

國立交通大學

機械工程學系碩士班

碩士論文

含裂縫矽晶太陽能電池的面內與面外共振模態量測

Measurement of In-plane and Out-of-plane Resonance Modes  
in Cracked Crystalline Silicon Solar Cells

研 究 生：梁均帆

指 導 教 授：尹 慶 中 博 士

中 華 民 國 一 ○ 一 年 十 一 月

含裂縫矽晶太陽能電池的面內與面外共振模態量測  
Measurement of In-plane and Out-of-plane Resonance Modes  
in Cracked Crystalline Silicon Solar Cells

研究生：梁均帆

Student: Chun-Fan Liang

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  
IESA  
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  
November 2012  
Hsinchu, Taiean, Republic of China

中華民國一〇一年十一月

# 含裂縫矽晶太陽能電池的面內與面外共振模態量測

研究生：梁均帆

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

薄紙般的矽晶太陽能電池兼具結構撓性及材料脆性，製造過程中容易產生肉眼不易察覺的細微裂縫，當太陽能電池組成模組時，受熱或壓力等負荷，容易發生結構性破壞。本研究以自行研發的寬頻壓電換能器量測矽晶太陽能電池的振動頻率響應函數，再以共振頻率激發對應之共振模態，應用量測面內及面外位移之電子光斑干涉術(ESPI)，全域檢測矽晶太陽能電池。矽晶太陽能電池面內振動的模態密度低，適宜以 ESPI 拍攝面內共振模態，檢出貫穿裂縫位置，裂縫附近之光斑干涉條紋呈現不連續。然而，面外振動的模態密度高，不易以 ESPI 拍攝出共振模態，但仍可以單頻激發的振形清晰檢出表面裂縫的特徵，表面裂縫附近的光斑干涉條紋呈現 V 形特徵。有限元素分析之共振模態與量測結果驗證了實驗的有效性。

關鍵詞：裂紋檢測、面內振動、電子光斑干涉術、矽晶太陽能電池

# Measurement of In-plane and Out-of-plane Resonance Modes in Cracked Crystalline Silicon Solar Cells

Student : Chun-Fan Liang

Advisor : Dr. Ching-chung Yin

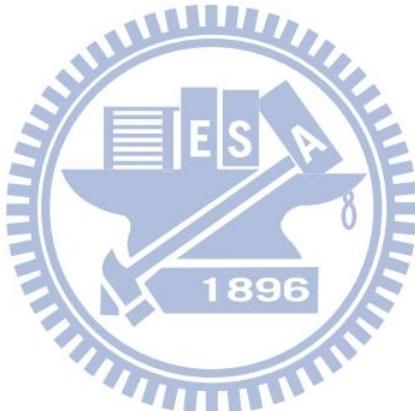
Department of Mechanical Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

Thin crystalline silicon photovoltaic (PV) cells have both good flexibility and brittle properties. The solar cells can be seriously fractured by hairline cracks when small disturbance such as thermal deformation, vibration exerts on the cell during manufacturing. Assessing solar cell integrity before or during module processing is therefore essential for minimizing production costs. The in-plane resonance in a thin plate has sparse modal density and can be potentially used to characterize the integrity of a crystalline silicon PV cells. This study integrates an experimental system to measure the resonance vibrations for a thin solar cell. Both resonant frequencies and mode shapes can be in sequence measured effectively. This system comprises an electronic speckle interferometer for measuring in-plane and out-of-plane displacement and a set of broadband conical transducers, which are used to actuate and measure structural vibration. The full-field measuring system was identified through a series of comparisons between experimental and numerical results. The in-plane vibration of a crystalline silicon PV cell has sparse modal density and can be used to characterize the through-thickness cracks. In contrast, the

out-of-plane vibrations in the cell have much higher modal density. It is hard to capture individual resonance mode. However, the ESPI image of out-of-plane vibration excited at single operating frequency can be recorded and used for detecting surface cracks. Speckle patterns near defects were manifested as chevron-shaped and broken fringes for surface cracks and through-thickness cracks, respectively. The validity of presented detection method for material discontinuities in photovoltaic cells has been verified by both finite-element analysis of resonant modes and ESPI speckle fringes.

*Keywords:* Crack detection, in-plane resonance vibration, electronic speckle pattern interferometry, crystalline silicon photovoltaic cells



## 誌謝

在此感謝指導教授 尹慶中博士於兩年多時間不厭其煩的辛勤教導，使本論文能順利完成，僅此致上最誠摯的感謝。同時感謝蕭國模老師、鄭泗東老師及鄭文雅老師在百忙中撥空擔任學生的口試委員，給予學生論文研究的指正及建議，使本論文內容更完整。

感謝非破壞評估實驗室的博士班學長王多聞、許世明、游泰和、溫子達及劉育翔給予研究上的指導及幫助。感謝蔡慶芳、黃士維、鄭智遠、湯士杰、吳家宇、王裕太及蔡旻軒幫助我在碩一課業上的學習，並教導實驗儀器的操作及數值模擬的經驗分享。感謝同學李劭遠、吳曼修及鄒心慧碩士生涯中研究的協助，並時常帶給實驗室歡笑，非常高興能與你們度過這兩年多的時間。學弟何家豪、李柏勳、黃仲平、張維霖、彭鈺原、陳勁希及學妹吳雨倩、羅憶青，感謝你們帶給實驗室的幫助與歡樂，預祝你們碩士論文都能順利完成。

感謝這兩年在交大籃球場與我一起打籃球的同學們，我會懷念在這裡打球的日子。並且感謝交通大學的健身中心，讓我在忙於研究時也能抽空做短暫的運動。感謝在交通大學給予我幫助的所有老師、助理及同學。

感謝國中至今的好友余昆翰、鄧為元及高正洋的勉勵，假日回台北與你們一起騎車、釣魚讓我研究所生活增添不同色彩。

最後謝謝我最摯愛的父母親，梁偉義先生、廖麗珍女士，撫養我長大並在求學路程給我的照顧與支持，非常感謝我的求學過程能有你們的陪伴，讓我無後顧之憂的接受教育。並感謝兄長梁晉瑋給予我的協助與關愛。感謝我的女友陳逸萱多年來的陪伴，不論是課業或生活，都給予我鼓勵與實質的幫助，有妳的支持我才能順利完成論文。僅以此論文獻給我摯愛的家人、師長與朋友。

# 目錄

中文摘要 .....	iii
英文摘要 .....	iv
誌謝 .....	vi
目錄 .....	vii
表目錄 .....	ix
圖目錄 .....	xi
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 文獻回顧 .....	2
1.2.1 電子光斑干涉術 .....	2
1.2.2 超音波共振法 .....	3
1.3 內容簡述 .....	5
第二章 工作原理與壓電換能器模擬分析 .....	13
2.1 電子光斑干涉術 .....	13
2.2 壓電效應 .....	14
2.2.1 壓電材料的本構方程式 .....	15
2.3 三維有限元素分析之元素及網格 .....	16
2.4 錐形壓電換能器設計與分析 .....	17
第三章 面內振動的數值模擬分析 .....	27
3.1 面內共振模態 .....	27
3.2 太陽能電池面內振動分析 .....	27
3.2.1 太陽能電池模態分析 .....	28

3.2.2 太陽能電池時諧分析 .....	28
<b>第四章 實驗量測結果與討論 .....</b>	<b>40</b>
4.1 面內模態共振實驗裝置 .....	40
4.1.1 錐形壓電換能器的有效量測範圍 .....	40
4.1.2 太陽能電池面內共振頻率量測 .....	41
4.2 ESPI 量測面內位移實驗與結果 .....	42
4.2.1 多晶太陽能電池的量測 .....	43
4.2.2 單晶太陽能電池的量測 .....	44
4.3 含缺陷太陽能電池的量測 .....	45
4.3.1 貫穿裂縫 .....	45
4.3.2 表面裂縫 .....	47
4.4 實驗結果與討論 .....	48
<b>第五章 面外電子光斑干涉術實驗量測 .....</b>	<b>83</b>
5.1 面外圓柱形壓電換能器 .....	83
5.2 多晶太陽能電池面外共振頻率量測 .....	84
5.3 多晶太陽能電池之 ESPI 面外量測 .....	84
5.4 結果與討論 .....	85
<b>第六章 結論與展望 .....</b>	<b>94</b>
6.1 結論 .....	94
6.2 未來展望 .....	96
<b>參考文獻 .....</b>	<b>103</b>
<b>附錄 .....</b>	<b>105</b>

## 表目錄

表 2.1 ANSYS 的自由網格與規則網格比較表 .....	19
表 2.2 錐形壓電換能器頻率響應計算採用之壓電陶瓷(PZT-4)材料係數...	19
表 2.3 錐形壓電換能器頻率響應採用之鋁合金材料係數.....	19
表 3.1 模擬分析採用之多晶太陽能電池材料係數.....	30
表 3.2 單晶太陽能電池材料係數.....	30
表 3.3-1 多晶太陽能電池面內自然頻率及模態分析結果(I).....	31
表 3.3-2 多晶太陽能電池面內自然頻率及模態分析結果(II).....	32
表 3.4-1 單晶太陽能電池面內自然頻率及模態分析結果(I).....	33
表 3.4-2 單晶太陽能電池面內自然頻率及模態分析結果(II).....	34
表 3.5 太陽能電池時諧分析之邊界條件 .....	34
表 4.1 多晶太陽能電池 ESPI 激振頻率與面內共振頻率比較 .....	50
表 4.2-1 多晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(y 方向激振)結果比較(I) .....	51
表 4.2-2 多晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(y 方向激振)結果比較(II) .....	52
表 4.3-1 多晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(x 方向激振)結果比較(I) .....	53
表 4.3-2 多晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(x 方向激振)結果比較(II) .....	54
表 4.4 單晶太陽能電池 ESPI 激振頻率與面內共振頻率比較 .....	55
表 4.5-1 單晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(y 方向激振)結果比較(I) .....	56

表 4.5-2 單晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(y 方向激振)結果比較(II)	57
.....	.....
表 4.6-1 單晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(x 方向激振)結果比較(I)	58
.....	.....
表 4.6-2 單晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(x 方向激振)結果比較(II)	59
.....	.....
表 4.8-1 貫穿裂縫之單晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(I)	64
表 4.8-2 貫穿裂縫之單晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(II)	65
表 4.8-3 貫穿裂縫之單晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(III)	66
表 4.8-4 貫穿裂縫之單晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(IV)	67
表 4.9-1 表面裂縫之多晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(I)	68
表 4.9-2 表面裂縫之多晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(II)	69
表 5.1-1 表面裂縫之多晶太陽能電池數值模擬(I)	86
表 5.1-2 表面裂縫之多晶太陽能電池數值模擬(II)	87
表 6.1-1 本研究量測太陽能電池面內共振模態與[1]之結果(I)	97
表 6.1-2 本研究量測太陽能電池面內共振模態與[1]之結果(II)	98
表 6.2 多晶太陽能電池同一方向檢測之實驗結果	99
表 6.3 貫穿裂縫對矽晶太陽能電池數值模擬與實驗結果	100
表 6.4 矽晶太陽能電池數值模擬與實驗結果	101
表 6.5 貫穿裂縫與表面裂縫之多晶太陽能電池實驗結果比較	102

