處。Y 軸表示電場強度，單位為 kVolt/m，紅藍綠黑色實線及虛線分別表示 $S=0.7\sim 0.4$ mm，亦即 $W=0.3\sim 0.6$ mm 的模擬結果。

圖 3.8 (a)~(d) 分別表示在 0.5 倍與 1 倍半徑處的電場強度，包含電場絕對值與 X 方向電場，其中實線為對稱極化，虛線為反對稱極化。圖(a)與(b)分別表示纖維中央處的 X 方向電場強度與電場絕對值，而其差異並不大，推論纖維中心處的極化電場是以 X 分量之電場強度為主，其他方向的電場強度分量影響較小。

比較結果圖(c)與(d)，在 0.5 倍半徑位置處的極化電場亦是以 X 分量為主。此外，可從此位置的極化電場強度看出反對稱極化之壓電纖維中心的極化電場方向較水平，離中心較遠處則明顯出現電場強度不均勻之現象；而對稱極化時則無此種情形產生，表示其極化電場較為均勻。由於電極數目加倍，電場強度亦為反對稱極化的兩倍左右。由此可判斷，對稱極化無論是在強度或平行壓電纖維的性質，都比反對稱極化更為理想。

3.1.4 電場比較

因壓電纖維複材是圓柱狀纖維，AE-PFC 的材質不均勻，極化的分佈電力線會因不同截面而略有差異，在此將對不同截面的極化電場做比較與統整。參考圖 3.9 所示，將數值模型的 Z 方向尺寸均分為四等分，共五個截面，以 $Z=0$ 為初始面，分別對 $Z=0$ 、0.25、0.5、0.75、1 倍模型寬度的截面繪製電場強度的色階圖與 XY 方向的二維電力線。

圖 3.10 到圖 3.12(a)~(e)分別表示對稱極化時，X、Z 與 Y 方向電場的色階圖，圖 3.13 到圖 3.15(a)~(e)則表示反對稱極化時，X、Z 與 Y 方向電場的色階圖。從電力線的變化可以得知，壓電纖維內的電場大致與 X 方向，即纖維方向平行，而環氧樹脂內的電場則多與纖維方向垂直(Y 方向)，此種特性可以從圖 3.12 與圖 3.15，不同位置的 Y 方向電場強度觀察到。

比較圖 3.10 與圖 3.13 所示，可明顯看出對稱極化時，電極間壓電纖維的電場方向與纖維方向幾近平行。而反對稱極化時，電力線則明顯地傾斜，證明對稱極化所產生的電場方向性較佳。電場分量 E_x 在靠近電極邊緣處有一圈明顯的色階變化，離纖維中心越遠處越大，這代表在電極邊緣處的環氧樹脂層之電力線較為傾斜，與電極正下方環氧樹脂的垂直電場略微不同。

圖 3.11 與圖 3.14 所示 Z 方向電場分量展示了極化電力線在不同縱剖面之纖維與環氧樹脂內的走向，電場分量 E_z 在壓電纖維與環氧樹脂的交界處會有較明顯的色階變化，這說明了介電係數大的材料之極化電場強度會較大。

圖 3.16 所示是對稱極化模型正中央的透視圖，為了方便觀察電力線於纖維與環氧樹脂間的走向，而加上了屬於元素分割的白線，避免圖面

過於複雜，僅繪製電極的黑色電力線。此圖清楚顯示電力線在電極下方之環氧樹脂內會垂直向下走，碰到介電係數較大的壓電纖維後，才會產生 Z 方向的電場變化。纖維內的電力線又會朝纖維佔據較高比例的縱截面靠近，產生了圖 3.11 與圖 3.14 的 Z 方向電場變化。

3.1.5 改良環氧樹脂之極化電場

對稱極化電力線在 AE-PFC 的中平面處會集中於纖維的邊緣，當極化電壓提高到一定程度後，即有可能產生短路的情形，為了降低電力線的集中，本小節將 PZT-5A 粉末混合環氧樹脂取代純環氧樹脂，並採用有限元素分析法分析電場與電力線，觀察電場的均勻性。

數值模擬之混合環氧樹脂介電係數以混合律計算，方程式如下：

$$\epsilon_{33}^T = \alpha(\epsilon_{33}^T)_{\text{PZT-5A}} + (1-\alpha)(\epsilon_{33}^T)_{\text{Epoxy}} \quad (3.1)$$

分別對體積比(volume fraction) α 為 0、0.25、0.5、0.75 與 1 做計算，模擬示意圖如圖 3.7 所示，與前一小節之計算模型相同。

分析結果以模型電極中央($X=1.2\text{mm}$)、纖維之間($Z=133\mu\text{m}$)的電場進行量化比較(圖 3.19)，結果顯示高介電性之環氧樹脂極化電場強度與均勻性明顯優於純環氧樹脂($\epsilon_{33}^T=5$)。圖 3.18 所示為對稱極化 X 方向電場色階圖，剖面位置為 $Z=0.5a$ ， a 為數值模型的寬度，即模型的纖維相鄰之夾層。色階圖顯示，以添加 PZT-5A 粉末之環氧樹脂填充纖維間隙後之電力線分布較不再集中於纖維間距最小處(色階圖正中央)。改變環氧樹脂介電係數對鄰近 AE-PFC 結構表面($Y=0$ 與 $263\mu\text{m}$ 處)之電場影響較明顯，因此選擇座標(Y,Z)= $(0.263,0.133)\mu\text{m}$ 、電極間($X=1\sim 1.4\text{mm}$)之

電場做量化比較，如圖 3.20 所示，結果顯示高介電性環氧樹脂的 X 方向極化電場強度較為均勻。

3.2 時諧分析

為了瞭解 AE-PFC 所激發的導波狀況，本文採用時諧分析，計算模型近似電場模擬之模型，為雙層聚醯亞胺(polyimide)上下覆蓋圓形截面之 PZT-5A 纖維，中間填以環氧樹脂。如圖 3.21 所示，模型尺寸與稍後將於第 4.3 節介紹之金相實驗量測值相同，聚醯亞胺層厚 $25\ \mu\text{m}$ ，PZT-5A 纖維直徑為 $250\ \mu\text{m}$ ，纖維與聚醯亞胺間的環氧樹脂層厚 $16\ \mu\text{m}$ ，全部模型厚度為 $313\ \mu\text{m}$ 。因為 AE-PFC 主要驅動段位於銅電極之間而非銅電極之下，因此模擬結構不包含銅電極，外加之驅動電壓則直接施予纖維表面。模型寬度為 $263\ \mu\text{m}$ 包括一根纖維直徑與一個纖維間距，模型長度則為設計之驅動波長，包含兩對正負驅動電極的長度。

這是一個週期性模型，因此模型的邊界條件設定須注意兩點，第一是模型的長度方向兩端對應位置之節點場變數相同。如圖 3.21 所示，即模型垂直 X 方向的兩個剖面上、相同 Y 與 Z 座標的兩個節點之場變數相等。第二是寬度方向的兩個側面，即垂直 Z 方向之兩個側面對應位置之節點場變數相等。外部驅動電壓模擬為振幅 30V 之週期弦波，同圖 3.21，紅色位置施加正電壓，藍色位置施加負電壓。

3.2.1 電極間距(s)與電極寬度(w)的比較

AE-PFC 是以指叉電極驅動壓電纖維複材的導波換能器，其激振強度效果受極化電壓、極化電場方向與驅動電壓強度的影響而有所不同。

本小節將針對不同的電極寬度(w)與電極間距(s)比例對特定設計波長之 AE-PFC 響應進行分析。

數值模型的分割與先前的電場模擬使用相同的元素，環氧樹脂的部份則使用元素 solid 185，這是 Ansys 軟體預設之計算元素，是八個節點的三維元素，每個節點的自由度則為 XYZ 三個方向位移。分割後的模型截面如圖 3.23 所示，長度部分分割成 200 個元素，共使用了 39,204 個節點，35,760 個元素。

參考黃室維 [6]論文的第 4.2.2 節所述，固定波長 4 mm，即 $s+w=1$ mm 之 AE-PFC 自由狀態下的阻抗極小值發生於 720kHz 與 2.13MHz。在第 4.4.2 節則提到實際使用的共振頻率約為 730kHz，因此將模擬的掃頻範圍設為 0.6~1MHz，頻率間隔 5kHz 擷取一組數據，觀察其每單位電壓應變值之差異。

考慮數值模型不同位置處的變形量存有差異，後續分析將擷取結構變形量較大處的節點應變值做比較，本研究取模型長度 1/4 處之纖維中心節點，即座標為 $(X,Y,Z)=(1,0.1565,0.133)$ mm 之點的軸向應變 ϵ_x 來做比較。

圖 3.25 所示為此節點的每單位電壓之軸向應變值 ϵ_x ，在相同波長條件下，共振頻率會因為電極寬度與間距的比例而不同，頻率差異並不大、約在 5% 以內，詳細比較如表 2 所列，平均頻率約為 737kHz，與黃室維[6]的實驗中、波長 4mm 之 AE-PFC 試片所測得的共振頻率 780kHz 差異 5.5%。共振曲線最大值繪製成圖 3.26，清楚顯示在電極間距 $S=0.5$ mm、電極寬度 $W=0.5$ mm，即 $S:W=1:1$ 時，會產生最佳的致動效應。

3.2.2 AE-PFC 自由狀態阻抗分析

本節將介紹 AE-PFC 週期模型之共振頻率與模態的分析結果。3.2.1 節的結論指出指叉電極的間距(s)與寬度(w)比為 1 比 1 時會有最好的致動效應，所以使用比例尺 $s:w=1:1$ 之電極設計，數值模型則與第 3.2.1 節相同，但因模型長度受電極尺寸影響，分割過於細密時，會使邊界條件的設定產生錯誤，因此調整長度尺寸的分割元素為 40 個，整體模型共使用了 19,844 個節點，17,800 個元素，掃頻範圍為 0~3MHz，間隔為 5kHz。減少分割元素後，數值模型的共振頻率略有影響，此處僅以 $s=0.5$ mm 的模型做比較，比較結果如表 3 所列。

各電極尺寸的分析結果如圖 3.27(a)~(e)所示，各尺寸之共振頻率列於表 4。數值結果顯示在 0.3~2MHz 之間會出現第一個模態，電極尺寸越小者所驅動之導波波長越短、共振頻率越高，量化比較後則如圖 3.28 所示，電極尺寸與共振頻率成反比。

模擬之電極尺寸分別設定為寬度 $s=0.4$ mm、間距 $w=0.4$ mm，波長 3.2 mm，計算頻率範圍為 0~1.5MHz，頻率間距為 5kHz。阻抗分析結果如圖 3.29 所示，其中，實線表阻抗、虛線為相位，在 935kHz 出現共振頻率，與黃室維[6]第 4.2.2 小節描述，波長 3.2mm 之 AE-PFC 本身的共振頻率 928kHz 差異約 0.75%。

圖 3.30 是以等高色階圖分別展示模型在此共振頻率下、X 方向與 Y 方向的位移，藍線為負位移，紅線為正位移。若以模型中平面為對稱軸，則此共振模態 U_x 為對稱， U_y 為反對稱，此響應模態則同於平面板波的對稱模態。因此推論此設計之 AE-PFC 以頻率 928kHz 之訊號驅動時，會產生對稱模態的振動。

吳旻修[7]的論文提到電極寬度 $w=0.8$ mm，電極間距 $s=0.2$ mm，驅動波長為 4 mm 之 AE-PFC 量測之阻抗響應頻率約為 780kHz，以本章節的模擬方式分析此設計之 AE-PFC 阻抗曲線，計算結果如圖 3.31 所示，720kHz 為其響應頻率，與吳旻修提到之實驗值誤差-7.69%。

3.3 AE-PFC 黏於鋁板之阻抗分析

為了解 AE-PFC 黏於鋁板時所激發的導波波傳狀況，本節將介紹使用套裝軟體 ANSYS 進行 AE-PFC 黏貼於鋁板的阻抗分析結果。

3.3.1 材料係數量測

為了減少模擬計算結果與實際模型的誤差，先以脈波回音法 (pulse-echo method) 量測鋁基板材料係數。透過量測板材的縱波波速、橫波速度與密度之值，計算材料彈性係數。

脈波回音法的實驗架構如圖 3.32 所示，從超音波發射接收器 (Panametrics 5052UAX50) 發出寬頻高電壓脈衝訊號至超音波換能器，激發壓力波或剪力波，換能器接收自平板底部反射回來的回波訊號，傳遞至示波器觀察。超音波的傳遞則如圖 3.33 所示，實驗採用壓力波探頭 (Panametrics 10MHz V544) 及剪力波探頭 (Panametrics V221BA) 分別量測，壓力波及剪力波來回行經板厚兩次所需時間，計算壓力波及剪力波波速。此外，以電子秤量測平板質量，再除以體積獲得平板的質量密度。

材料彈性係數與縱波波速、橫波波速及密度之間的關係如下式：

$$E = \rho c_s^2 \left(\frac{3c_l^2 - 4c_s^2}{c_l^2 - c_s^2} \right) \quad (3.2)$$

$$\nu = \frac{c_l^2 - 2c_s^2}{2(c_l^2 - c_s^2)} \quad (3.3)$$

其中 c_l 為壓力波波速， c_s 為剪力波波速， ρ 為材料密度， E 是楊氏係數， ν 是浦松比。實驗選用的基板材料為 1 mm 厚之 T6061 鋁板，材料係數量測值如表 1 所列。

3.3.2 阻抗響應分析結果

AE-PFC 阻抗分析的數值模型如圖 3.34 所示，考慮一單位波長的 AE-PFC 黏貼於等長鋁板，中間以厚度 10 μ m 的環氧樹脂黏貼，各材料採用元素如表 1 所列，網格分割後的模型如圖 3.35 所示，共使用了 62,640 個元素，節點數量為 68,121。

邊界條件的部分則設定模型的長度(X-axis)與寬度(Z-axis)方向之兩端相對座標位置之場變數相同，高度方向則不做任何限制，以達成週期模型的邊界條件。極化電壓範圍則設定 ± 1000 V 的直流電壓，其中模型中央電極施加+1000V，兩側電極則施加-1000V。

分析結果如圖 3.36 (a)與(b)所示，分別是波長 4mm 與 3.2mm 的阻抗曲圖，波長 3.2mm 的模型在 1.03MHz 時會有最佳共振頻率，而 1.3MHz 頻率響應為 0.56MHz 的倍頻模態。波長 4mm 的模型則在 865kHz 時會有最佳共振頻率。

3.3.3 基板對於傳遞板波激發的影響

AE-PFC 黏貼於基板上，會改變板的局部剛性，因此，AE-PFC 黏貼於激發的板波與自由板波的波長頻率關係不一致，本節將以數值探討

波傳過度區的長度。數值模型如圖 3.37 所示，AE-PFC 黏貼於 1mm 厚的鋁板上，鋁板的長度較 AE-PFC 多出 $2L$ ，倘若鋁板的延伸長度為自由板波半波長的整數倍，則自由板波會形成駐波。因此，以伸長度 L 為變數，由 0.5mm 增加至 20，每 0.01mm 計算一次 AE-PFC 激發的基板響應。當駐波條件符合時，鋁板伸長度上的各點響應會達到最大值，此時伸長度可稱之為共振長度。模型的材料係數與分割元素列於表 1，模型的分割量根據鋁板伸長度 L 調整，分割量列於表 5。

AE-PFC 的驅動電壓設為 $\pm 30V$ 之正弦波，AE-PFC 代表元素兩側各節點在相同的 Z 座標之場變數設為相等，鋁板兩端垂直 X 軸的截面及兩側垂直 Z 軸的截面各對應點之場變數也設為相等。將鋁板伸長度 L 均分成四段五個節點(圖 3.38)，取此五節點之 X 方向位移分量繪製位移響應與伸長度的關係圖(圖 3.39)，圖中數字表示鋁板的共振長度。

圖 3.39 特定倍數的伸長度會產生較明顯的 X 方向位移響應，比較對應的模態圖後，發現駐波響應相對於基板的中平面(mid-plane)，可以區分為 A_0 與 S_0 模態。圖 3.40 與圖 3.41 分別為 A_0 與 S_0 模態的 X 方向之等高線圖，藍線為正值，紅線為負值。從模態位移的等高線圖可以看出鋁板共振長度越長，模態越清晰，越接近 AE-PFC 黏貼處的過度區，越不易判斷出駐波的模態特性。

圖 3.42 所示為鋁板共振長度 L 與鋁板的 A_0 、 S_0 模態自由板波波長的比值，水平軸為鋁板伸長度 L ，鉛垂軸為上述比值。空心方點為 A_0 模態之結果，在鋁板伸長度 L 約為 6 mm 後，趨近於 A_0 模態波長。實心圓點為 S_0 模態的結果， S_0 模態在伸長度的過度區較長，約為 12 mm 後，才趨近於自由板波波長。

3.4 AE-PFC 頻散曲線模擬

為了確定 AE-PFC 在不同工作頻率下所激發的基板自由板波波長，有必要計算機板蘭姆波的頻散曲線(dispersion curve)，以作為上述模型之共振長度的參考，亦可作為實驗分析的依據，本研究採用數值方式進行頻散曲線的模擬。

數值模擬採用 SOLID185 元素，做為環氧樹脂(epoxy)、PZT-5A 纖維與聚醯亞胺(polyimide)的元素，此為 8 節點的三維元素，每個節點的自由度為三個位移方向。

為了節省計算時間，使用代表體積元素(representative element volume)模型及週期邊界條件模擬計算，圖 3.43 為模擬所使用的代表體積與座標系示意圖。模型的細部尺寸則取自冷鑲埋試片觀察所得之值為依據，製作的模型寬度以一個纖維與纖維間距為單位寬度，其值為 $266\mu m$ 。厚度方向則為兩片寬 $25\mu m$ 的聚醯亞胺、中層兩半圓 PZT-5A 纖維與黏合填充物環氧樹脂所構成的區域，模型的長度設定為一個波長。圖 3.44 為實際模擬圖形，模擬所使用的材料參數則參照表 1。

壓電纖維以軸向振動為主，所以 AE-PFC 在 z 方向的變形量是十分微小的，因此數值模型給予 z 方向位移變化為零的邊界條件。考慮代表體積元素內的單方向波傳，設定週期邊界條件，使模型座標點 $(x, y, 0)$ 與 (x, y, λ) 對應的場變數相等，使得模型前後面自由度相等，近似長度無限延伸。模型的寬度部分亦然，設定兩側平面 $(x, 0, z)$ 與 $(x, 266\mu m, z)$ 的自由度相等，使整體模型近似於無限延伸的平面。網格分割後的模型如圖 3.45 所示，共使用了 33,917 個節點，13,040 個元素。

本研究採用套裝軟體 ANSYS 裡的 Mode-frequency 求解方式，得到單一波長不同模態的自然頻率。在設定 AE-PFC 波長為變數的安排下，整理所得的模態自然頻率值可獲得基板自由板波的頻散曲線，如圖 3.47。

為了確認分析方法的正確性，數值結果與鋁板自由板波頻散曲線的確切解(exact solution)比較，此處所使用鋁板模型厚度為 2mm，求取模態為 S_0 及 A_0 ，鋁板材料係數如表 1 所列。單層鋁板波長頻散曲線的對照結果如圖 3.46 所示，比較數值測試的結果與鋁板板波頻散曲線的解析解[2]，兩者幾無差異。

本研究以上述方法，數值計算 AE-PFC 積層結構的板波頻散曲線(圖 3.47)，水平軸為自然頻率(單位 MHz)，鉛垂軸為板波波長的倒數 $1/\lambda$ (單位 1/mm)，也稱為板波的空間頻率(spatial frequency)。由於套裝軟體 ANSYS 的模態頻率分析只能指定數值模型的長度，無法指定波數，故計算出的結果包含自然頻率的多倍頻，使波長頻散曲線顯得雜亂。為了辨識 A_0 模態(圖 3.48)與 S_0 模態(圖 3.49)的波長頻散曲線，依據各頻率對應的振動模態揀選適當的自然頻率，可以確定圖 3.47 中藍線為 A_0 模態，紅線為 S_0 模態。其他雜亂的數據點裡多為此二者的倍頻模態，如圖 3.50，交錯出現。

第四章實驗的量測與討論

AE-PFC 是由一對反對稱排列指叉電極夾著單一方向排列之壓電纖維，製作而成的導波換能器，其中，指叉電極排列方向與壓電纖維垂直，如圖 4.1 所示，因此命名為反對稱指叉電極壓電纖維複材導波換能器。

此章描述 AE-PFC 的製作過程，透過顯微鏡觀察 AE-PFC 的細部尺寸，做為數值模型的尺寸依據，細部檢測也可用於檢察 AE-PFC 成品品質。

4.1 指叉電極與輔電極的設計

AE-PFC 的指叉電極是由撓性印刷電路板製作而成，以鍍上銅箔的聚醯亞胺為材料，再蝕刻製成所需之電路。慣用的指叉電極的每對電極寬度(width, w)與電極間距(spacind, s)相同，而表面聲波元件的波長為指叉電極單位寬的 4 倍，即 $\lambda = 4(w + s)$ ，如圖 4.2 所示。

本研究所使用的指叉電極尺寸為 10 對電極對，指叉電極重疊寬度(overlap width)為 25mm，而電極間距則固定為 0.4mm，以避免激發過多模態造成判讀困難。指叉電極製作委託岳橋漢公司代工。

從第 3.1 小節的計算結果，得知對稱極化的電場強度約為反對稱極化的兩倍，前者的極化電場與壓電纖維的夾角亦比反對稱極化電場的水平傾角更小，故本研究將對稱極化的想法融入反對稱驅動之 AE-PFC 設計。

黃室維[6]設計的 AE-PFC 致動器，是以反對稱指叉電極驅動極化方向一致的壓電纖維複材。極化時對 AE-PFC 的上層電極施予同極性之電

壓，下層電極施加相反極性的電壓，可使壓電纖維週期性承受方向一致的極化電場。極化完畢後，將電極的正負極做些微更替後，使得致動電場與極化電場呈現一段方向相同、一段方向相反的交流情形。

參考圖 4.4(a)所示的對稱極化示意圖，與反對稱極化的差異在於壓電纖維複材的上下表面相對應位置都設置相同極性的金屬電極。電極數目多了一倍，因此極化及致動電場強度也增加為近乎兩倍。

本研究提出輔電極的設計概念，圖 4.5(a)所示是反對稱極化的 AE-PFC 指叉電極示意圖，極化時需對上電極與下電極施加相反極性之電壓。圖 4.5(b)是對稱極化的設計示意圖，除了原本設計的主電極外，另外加入了淺藍色與橘色輔電極輔助 AE-PFC 的極化。極化時輔電極施加電壓的極性與其相對位置的指叉電極相同，極化電場方向與反對稱極化相同，但是壓電纖維的電偶極矩可排列得與纖維方向更加平行。AE-PFC 電極設計圖如圖 4.6 所示。



4.2 AE-PFC 製作程序

本研究採用的 AE-PFC 製作程序取自黃室維 [3]的論文，製作程序如下：

- (1) 壓電纖維排列：依照設計的指叉電極總長與重疊寬度，將直徑 $250\mu\text{m}$ 的 PZT-5A 壓電纖維整齊平行排列於低黏性膠布上，如圖 4.7 所示。
- (2) 指叉電極前置作業：裁切適當大小的指叉電極，並在電極處以低黏性膠布覆蓋，如圖 4.8 所示。
- (3) 黏合纖維與下電極：以環氧樹脂(epoxy)為黏著劑將壓電纖維與下指叉電極黏合，並以熱壓機 46°C ，熱壓三分鐘，同時使用真空幫浦抽氣以降低環氧樹脂中的氣泡殘留，如圖 4.9 所示。

- (4)黏合上下電極：將纖維另一面塗上環氧樹脂，並將上電極整齊覆蓋黏貼上去後再做熱壓，熱壓溫度 120°C 、壓力 $4.9\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，熱壓時間則為2小時，再使用真空幫浦抽氣減少氣泡殘留，如圖 4.10 所示。
- (5)極化：熱壓黏貼完畢的 AE-PFC 需透過極化，將壓電纖維電偶極矩排列整齊，才能使 AE-PFC 能產生固定方向的形變，以高電壓電源供應器(Stanford Research System Model PS325)對 AE-PFC 施予 2000V 極化，極化方向如圖 3.8 所示。
- (6)AE-PFC 後處理：極化完成的 AE-PFC 成品需使用銀膠導通上下電極，並分割致動端與接收端
- (7)本研究試做了兩種尺寸的試片(圖 4.11)，分別是(a)反對稱極化：10對電極且 $\lambda=4\text{ mm}$ ；(b)對稱極化：10對電極且 $\lambda=3.2\text{ mm}$ 。

4.3 金相觀察與量測

為了檢驗 AE-PFC 的品質與細部尺寸，因此將成品切塊，垂直置入鑲埋杯內，再灌入鑲埋液做成金相冷鑲埋試片(圖 4.12)，先以最粗的 150 號砂紙開始粗磨，至 1500 號砂紙。粗磨時須平穩抓住試片、使試片研磨平面的受力平整。更替砂紙號數須同時將試片旋轉 90 度角，砂紙粗磨完畢後再以 $3\mu\text{m}$ 拋光粉末拋光。研磨完畢的試片不可直接碰觸拋光面，試片的保存須以保鮮膜包覆後收納於防潮箱。最後使用實體顯微鏡觀察試片截面，若截面有粗砂顆粒殘留則表示需再做一次研磨。

透過顯微鏡拍攝 AE-PFC 的影像(圖 4.13)，結果顯示 AE-PFC 整體截面厚度為 $340\mu\text{m}$ ，內含兩層厚度 $25\mu\text{m}$ 的聚醯亞胺，一層厚約 $27\mu\text{m}$ 的銅箔電極、 $13\mu\text{m}$ 厚的環氧樹脂與 $250\mu\text{m}$ 寬的 PZT-5A 纖維。由於試

片寬度方向的尺寸因切面不垂直於纖維，故需要透過比例換算求得實際值，纖維間隙的環氧樹脂寬度 $16\mu\text{m}$ 。

4.4 自由狀態之 AE-PFC 共振頻率量測

共振頻率代表一件物體最容易被驅動的頻率，量測 AE-PFC 共振頻率的目的是在於找尋其最佳致動頻率。AE-PFC 元件具有壓電特性，可以採用網路分析儀(HP 8751A)量測阻抗響應與插入損失，為了降低 AE-PFC 收發端的差異性，一次製作出來的試片包含了兩組 AE-PFC，可做一對收發元件，或分割開來個別使用。直接量測試片成品的阻抗響應較類似以一組 AE-PFC 為導波換能器，另一組僅屬於結構的一部份，量測出的結果並不是 AE-PFC 導波換能器的共振頻率，故將 AE-PFC 分割後再做量測，其結果如圖 4.14，表 7 所列則為實驗與計算值的比較。本研究製作的 AE-PFC 考慮單向發射的設計，在一個 AE-PFC 元件內安排兩組間距固定距離的指叉電極，此種設計無法將 AE-PFC 依指叉電極分割開來量測阻抗響應。如果將兩個 AE-PFC 元件分別作為發射與接收端、量測插入損失會是一個準確獲得共振頻率的方式。

插入損失(insertion loss)亦稱作散射參數(scattering parameter)，主要是以穿透波(transmitted waves)與反射波(reflected waves)和入射波(incident waves)功率做比值表示。將入射訊號傳至待測元件(device under test, DUT)輸入端的電極埠，並量測輸出端接收的穿透波或反射波訊號的功率與相位，紀錄待測元件的頻率特性。

參考圖 4.15 所示， a_1 與 a_2 代表埠一與埠二的入射訊號功率， b_1 與 b_2 則代表反射訊號功率。若單位功率之訊號由待測元件的埠一入射，從埠一的入射端可接收到反射功率 S_{11} ，在埠二的反射端可接收到傳輸功率

S_{21} 。若單位功率之訊號由待測元件的埠二輸入，在埠一得到的反射功率為 S_{22} 、穿透功率 S_{12} 。各散射參數的關係可以矩陣式表示如下：

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

其中插入損失 S_{ij} 的下標 i 表示訊號輸出端的埠號， j 表示訊號輸入端的埠號。圖 4.16 為指叉電極激發之導波插入損失頻率響應示意圖，曲線的最大峰值為具波傳特性的響應頻率。

本研究使用網路分析儀(HP 8751A)搭配散射參數量測裝置(HP 87511A)量測 AE-PFC 的散射參數(圖 4.17)，將埠一的 a_1 與 b_1 連接兩組 AE-PFC 其中一端的電極，埠二的 a_2 與 b_2 連接另一端的電極，輸入一交流訊號於左端 AE-PFC 之埠一，聲波訊號經中間介質傳遞至右端 AE-PFC 之埠二接收，兩者的比值即為散射參數 S_{21} ，從 S_{21} 的頻譜可得知這兩組 AE-PFC 的工作頻率。如圖 4.18 所示，可以判斷波長設計為 4mm 的 AE-PFC 工作頻率約為 779kHz。波長設計為 3.2 mm 試片的兩組 AE-PFC 距離較近，插入損失小，工作頻率約為 885kHz。表 8 所列為實驗與計算值的比較，結果顯示兩者平均差異最大約 7.6%。表 9 列出插入損失與阻抗響應的比較結果，兩者差異最大約-3%。