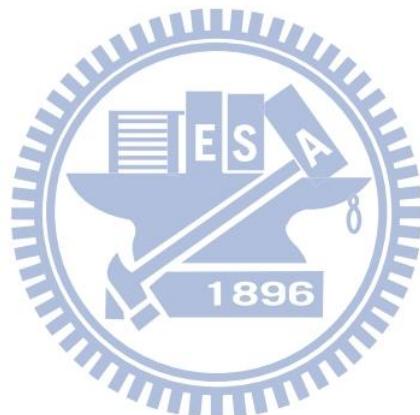
## 圖目錄

圖 1.1 單晶太陽能電池的正面 .....	7
圖 1.2 單晶太陽能電池的反面 .....	7
圖 1.3 表面電極(busbar 及 finger) .....	8
圖 1.4 面內振動量測的夾具 .....	8
圖 1.5 RUV 量測系統[9] .....	9
圖 1.6 RUV 實驗側視圖及上視圖[12] .....	9
圖 1.7 砂基板裂縫檢測之敲擊實驗裝置[13] .....	10
圖 1.8 電致發光量測系統[15] .....	10
圖 1.9 單晶太陽能電池的(a) EL 影像、(b) SAM 影像[15] .....	11
圖 1.10 單晶矽基板表面點壓痕裂紋的超音波顯微鏡影像[16] .....	11
圖 1.11 點壓痕裂紋的聚焦離子束掃描式電子顯微鏡影像[16] .....	12
圖 2.1 電子光斑干涉術量測位移的座標系統 .....	20
圖 2.2 ESPI 量測面內振動的實驗系統 .....	20
圖 2.3 ESPI 量測面外振動的實驗系統 .....	21
圖 2.4 壓電材料的正壓電效應 .....	21
圖 2.5 壓電材料的逆壓電效應 .....	22
圖 2.6 元素 Solid45 .....	22
圖 2.7 元素 Solid5 .....	23
圖 2.8 錐形壓電換能器之有限元素網格 .....	23
圖 2.9 錐形壓電換能器幾何尺寸及參數 .....	24
圖 2.10 錐形壓電換能器第一軸向自然模態 .....	24
圖 2.11 不同元素數目計算錐形壓電換能器之電位頻率響應曲線 .....	25

圖 2.12 錐形壓電換能器前端軸向位移頻率響應圖 .....	25
圖 2.13 錐形壓電換能器受時諧外力之電位頻率響應計算曲線 .....	26
圖 2.14 錐形壓電換能器阻抗頻率響應計算曲線.....	26
圖 3.1 太陽能電池冷鑲埋.....	35
圖 3.2 多晶太陽能電池剖面的電子顯微鏡影像 1.....	35
圖 3.3 多晶太陽能電池剖面的電子顯微鏡影像 2.....	36
圖 3.4 不同元素數目計算多晶太陽能電池之面內振動頻率響應曲線 .....	36
圖 3.5 多晶太陽能電池有限元素模型(a)正面、(b)背面 .....	37
圖 3.6 單晶太陽能電池有限元素模型(a)正面、(b)背面 .....	37
圖 3.7 垂直( $F_x$ )與平行( $F_y$ )電極激振之面內 $U_x$ 的位移頻率響應計算曲線 .....	38
圖 3.8 垂直( $F_x$ )與平行( $F_y$ )電極激振之面內 $U_y$ 的位移頻率響應計算曲線 .....	38
圖 3.9 多晶太陽能電池面內振動位移頻率響應計算曲線.....	39
圖 3.10 單晶太陽能電池面內振動位移頻率響應計算曲線.....	39
圖 4.1 錐形壓電換能器結構示意圖.....	70
圖 4.2 錐形壓電換能器實體結構.....	70
圖 4.3 錐形壓電換能器之夾持基座.....	71
圖 4.4 面內共振頻率量測實驗架構.....	71
圖 4.5 錐形壓電換能器之阻抗頻率響應量測實驗架構.....	72
圖 4.6 第一錐形壓電換能器之阻抗頻率響應曲線.....	72
圖 4.7 第二錐形壓電換能器之阻抗頻率響應曲線.....	73
圖 4.8 第三錐形壓電換能器之阻抗頻率響應曲線.....	73
圖 4.9 第四錐形壓電換能器之阻抗頻率響應曲線.....	74
圖 4.10 太陽能電池面內共振頻率量測實驗.....	74

圖 4.11 多晶太陽能電池試片 .....	75
圖 4.12 多晶太陽能電池面內振動頻率響應曲線.....	75
圖 4.13 單晶太陽能電池試片 .....	76
圖 4.14 單晶太陽能電池面內振動頻率響應曲線.....	76
圖 4.15 多晶太陽能電池剖面圖[17].....	77
圖 4.16 含表面裂縫之多晶太陽能電池剖面圖[17].....	77
圖 4.17 面內 ESPI 光路實驗架構.....	78
圖 4.18 面內 ESPI 實驗使用之 LabVIEW 程式介面.....	78
圖 4.19 表面裂縫 .....	79
圖 4.20 貫穿裂縫 .....	79
圖 4.21 有限元素模型裂縫處斷面重合.....	80
圖 4.22 有限元素模型裂縫處斷面分開.....	80
圖 4.23 多晶太陽能電池之貫穿裂縫位置示意圖.....	81
圖 4.24 單晶太陽能電池之貫穿裂縫位置示意圖.....	81
圖 4.25 多晶太陽能電池之表面裂縫位置示意圖.....	82
圖 5.1 面外圓柱形壓電換能器尺寸示意圖 .....	88
圖 5.2 圓柱形壓電換能器模態分析結果.....	88
圖 5.3 圓柱形壓電換能器受時諧外力之電位頻率響應計算曲線 .....	89
圖 5.4 圓柱形壓電換能器實體結構.....	89
圖 5.5 圓柱形壓電換能器之阻抗頻率響應曲線.....	90
圖 5.6 面外共振頻率量測之實驗架構.....	90
圖 5.7 頻率響應曲線之振幅結果 .....	91
圖 5.8 頻率響應曲線之相位結果 .....	91
圖 5.9 面外 ESPI 實驗架構.....	92
圖 5.10 完整多晶太陽能電池之 ESPI 影像 .....	92

圖 5.11 含表面裂縫之多晶太陽能電池 ESPI 影像.....93



# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

現今人類依舊大量使用非再生能源，包括煤、天然氣、石油等，使地球資源日漸枯竭，並在空氣中釋出二氧化碳，造成地球暖化。近年來，人類環保意識提高，再生能源的利用成為重要之議題。地球表面接受 40 分鐘的太陽能，相當於整個世界 1 年所消耗的能源。台灣位處於陽光日照充足的亞熱帶地區，適合發展太陽能發電。

太陽能電池是一種能夠直接將光能轉換為電能的光電元件，矽基板的正面為氮化矽抗反射層(圖 1.1)，背面為鋁質背襯(back surface field, BSF)，如圖 1.2 所示。表面的外部電極依形狀分為較粗的柵狀匯流電極(busbar)及較細的指狀(finger)匯流電極，前者為兩束電極，正反面都有；後者散佈電池正面增加收集電流之面積，如圖 1.3 所示。矽晶太陽能電池主要可分為單晶矽，多晶矽與非晶矽三類，單晶矽具有方向性，多晶矽為等向性，非晶矽則無特定方向，多用於可撓性太陽能電池。太陽能電池市場以單晶矽與多晶矽為主流，單晶矽太陽能電池光電轉換效率最好，多用於充電系統、道路照明及交通號誌等。多晶矽太陽能電池發電效率次之，多晶太陽能電池製程步驟簡單、成本低廉，故低功率的電力系統多採用多晶矽太陽能電池。

矽晶太陽能電池的生產趨勢是降低矽的使用量，讓矽基板厚度愈來愈薄，矽屬於高剛度脆性材料，製程中的損傷容易產生寬度細微如髮絲般的裂縫，以自動化光學檢測這些裂縫的檢出率很低。若太陽能電池生產時已存有裂縫，在錫焊串聯成模組(module)的過程中，很容易造成裂縫延展而破碎，使得已串聯的部分都無法使用，造成成本的消耗。

鄭智遠 [1]採用結構較單純的矽基板為實驗試片，以自行設計的面內共振模態量測裝置(圖 1.4)，量測試片的面內共振頻率。應用電子光斑干涉術(electronic speckle pattern interferometry, ESPI)量測物體面內振形的實驗架構，拍攝矽基板面內共振模態的光斑干涉條紋。比較實驗與數值分析結果，探討矽基板的面內共振模態。本研究的實驗試片採用矽晶太陽能電池，改良[1]的實驗量測裝置、光路設計及夾持試片的邊界條件，使得太陽能電池共振頻率量測與 ESPI 實驗的邊界條件儘可能一致。並製作含裂縫太陽能電池，利用共振頻率的改變及光斑干涉條紋在裂縫處的不連續性，判斷太陽能電池裂縫之位置。

## 1.2 文獻回顧

### 1.2.1 電子光斑干涉術



1971 年，Butters 及 Leendertz [2]首先提出電子光斑干涉術，這是一種即時、全域且非接觸的量測技術，使用電視照相機與電子處理技術取代傳統全像術，縮短量測的時間。採用量測面外位移的實驗架構，將試片變形前與變形後擷取的影像做相減，獲得等同於變形等高線的光斑干涉條紋。

1977 年，Høgmoen 及 Løkberg [3]在時間平均(time-average) ESPI 量測系統加入參考光相位調制技術(reference beam modulation)，可即時量測微小振幅及相位，提高 ESPI 量測振動的精準度。

1996 年，Wang *et al* [4]提出振幅變動電子光斑干涉術(amplitude-fluctuation ESPI, AF-ESPI)，比較影像相減與振幅變動法的優缺點，影像相減法是以動態減靜態，振幅變動電子光斑干涉術是利用兩張不同振幅的動態影像做相減，後者不僅能降低雜訊干擾，還可提升條紋的清晰度。

Huang 及 Ma [5]於 2000 年先量得圓形鋁板的面外共振頻率，再以共振頻率激振鋁板，利用振幅變動電子光斑干涉術拍攝含裂縫鋁板的面外共振模態，與數值模擬分析比對，發現鋁板共振頻率隨著裂縫長度增加有下降趨勢，且干涉條紋在裂縫處會產生位移不連續之特徵，可標示裂縫之位置。

2003 年，Murukeshan *et al* [6]應用 Matlab 軟體進行電子光斑干涉術的數位影像處理，主要根據傅立葉光學(Fourier optics)原理，將影像從空間域轉換至空間頻率域(spatial frequency)，過濾掉高頻雜訊後，再轉回空間域，此影像處理方法能有效提高干涉條紋的清晰度。

2008 年，Ma *et al* [7] 利用 AF-ESPI 量測壓電陶瓷(piezoceramics)與壓電複合材料(piezo-laminated composites)的面內共振模態，並與數值模擬結果比對驗證，發現不同疊層角度之壓電複合材料的共振頻率會有改變。

### 1.2.2 超音波共振法



2000 年，Ostapenko 及 Tarasov [8]提出超音波共振法(resonance ultrasonic vibrationsin, RUV)，採用 Cz-Si 晶圓為實驗試片，以壓電換能器激振試片，同時以非接觸超音波探頭量測訊號，當試片存有裂縫時，可以共振頻率的改變作為判斷之依據。

2006 年，Ostapenko *et al* [9]再提出超音波共振法的實驗架構(圖 1.5)。以含裂縫的矽基板為實驗試片，利用真空幫浦將矽基板吸附在壓電平台上，在厚度方向激振，採用寬頻超音波探頭在試片邊緣處量測共振頻率，並比較實驗與有限元素軟體分析結果，裂縫的長度增長會造成共振頻率振幅下降，並且在峰值處的頻寬(peak bandwidth)會隨裂縫長度增加而變寬。

2006 年，Ostapenko 及 Belyaev *et al* [10-11] 同樣以超音波共振法為理論基礎，並以有限元素軟體數值模擬含裂縫矽基板的變形。另外使用掃描式超音波顯微鏡(scanning acousitc microscopy, SAM)觀察裂縫實際尺寸，文獻中提到在矽基板的共振模態中，高頻率的共振模態會有較大的平面應力。

2007 年，Dallas *et al* [12] 採用圖 1.6 所示之實驗示意圖，測試三種不同尺寸的矽基板，當矽基板邊長增加，模擬與實驗量測的共振頻率皆有下降的趨勢。文獻中以兩種不同位置的裂縫做比較，其一為在矽基板邊長中間位置，其二為在矽基板角落位置，裂縫長度皆為 6mm。在第一種情況下，含裂縫矽基板的共振頻率附近的頻率響應函數偏移量很小，而第二種角落型裂縫之頻率響應函數在共振頻率附近的偏移量則非常明顯。

2007 年，Hilmersson *et al* [13] 應用敲擊法，實驗裝置如圖 1.7 所示。檢測單晶矽基板的音洩訊號，得到共振頻率、共振頻率峰值與阻尼係數的實驗結果，裂縫依位置可分成兩種，其一為裂縫起始處在矽基板邊長的中間位置，其二的裂縫位置偏離中間位置。實驗結果顯示，第一種裂縫對上述三種物理量的變動較靈敏，其中又以共振頻率處頻率響應函數的峰值改變最為顯著。

2008 年，Monastyrskyi *et al* [14] 將超音波共振法、掃描式超音波顯微鏡(SAM)與光激螢光(photoluminescence, PL)三種裂縫檢測方法做比較，裂縫若是貫穿裂縫，三種方法皆可檢出裂縫，但光激螢光法耗時最久，且裂縫會受到內部雜質影響降低檢出率，超音波共振法檢測時間最短，但無法知道裂縫位置，裂縫為表面刮傷時，超音波共振法對裂縫靈敏度較差，只有掃描式超音波顯微鏡與光激螢光法能檢出裂縫。

2009 年，Belyaev *et al* [15] 在文獻中提出結合超音波共振法的三種系統，在製程中檢測矽基板與太陽能電池裂縫的構想，文章中提到應用電致發光(electro-luminescence, EL)檢測太陽能電池，實驗架構如圖 1.8 所示，其

結果與掃描式超音波顯微鏡影像比較(圖 1.9 a、b)，電致發光法可檢測出裂縫，掃描式超音波顯微鏡則否。但電致發光法須在太陽能電池上設置電極後，才能通電進行檢測。

2011 年，Emirov *et al* [16]以掃描式超音波顯微鏡檢測次毫米壓痕裂紋，能夠成功標示出太陽能電池及矽基板上的裂縫，如圖 1.10 所示。作者另外以聚焦離子束掃描式電子顯微鏡(focused ion beam scanning electron microscopy)觀察同樣的十字裂縫，能更進一步觀察裂縫的細節部分，如圖 1.11 所示。文獻中提到太陽能電池的線上檢測方法，使用超音波共振法加上掃描式超音波顯微鏡或聚焦離子束掃描式電子顯微鏡，能提高太陽能電池在製造過程中破損的檢出率，惟其檢測非常耗時。

### 1.3 內容簡述



本研究首先改良鄭智遠先前設計之面內振動實驗裝置，希望藉此能量測到較清晰的光斑干涉條紋，改進激振時平板試片位移量太小之缺點。另外將實驗試片水平置放於光學桌面，改善試片自重造成邊界受力不平均與試片邊緣處的損壞。採用垂直光路，方便調整與試片間的方位，量測面內 x、y 方向位移。本研究量測太陽能電池的面內共振頻率，並以電子光斑干涉術拍攝太陽能電池的面內共振模態，與 ANSYS 有限元素軟體的分析結果比較。再製作含裂縫太陽能電池，以共振頻率改變判斷試片是否含有缺陷，由干涉條紋不連續處標示裂縫的位置。由於 ESPI 面內量測實驗對表面裂縫的檢出率不佳，針對表面裂縫以 ESPI 面外量測實驗做檢測。

本文共分成六章，第一章為緒論，介紹研究背景、文獻回顧及論文內容簡述。第二章，簡介電子光斑干涉術的量測原理、壓電材料特性及錐形壓電換能器的設計與分析。第三章介紹，應用 ANSYS 套裝軟體，模擬單晶

及多晶太陽能電池的共振頻率及共振模態。第四章介紹本研究使用的面內振動量測裝置及電子光斑干涉術，比較貫穿裂縫與表面裂縫的數值模擬與實驗結果。第五章介紹 ESPI 面外量測實驗及表面裂縫檢測之結果。第六章為本研究的結論及展望。附錄摘述 ESPI 面內量測位移的原理。



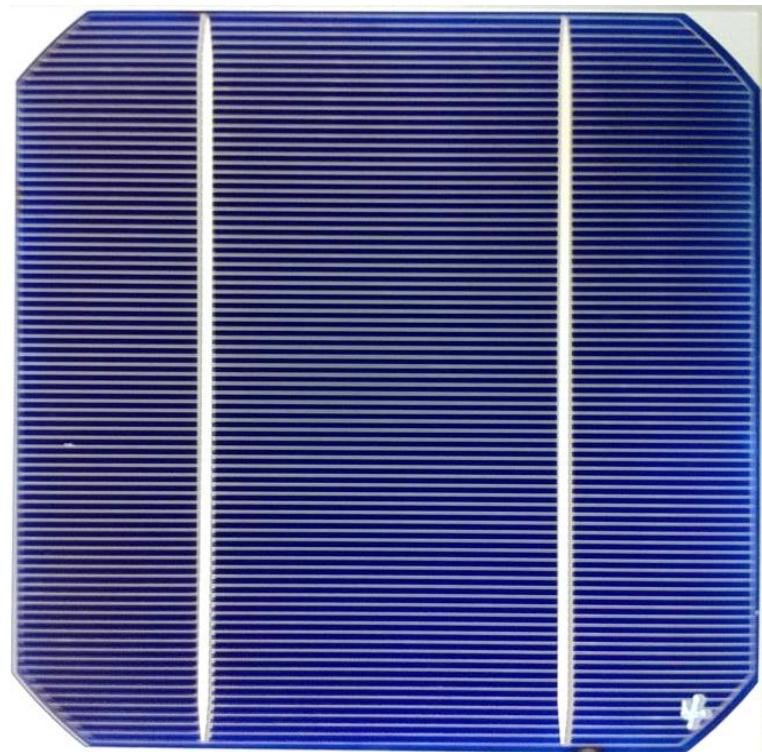


圖 1.1 單晶太陽能電池的正面

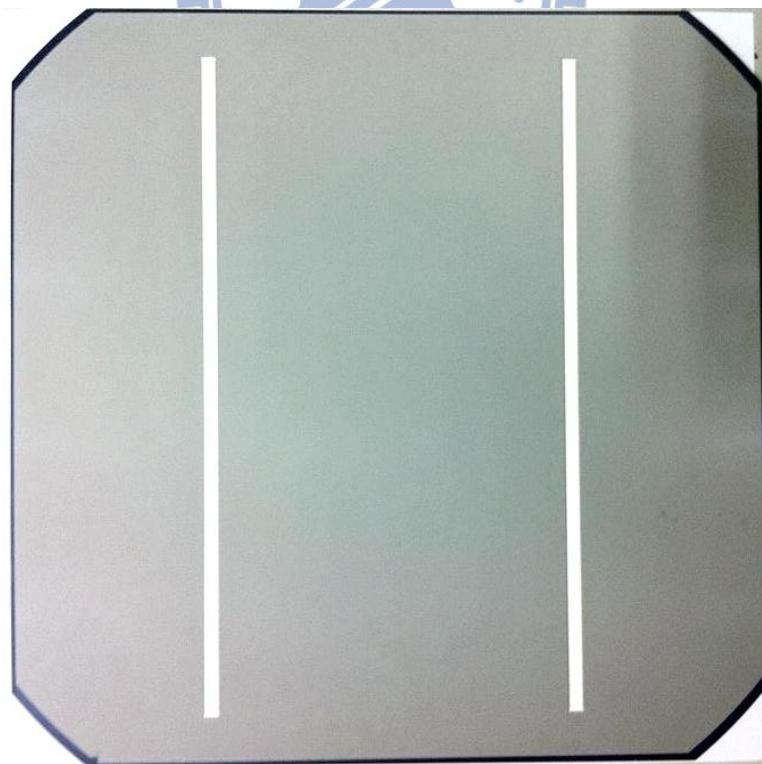


圖 1.2 單晶太陽能電池的反面

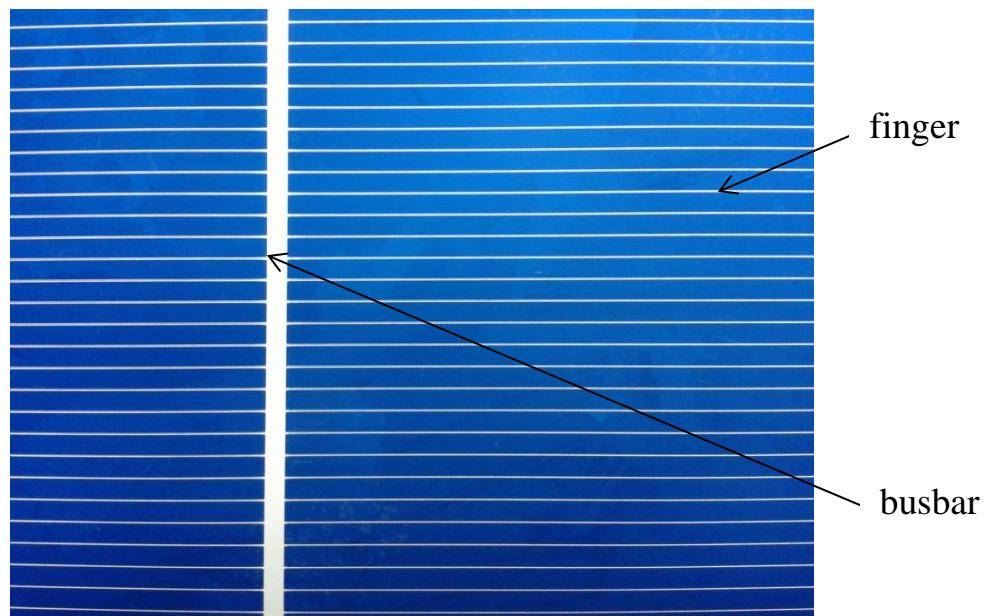


圖 1.3 表面電極(busbar 及 finger)