4.5 鋁板的板波量測

本研究以具有 10 對電極、設計波長為 3.2 mm 的 AE-PFC 導波換能器作為訊號發射器，探討其聲場分布特性與鋁板的波傳。

都普勒效應是波源與接收端有相對運動時，接收端收到的訊號頻率會與波源相異，接收頻率會隨兩者間的相對速度而感變，雷射都普勒干涉儀(LDV)即是依據此原理，利用雷射光照射在待測物上的頻率感變量來判斷該點表面振動的位移與速度，為非接觸式光學的單點量測系統。

本研究使用雷射都普勒干涉儀(polytec ofv-5000)，配合雷射光源(polytec OFV-505)量測黏貼於鋁板之 AE-PFC 激發的板波頻譜響應。實驗先以 LabVIEW 產生高斯脈波調製的正弦脈波，函數如下

$$\varphi(t) = \sin [2\pi(t - t_0)] e^{-(t-t_0)^2}$$

(4.2)

其中 $t = N\Delta t$ ， $t = 10\text{sec}$ ， $t_0 = 4.5\text{sec}$ ，為訊號中心位置，圖 4.19 所示為此波形曲線。

本實驗以待測結構如圖 4.20 所示，將一組 AE-PFC 黏貼於 1 mm 厚之 T6061 鋁板上，鋁板尺寸為 300×750 mm。AE-PFC 的黏貼好壞對鋁板的頻率響應影響相當大，為了降低黏貼不良造成的實驗誤差，參考 AE-PFC 的製作熱壓過程。配合環氧樹脂的熱固性，施予 AE-PFC 及鋁板熱壓的壓力為 $4.9\text{kgf} / \text{cm}^2$ ，溫度為攝氏 120 度，黏貼過程如下列敘述：

1. 先以酒精擦拭淨鋁板欲黏貼 AE-PFC 之表面。
2. 以低黏性膠帶沿 AE-PFC 的黏貼邊緣貼一圈，如圖 4.21，除了標示位置外，還可去除受熱壓而擠出之環氧樹脂。
3. 以 600 號粗砂紙研磨黏貼處，研磨方向為單向研磨，避免來回或旋轉研磨黏貼處。
4. 將環氧樹脂平均塗於鋁板上後，再將 AE-PFC 放置上去，並以低黏性膠帶固定於 AE-PFC 四周。

5.在 AE-PFC 上依序蓋上隔離棉布、離形紙與隔絕膠片後，置入熱壓機中，熱壓兩小時後即可。

4.5.1 實驗架構

圖 4.22 所示為實驗架構，由函數產生器(Agilent 33120A)輸出振幅為 8V、頻率 79.8 kHz 的高斯脈波訊號至黏於鋁板上的 AE-PFC，以雷射都普勒干涉儀量測 AE-PFC 前方的鋁板的面外振動，再以示波器擷取量測之波形。為了提高實驗的精確度，在空間掃描時，以步進馬達移動鋁板改變測量位置。沿 X 方向直線掃描，掃描範圍為 $X=0\sim 100$ mm，間隔 0.1mm，實驗架構如圖 4.23。

4.5.2 波傳訊號與結果分析

圖 4.24 所示為直線掃描的時域訊號振幅大小的灰階圖，又稱為 B 掃描影像，水平軸為時間，鉛垂軸為試片的 X 座標，訊號取樣頻率為 20 M sample/sec。圖中最明顯的是自 $X=0$ mm 處、 $12\ \mu\text{s}$ 至 $X=100$ mm 處、 $57.2\ \mu\text{s}$ 的板波訊號前緣，板波前緣的波速約為 2,212 m/s。1mm 厚、鋁板的 A_0 模態在 830 kHz 的相速度約為 2,181m/s，因此可以判斷該波前屬於 A_0 模態的訊號。於 $X=0$ mm 處、 $14\ \mu\text{s}$ 至 $X=100$ mm 處、 $32.2\ \mu\text{s}$ 有個較不明顯的波傳訊號，此訊號波速約為 5,495m/s，與鋁板的 S_0 模態相速度 5,346 m/s 相當接近，推估此為 S_0 模態訊號。實驗得到的 A_0 與 S_0 模態在 $X=0\sim 60$ mm 處有明顯的重疊現象，而在 $X=20$ mm 之後，因不同模態板波相速度差異而分開，故在距波源 60mm 範圍內，比較不適合觀測鋁板的模態。

除了這兩個較明顯的波傳特徵外，在 $X=25\text{mm}$ 處、 $60\ \mu\text{s}$ 至 $X=80\text{mm}$ 處、 $35.25\ \mu\text{s}$ 出現了特徵反射訊號，反射波在 $X=90\text{mm}$ 至 $X=100\text{mm}$ 處與 A_0 模態訊號混合。

時域訊號灰階圖的 $20\sim 28\ \mu\text{s}$ 至 $54\sim 60\ \mu\text{s}$ 處也出現了波速約等於 A_0 模態的反射訊號，從波前抵達時間與波速可以推測這應屬於鋁板邊緣反射的訊號。反射的訊號在訊號出現的初始位置($X=0\text{mm}$ ， $12\ \mu\text{s}$)與 A_0 板波混合，直至 $X=45\text{mm}$ 處才產生明顯的分離。

將沿著波傳方向直線掃描的時域訊號以小波轉換後，可得到訊號的包絡線，從而得知 A_0 板波波群訊號的最大振幅。將最大振幅依空間分布繪製出分布圖，藉此觀測訊號的遠近場分布(圖 4.26)。在 $X=10\text{mm}$ 處，也就是距離 AE-PFC 邊緣 63mm 處出現最大響應訊號，訊號振幅隨著距離增加逐漸減小，推斷此位置為 AE-PFC 激發 A_0 板波之遠近聲場的分界，在近場範圍內，因為 AE-PFC 前緣激發的板波相互干涉，致訊號強度變化大，顯示了近場訊號不穩定的特色。

第五章 結論

本研究以有限元素分析套裝軟體 ANSYS 模擬 AE-PFC 在直流電壓作用下的靜電場及交流電壓下的時諧板波分析，探討不同幾何尺寸的指叉電極與極化方式對 AE-PFC 致動效應的影響，並實際製作 AE-PFC 驗證其可行性。實驗部分則以網路分析儀搭配散射參數量測模組量測 AE-PFC 的插入損失，並以都普勒干涉儀量測 AE-PFC 在鋁板上激發的板波頻率響應與聲場強度分布。

5.1 數值分析

由靜態電場分析可以獲得對稱極化與反對稱極化的電場強度與極化方向。反對稱極化時，AE-PFC 的電場強度分布並不均勻，靠近電極端的電場強度較大，而遠離電極端的纖維極化電場較小，使得 AE-PFC 的剖面極化電場分布不對稱，也不完全與纖維方向呈水平，而電場方向與水平之間具有 20 度斜角。驅動試片時，容易受纖維的側向材料剛性限制而影響致動效能。對稱極化的極化電場方向大致上與纖維軸向平行，較不易有變形不均勻的情形出現。

比較相同波長、不同電極間距與寬度比例的條件下，當電極間距 s 與寬度 w 比例為一比一時，AE-PFC 具有最佳的致動效應。除此之外，不同比例的電極之共振頻率會有 5% 左右的差異。受限於建模的難度，本研究模擬壓電纖維的極化方向都設定平行於壓電纖維。數值結果與同樣電極尺寸的 AE-PFC 實驗結果比較，則會出現 4~7% 左右的差異，推

測原因是實際的 AE-PFC 試片在電極正下方的極化電場方向幾乎垂直於纖維方向，與數值模型有所不同。

5.2 實驗結果

從掃描 AE-PFC 激發之鋁板板波時域訊號，可以看到明顯的 A_0 模態板波傳遞的情形， S_0 訊號雖然較不明顯，但仍可看到因為距離拉遠而分開的兩個模態。除此之外，從 $X=25\text{mm}$ 處、 $60\ \mu\text{s}$ 至 $X=80\text{mm}$ 處、 $35.25\ \mu\text{s}$ 出現板緣的反射訊號，由反射訊號及掃描圖的斜率可推測此為 A_0 模態的反射訊號，根據 A_0 模態訊號的時間差及相速度可計算出反射訊號的反射位置，判斷這是鋁板末端的回波訊號。鋁板側邊反射訊號的布分出現在 $X=0\text{mm}$ 、 $20\sim 28\ \mu\text{s}$ 至 $X=100\text{mm}$ 、 $54\sim 60\ \mu\text{s}$ 處，此回波與 A_0 模態的正向波傳訊號大致重疊，在距離拉遠後訊號才出現分離。從分離訊號看出鋁板側邊反射的訊號能量十分微弱，但仍會對聲場的量測結果產生些許影響。

透過降低驅動訊號波包寬度或電極對數可以減少板波訊號振盪的時間，但是降低波包寬度會造成波包連續性不佳，減少電極對數不僅降低壓電纖維的作用範圍，也會造成驅動效應不佳。將鋁板尺寸增大是避免回波出現的最簡易改進方式。

將板波訊號以小波轉換後，取得 A_0 模態波包最大值，繪製空間分佈圖，可以看到清楚的 AE-PFC 生成板波之遠近場分佈，近場範圍的訊號忽大忽小，至 $X=10\ \text{mm}$ 處出現訊號強度的最大值，為遠近場交界，之後的訊號強度隨著與 AE-PFPC 之距離增大而逐漸遞減。

5.3 未來工作展望

本研究設計之 AE-PFC 電極可以選擇以對稱或反對稱的方式極化，因此可以對兩種極化的差異性作實驗比較。此外，也可以對試片的單向波傳設計與建設性干涉差異來做測試。

本研究從線性掃描的結果可以看到幅寬 2.5cm 之 AE-PFC 生成板波的近場干涉，未來可以發展陣列 AE-PFC 換能器，並探討缺陷辨識力，提升 AE-PFC 在結構健康監測上的可行性。

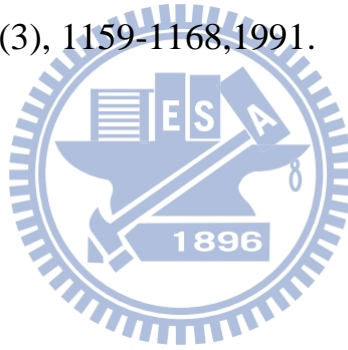


參考文獻

- [1] 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.
- [2] M. Veidt, T. Liu, and S. Kitipornchai, “Modelling of Lamb waves in composite laminated plates excited by interdigital transducers,” *NDT&E International*, **35** (2002) 437–447.
- [3] H. A. Sodano*, G. Park, and D. J. Inman, An investigation into the performance of macro-fiber composites for sensing and structural vibration applications, *Center for Intelligent Material Systems and Structures, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061-0261, USA*, 2003.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 黃室維 (2011) ,反對稱指叉電極的壓電纖維複材導波換能器, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 新竹市, 台灣.
- [7] 吳旻修 (2012) ,偵測水穿透質子交換膜的聲波感測器, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 新竹市, 台灣.
- [8] G. A. Rossetti Jr., 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] C. R. Bowen, L. J. Nelson, R. Stevens, M. G. Cain, and M. Stewart, “Optimisation of interdigitated electrodes for piezoelectric actuators and active fibre composites,” *Springer Science, Business Media, LLC* 2006.
- [12] A. Deraemaeker, H. Nasser, A. Benjeddou, and A. Preumont, “Mixing rules for the piezoelectric properties of macro fiber composites,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20, 2009.
- [13] A. A. Bent and N. W. Hagood, “Piezoelectric fiber composites with interdigitated electrodes,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **8**, 903-919, 1997.
- [14] Bent, A. A., “*Active Fiber Composite Material Systems for Structural Control Applications*,” *Proceedings, SPIE 6th International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, CA, March 1-5, 1999.
- [15] 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.

- [16] J. W. High, Method of Fabricating NASA-Standard Macro-Fiber Composite Piezoelectric Actuators, *Langley Research Center, Hampton, Virginia*, 2003
- [17] W. K. Wilkie, R. G. Bryant, J. W. High, R. L. Fox, R. F. Hellbaum, A. Jalink, Jr., B. D. Little, and P.H. Mirick, Low-cost Piezocomposite Actuator for Structural Control Applications, *NASA Langley Research Center, Hampton, VA 23681-2199*, 2000.
- [18] 王多聞(2010) , 主動纖維複材的脫層偵測與驗證, 國立交通大學機械工程學系博士論文, 新竹市, 台灣.
- [19] D.Alleyne and P.Cawley, “A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals,” *J. Acoust. Soc. Am.*,**89**(3), 1159-1168,1991.



附表

表1 材料係數 (x_3 方向極化)

材料	壓電纖維	環氧樹脂	聚醯亞胺	鋁(Al)	銅(Cu)
	PZT-5A	(Epoxy)	(polyimide)		
元素種類	Solid 5	Solid 5	Solid 185	Solid 45	Solid 45
密度(kg/m ³)	7,750	1,160	1,430	2,702	8,920
c_{11}^E (GPa)	121	7.80	4.93	103.7	160.46
c_{12}^E	75.9	4.65	2.54	51.1	63.96
c_{13}^E	75.4	4.65	2.54	51.1	63.96
c_{33}^E	111	7.80	4.93	103.7	160.46
c_{44}^E	21.1	1.57	1.19	26.3	48.25
e_{31} (C / m ²)	-5.4				
e_{33}	15.8				
e_{15}	12.3				
ϵ_{11}^S (10 ⁻⁹ F / m)	8.11	0.0443			
ϵ_{33}^S	7.349	0.0443			

表2 波長=1mm，不同比例電極的共振頻率

電極間距 s (mm)	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
電極寬度 w (mm)	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
共振頻率 (kHz)	725	730	735	740	755

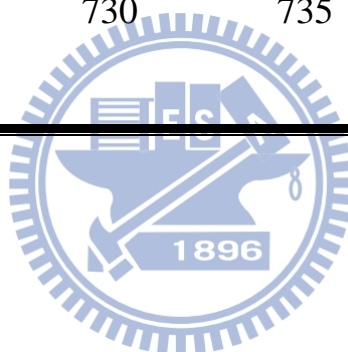


表3 波傳方向元素分割量不同之共振頻率比較

模型長度 (mm)	電極尺寸 (mm)	長度分割量	共振頻率 模擬值(kHz)	差異(%)
4	s=w=0.5	40	750	2%
		200	735	

表4 固定電極比 s:w=1:1 之模擬共振頻率

電極寬度 w (mm)	0.25	0.375	0.5	0.75	1
波長 λ (mm)	2	3	4	6	8
共振頻率 (kHz)	1600	1045	750	495	365

表5 Hostplate 模擬分割數量表

L(mm)	0.5~6	6~12	12~18	18~20
L 分割元素 數	20	40	60	80
總節點數	48,761	63,041	77,321	91,601
總元素量	44,120	56,920	69,720	82,520

表6 AE-PFC 金相觀測結構尺寸

整體厚度	纖維間距	電極厚度	聚醯亞胺厚度
340 μm	16 μm	27 μm	25 μm

表7 自由狀態之 AE-PFC 阻抗響應的數值分析與實驗值比較

電極尺寸 s+w (mm)	波長 λ (mm)	響應頻率		誤差(%)
		實驗值(kHz)	分析值(kHz)	
1	4	750	720	4.17%
0.8	3.2	880	935	-5.35%

表8 自由狀態之 AE-PFC 插入損失的數值分析與實驗值比較

電極尺寸 s+w (mm)	波長 λ (mm)	響應頻率 實驗值(kHz)	響應頻率 分析值(kHz)	誤差(%)
1	4	775	720	7.6%
0.8	3.2	885	935	-5.3%

表9 自由狀態之 AE-PFC 實驗量測阻抗響應與插入損失比較

電極尺寸 s+w (mm)	波長 λ (mm)	阻抗響應 頻率(kHz)	插入損失 頻率(kHz)	誤差(%)
1	4	750	775	-3.22%
0.8	3.2	880	885	-0.56%

表10 聲場訊號極值對照表

聲場距離 電極尺寸 s+w (mm)	30 mm		60 mm	
	最大值 (dB)	最小值 (dB)	最大值 (dB)	最小值 (dB)
1	-61.851	-78.416	-62.1	-46.1



附圖

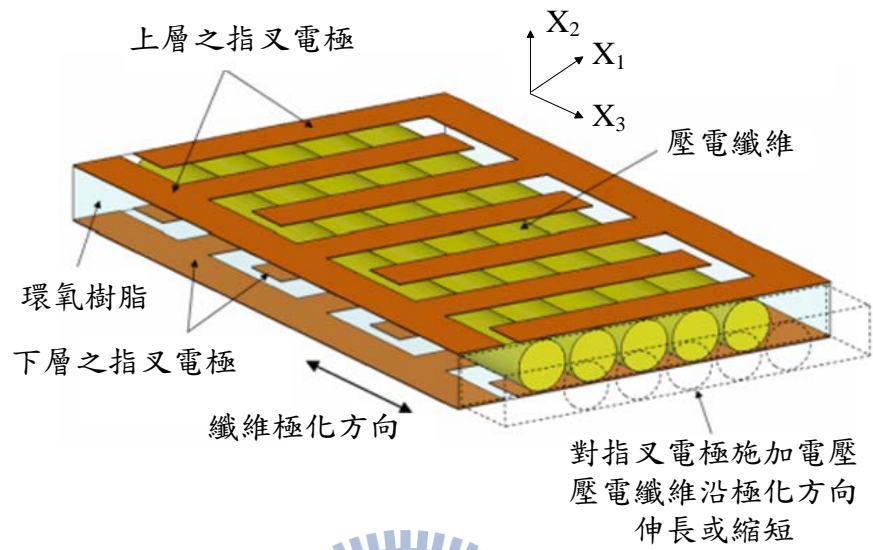


圖1.1 壓電纖維複合材料(PFC)

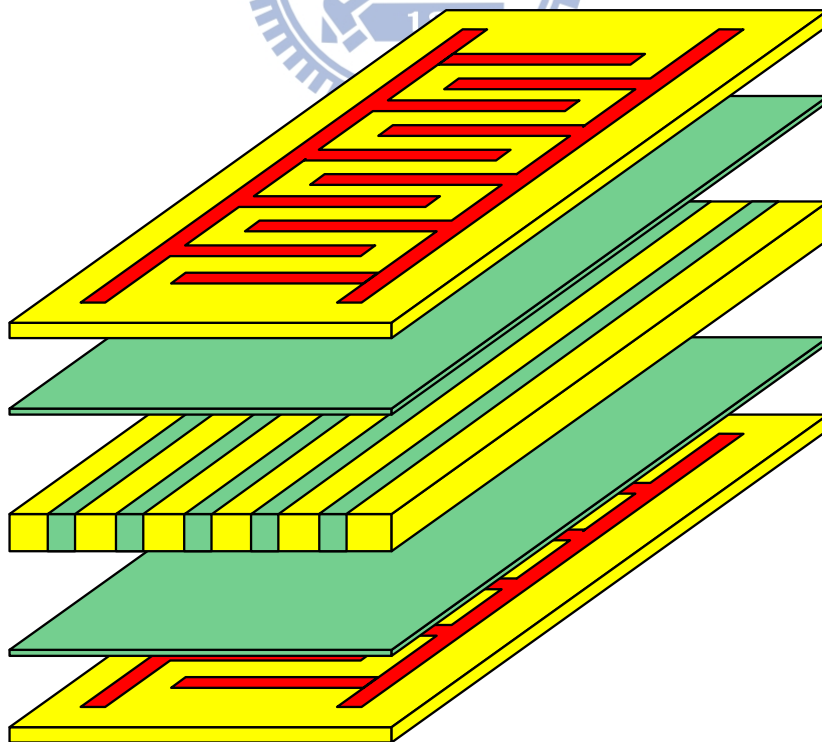


圖1.2 MFC 爆炸示意圖

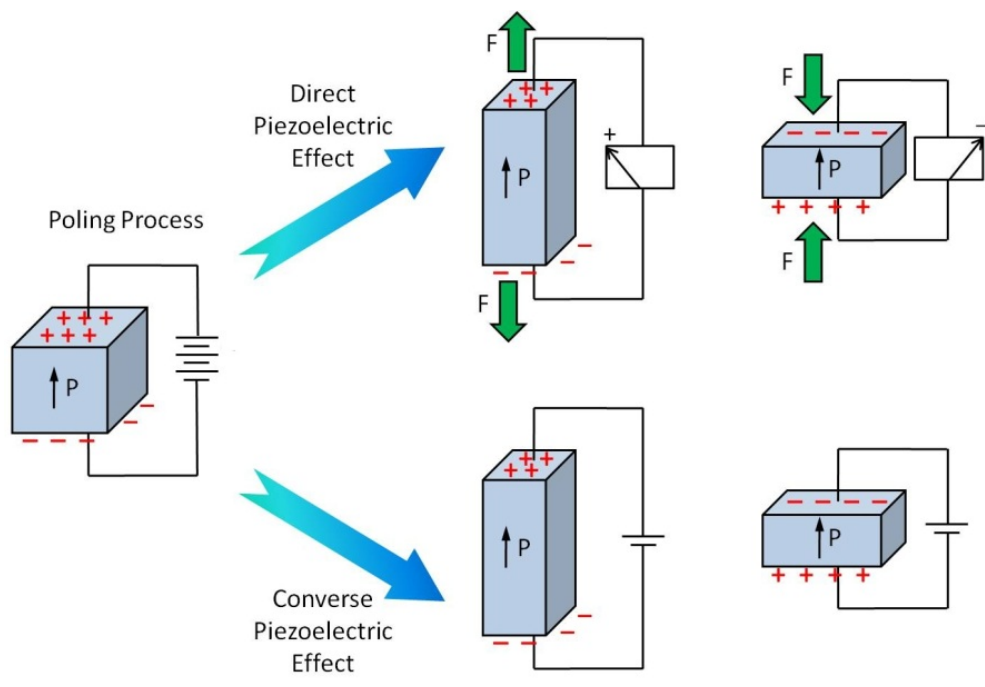


圖2.1 壓電效應示意圖

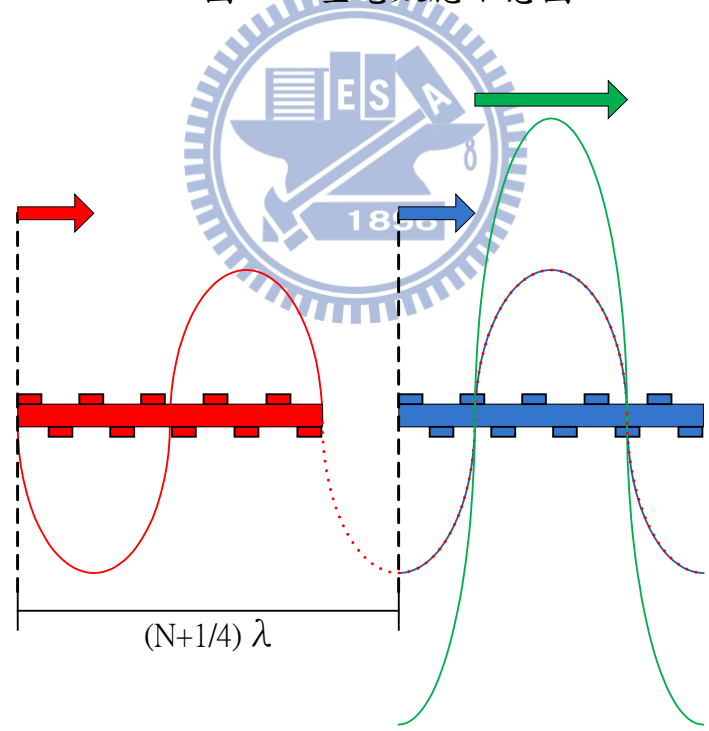


圖2.2 單向波傳示意圖

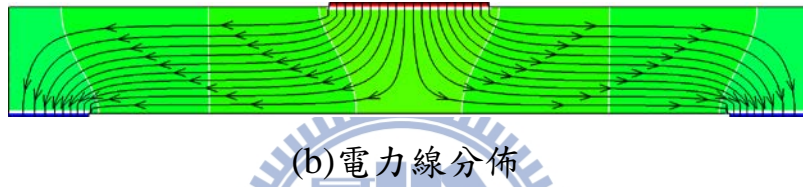
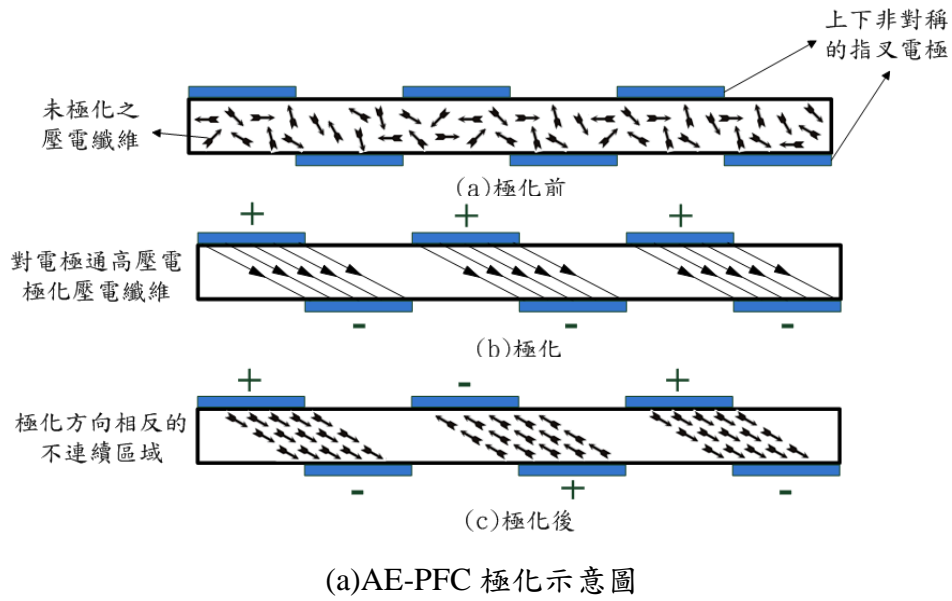


圖3.1 (a)AE-PFC 極化示意圖與(b)電力線分佈

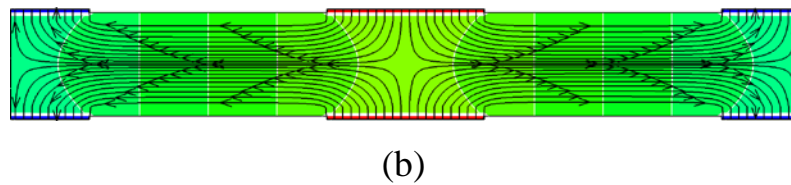
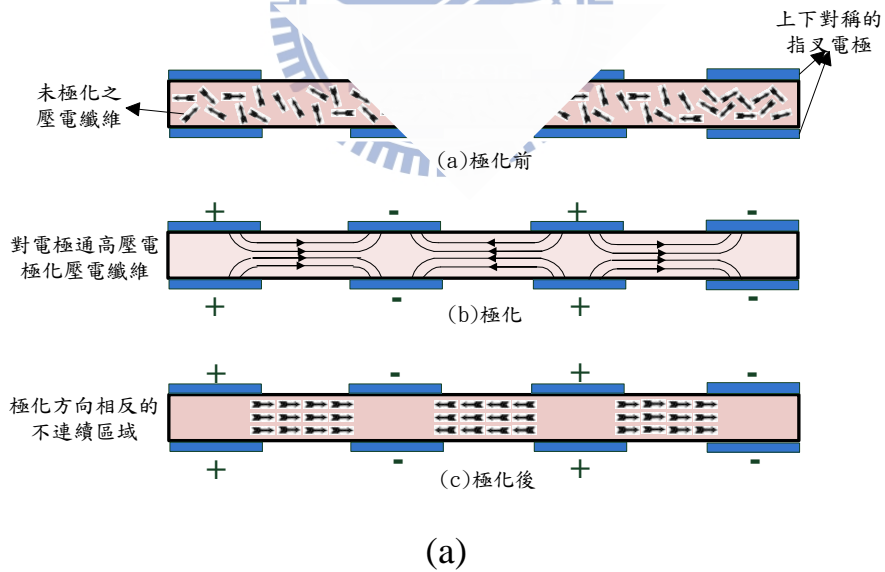
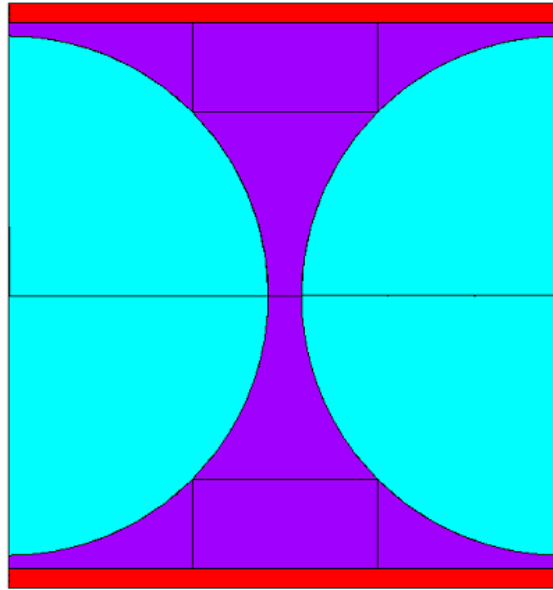