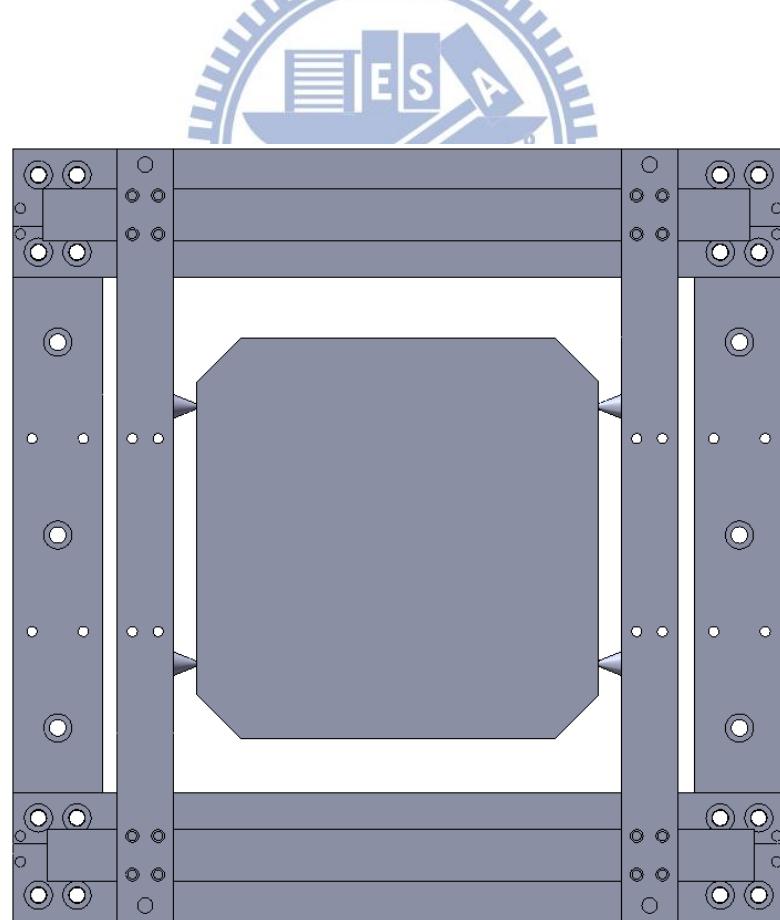


圖 1.4 面內振動量測的夾具

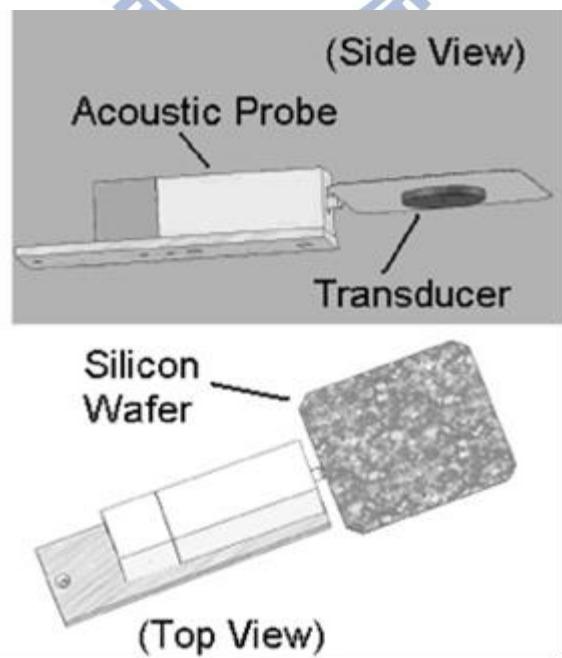
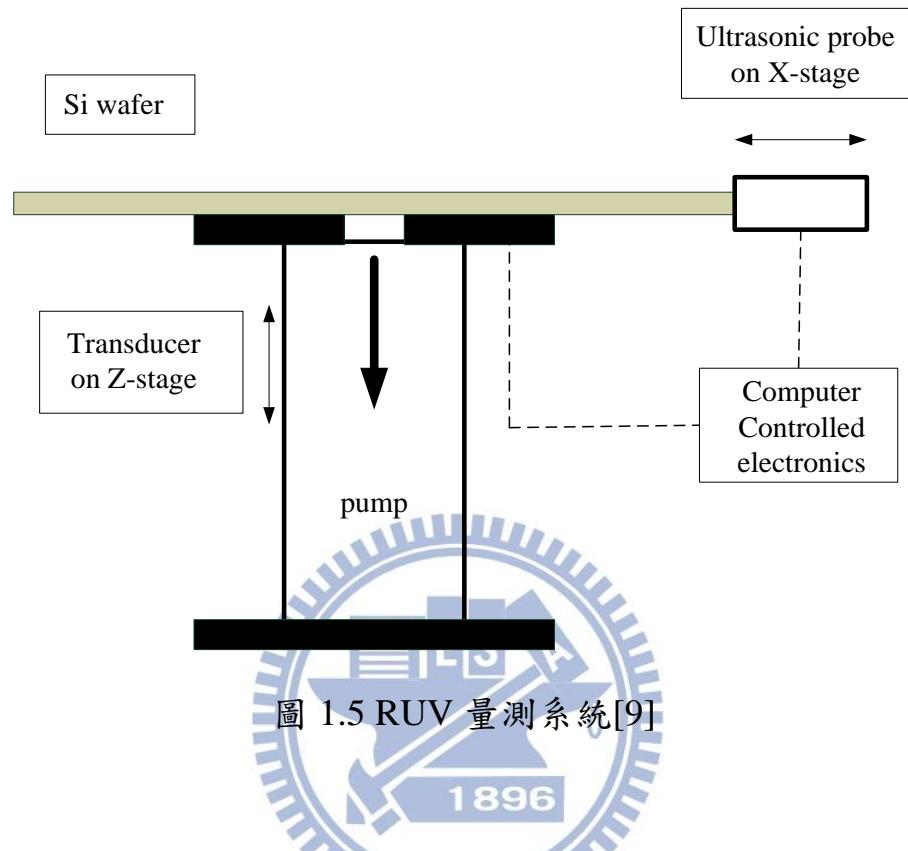


圖 1.6 RUV 實驗側視圖及上視圖[12]

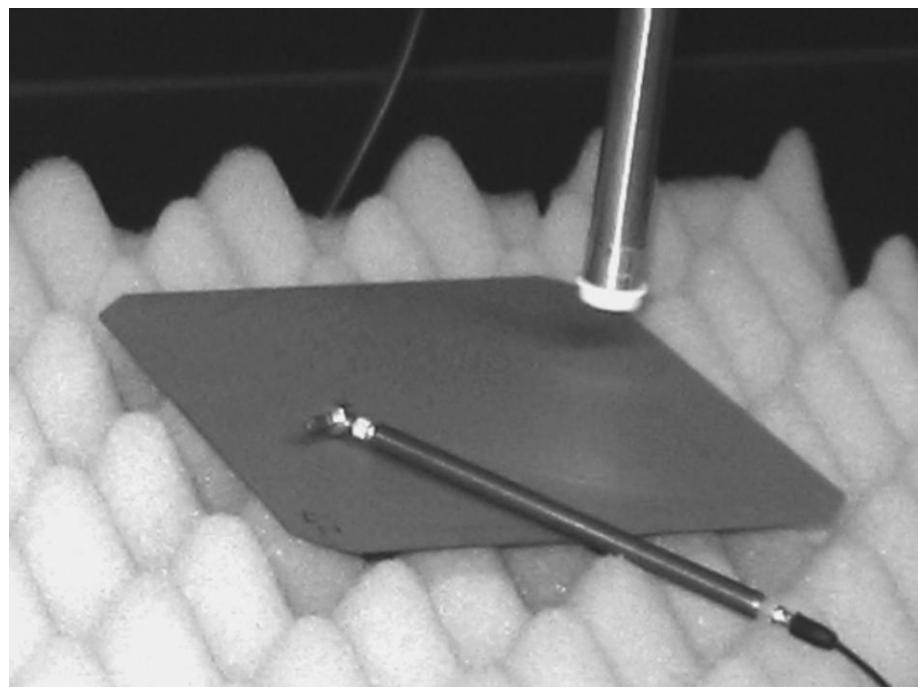


圖 1.7 砂基板裂縫檢測之敲擊實驗裝置[13]

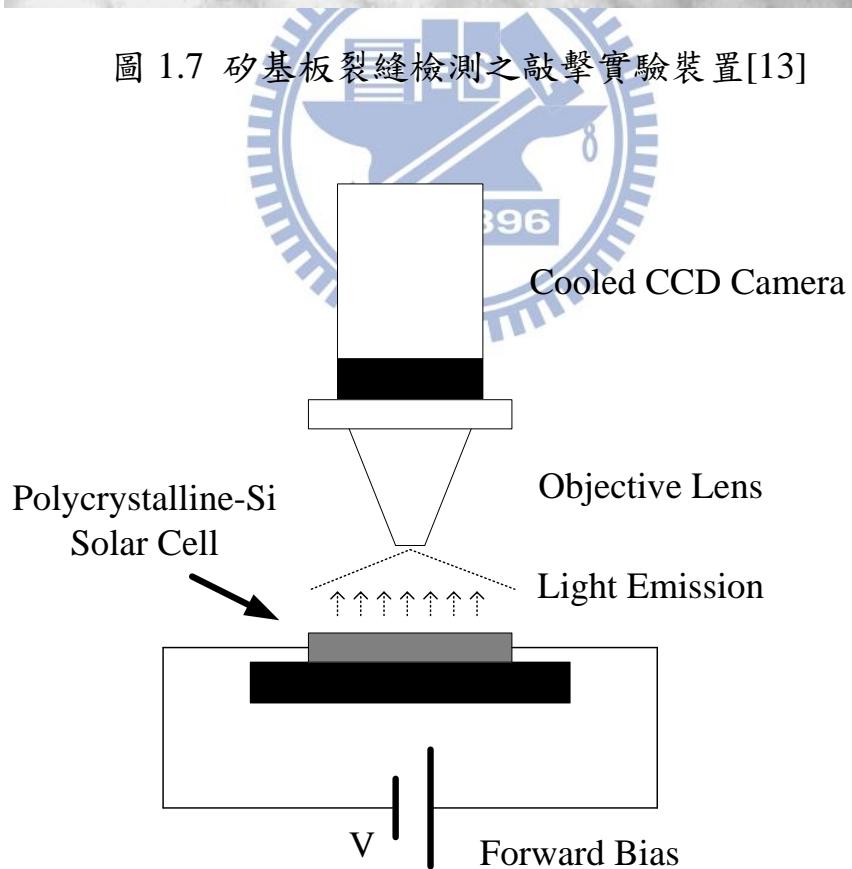


圖 1.8 電致發光量測系統[15]

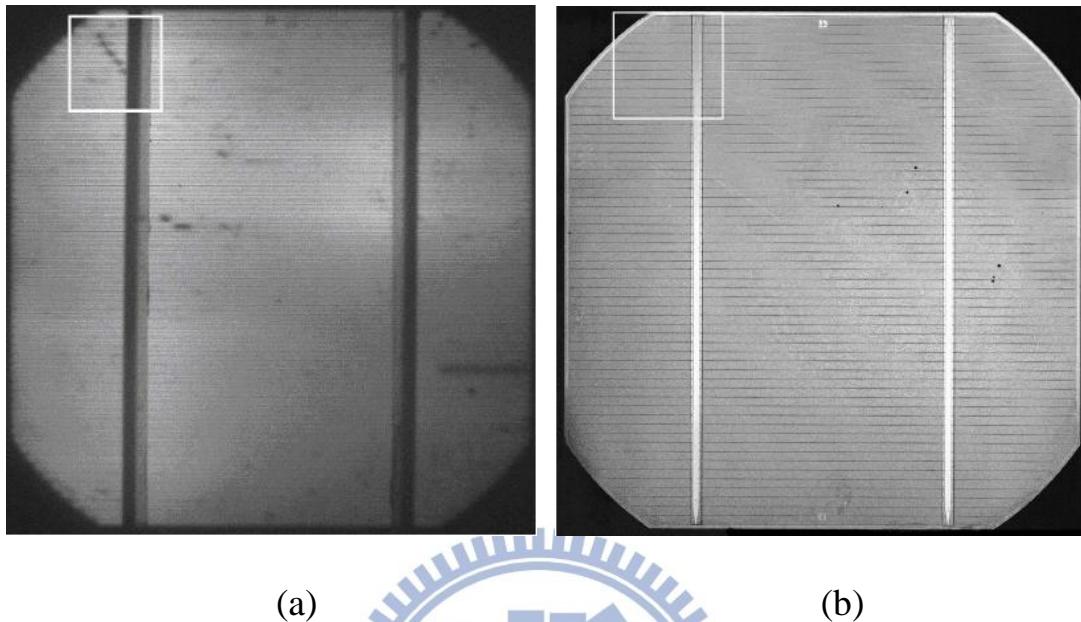


圖 1.9 單晶太陽能電池的(a) EL 影像、(b) SAM 影像[15]

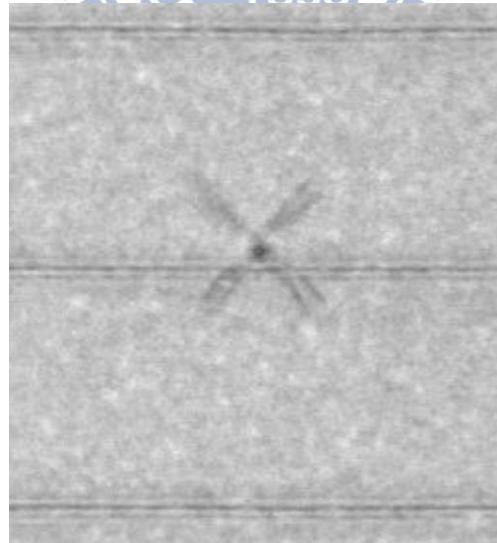


圖 1.10 單晶矽基板表面點壓痕裂紋的超音波顯微鏡影像[16]