圖3.2 (a) PFC 極化示意圖與(b)電力線分佈

VOLUMES
MAT NUM

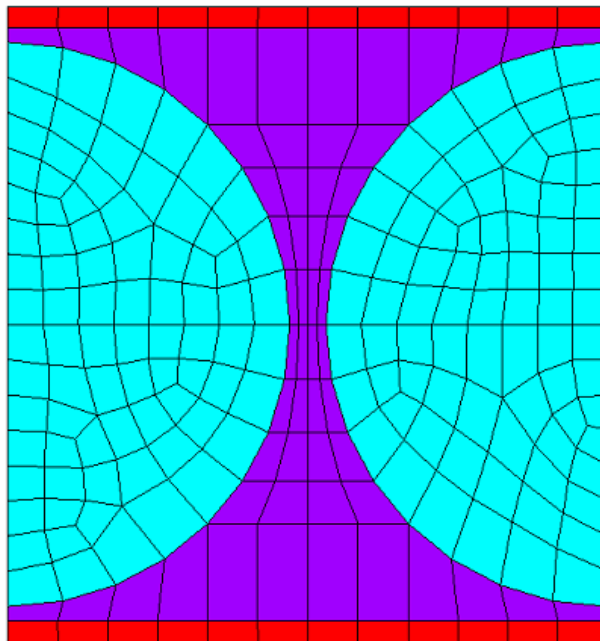


ANSYS
JUL 23 2013
15:20:10

圖3.3 模態分析之電場模擬模型剖面圖



ELEMENTS
MAT NUM



ANSYS
JUL 23 2013
15:18:42

圖3.4 模態分析之電場模擬模型網格圖

ELEMENTS
MAT NUM

ANSYS
JUL 17 2013
22:48:09

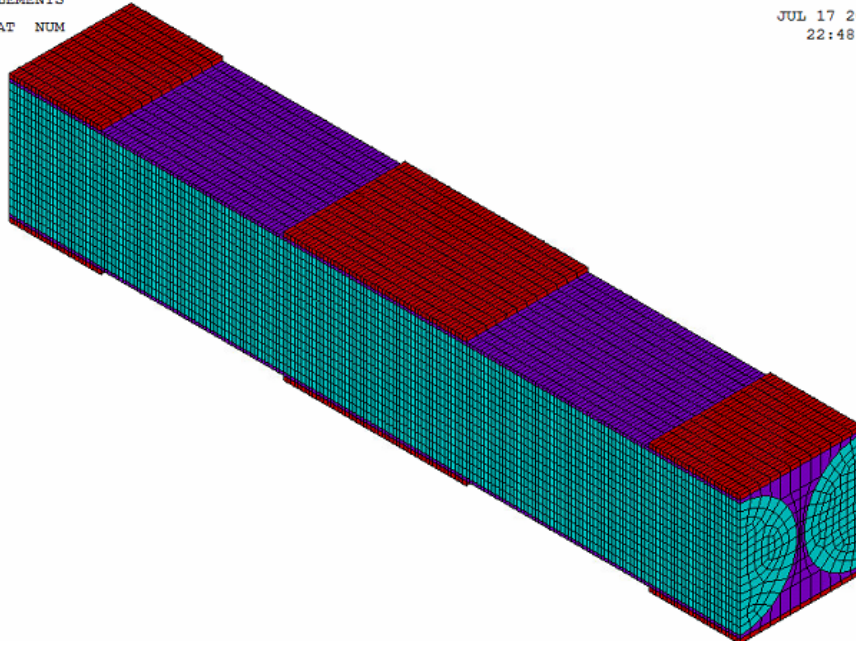


圖3.5 對稱極化電場模擬模型

ELEMENTS
MAT NUM

ANSYS
JUL 17 2013
22:46:56

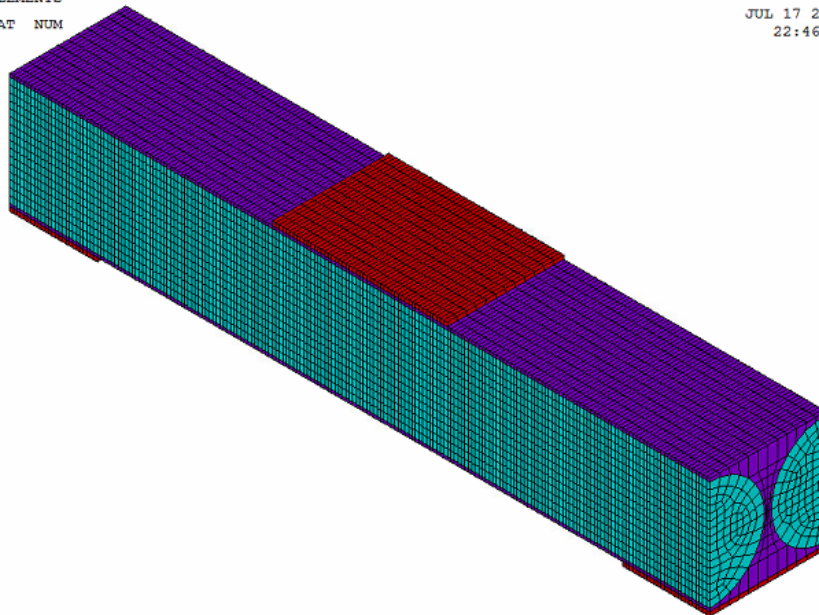
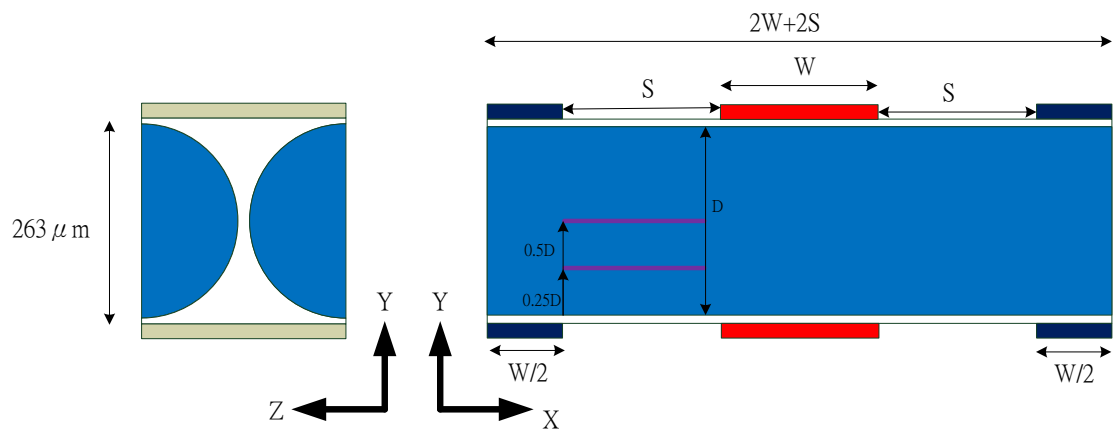
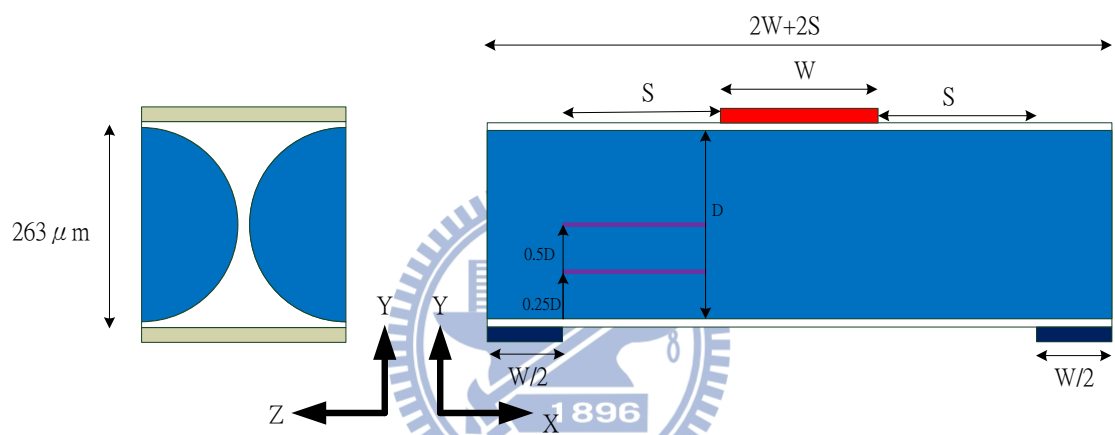


圖3.6 反對稱極化電場模擬模型



(a)



(b)

圖3.7 電場模擬模型示意圖(a)對稱極化(b)反對稱極化

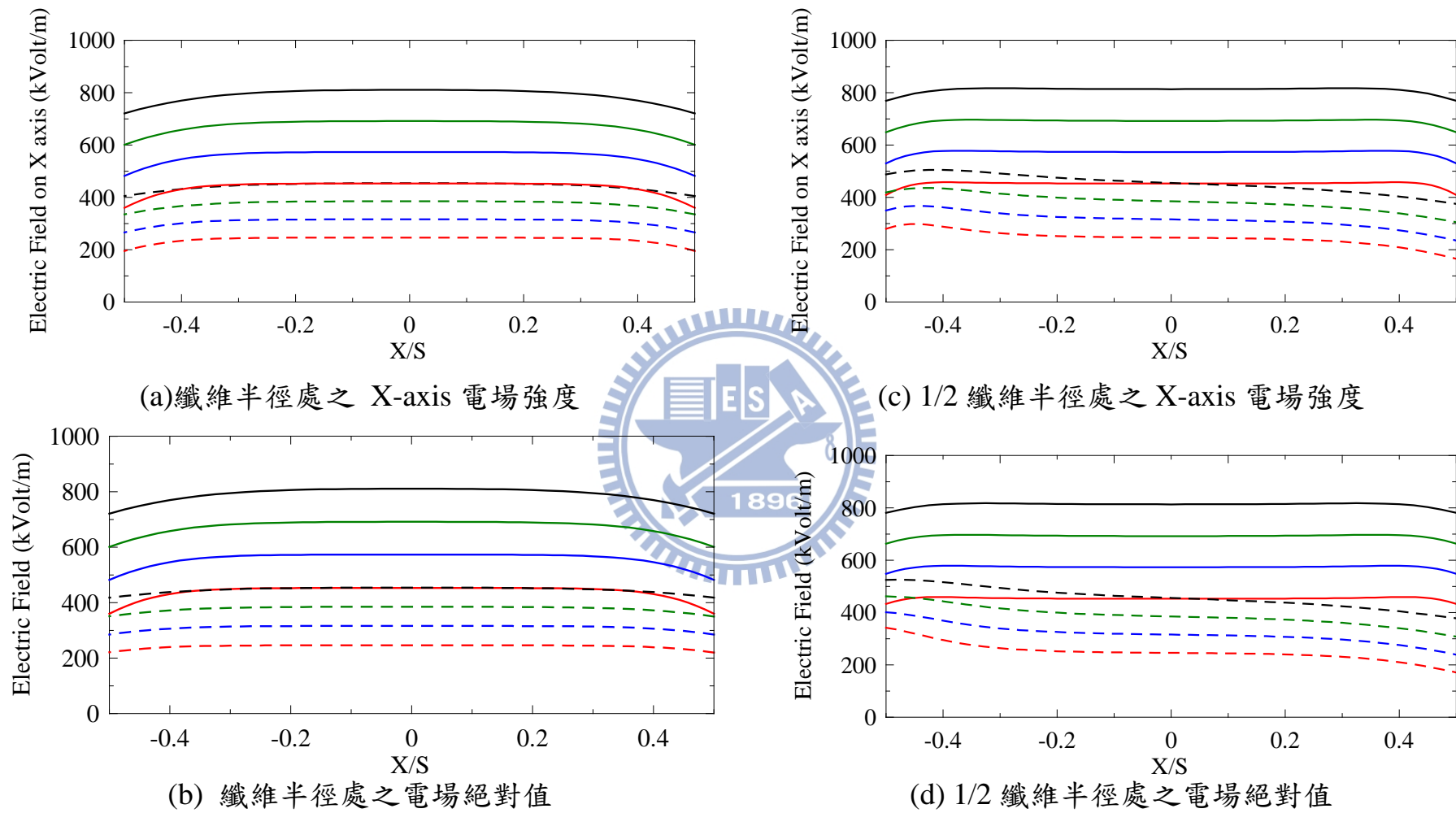


圖3.8 AE-PFC 壓電 纖維中心剖面電場強度 E_x 分量

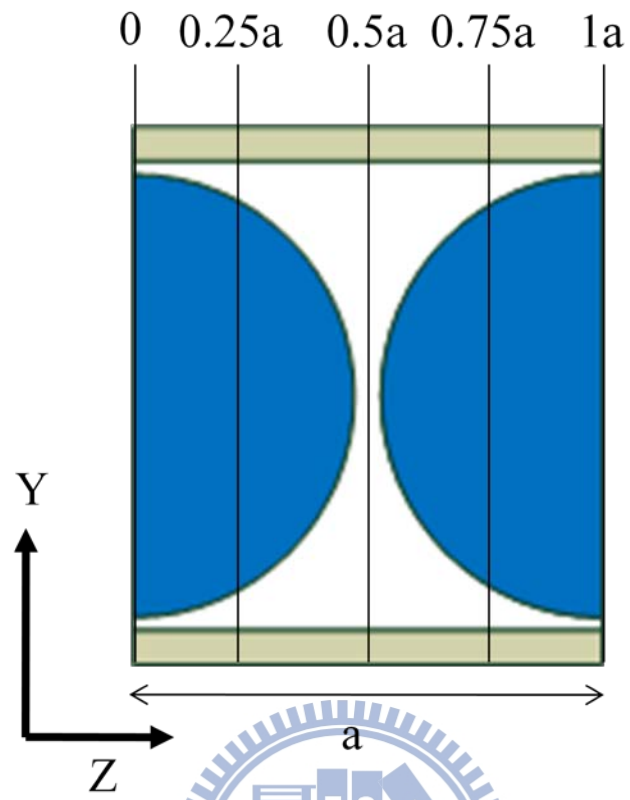
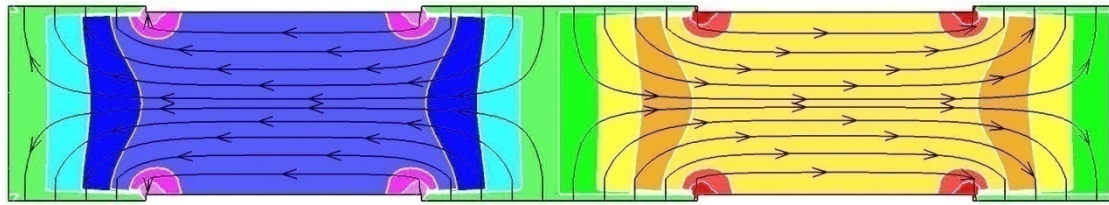
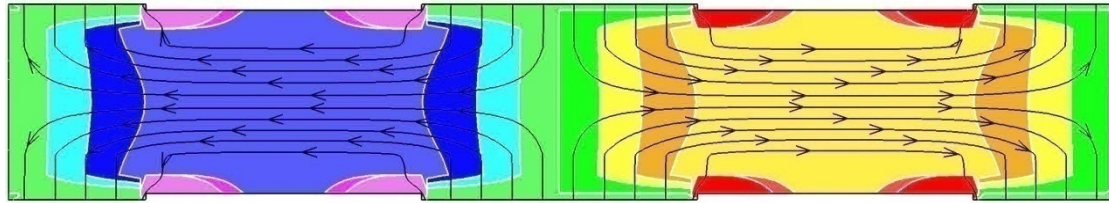


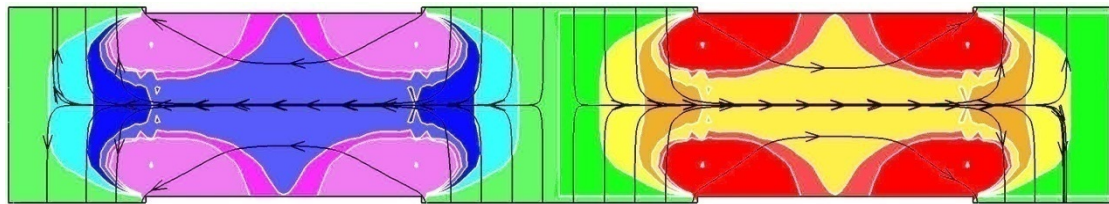
圖3.9 電場模擬結果不同縱截面示意圖



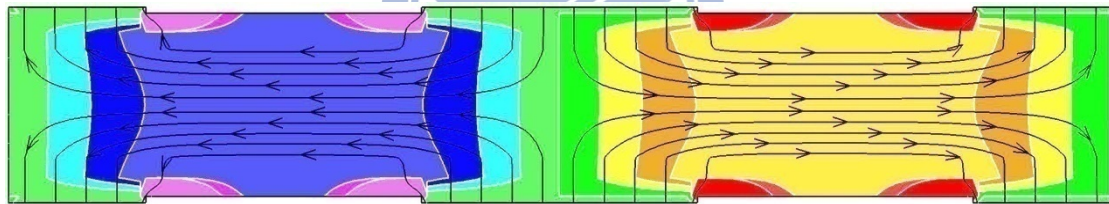
(a)



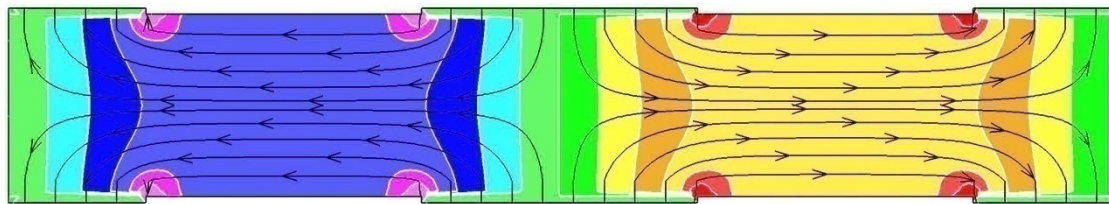
(b)



(c)



(d)



(e)

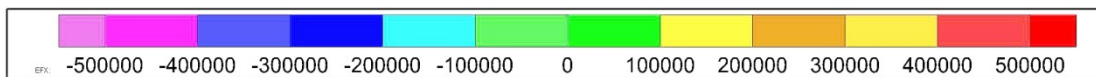


圖3.10 於模型寬度(a)0倍(b)1/4倍(c)1/2倍(d)3/4倍(e)1倍位置之對稱極化X方向電場分量

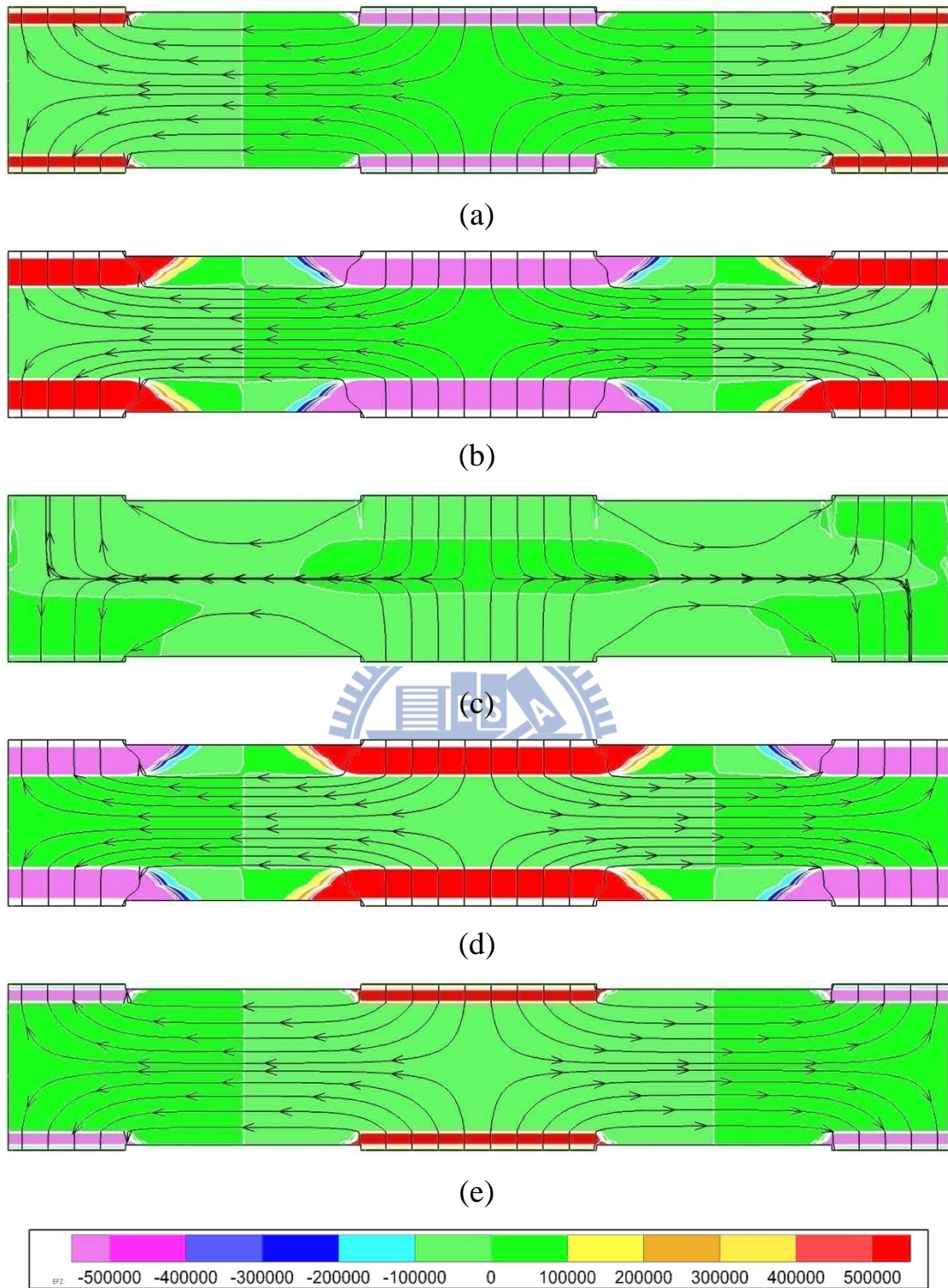


圖3.11 於模型寬度(a)0 倍(b) 1/4 倍(c) 1/2 倍(d) 3/4 倍(e) 1 倍 位置之對稱極化 Z 方向電場分量

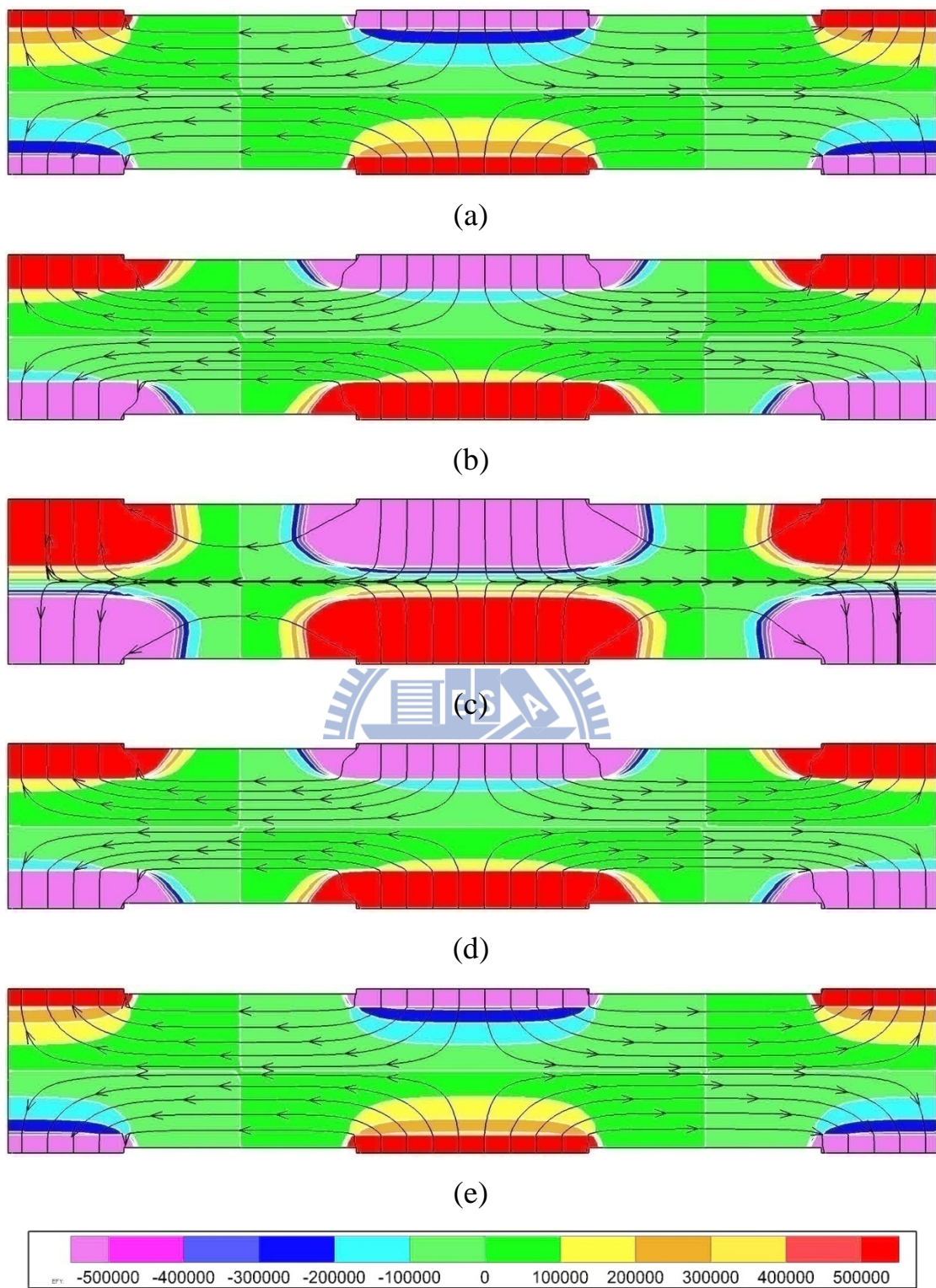


圖3.12 於模型寬度(a)0 倍(b) 1/4 倍(c) 1/2 倍(d) 3/4 倍(e) 1 倍 位置之對稱極化 Y 方向電場分量

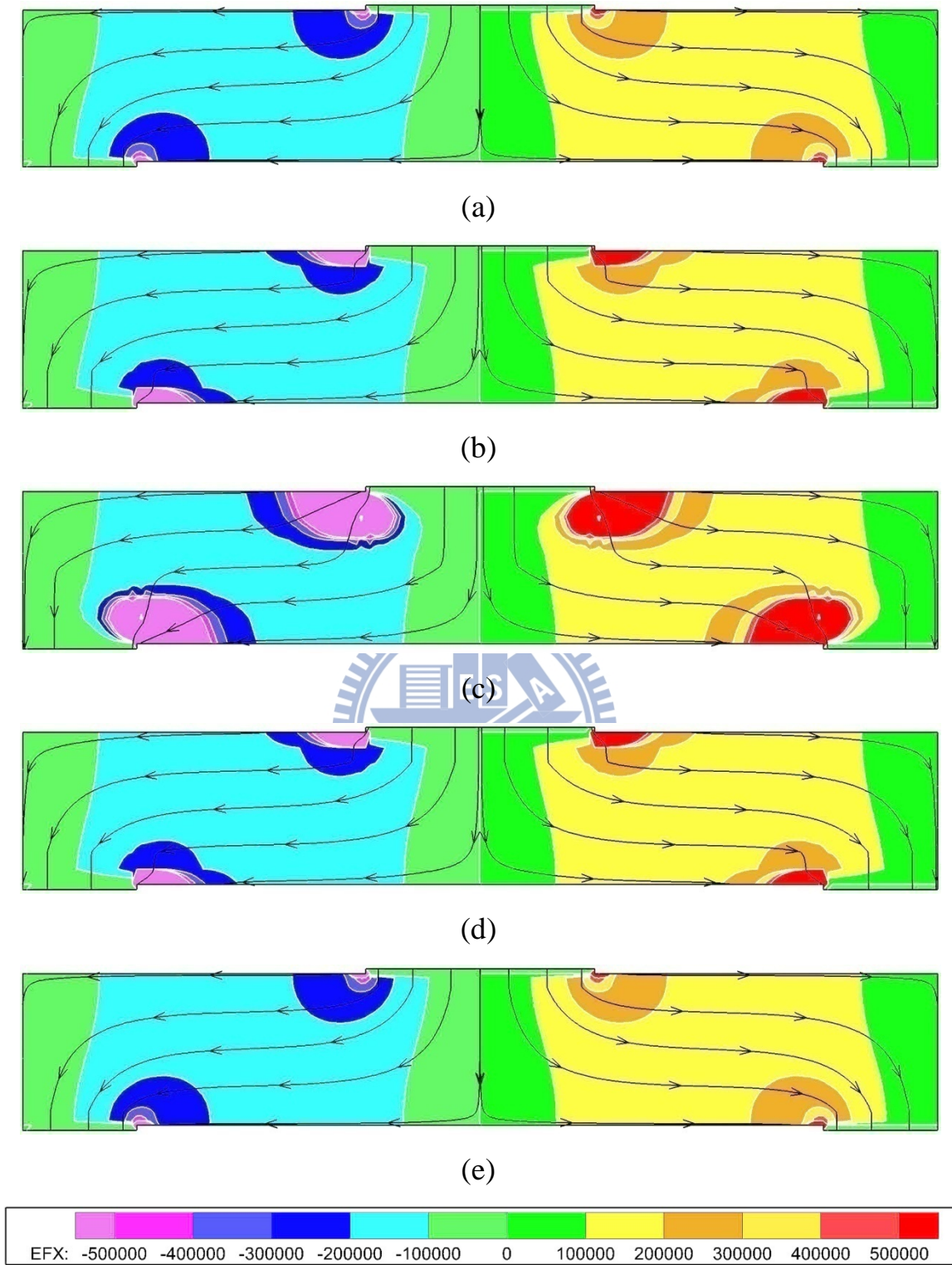


圖3.13 於模型寬度(a)0 倍(b) 1/4 倍(c) 1/2 倍(d) 3/4 倍(e) 1 倍 位置之
反對稱極化 X 方向電場

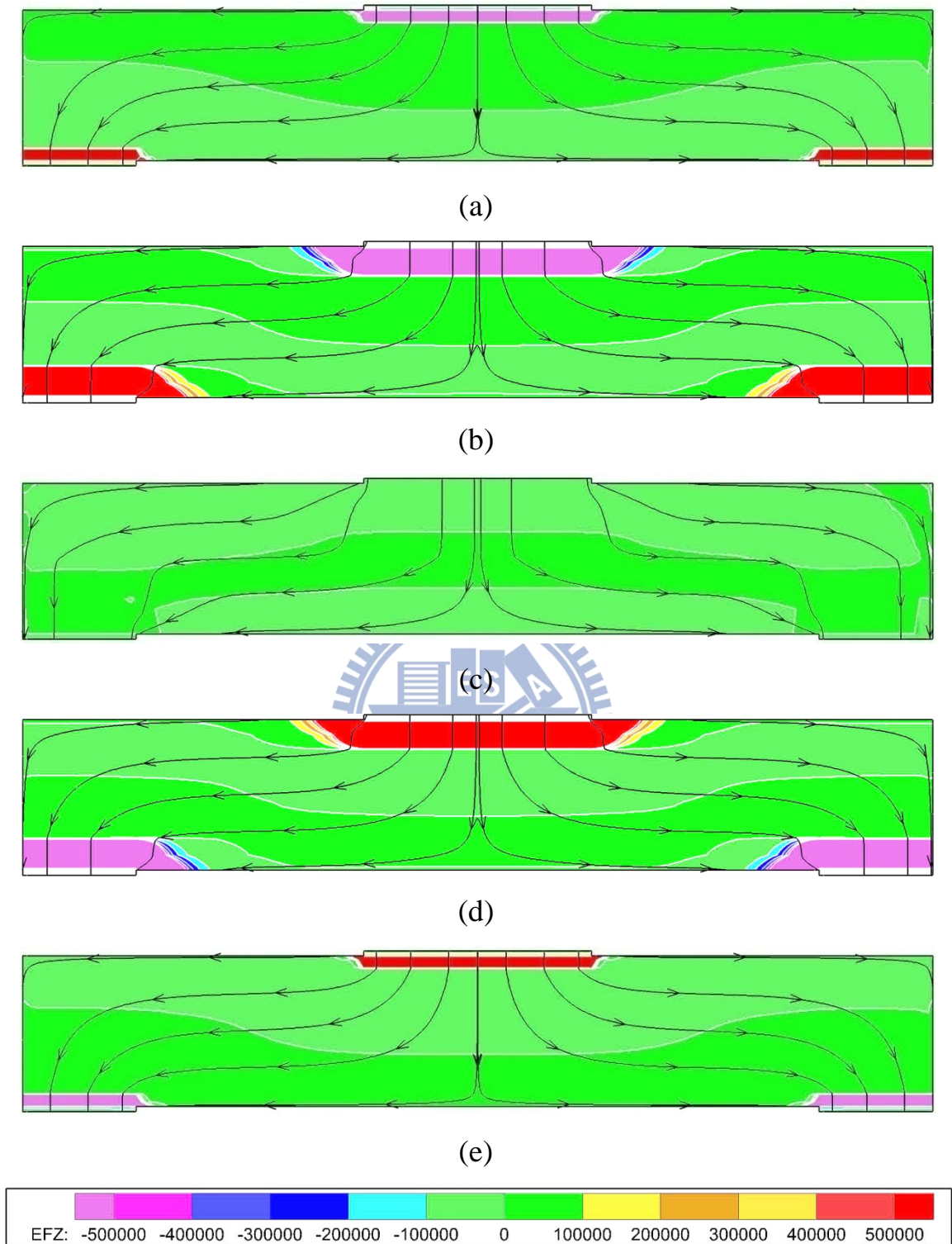


圖3.14 於模型寬度(a)0 倍(b) 1/4 倍(c) 1/2 倍(d) 3/4 倍(e) 1 倍 位置之
反對稱極化 Z 方向電場分量

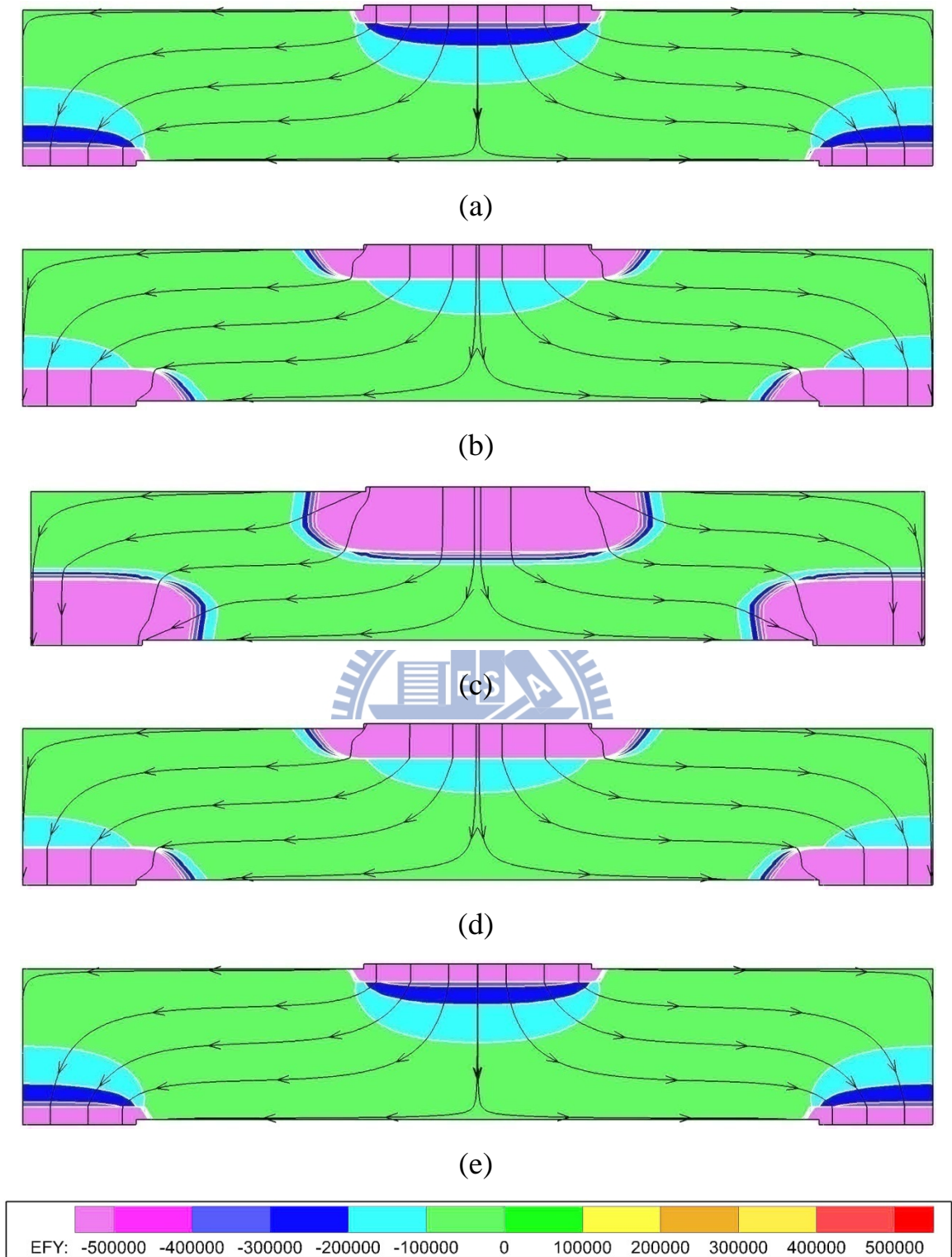


圖3.15 於模型寬度(a)0 倍(b) 1/4 倍(c) 1/2 倍(d) 3/4 倍(e) 1 倍 位置之
反對稱極化 Y 方向電場分量

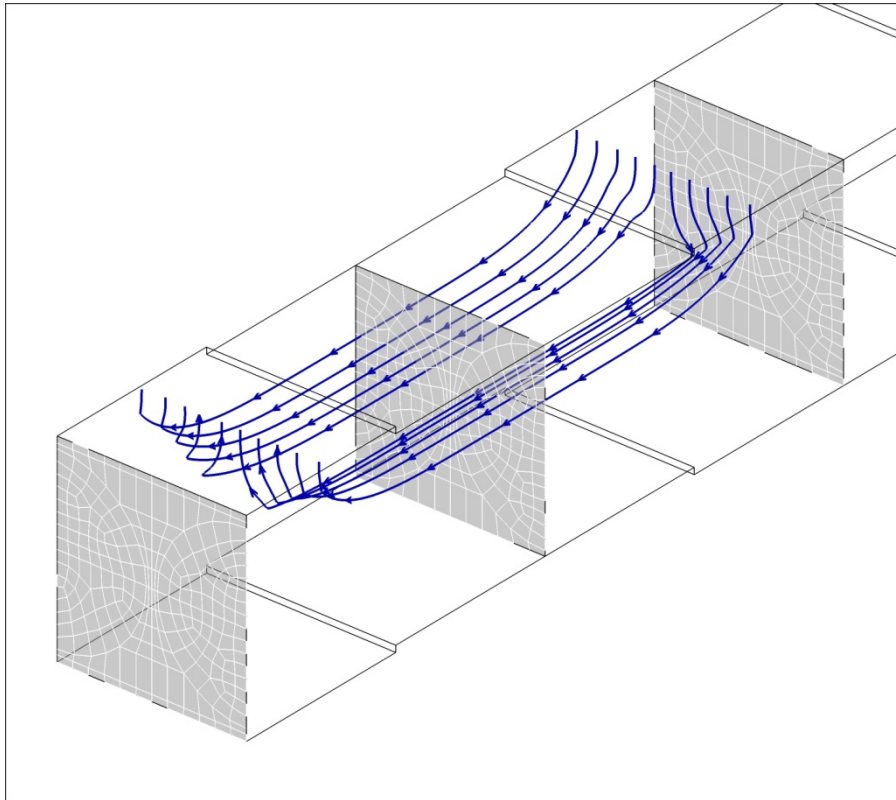


圖3.16 對稱電極生成之極化電力線(僅顯示模型上半部)

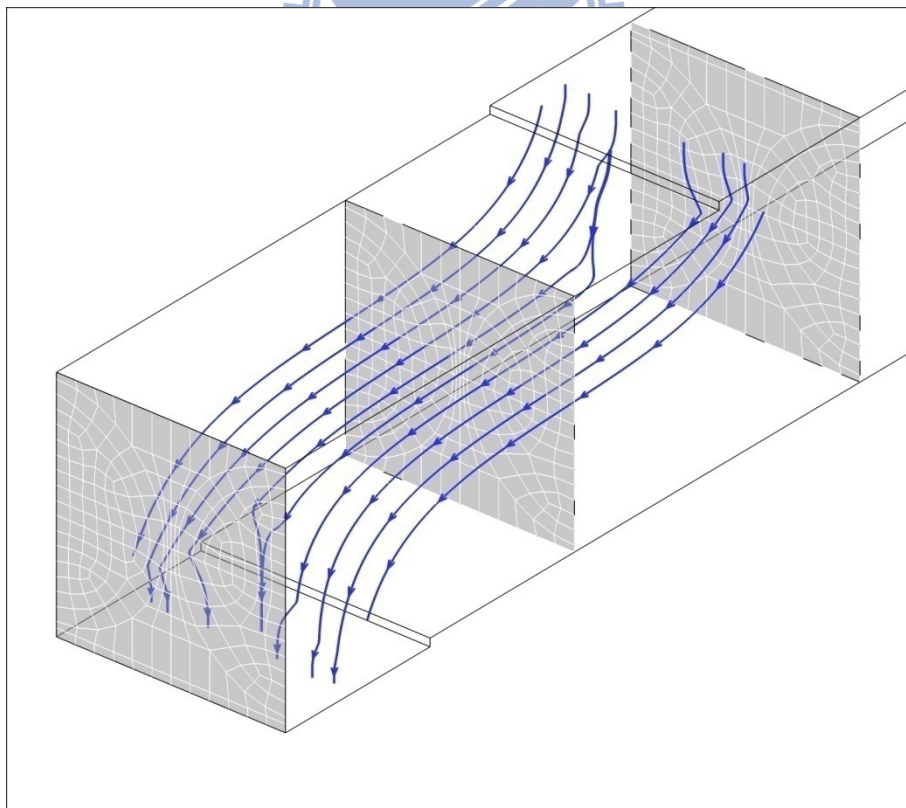
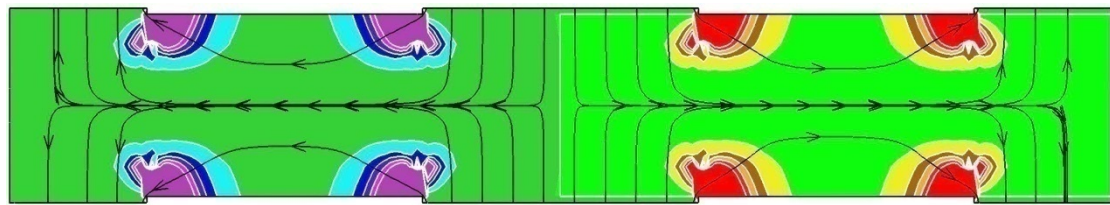
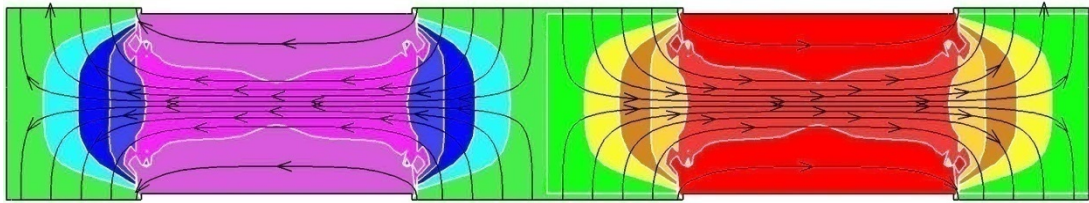


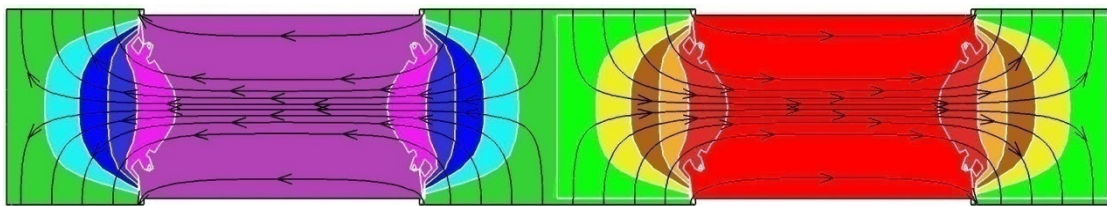
圖3.17 反對稱電極生成之極化電力線



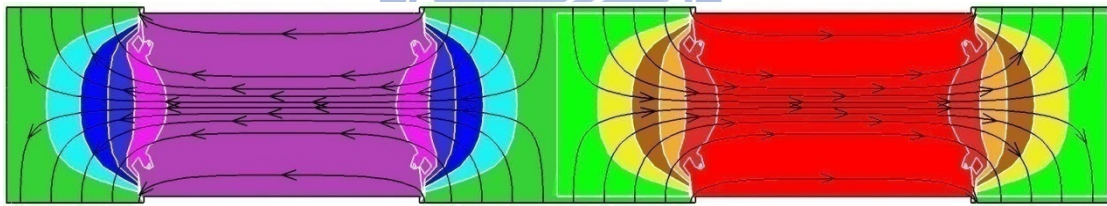
(a)



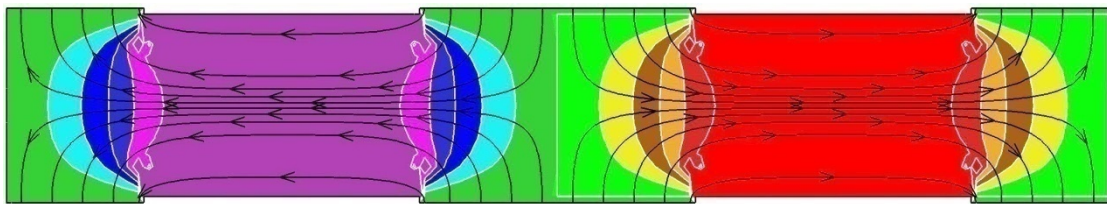
(b)



(c)



(d)



(e)

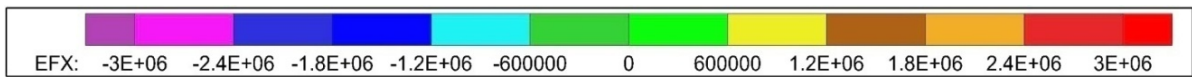


圖3.18 母材為混合 PZT 粉末與環氧樹脂之對稱極化電場(a) $\varepsilon_{33}^T = 5\varepsilon_0$

(b) $\varepsilon_{33}^T = 211.25\varepsilon_0$ (c) $\varepsilon_{33}^T = 417.5\varepsilon_0$ (d) $\varepsilon_{33}^T = 623.75\varepsilon_0$ (e) $\varepsilon_{33}^T = 830\varepsilon_0$

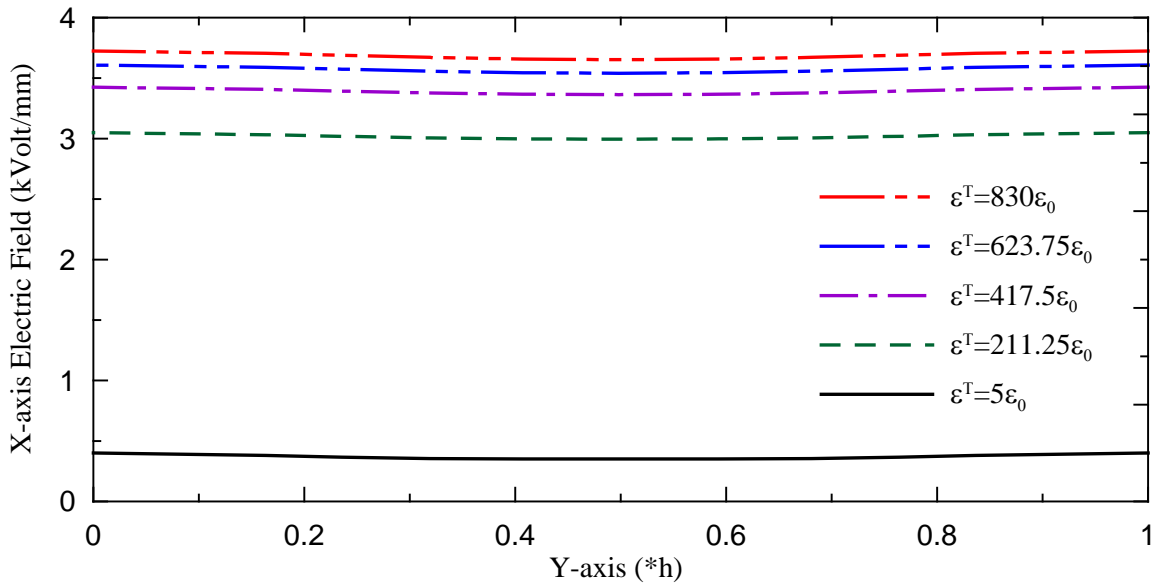


圖3.19 電極中央環氧樹脂層之 X 方向電場

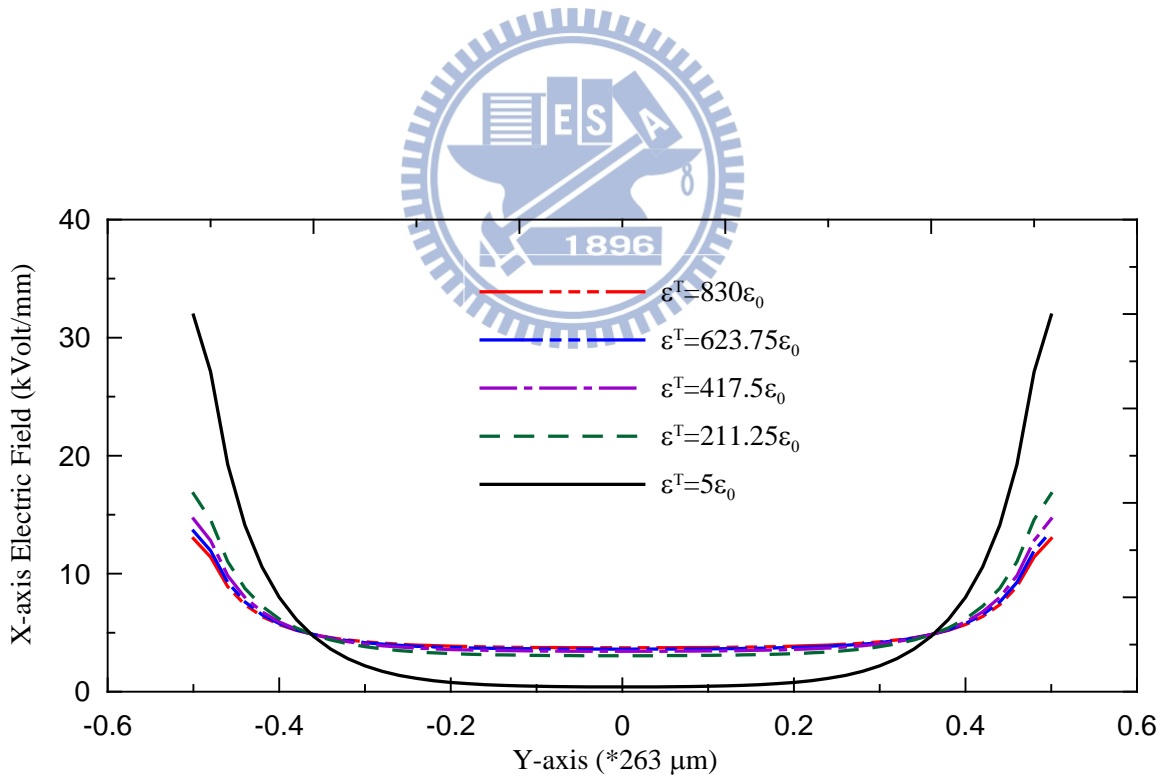


圖3.20 電極間環氧樹脂層之 X 方向電場

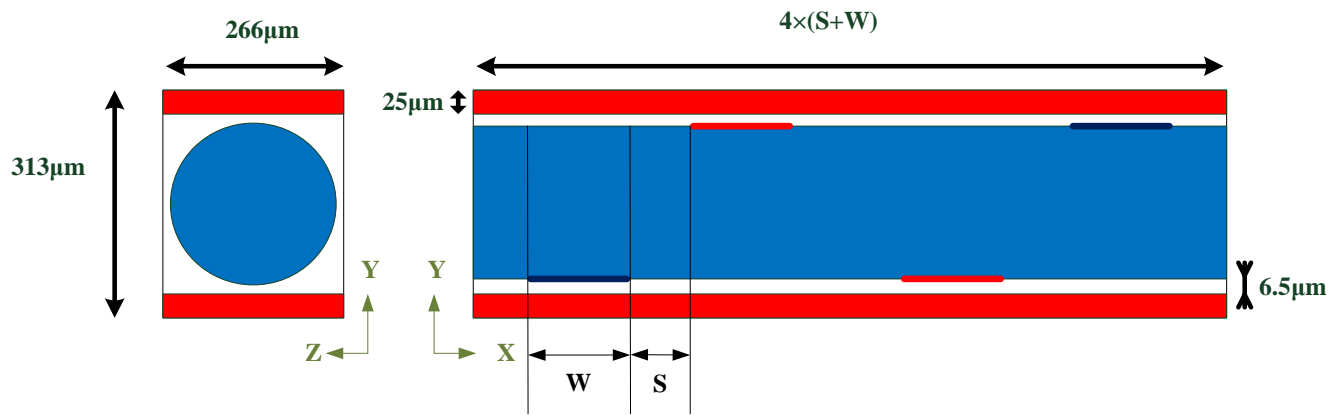


圖3.21 AE-PFC 時諧分析模型示意圖

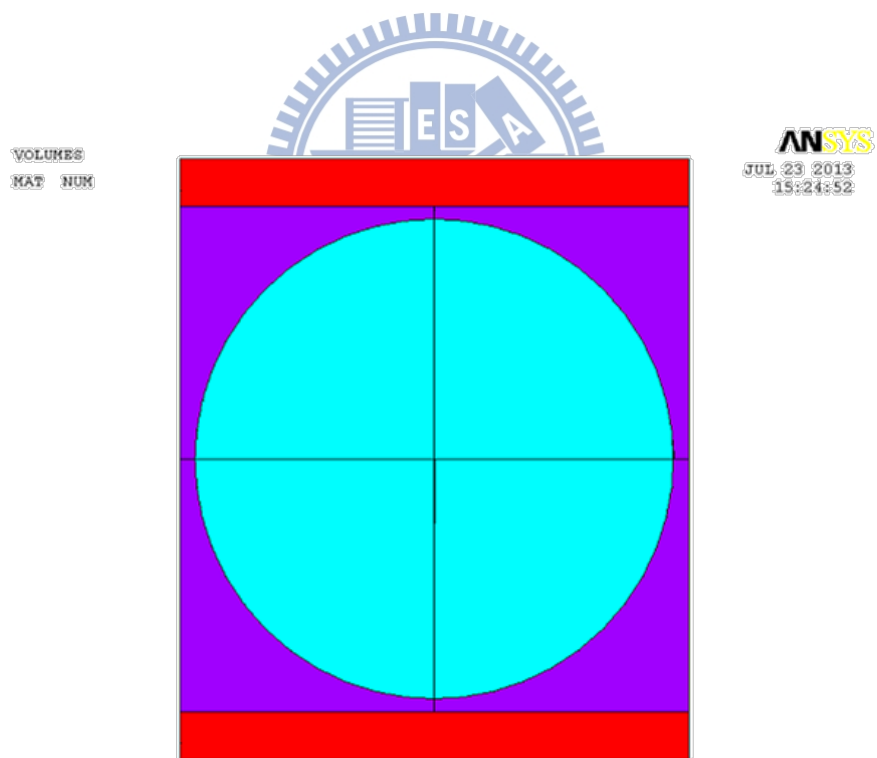
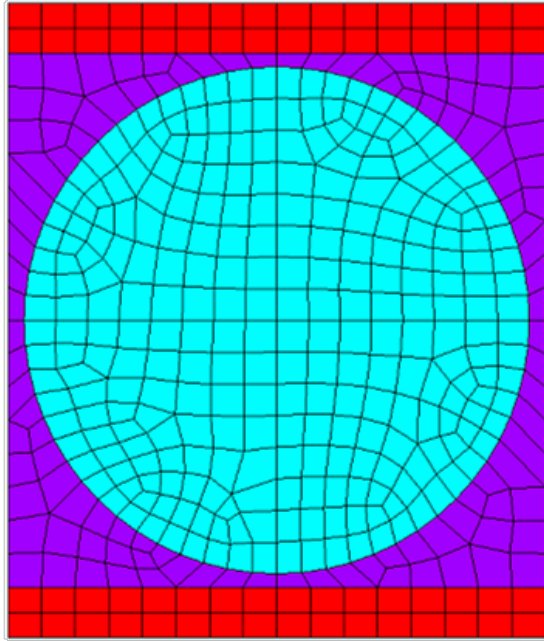