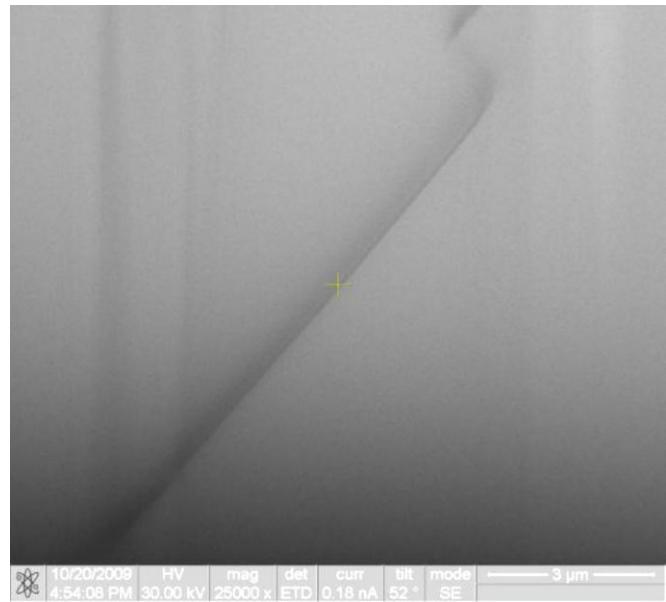
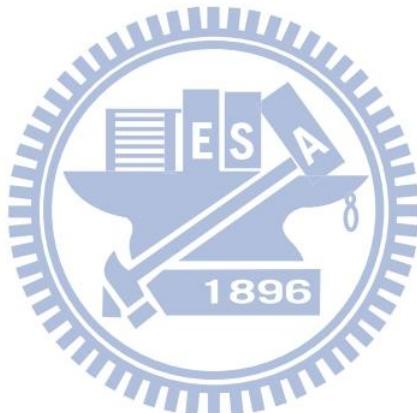


圖 1.11 點壓痕裂紋的聚焦離子束掃描式電子顯微鏡影像[16]



## 第二章 工作原理與壓電換能器模擬分析

本章分成四節，第一節介紹電子光斑干涉術的原理及 ESPI 面內與面外位移量測的實驗架構。第二節介紹壓電材料的力學行為及電性。第三節介紹有限元素分析軟體的網格類型及建模方式。第四節以有限元素法模擬錐形壓電換能器的振動響應，先介紹壓電換能器的設計構想，使用 ANSYS 套裝軟體，以模態分析求得軸向自然頻率數值，再應用時諧分析繪出頻率響應曲線。

### 2.1 電子光斑干涉術

同調光經過粗糙面散射而成的顆粒狀光學斑點稱為光斑(speckle)，照射區域的尺寸大小取決於光波長及透鏡的焦距與光圈。當待測物受負載而表面變形大於光波長時，自光學粗糙面散射的光在空間互相干涉形成複雜的光強分布，形成顆粒狀之光斑圖(speckle pattern)，光斑的大小與雷射光波長及待測物距離成正比關係。

電子光斑干涉術是以影像感測元件與電子處理技術，紀錄低空間頻率 (low spatial frequency) 之全像干涉術，具有即時、全域與非接觸等優點，是一種用途廣泛的光學測量方法。電子光斑干涉術可分為兩種光路架構，一是平行於待測物表面的面內位移量測，二是垂直於待測物表面的面外位移量測，如圖 2.1 所示。本研究主要量測太陽能電池的面內變形，為了增加干涉條紋的解析度，參考 Høgmoen 和 Løkberg [3] 所提出的均時法 (time-average method)、Murukeshan *et al* [6] 進行影像處理之方法，及 Wang *et al* [4] 提出的振幅變動法，量測太陽能電池面內振動的等位移條紋。均時法是在電荷耦合相機(charge-coupled device, CCD) 的曝光時間內對振動物體連

續存取，再使用影像處理方法，得到的干涉條紋由零階貝索函數控制，使節線區的影像較亮。

本研究實驗架構分為 ESPI 面內及面外位移量測系統，在面內量測架構(圖 2.2)中，雷射光通過分光鏡分成物光及參考光，兩道光束分別經過反射鏡，穿過空間濾波器轉為球面光，兩同光程之球面光同時照射在太陽能電池，激振電池產生擾動，以相機擷取兩張不同振幅激振之影像，進行影像相減獲得光斑干涉圖形。在 ESPI 面外位移量測實驗架構(圖 2.3)中，雷射光先經過空間濾波器轉為球面光，再通過 45 度分光鏡分為物光及參考光，前者照射於待測試片，後者照射於參考平面，同時產生散射，由相機擷取兩散射光干涉產生的影像，再與另一張不同振幅激振之影像相減，即可得光斑干涉圖形。相關量測園裡的數學表示式詳述於附錄。



## 2.2 壓電效應

壓電材料的壓電效應分為正壓電效應(piezoelectric effect)與逆壓電效應(converse piezoelectric effect)。當壓電材料施以正向壓力時，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變化會產生電壓抗衡以保持原狀。參考圖 2.4 所示，當一機械應力作用於壓電材料時，材料體會產生一組與應力大小成正比例的正負電荷，若應力方向相反，電壓也隨之相反，這種正壓電效應即是機械能轉化為電能的過程，大多應用於感測器，如加速規及位移感測器等。在壓電材料表面施予電壓時，因電場作用，電偶極矩被拉長，壓電材料會沿電場方向伸長，這是電能轉化為機械能的逆壓電效應，如圖 2.5 所示，大多應用於壓電致動器(piezoelectric actuator)。本研究採用壓電材料設計錐形換能器，作為激振及感測太陽能電池之裝置。

## 2.2.1 壓電材料的本構方程式

壓電陶瓷為機械能與電能互相耦合的材料，本構方程式(constitutive equation)包含機械特性與電性。壓電陶瓷為非等向性材料，本構方程式比一般等向性材料複雜。

本構方程式涉及的變數有四組，其中兩組為機械場變數，應力  $\mathbf{T}$  及應變  $\mathbf{S}$ ，兩組為電性場變數，電場  $\mathbf{E}$  與電位移  $\mathbf{D}$ 。壓電材料的本構方程式表示，

$$\begin{aligned}\mathbf{T} &= \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e}^T \mathbf{E} \\ \mathbf{D} &= \mathbf{e} \mathbf{S} + \mathbf{\epsilon}^S \mathbf{E}\end{aligned}\quad (2.1)$$

此處依據 Voigt 表示法，將應力與應變二階張量(tensor)簡化為向量型式， $\mathbf{T}$  為應力向量， $\mathbf{S}$  為應變向量， $\mathbf{c}^E$  為在固定電場條件下的彈性剛度矩陣(matrix of elastic stiffness)， $\mathbf{e}$  為壓電常數矩陣(matrix of piezoelectric constants)， $\mathbf{e}^T$  為壓電常數矩陣的轉置矩陣(transport matrix)， $\mathbf{D}$  為電位移向量矩陣， $\mathbf{E}$  為電場向量， $\mathbf{\epsilon}^S$  是固定應變下的介電常數矩陣(matrix of dielectric constants)。

考慮以 Z 軸為極化方向，具橫向等向性之壓電陶瓷，其彈性勁度矩陣為

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

壓電常數矩陣為

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

固定應變之介電常數矩陣為

$$\boldsymbol{\varepsilon}^S = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^S & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

本構方程式(2.1)可以展開如下：

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{31} \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{31} \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{33} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 & -e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & -e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11} \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

### 2.3 三維有限元素分析之元素及網格

本研究分析兩種振動模型，分別為錐形壓電換能器及太陽能電池，模擬使用的結構元素類型為體積元素 Solid45 及 Solid5，如圖 2.6、2.7 所示。太陽能電池及錐形換能器鋁合金材料使用 Solid45 元素，此元素為 8 個節點的三維元素，每個節點有 x、y、z 三個方向的位移自由度，錐形換能器的壓電材料使用 Solid5 元素，此元素同樣為 8 節點的三維元素，每個節點有 x、y、z 三個方向的位移自由度及一個電位自由度。有限元素網格可分為自由網格(free mesh)及規則網格(mapped mesh)，自由網格與規則網格的比較參考表 2.1 所示。太陽能電池及錐形壓電換能器外型較單純，故都使用 ANSYS 軟體繪圖製作模型，採用規則網格做有限元素模型。

採用 ANSYS 的模態分析模組求得錐形壓電換能器的自然頻率及振形，改變錐形換能器的各部位尺寸，求取較高的第一軸向自然頻率，並以時諧分析計算錐形壓電換能器的頻率響應函數。

太陽能電池依實際尺寸建立分析模型，厚度方向分成矽基板、多孔性鋁結構與柵狀匯流電極，鋁矽共晶結構則因為厚度很小，沒有建立在模型中。分別以 ANSYS 模態分析及時諧分析模組，數值計算太陽能電池面內自然模態及位移頻率響應曲線。

## 2.4 錐形壓電換能器設計與分析

本研究以疊層壓電陶瓷改善錐形壓電換能器的性能，用於量測太陽能電池的面內共振頻率及激振電池進行 ESPI 量測，鄭智遠[1]設計之錐形壓電換能器量測試片頻率響應時，試片的一側為兩個致動器，另一側為兩枚感測器。但是在進行 ESPI 面內位移量測實驗時，兩側皆為致動器，兩項實驗的邊界條件不一致。若提高錐形壓電換能器的激振性能，使得頻率響應量測與 ESPI 面內位移量測實驗條件一致，均為單側激振。

在量測太陽能電池振動頻率響應時，將錐形壓電換能器緊靠於試片側邊，激振太陽能電池產生振動，錐形壓電換能器承受軸向壓力變形而感測到振動訊號。本研究設計系統的量測頻率範圍為 0~100 kHz 間，避免換能器自身共振頻率影響待測系統頻率響應函數的量測結果，故錐形壓電換能器的軸向第一共振頻率應高於 100 kHz 為佳。本研究將壓電換能器設計為錐形，因錐形結構底面積大，不易產生撓曲、扭曲的共振模態，此種幾何形狀能使軸向第一共振頻率有效提高，壓電片製作成疊層型式，相鄰的壓電片彼此電位相同，以並聯方式串接，並將壓電片設計在錐形換能器中間部位，當壓電片通以電壓，後方圓柱體會推擠前面的錐形結構，產生致動效果，壓電片後方的圓形環狀結構為錐形換能器夾持固定之位置。

錐形壓電換能器採用的壓電材料為 PZT-4，錐形體及圓柱體的材料為鋁合金，兩者的材料係數如表 2.2、表 2.3 所列。以有限元素法分析錐形換能

器的振動特性，換能器有限元素網格如圖 2.8 所示。調整各幾何參數改變錐形探頭的自然頻率，由軸向第一自然頻率的高低，決定錐形壓電換能器的適當尺寸(圖 2.9)。首先以模態分析求取第一軸向自然頻率，換能器尺寸等比例縮小會使自然頻率明顯提高，但為了使致振力能有效提升，錐形換能器的設計尺寸也不宜太小。模擬結果顯示第一軸向自然頻率為 84.204 kHz，如圖 2.10 所示。確定錐形換能器的結構尺寸後，接著對換能器進行時諧分析，圖 2.11 所示為四種不同數目的元素網格討論錐形壓電換能器的收斂性分析。元素數量為 1,104 時，與其他元素數目的分析結果不同，當元素數目增為 7,068、18,000 與 27,516，頻率響應函數之自然頻率發生位置及振幅值皆趨近定值。模型元素量太少，會造成分析結果失真，元素數目分割越多，結果相對較準確，但過多的元素數目，會浪費分析求解的時間，故採用元素數目 18,000 進行後續的模擬分析。