圖3.22 AE-PFC 時諧分析模擬模型圖

ELEMENTS
MAT NUM

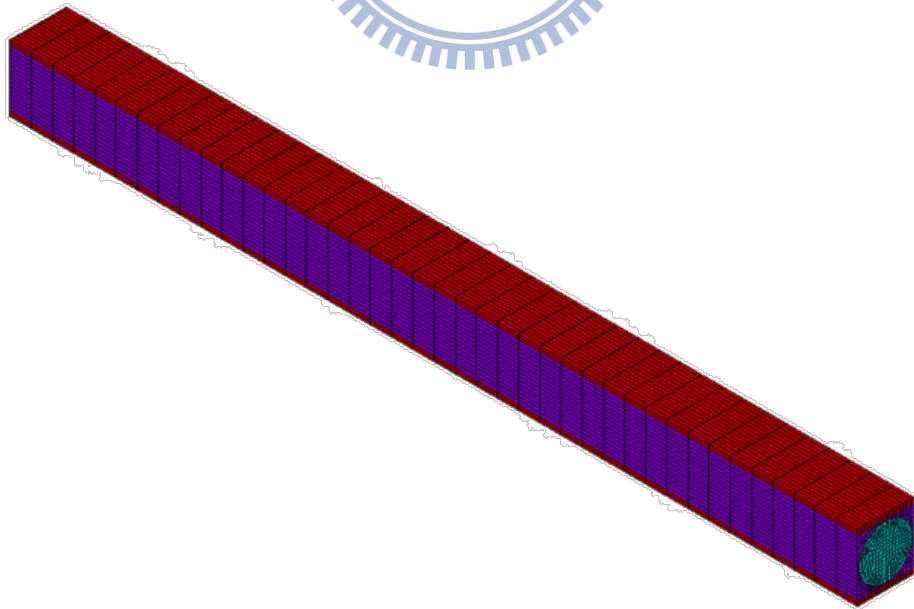


ANSYS
JUL 23 2013
15:24:23

圖3.23 AE-PFC 時諧分析模擬網格圖



ELEMENTS
MAT NUM



ANSYS
JUL 17 2013
22:34:50

圖3.24 AE-PFC 時諧分析模型圖

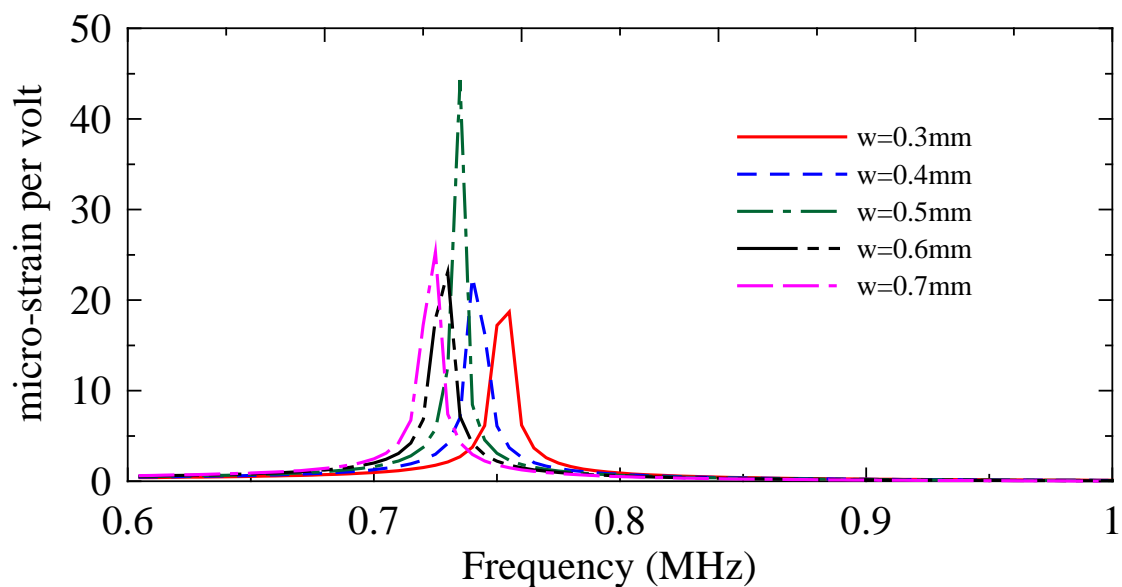


圖3.25 不同電極尺寸比例的單位電壓生成軸向(X-axis)應變響應

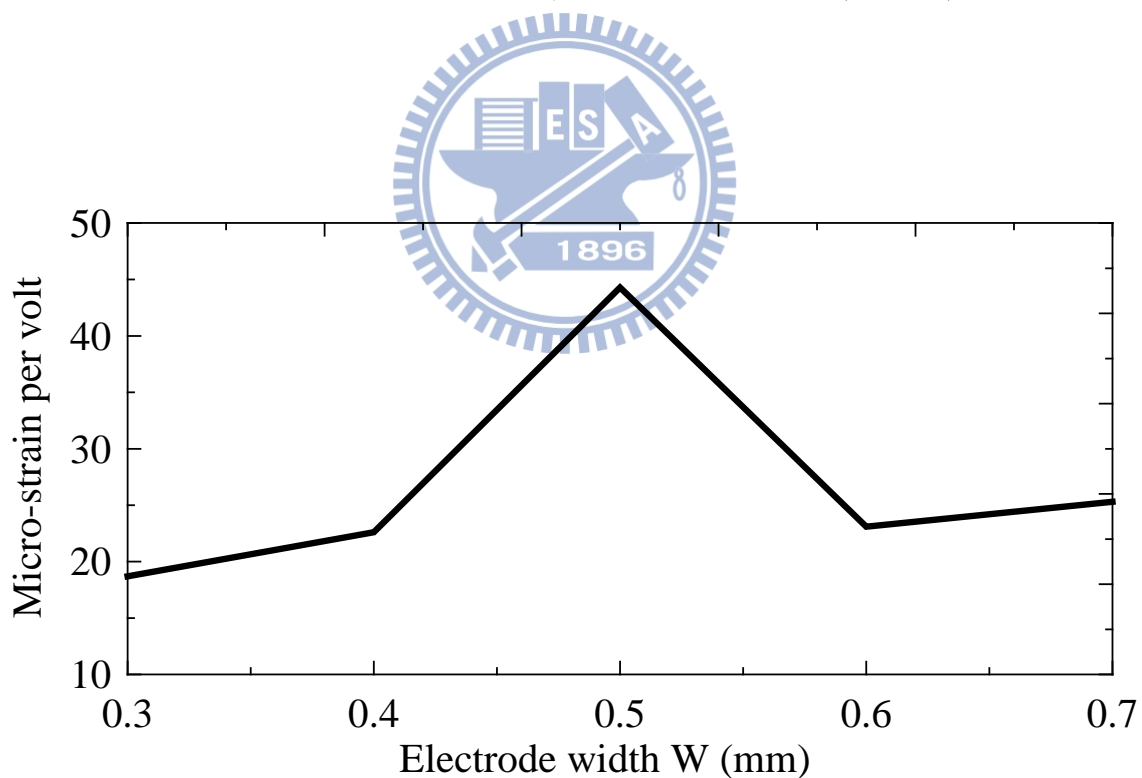
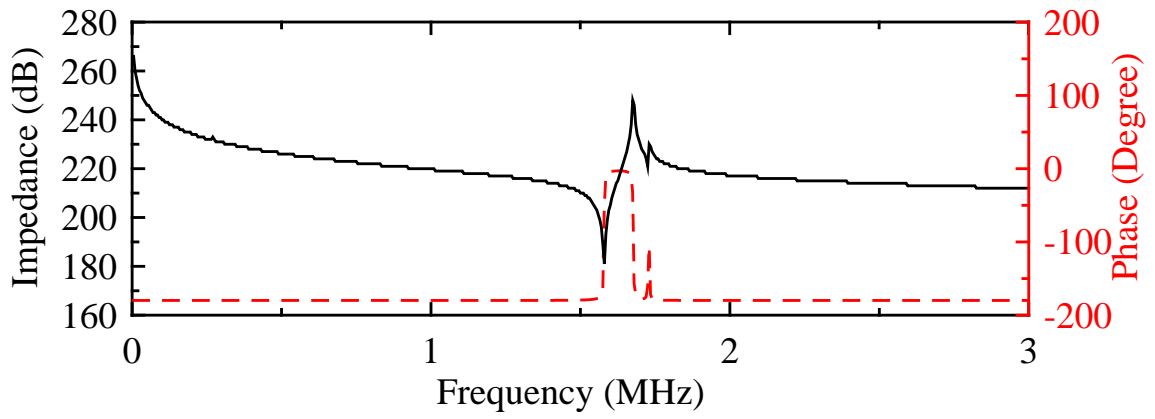
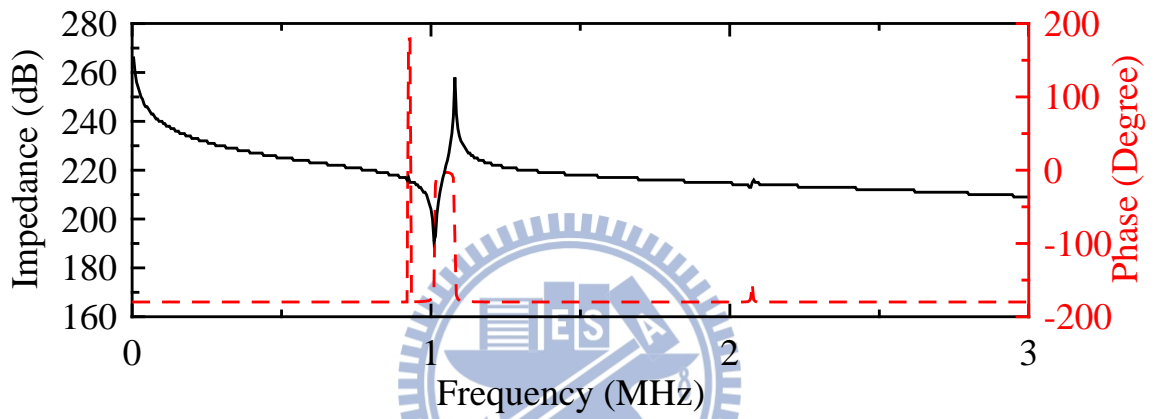


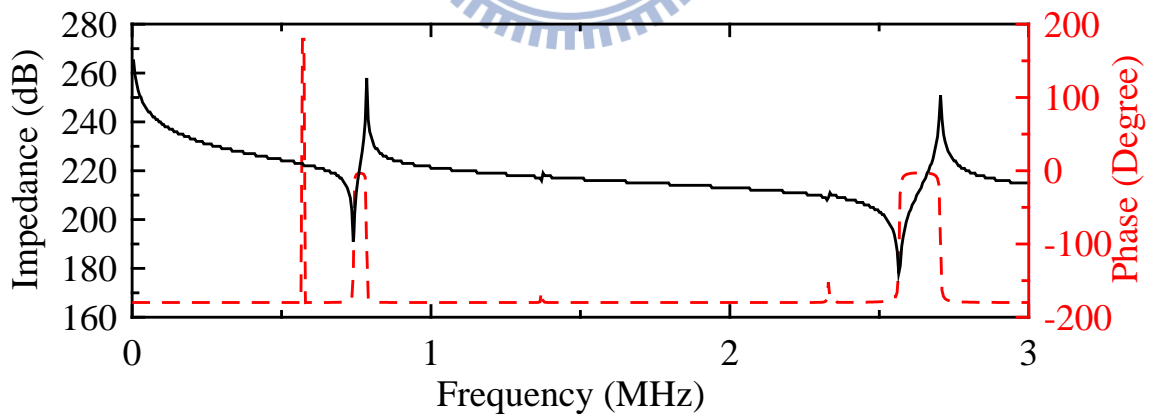
圖3.26 不同電極寬度時的單位電壓生成軸向(X-axis)應變響應



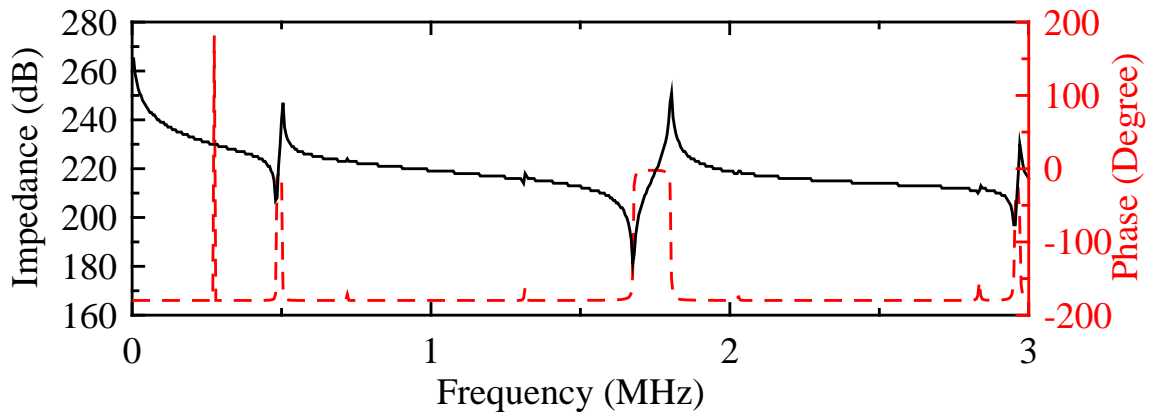
(a) $s=0.25$ mm , $w=0.25$ mm



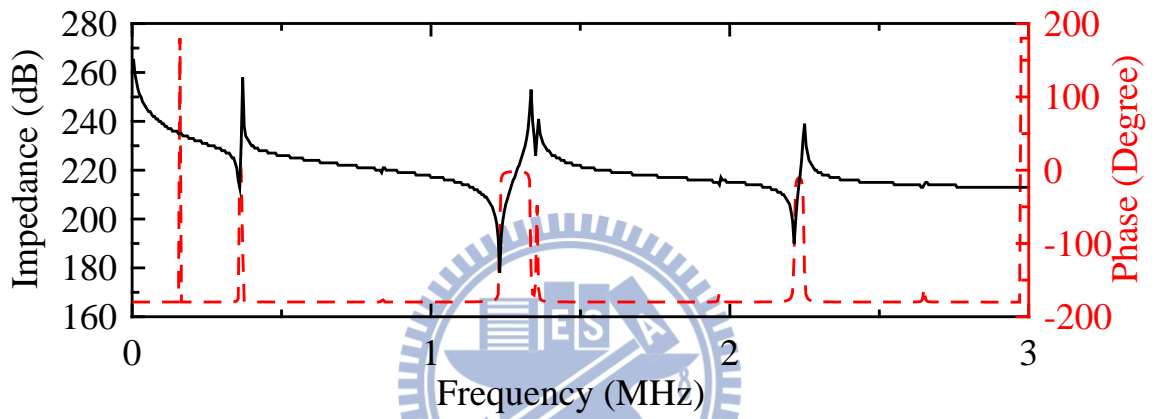
(b) $s=0.375$ mm , $w=0.375$ mm



(c) $s=0.5$ mm , $w=0.5$ mm



(d) $s=0.75 \text{ mm}$, $w=0.75 \text{ mm}$



(e) $s=1 \text{ mm}$, $w=1 \text{ mm}$

圖3.27 不同電極尺寸的阻抗分析曲線

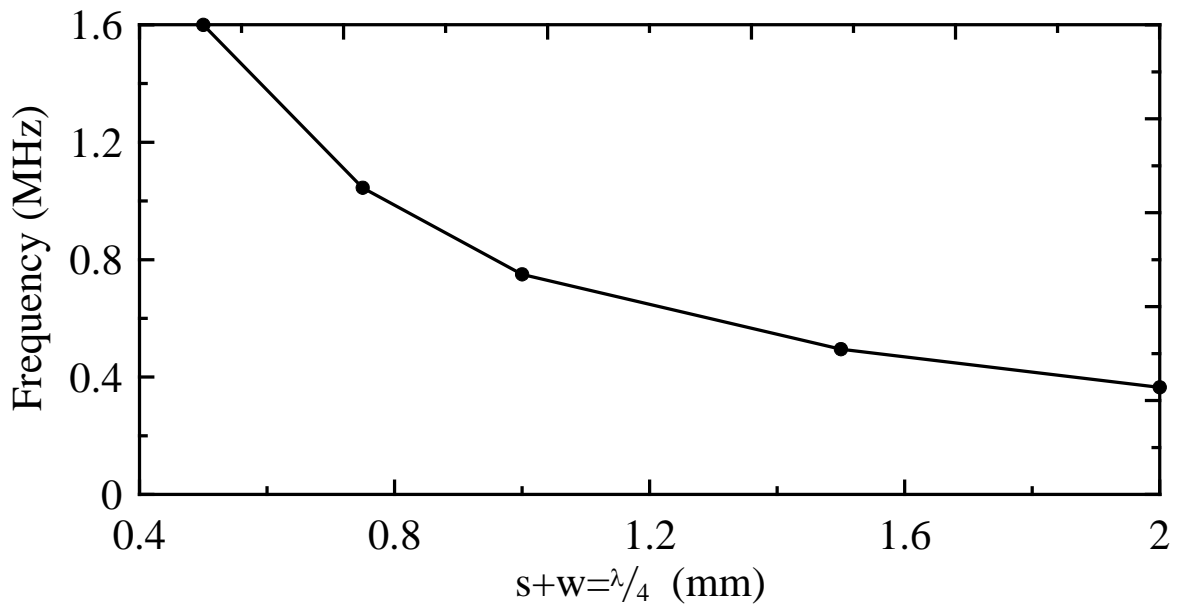


圖3.28 共振頻率與電極尺寸量化比較

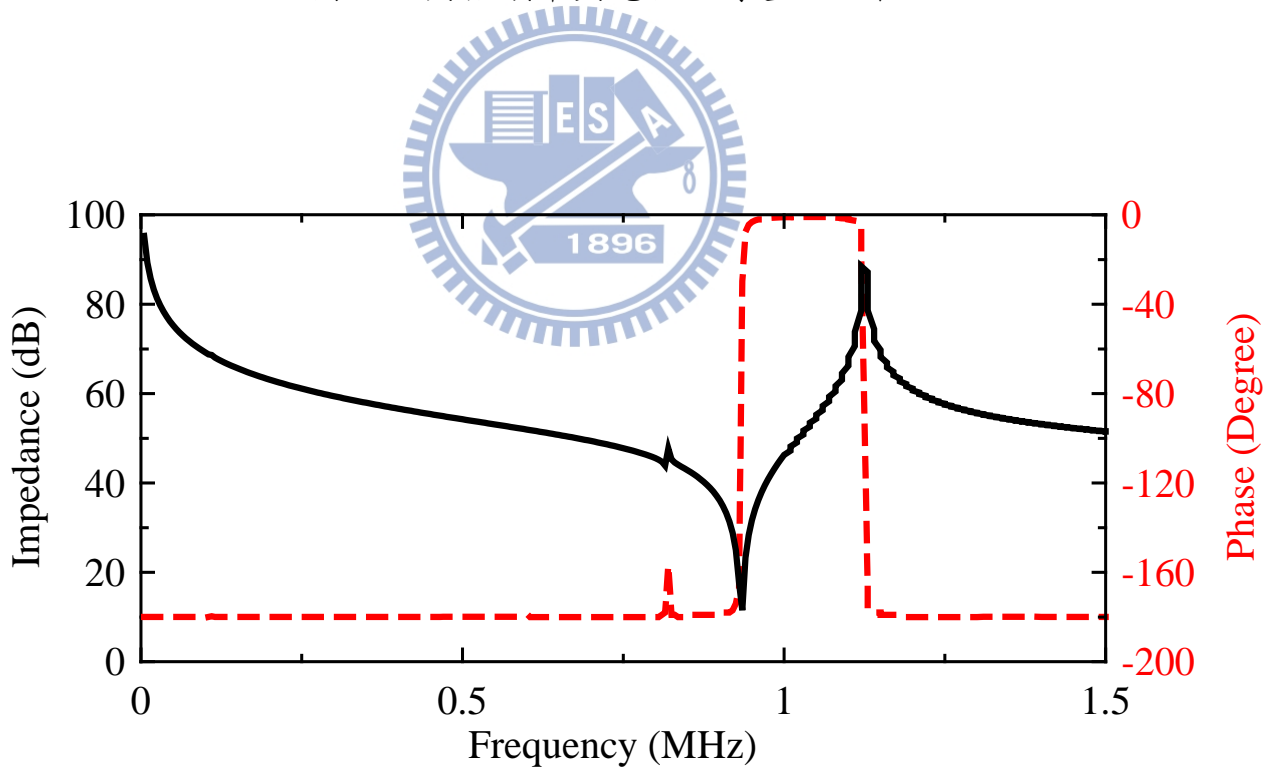
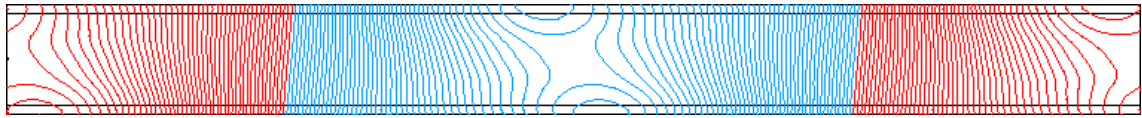
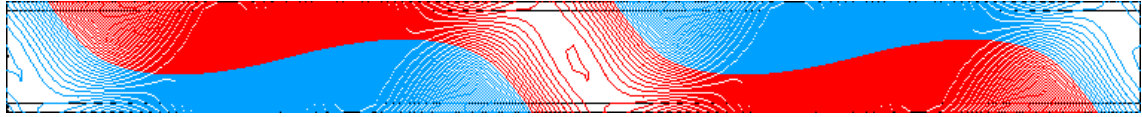


圖3.29 指叉電極間距(s)與寬度(w)為 0.4mm 之模擬阻抗響應曲線



(a)



(b)

圖3.30 共振頻率下之AE-PFC 模態圖(a) U_x (b) U_y

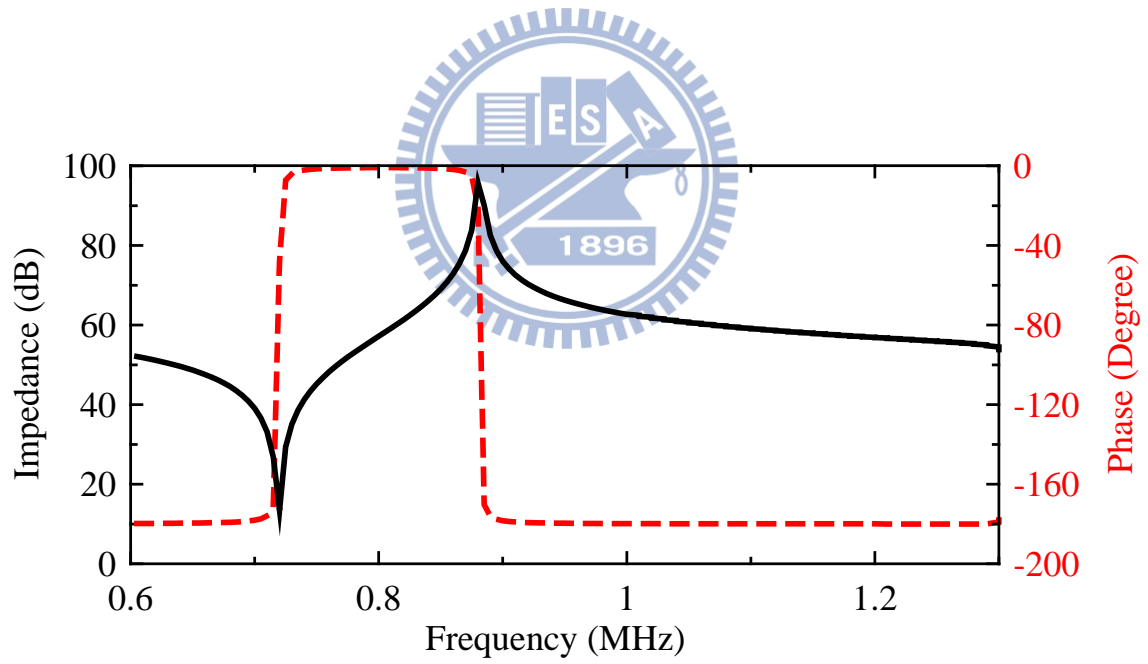


圖3.31 $w=0.8\text{mm}$ ， $s=0.8\text{mm}$ 之 AE-PFC 模擬阻抗響應圖

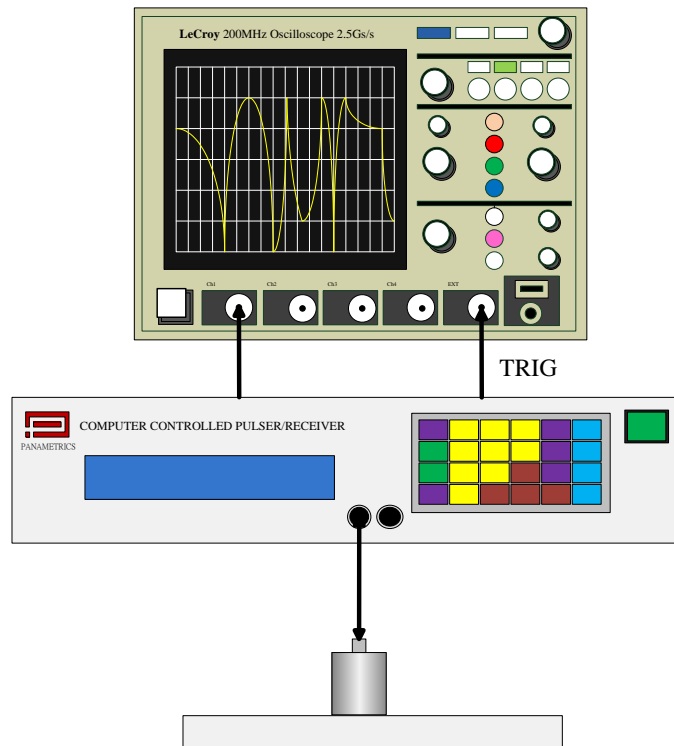


圖3.32 脈波回音法實驗架構

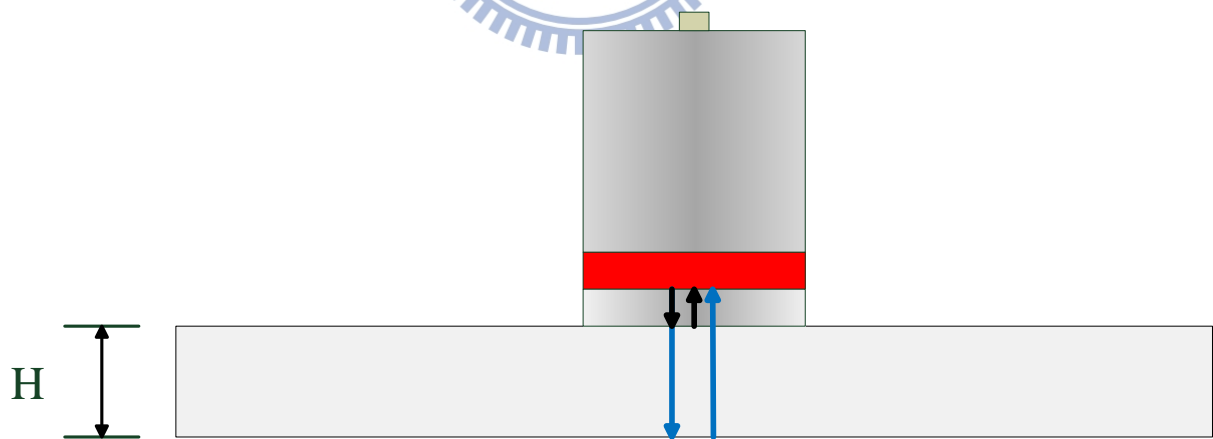


圖3.33 縱波與橫波的回波示意圖

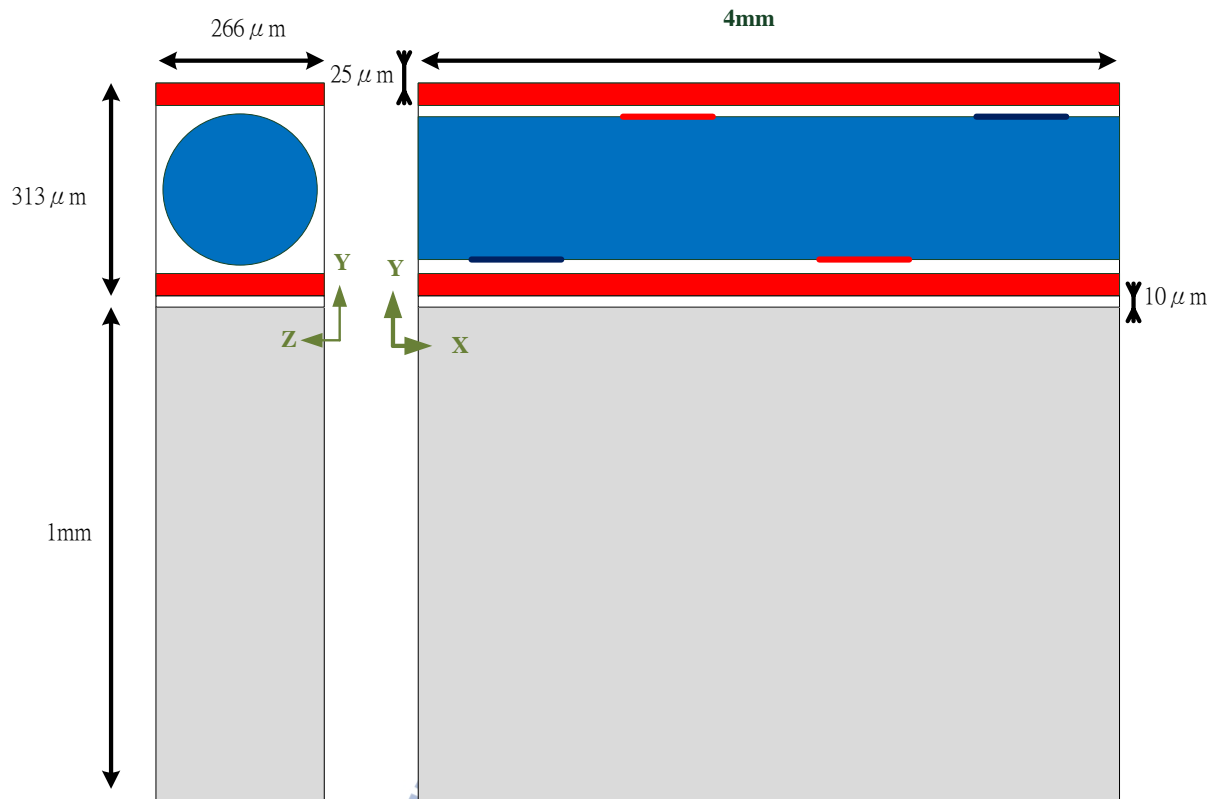


圖3.34 AE-PFC 黏貼於鋁板的阻抗分析數值模型

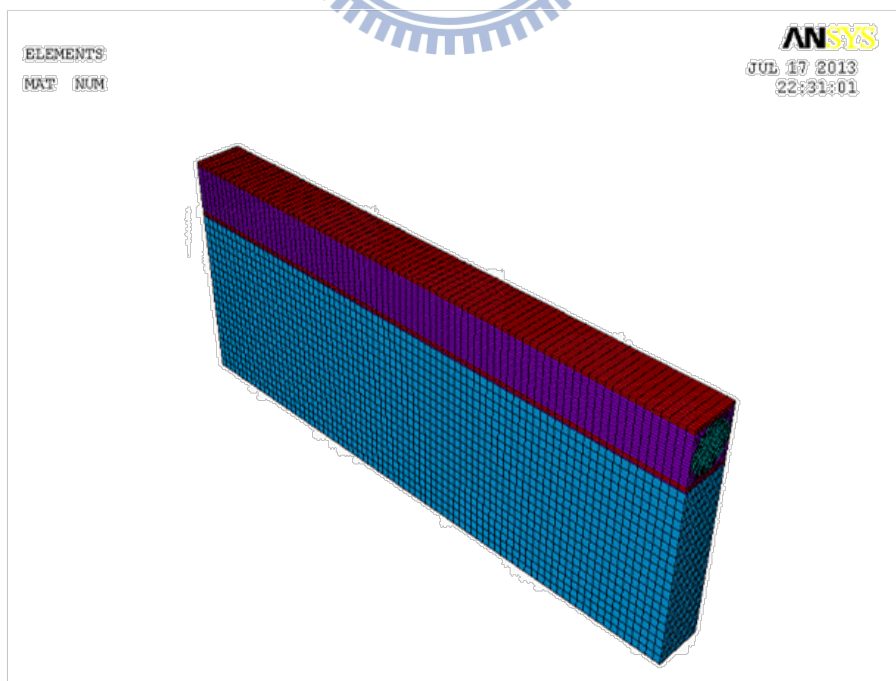
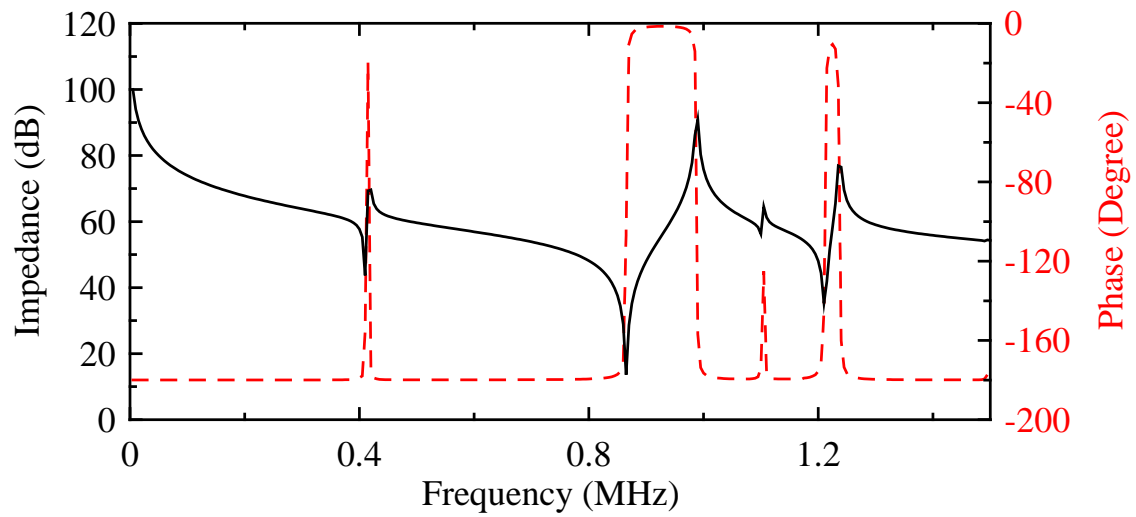
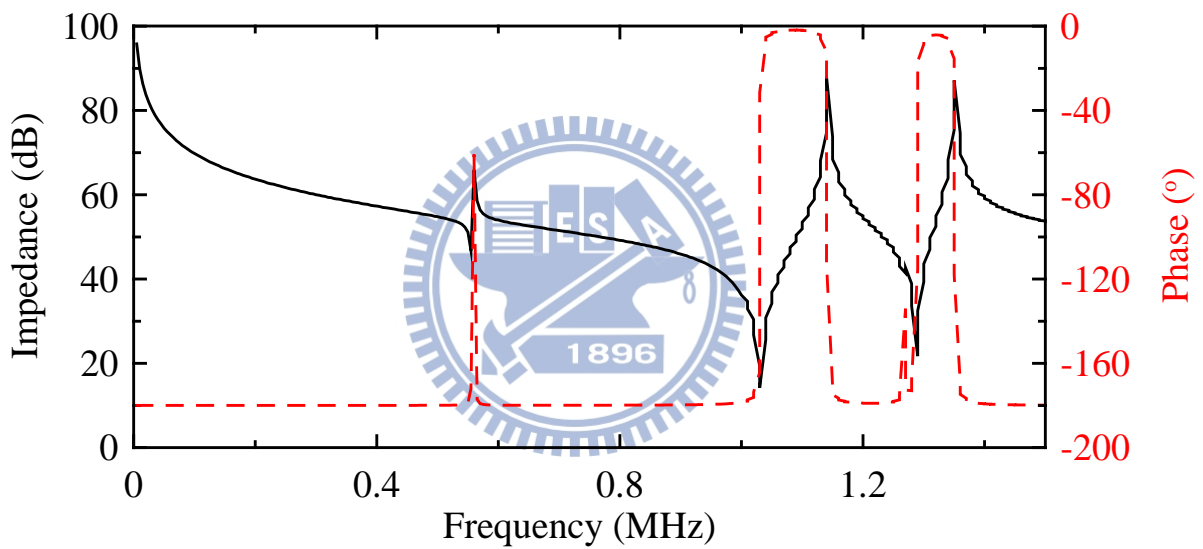


圖3.35 AE-PFC 黏貼於鋁板的 ANSYS 阻抗分析模型



(a) 設計波長 $\lambda=4$ mm，865kHz 為最佳共振頻率



(b) 設計波長 $\lambda=3.2$ mm，1.03MHz 為最佳共振頻率

圖3.36 AE-PFC 黏於鋁板週期模型阻抗響應

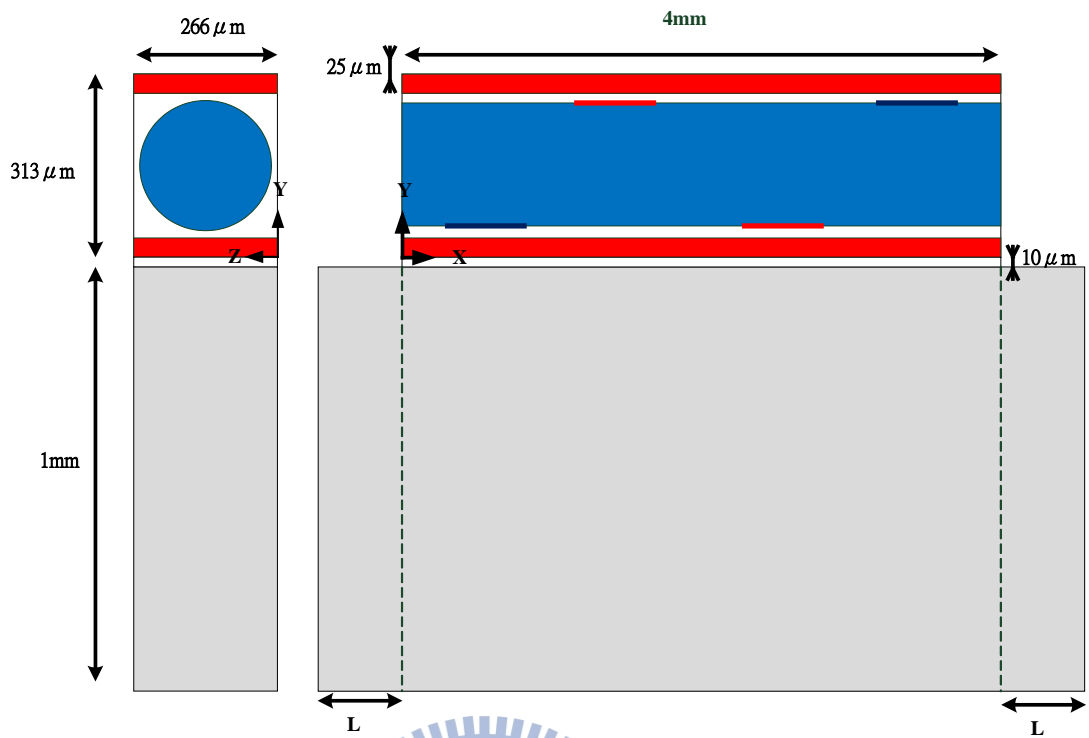


圖3.37 基板模擬數值模型示意圖

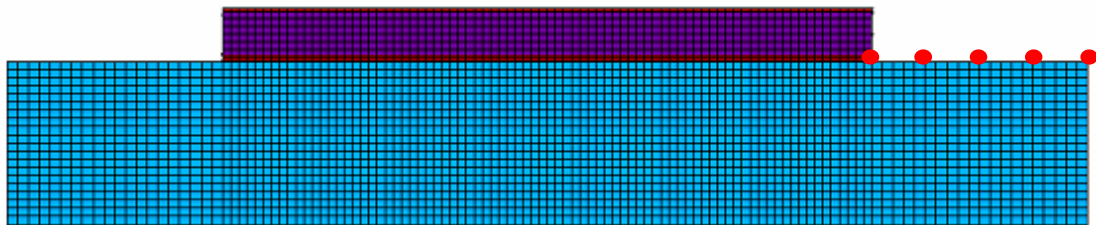


圖3.38 分析節點位置

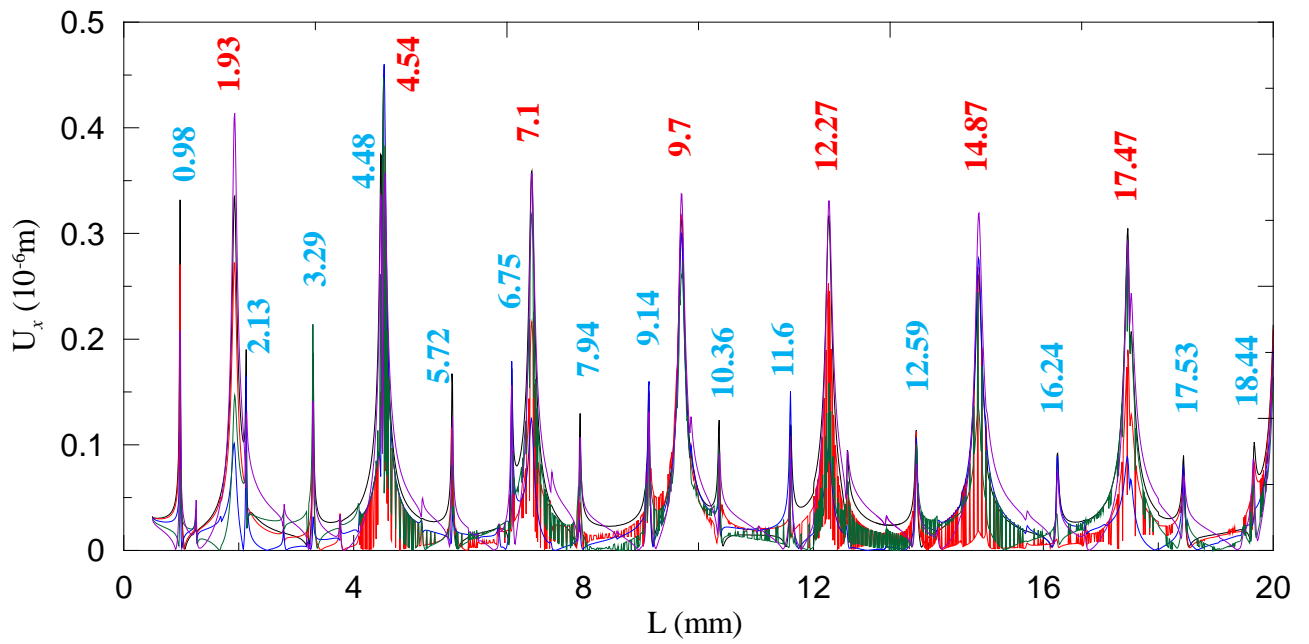


圖3.39 基板模擬振盪曲線圖

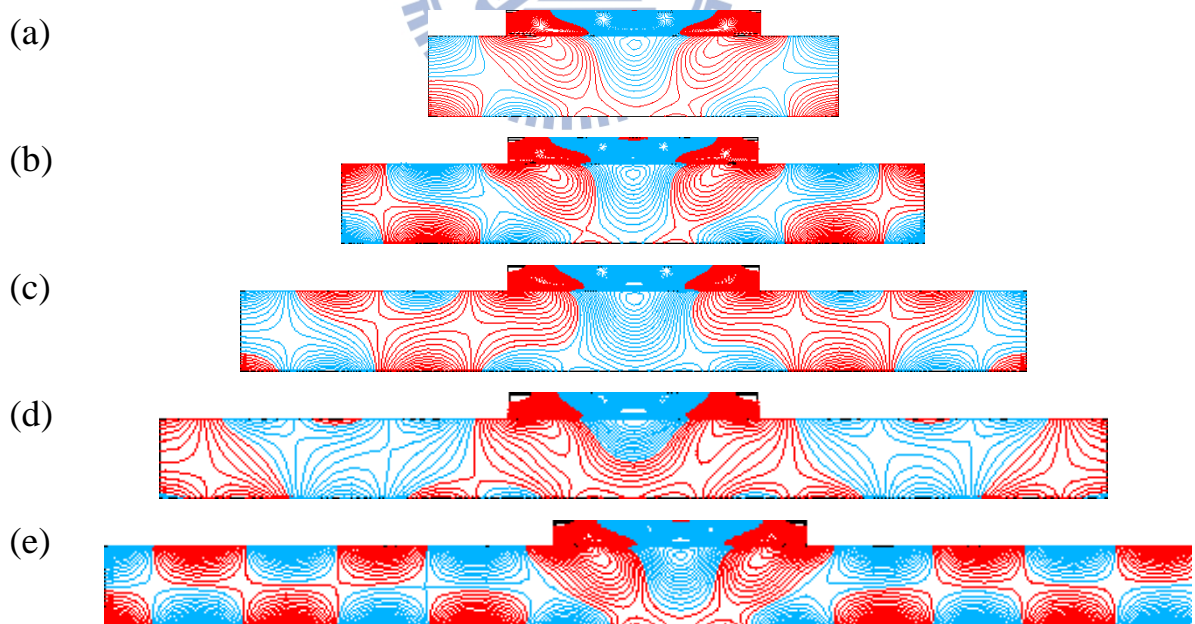


圖3.40 共振長度 $L=(a) 0.98(b) 2.13(c) 3.29(d) 4.48(e) 5.72$ (mm)之 A_0 模態 U_x 位移分量等高線圖

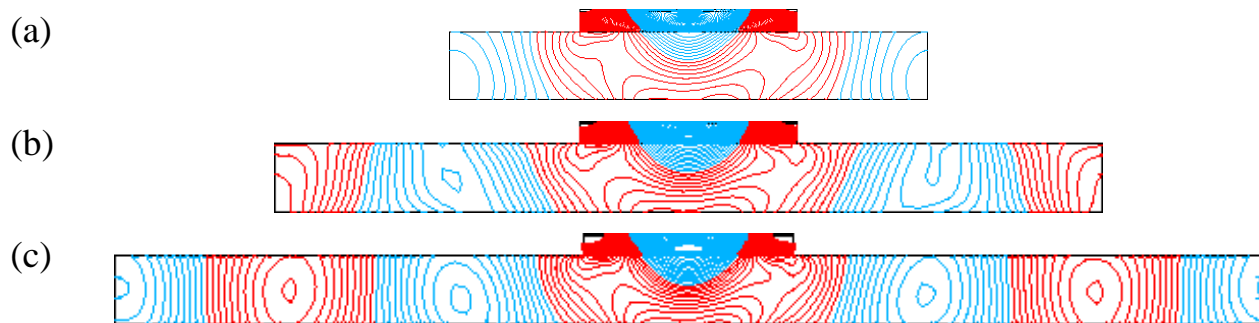


圖3.41 共振長度 $L=(a) 1.93\text{mm} (b) 4.54\text{mm} (c) 7.1\text{mm}$ 之 S_0 模態 U_x 位移分量等高線圖

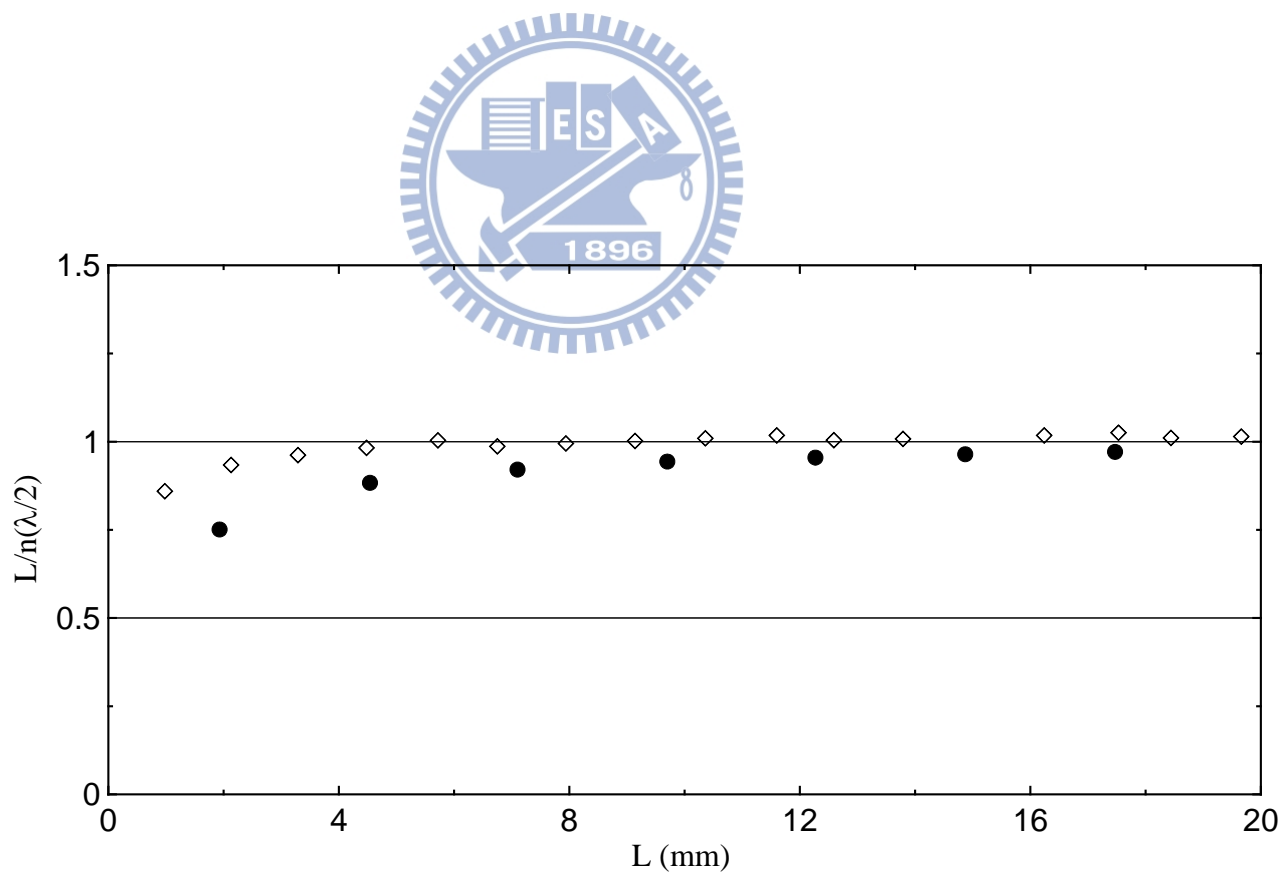


圖3.42 鋁板長度 L 與板波模態比較圖

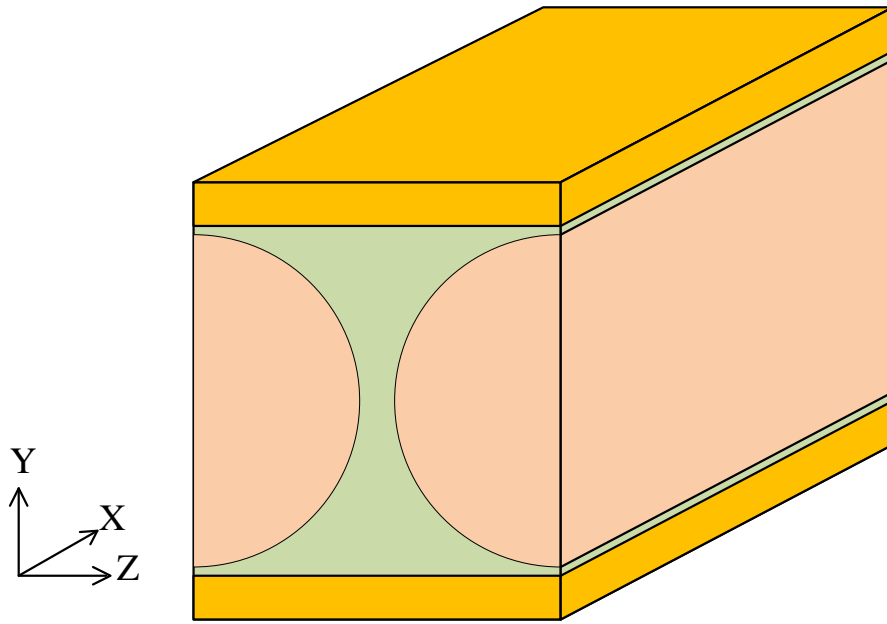


圖3.43 AE-PFC 模擬模型示意圖

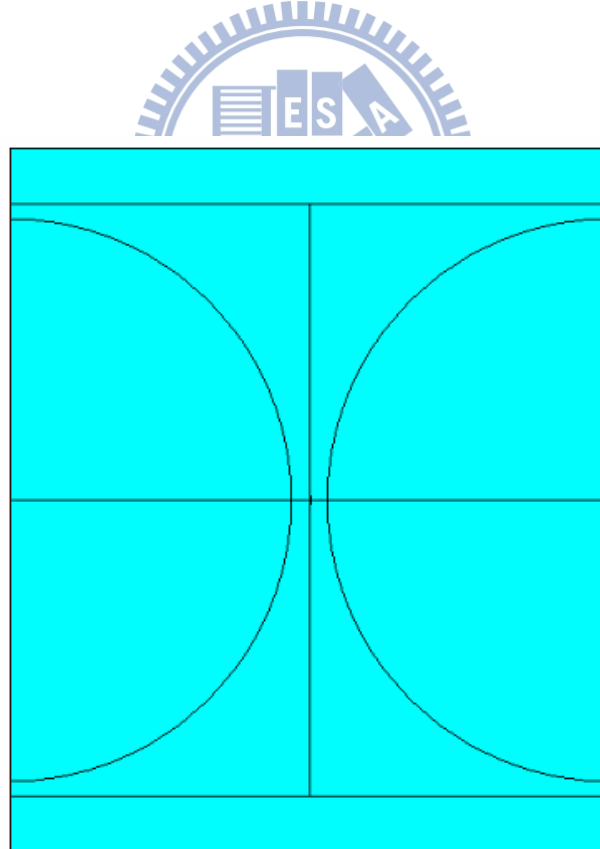


圖3.44 實際模擬模型

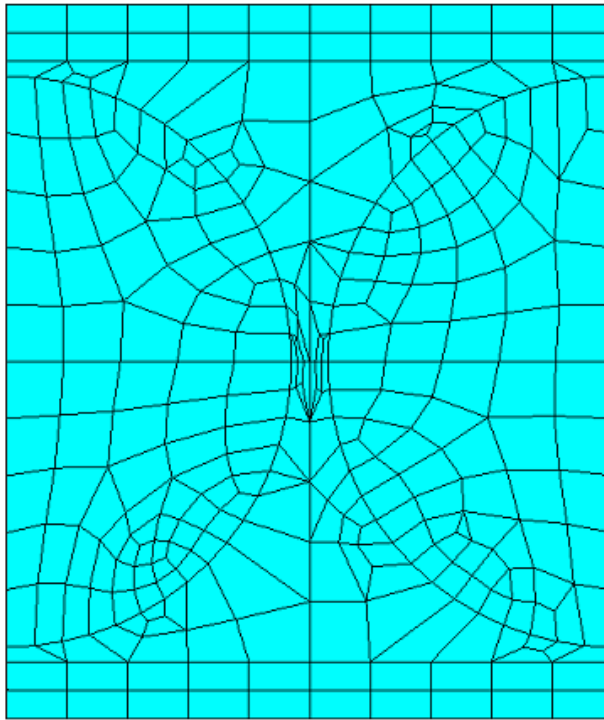


圖3.45 AE-PFC 網格化模型

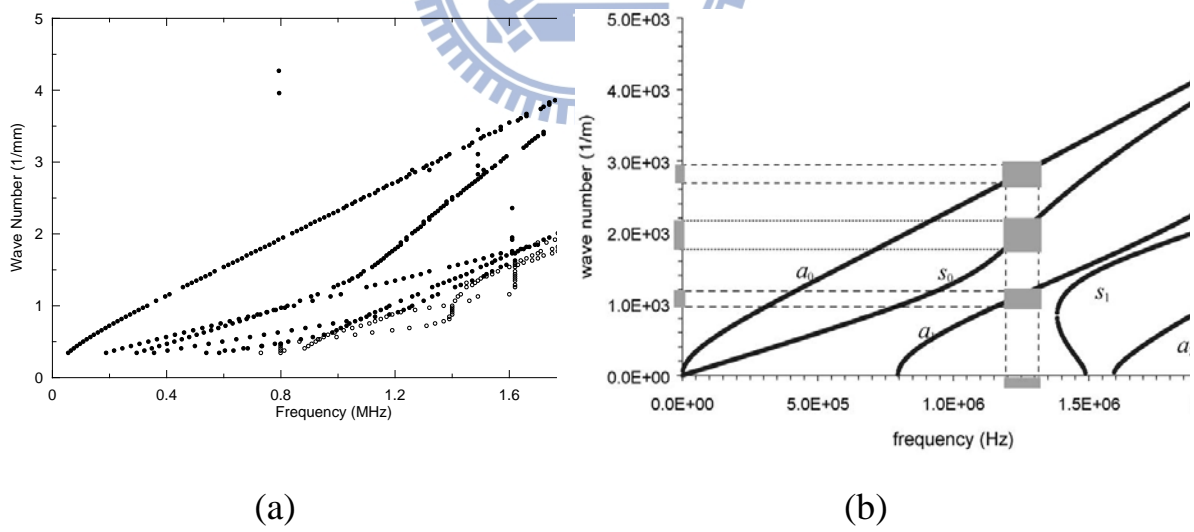


圖3.46 2mm 鋁板頻散曲線，(a)ANSYS 數值計算結果及(b) 解析解[2]