錐形壓電換能器的時諧分析，是以三種情況模擬分析自然頻率，其一為施予壓電片交流電壓，計算換能器前端頂部的軸向位移量，產生最大軸向位移量的自然頻率為 84.25 kHz(圖 2.12)。其二為將前端錐形體頂部施加一軸向時諧外力，讀取壓電片的電位頻率響應(圖 2.13)自然頻率為 84.75 kHz。其三為模擬錐形壓電換能器的阻抗(electrical impedance)頻率響應(圖 2.14)，共振發生在曲線的最低點，自然頻率為 84.375 kHz。阻抗是電路中電阻、電感與電容對電流阻礙作用之統稱。由三種時諧分析，計算錐形壓電換能器的軸向自然頻率，結果顯示換能器的軸向自然頻率位於 84 kHz 附近。

表 2.1 ANSYS 的自由網格與規則網格比較表

Free mesh	Mapped mesh
面積網格使用三邊形與四邊形 元素	面積網格使用四邊形元素
體積網格使用四面體元素	體積網格使用六面體元素
快速產生有限元素模型，處理較 複雜的實體模型	實體模型的形狀與分割的設定 須符合某先限制
元素及節點數量多	元素及節點數量少

表 2.2 錐形壓電換能器頻率響應計算採用之壓電陶瓷(PZT-4)材料係數

彈性係數(GPa)				
$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{33}$	$C_{44}$
139	77.8	74.3	115	25.6
壓電係數(Coulomb/m <sup>2</sup> )			介電係數	
			$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ farads/m	
$e_{15}$	$e_{31}$	$e_{33}$	$\epsilon_{11} / \epsilon_0$	$\epsilon_{33} / \epsilon_0$
12.7	-5.6	15.1	730	635