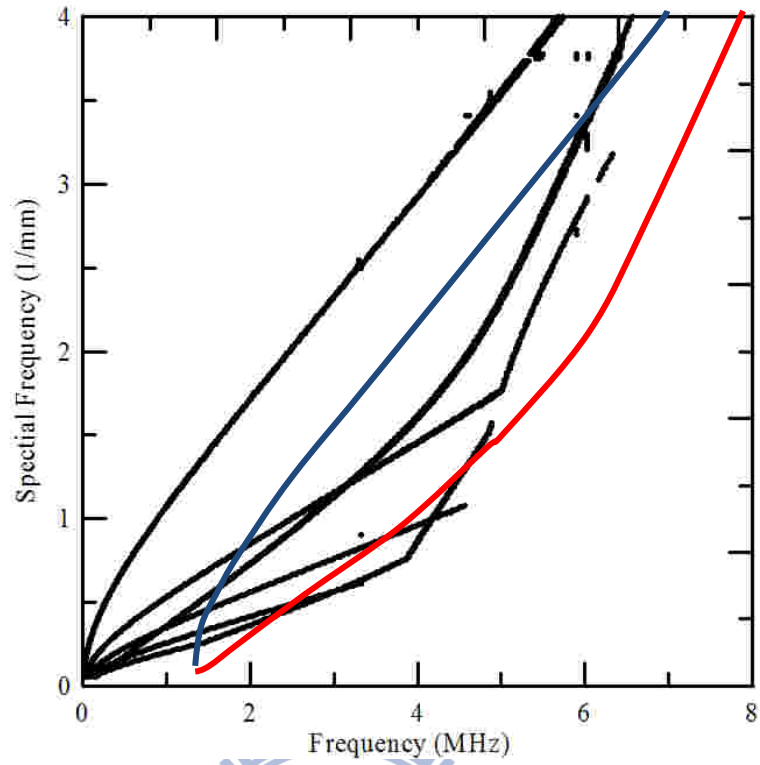


圖3.47 ANSYS 數值計算之 AE-PFC 頻散曲線圖

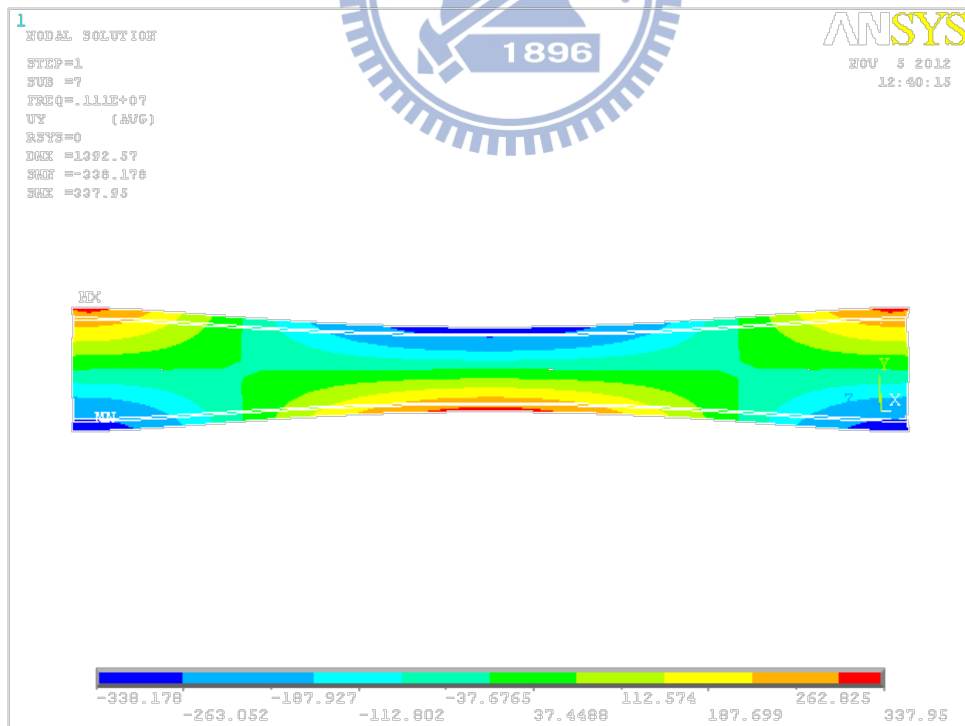


圖3.48 S_0 模態振形圖

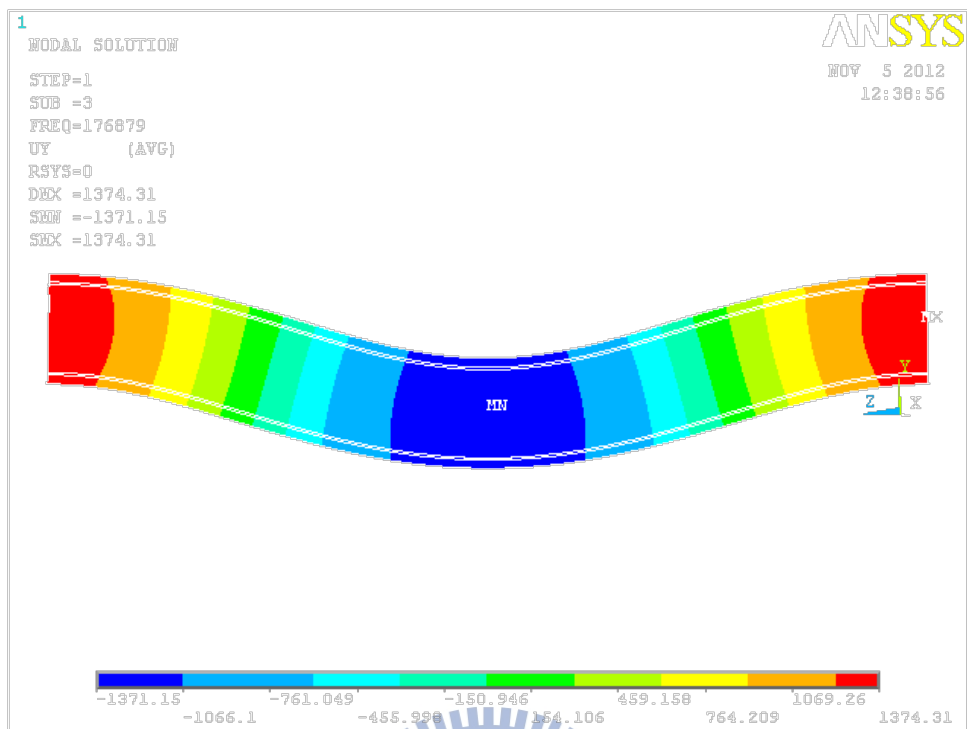


圖3.49 A_0 模態振形圖

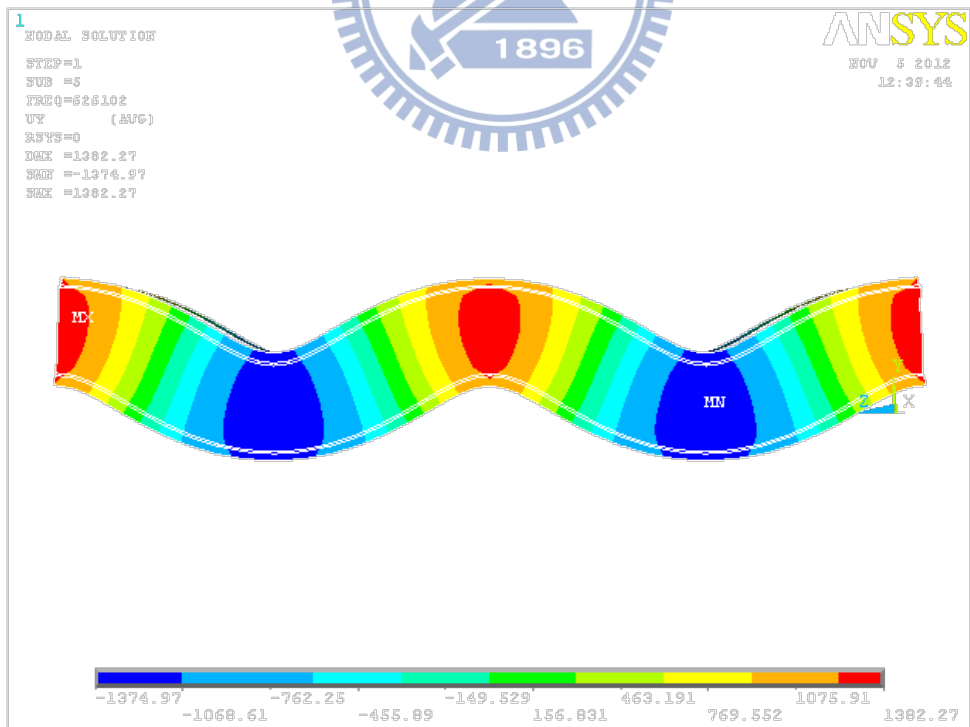


圖3.50 A_0 的倍頻振動模態

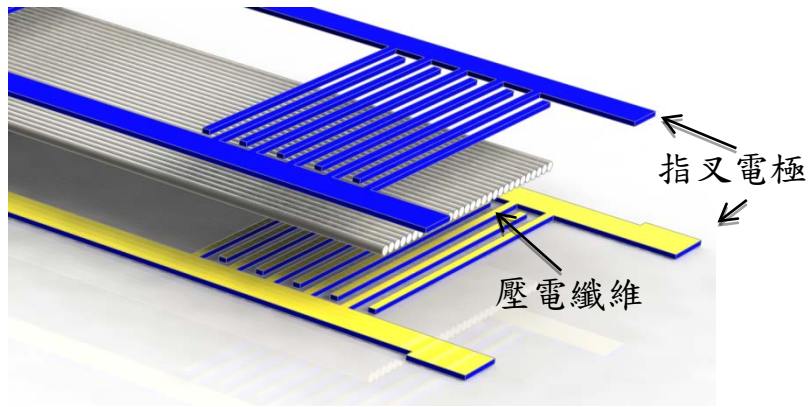


圖4.1 AE-PFC 構造的爆炸圖

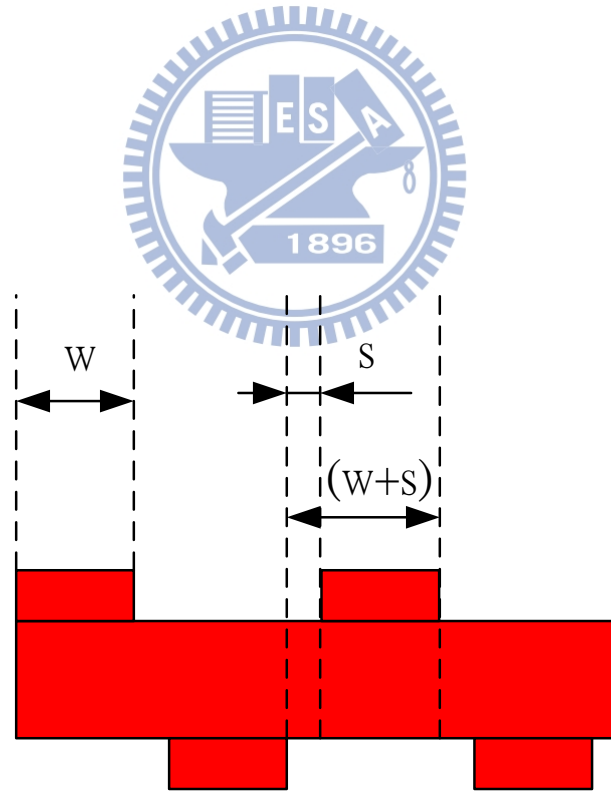
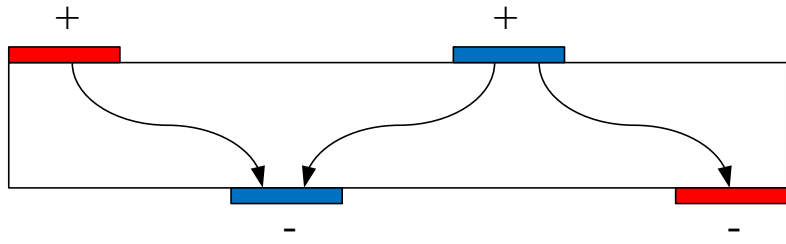
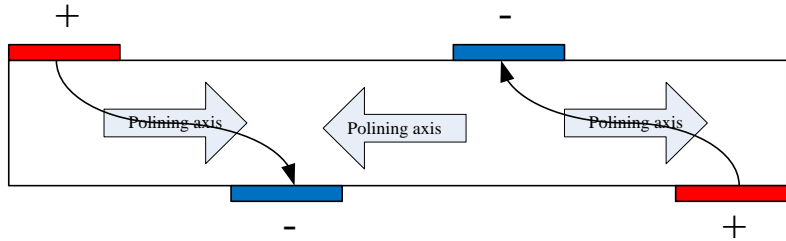


圖4.2 AE-PFC 模型與尺寸標示圖

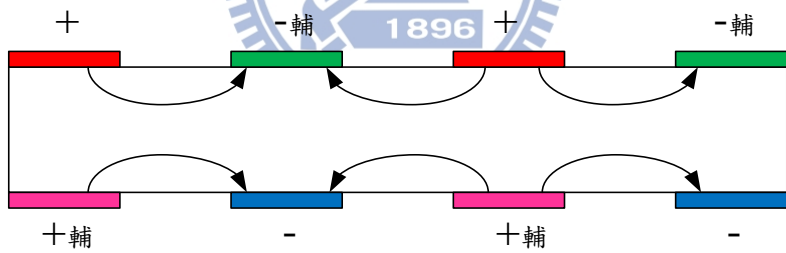


(a)反對稱極化

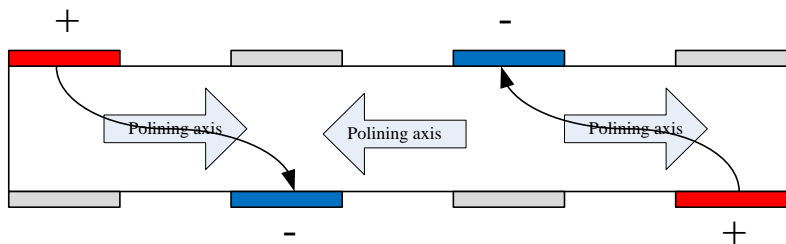


(b)反對稱驅動

圖4.3 反對稱極化、反對稱驅動之 AE-PFC

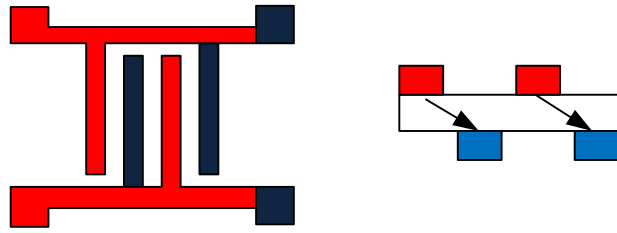


(a)對稱極化

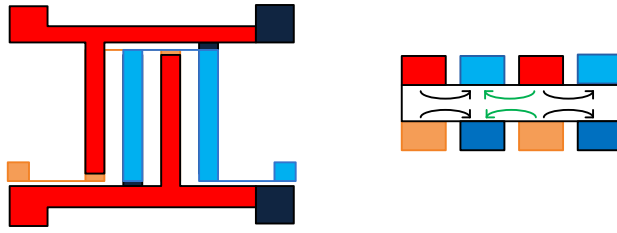


(b)反對稱驅動

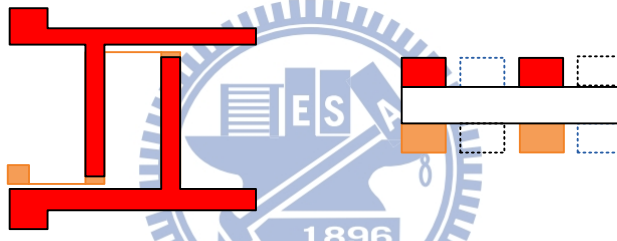
圖4.4 對稱極化、反對稱驅動之 AE-PFC



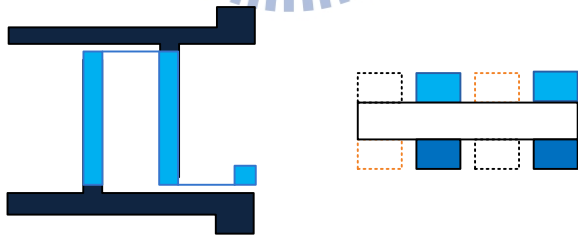
(a) 反對稱極化



(b) 對稱極化



(c) 對稱極化的上電極與對應輔電極



(d) 對稱極化的下電極與對應輔電極

圖4.5 輔電極設計概念

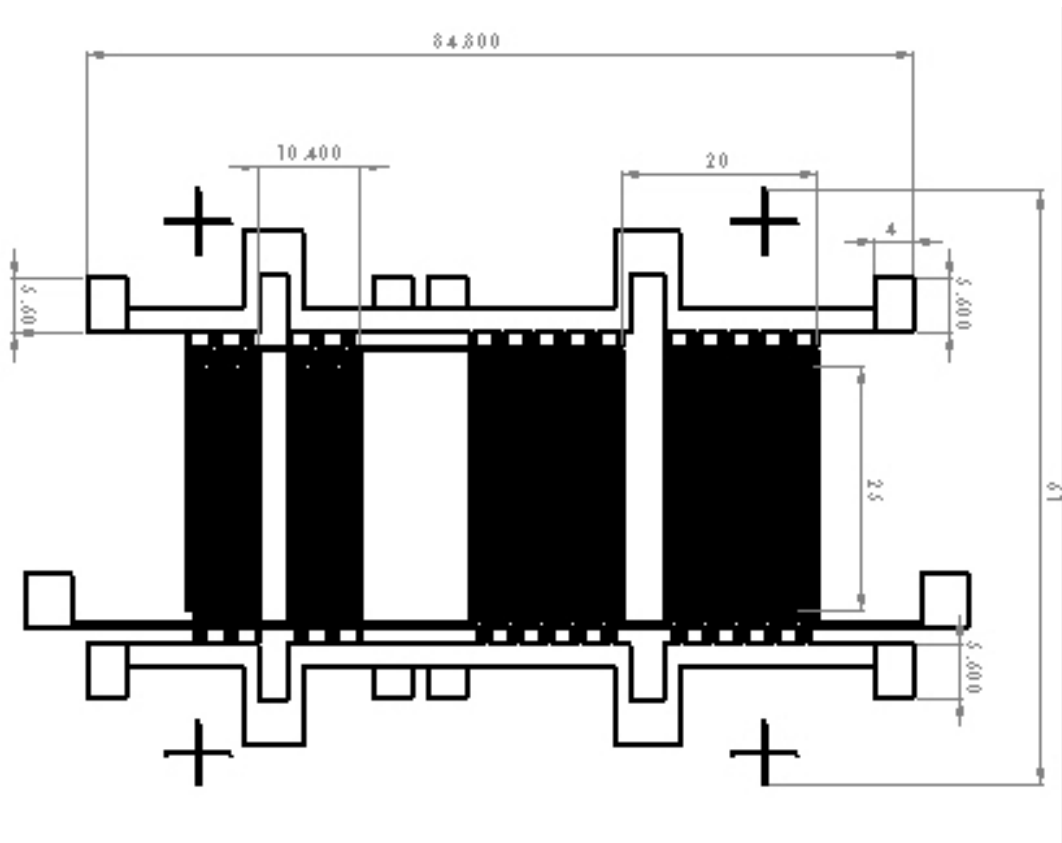


圖4.6 單向波傳指叉電極設計



圖4.7 壓電纖維排列於低黏性膠布

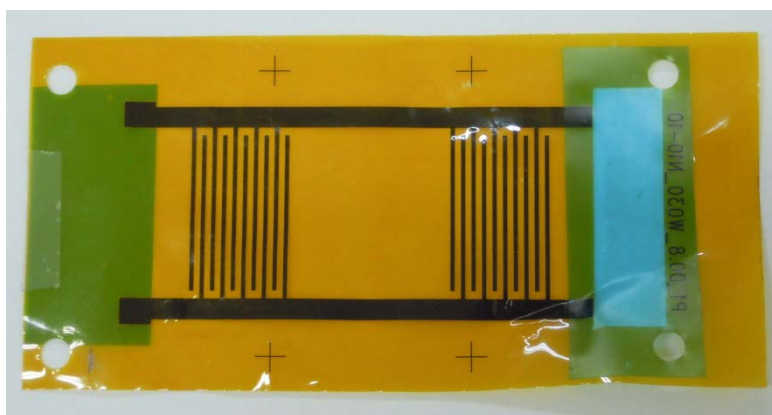


圖4.8 指叉電極前置處理

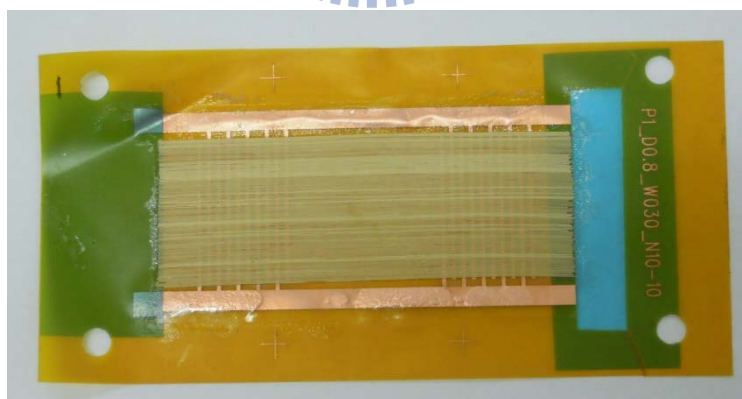


圖4.9 指叉電極與下電極黏貼半成品

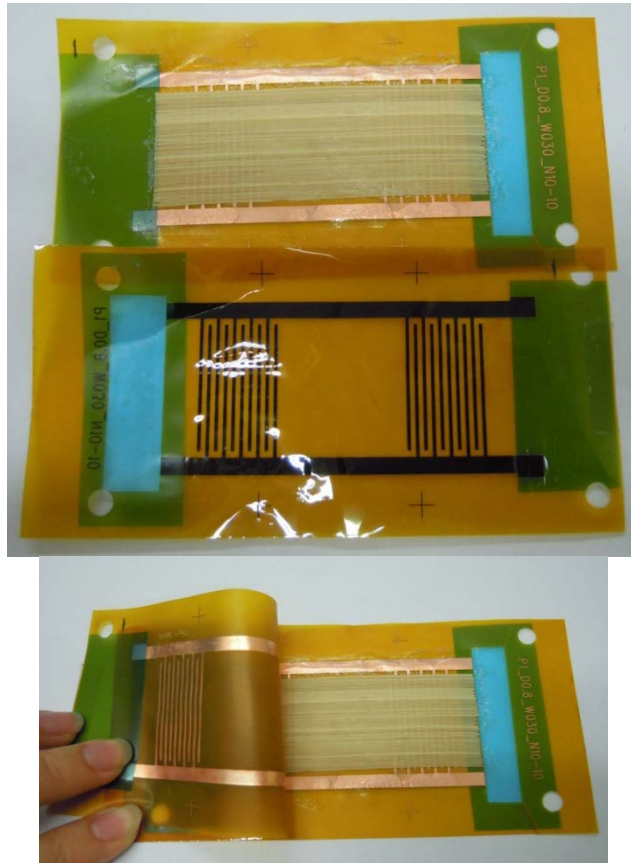
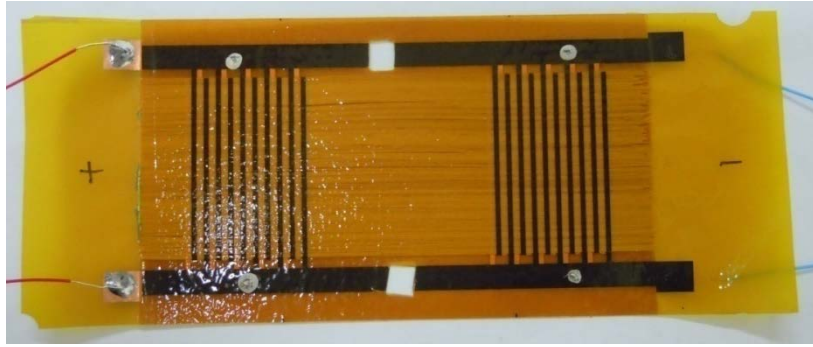
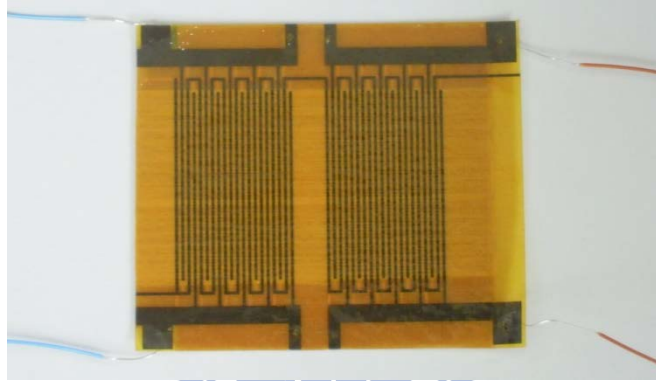


圖4.10 上電極與半成品黏貼示意



(a) $\lambda=4$ mm



(b) $\lambda=3.2$ mm

圖4.11 AE-PFC 成品

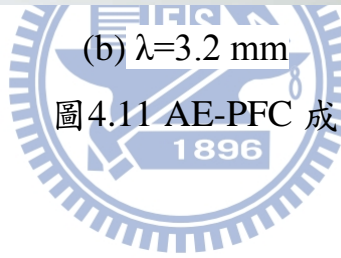


圖4.12 AE-PFC 冷鑲埋試片圖

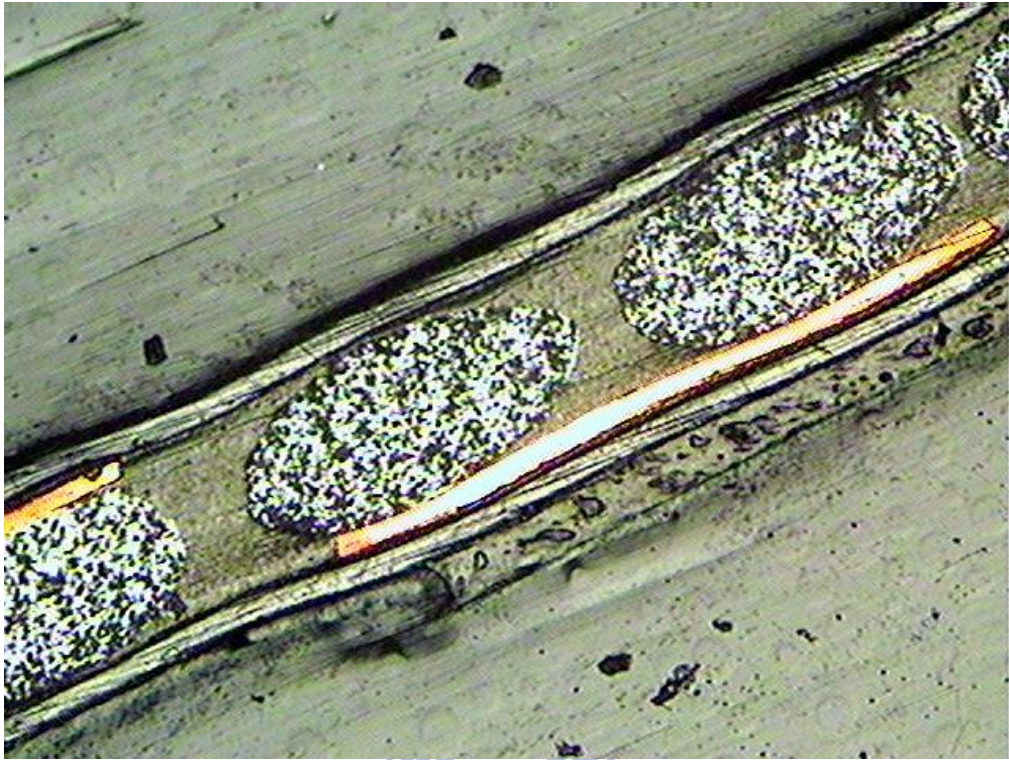
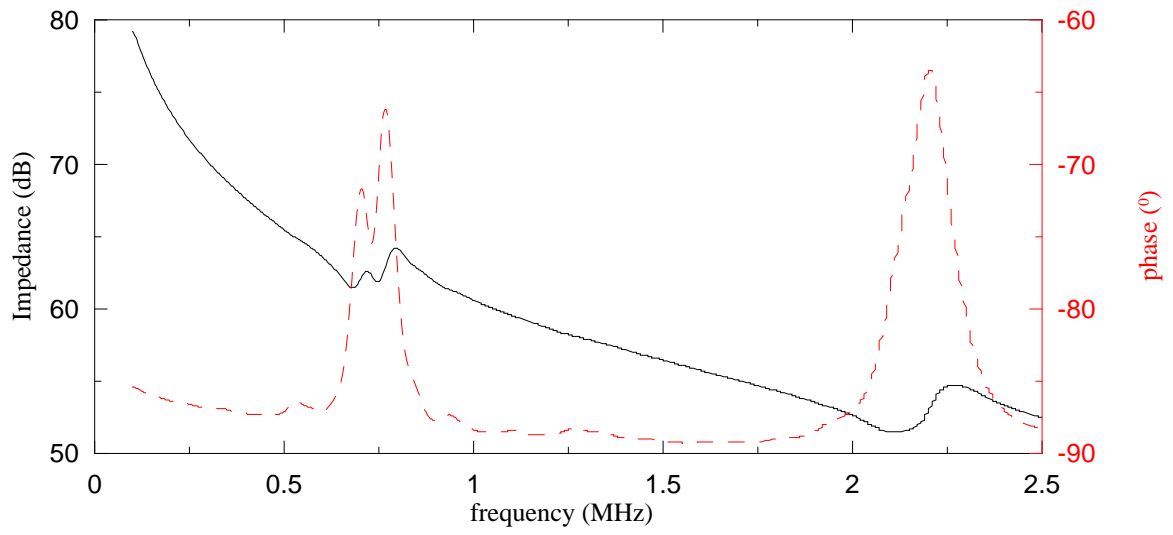
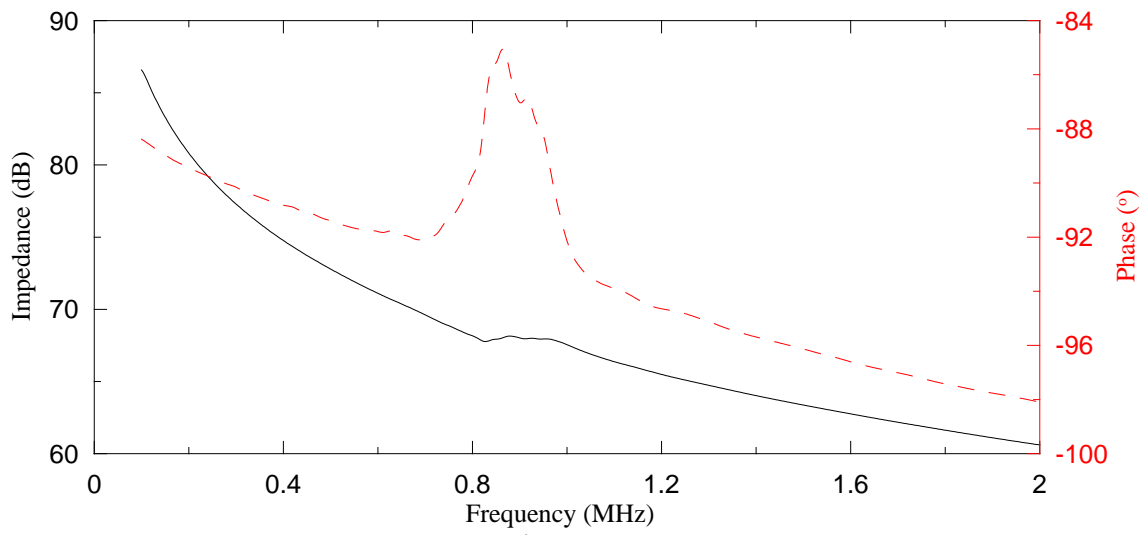


圖4.13 AE-PFC 截面金相圖





(a) $\lambda = 4$ mm



(b) $\lambda = 3.2$ mm

圖4.14 AE-PFC 阻抗響應

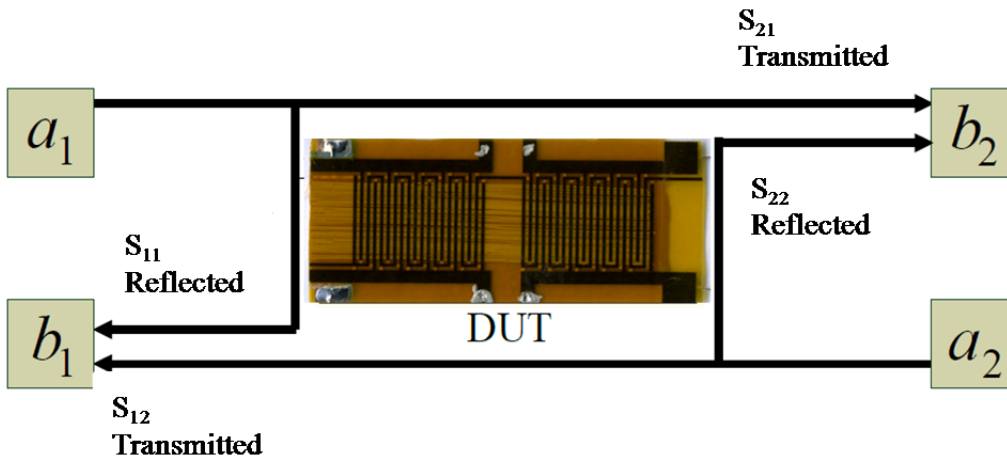


圖4.15 插入損失量測

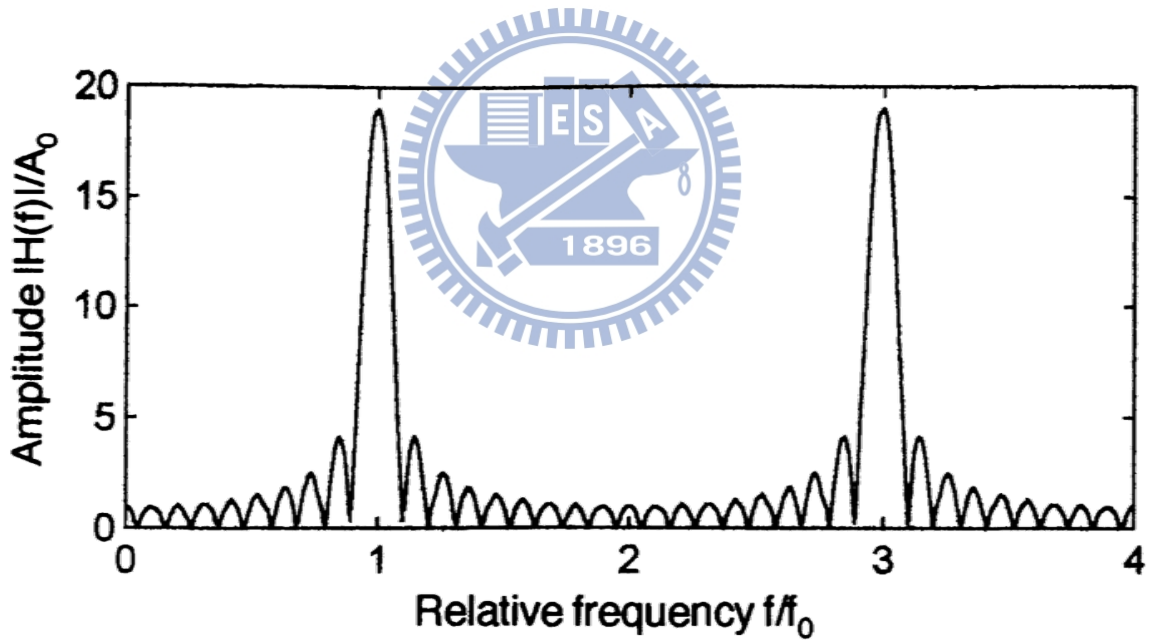


圖4.16 指叉電極激發之導波插入損失頻率響應

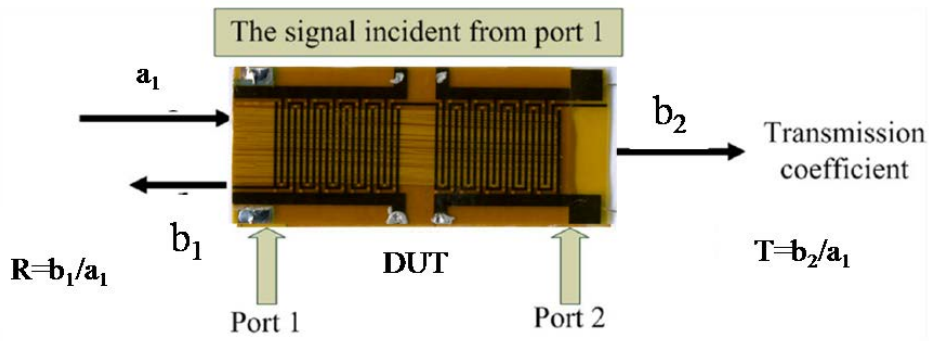
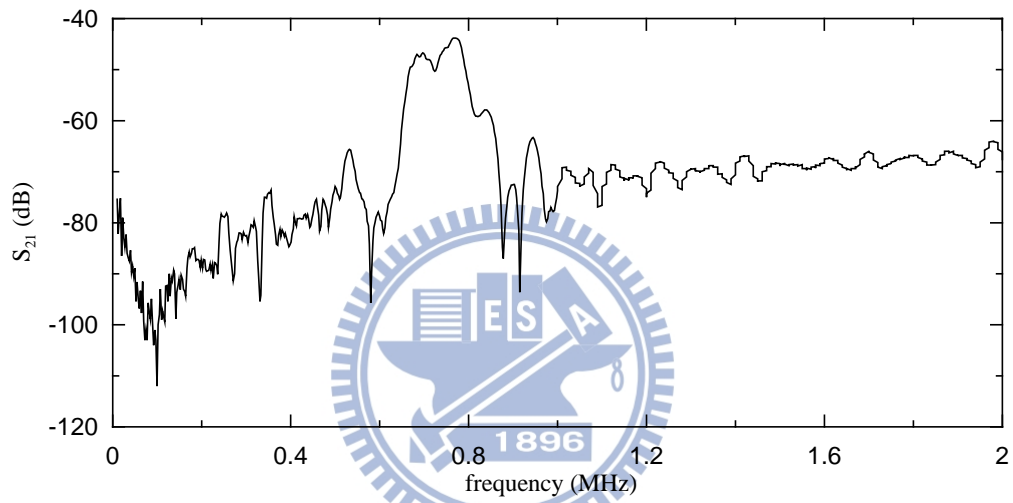
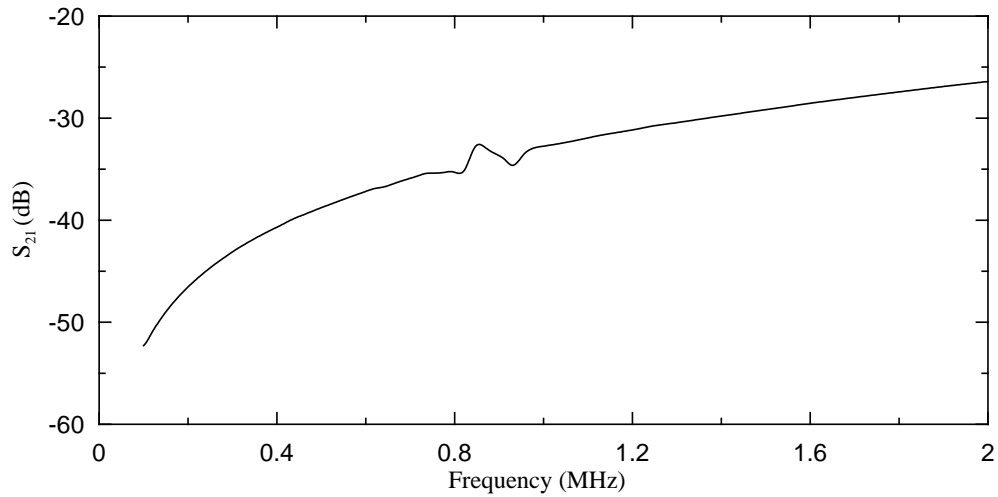


圖4.17 AE-PFC 量測插入損失



(a) $\lambda = 4$ mm



(b) $\lambda = 3.2$ mm

圖4.18 AE-PFC 的插入損失

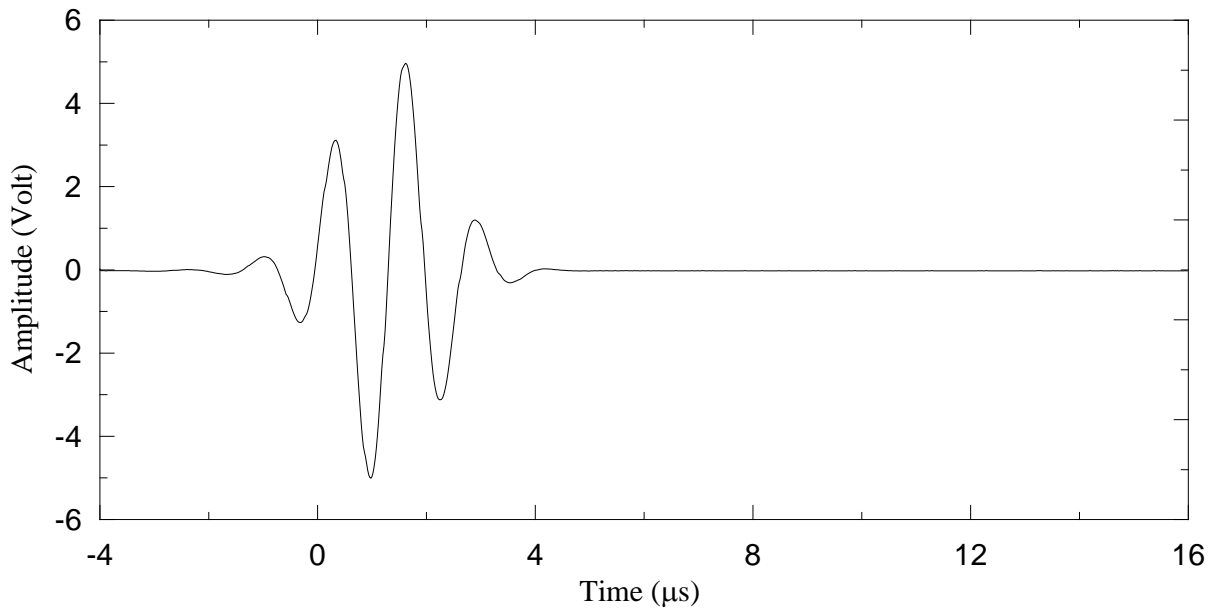


圖4.19 高斯脈波波型圖

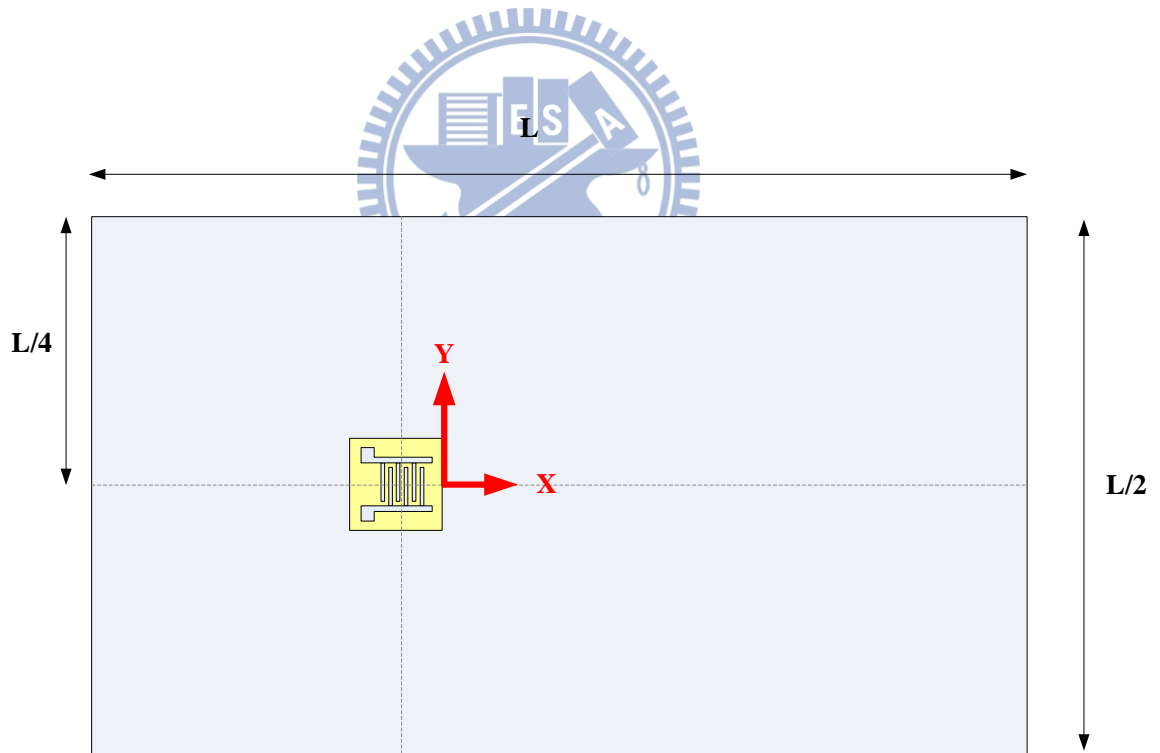


圖4.20 空間掃描待測元件

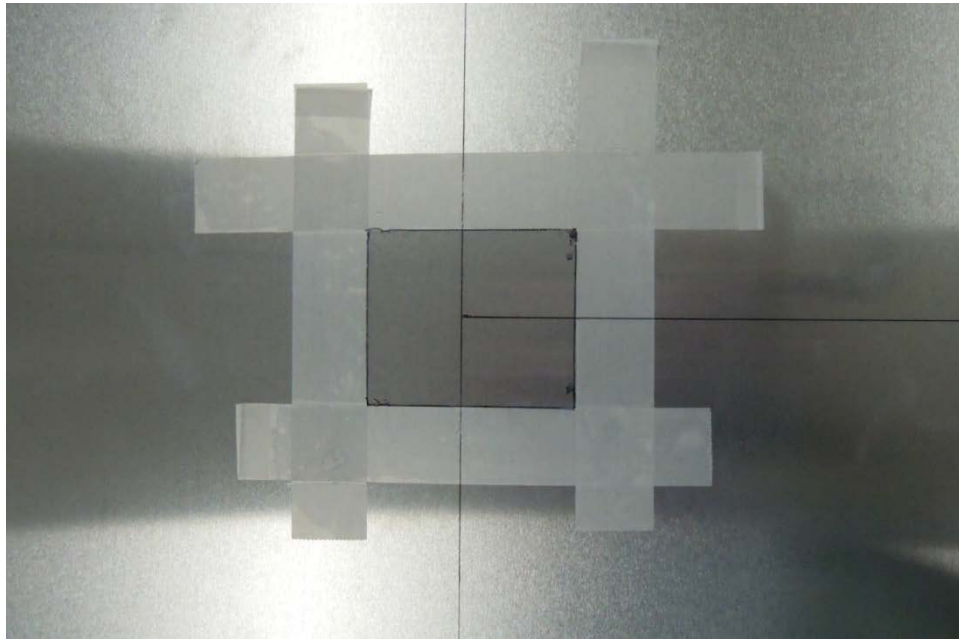


圖4.21 以低黏性膠帶標示 AE-PFC 黏貼範圍

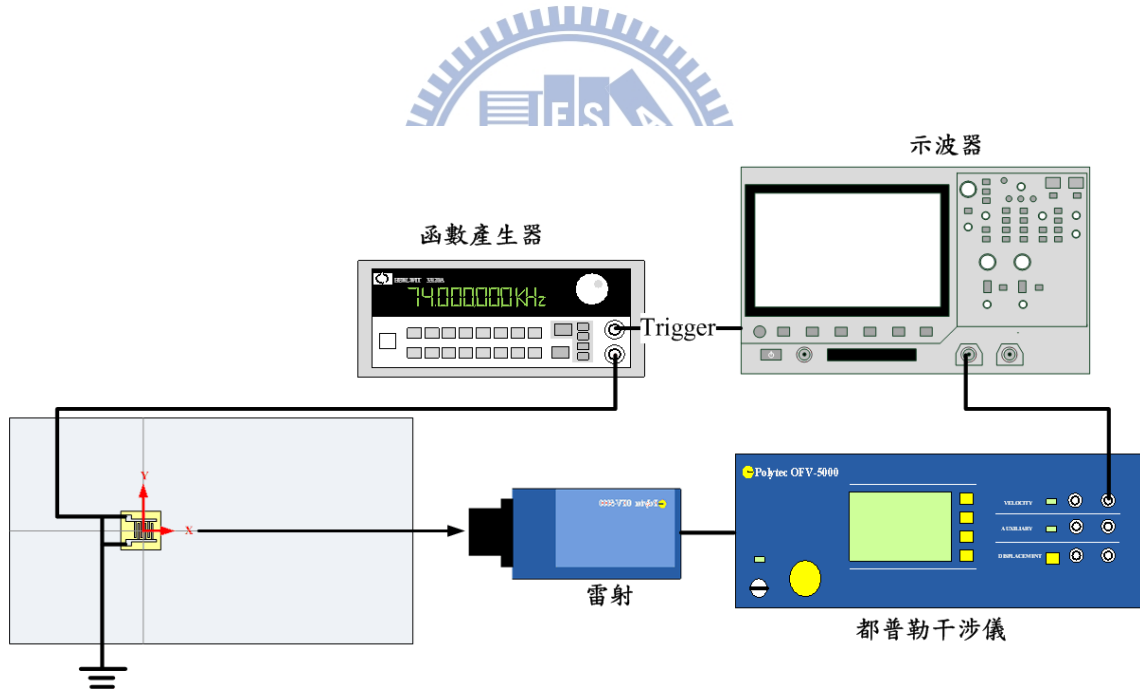


圖4.22 暫態訊號量測實驗架構

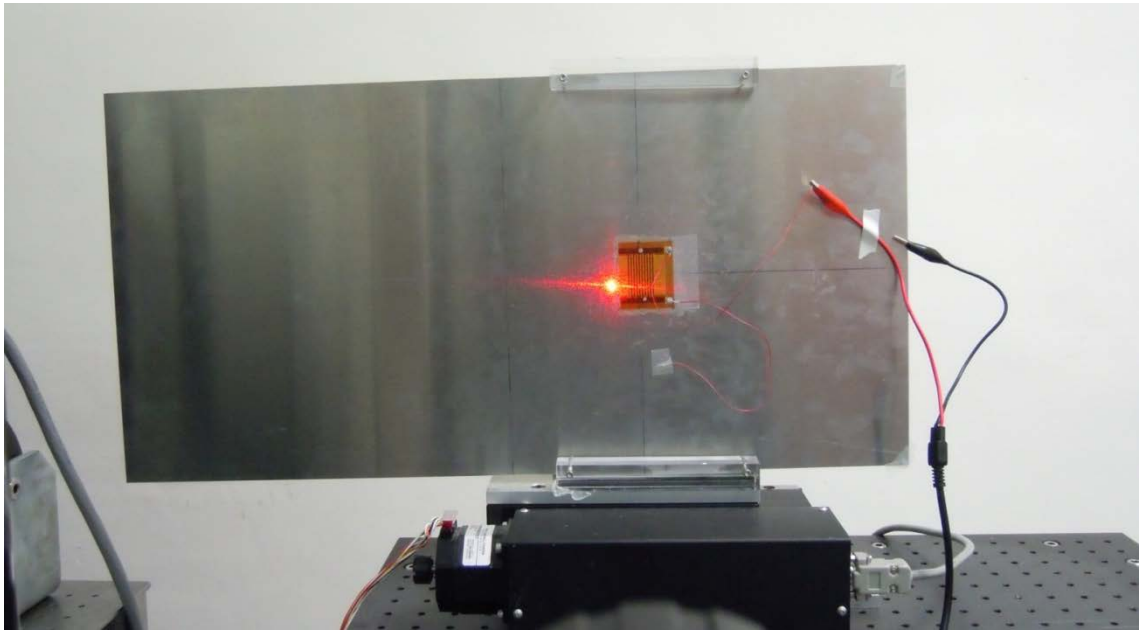


圖4.23 B-scan 實驗試片

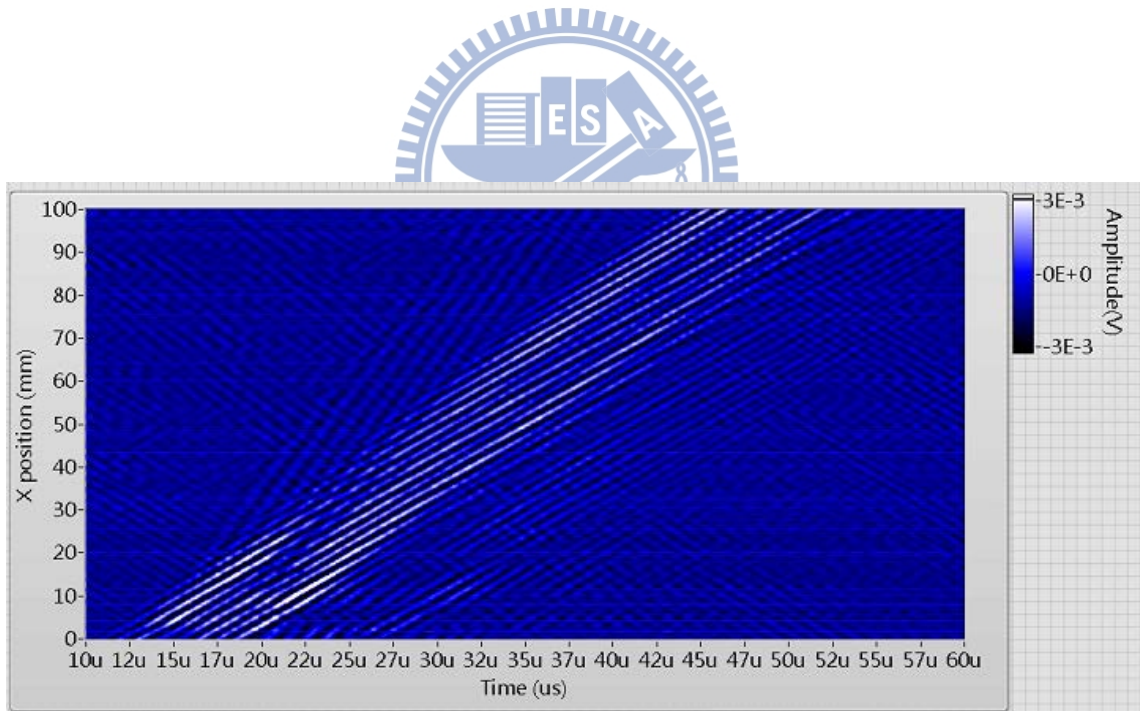


圖4.24 AE-PFC 激發之鋁板板波 B 掃描灰階圖

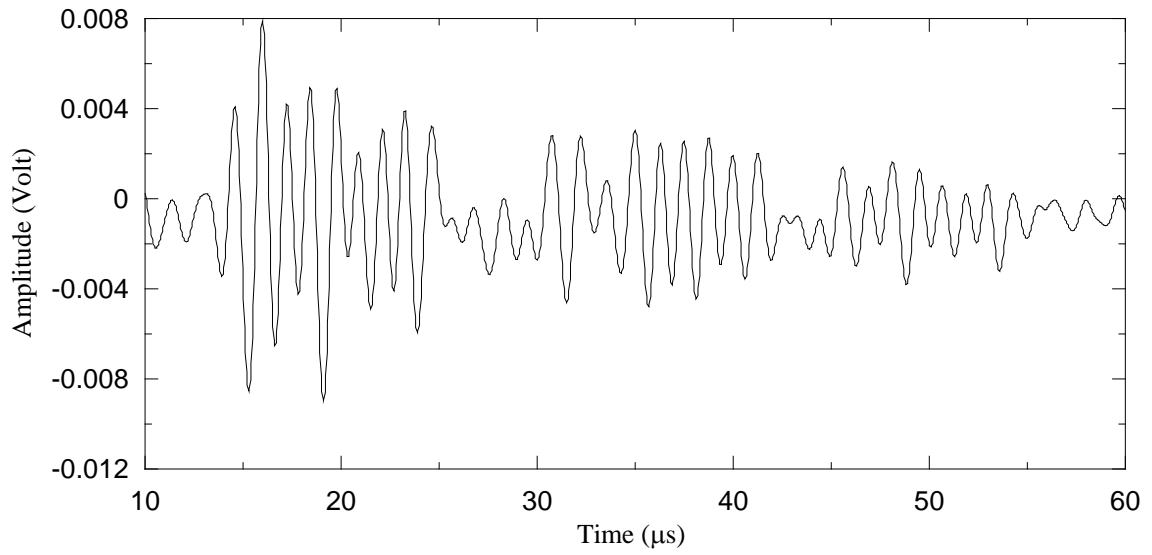


圖4.25 X=0 mm 處時域訊號

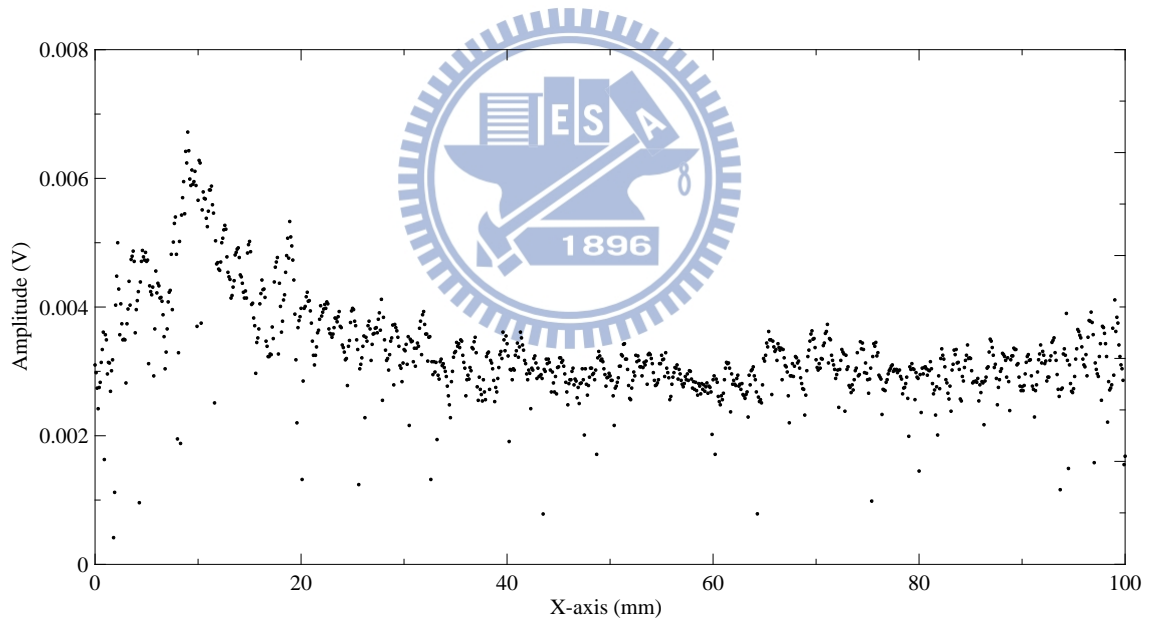


圖4.26 AE-PFC 激發之鋁板 A_0 板波振幅的空間分佈圖