表 2.3 錐形壓電換能器頻率響應採用之鋁合金材料係數

密度 $\rho$ (kg / m <sup>3</sup> )	楊氏係數 $E$ (GPa)	蒲松比 $\nu$
2700	70	0.33

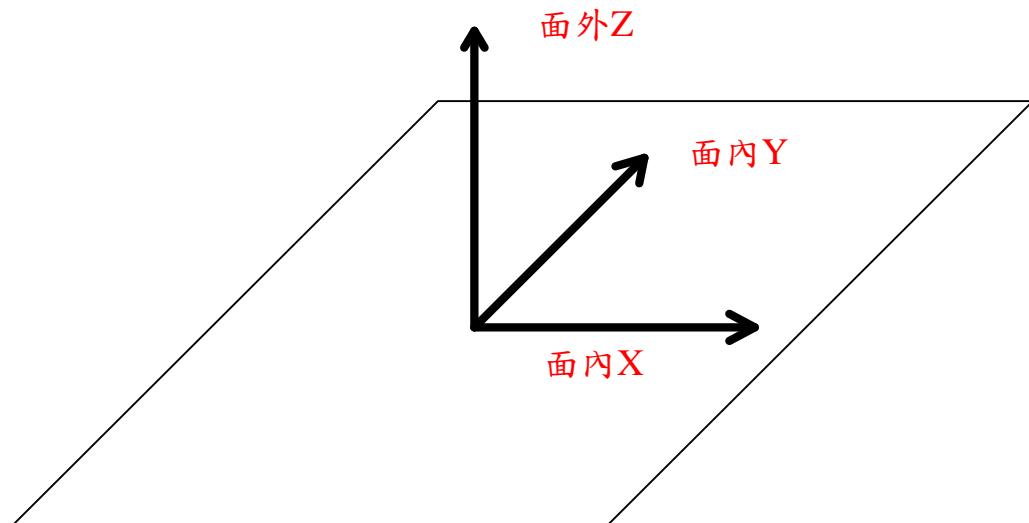


圖 2.1 電子光斑干涉術量測位移的座標系統

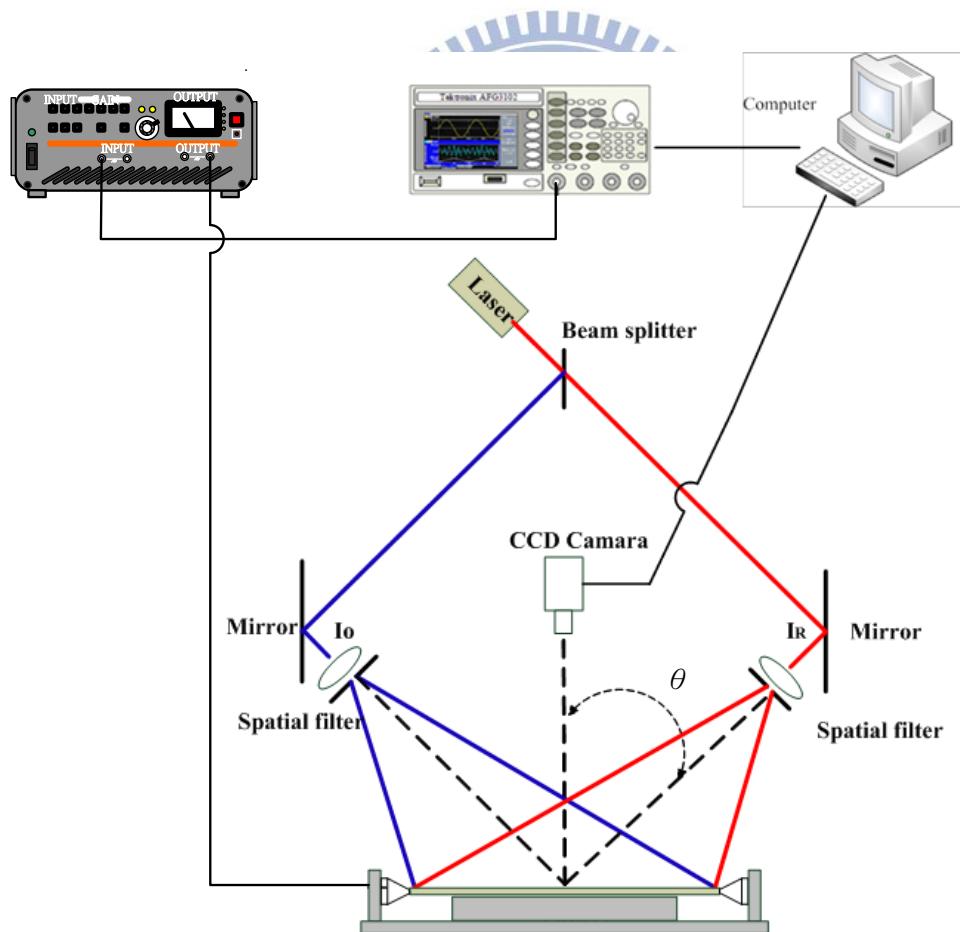


圖 2.2 ESPI 量測面內振動的實驗系統

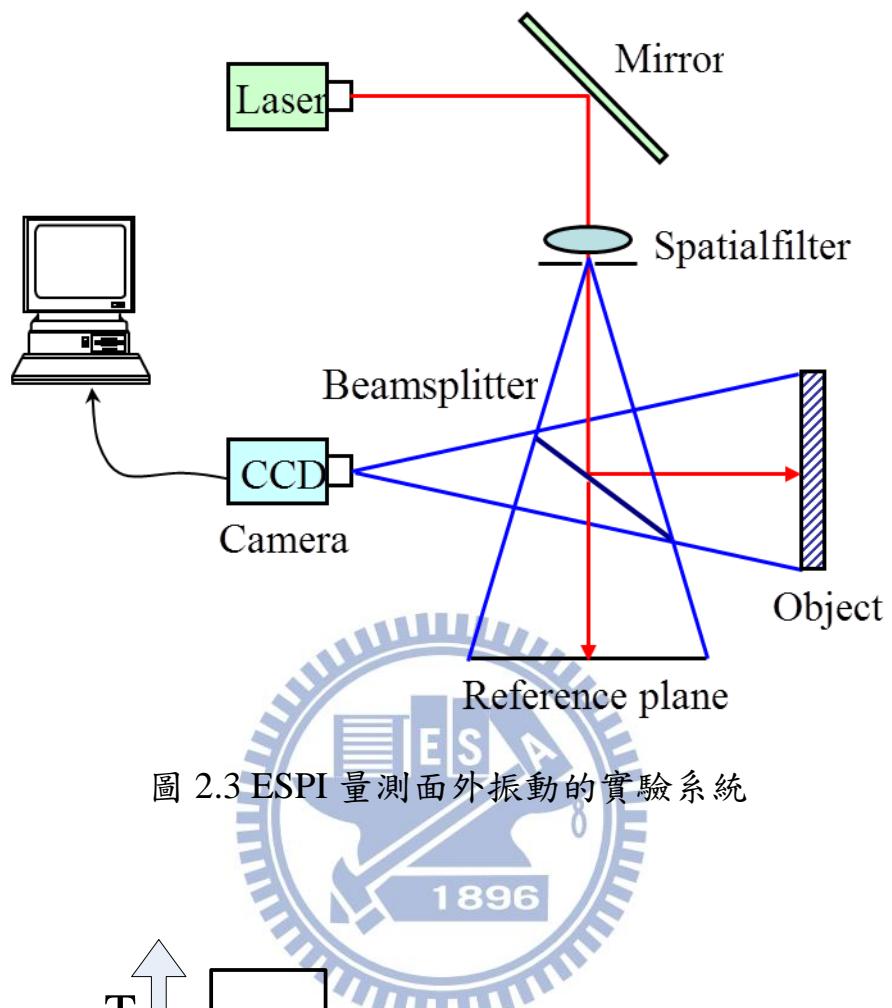


圖 2.3 ESPI 量測面外振動的實驗系統

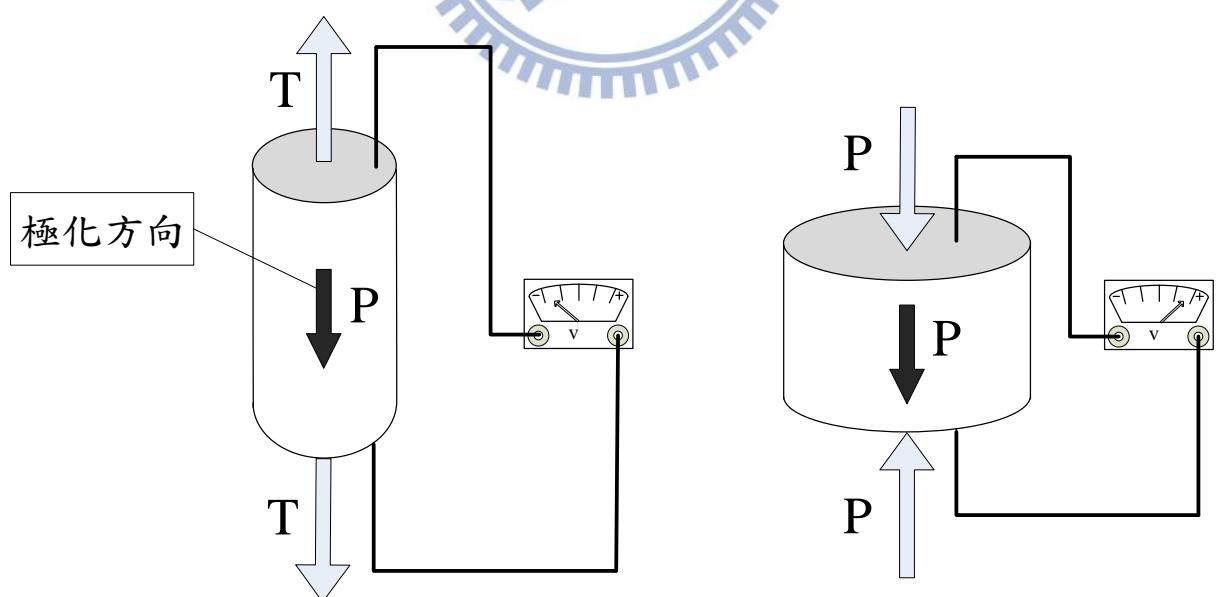


圖 2.4 壓電材料的正壓電效應

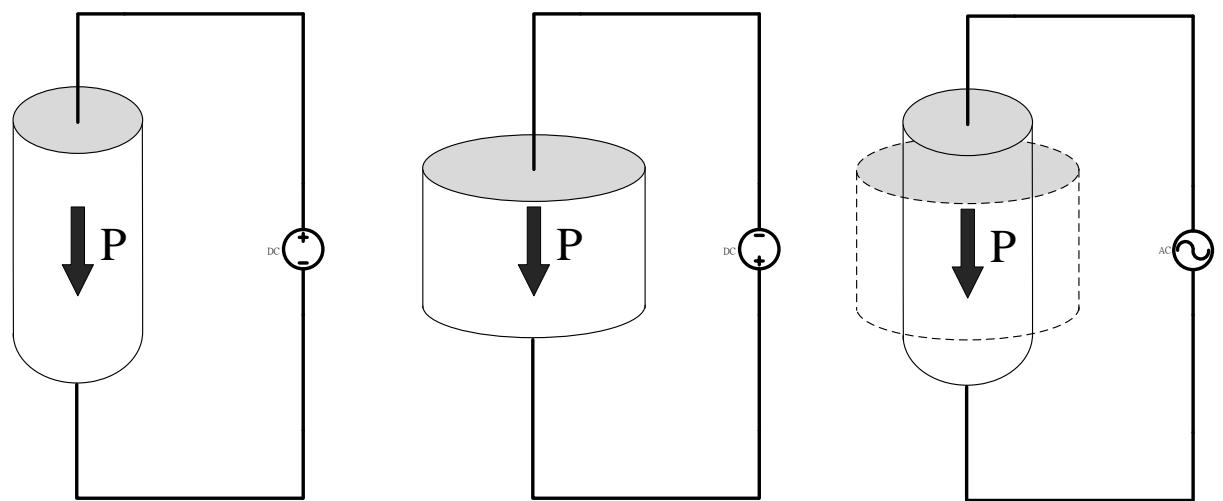


圖 2.5 壓電材料的逆壓電效應

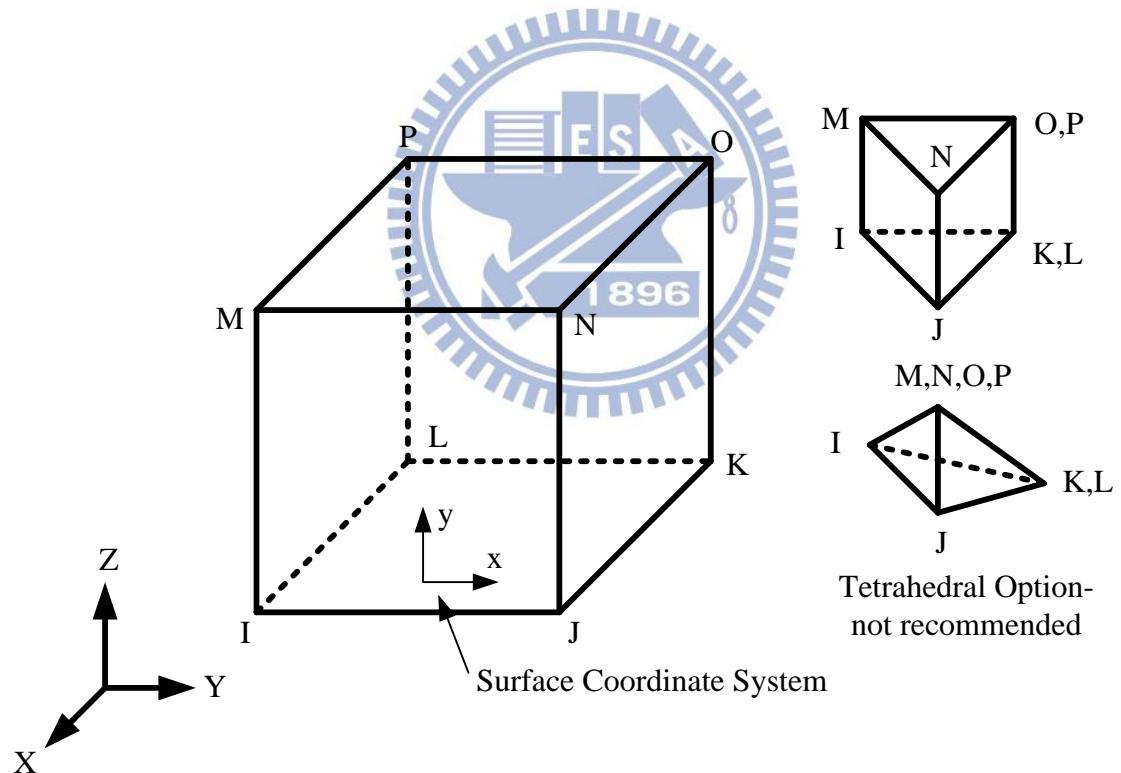


圖 2.6 元素 Solid45

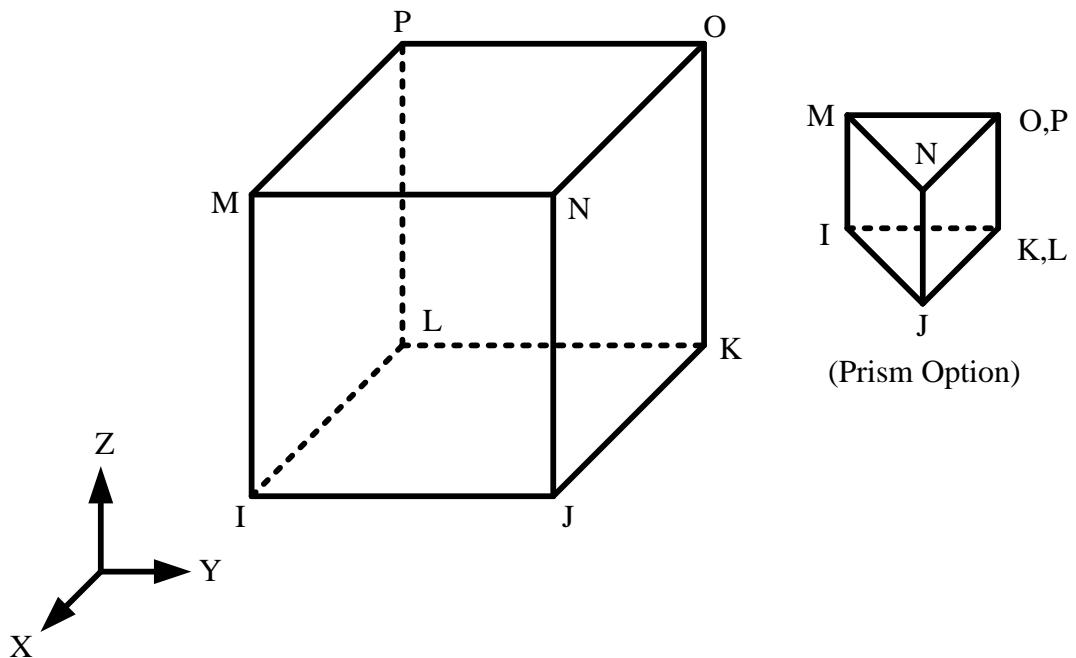


圖 2.7 元素 Solid5

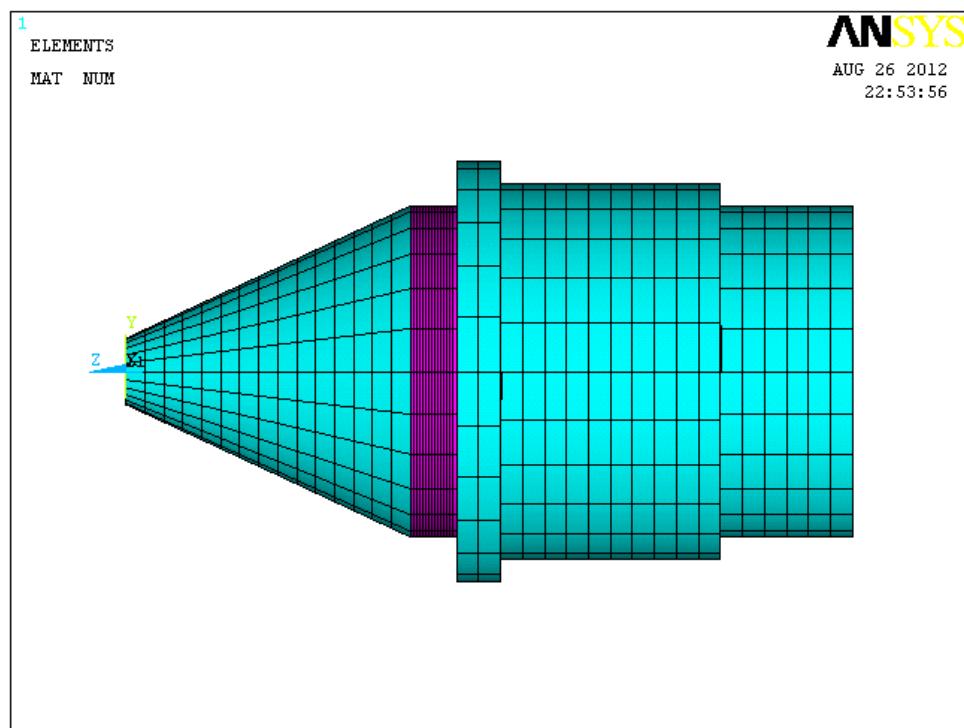


圖 2.8 錐形壓電換能器之有限元素網格

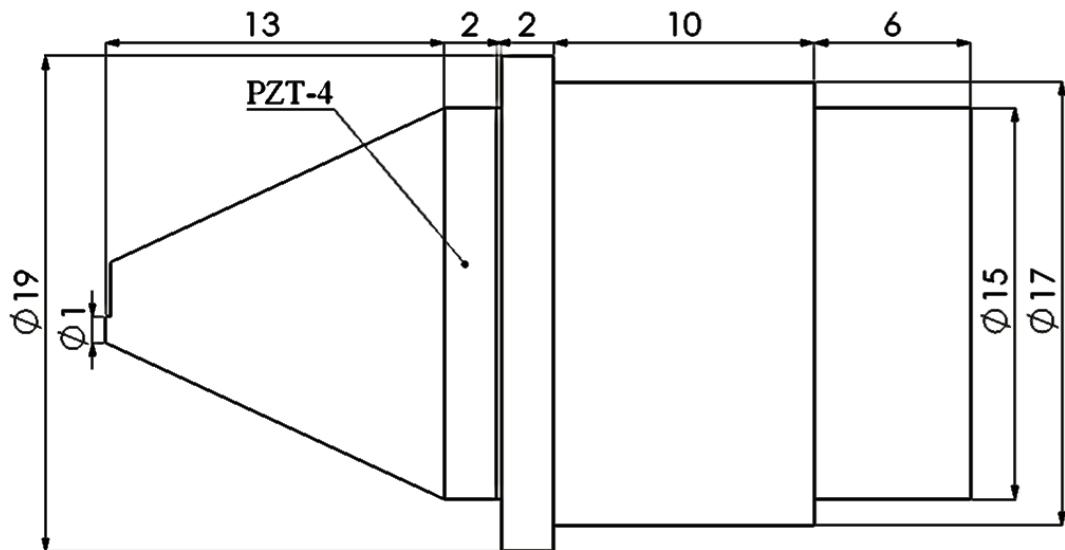


圖 2.9 錐形壓電換能器幾何尺寸及參數

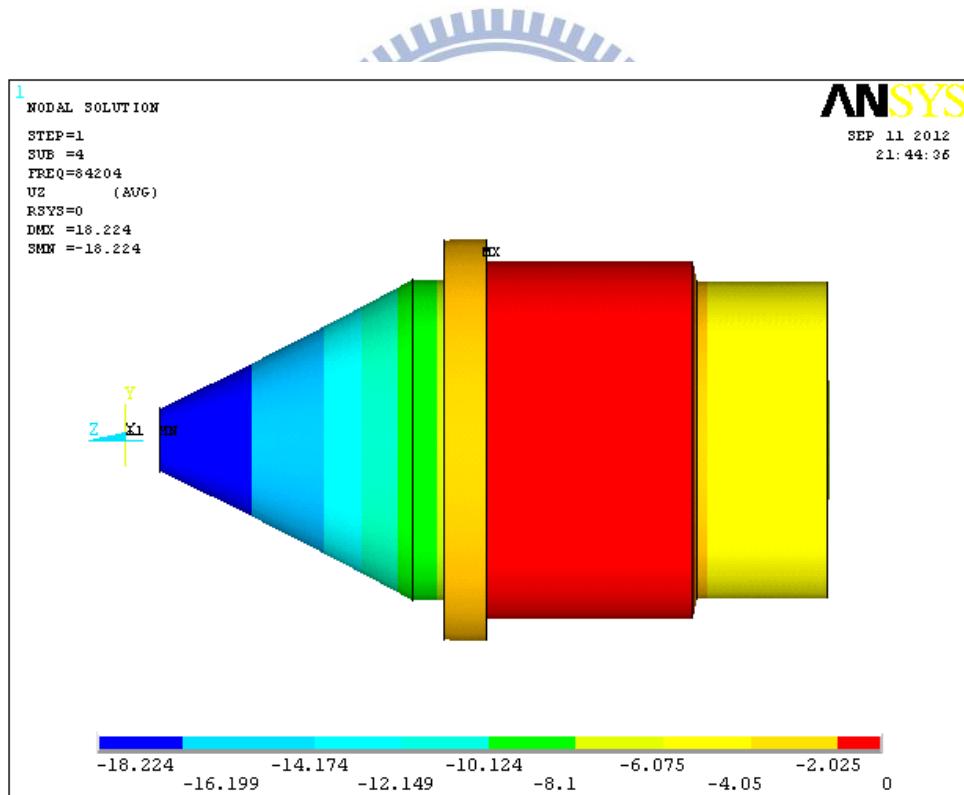


圖 2.10 錐形壓電換能器第一軸向自然模態

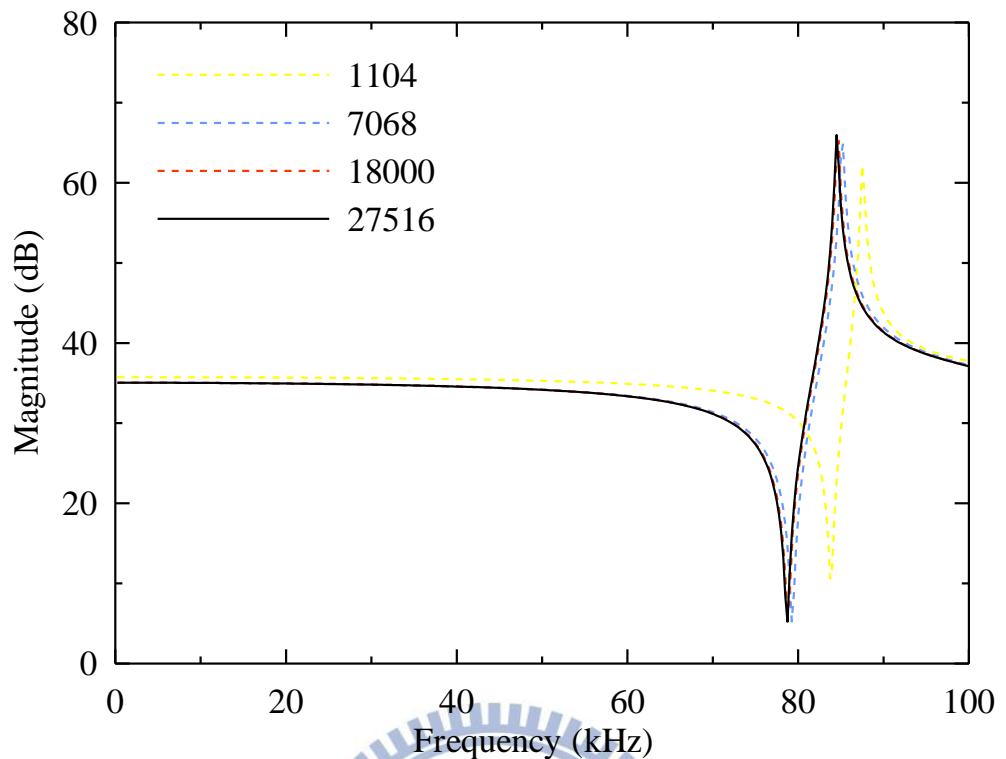


圖 2.11 不同元素數目計算錐形壓電換能器之電位頻率響應曲線

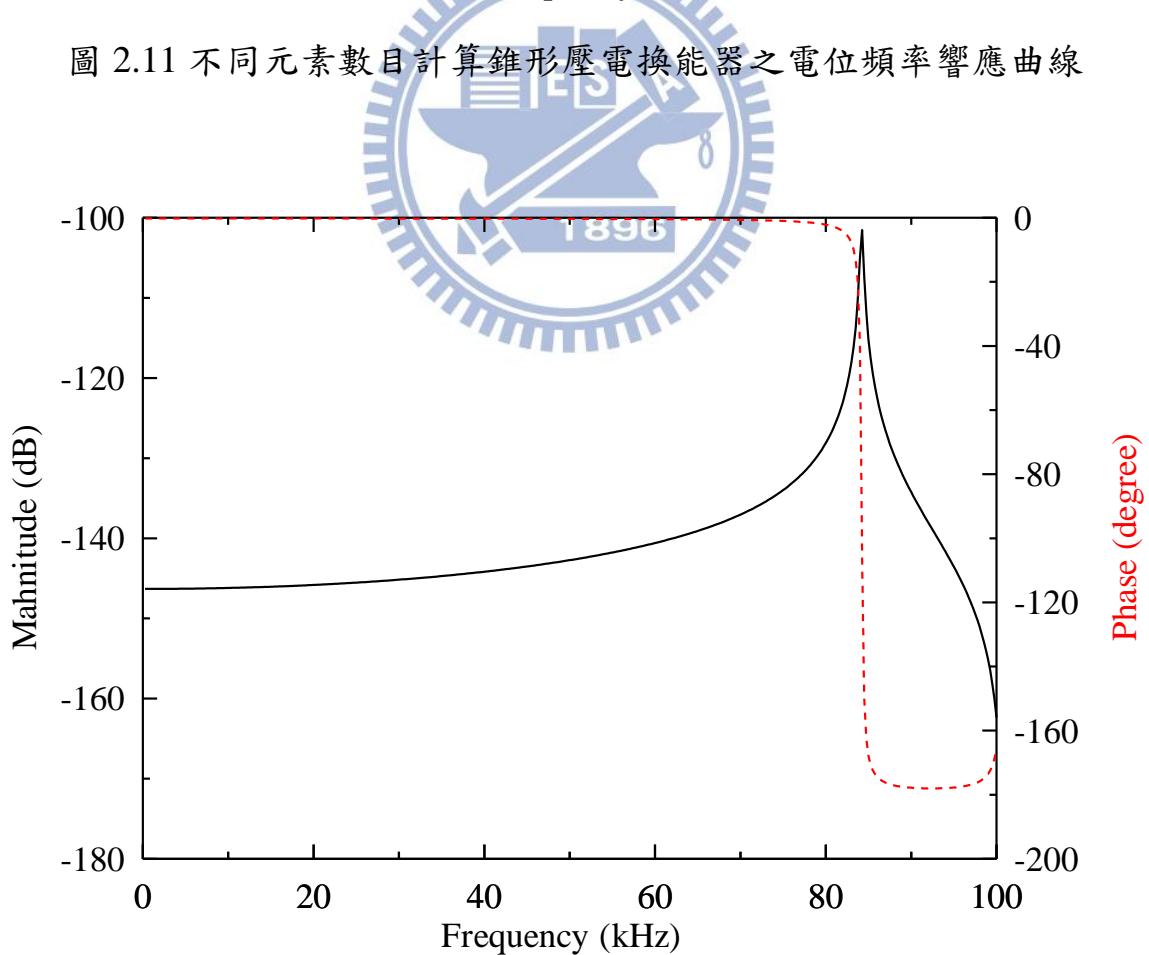


圖 2.12 錐形壓電換能器前端軸向位移頻率響應圖

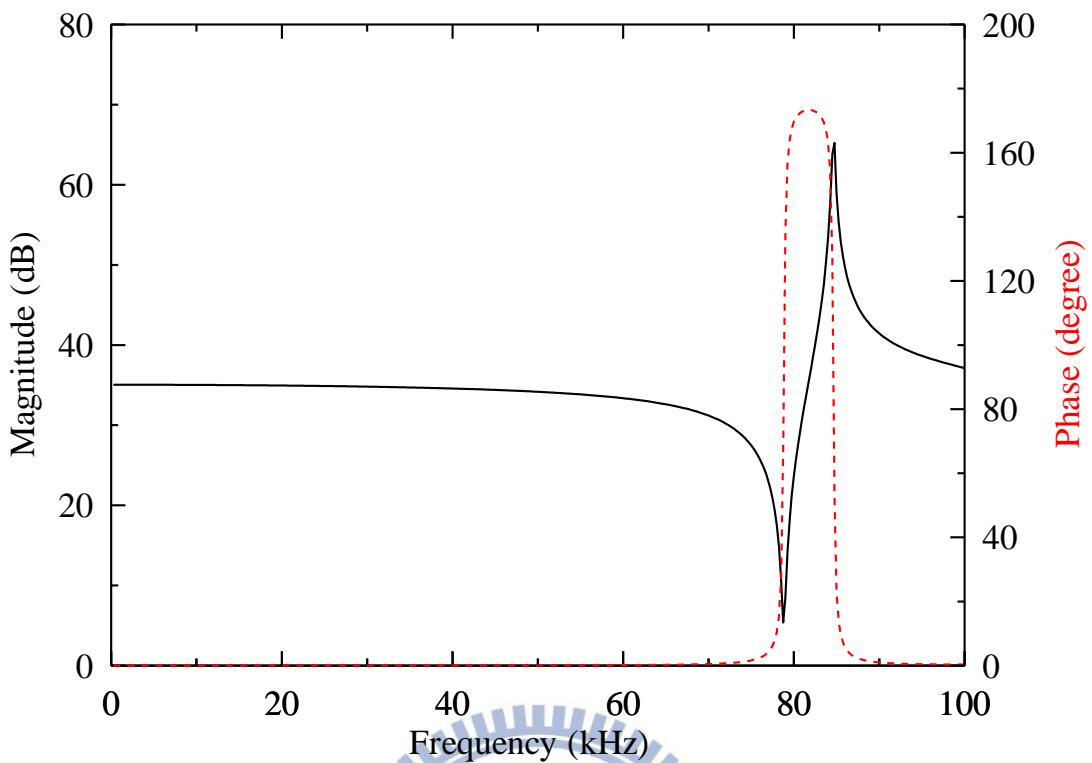


圖 2.13 錐形壓電換能器受時諧外力之電位頻率響應計算曲線

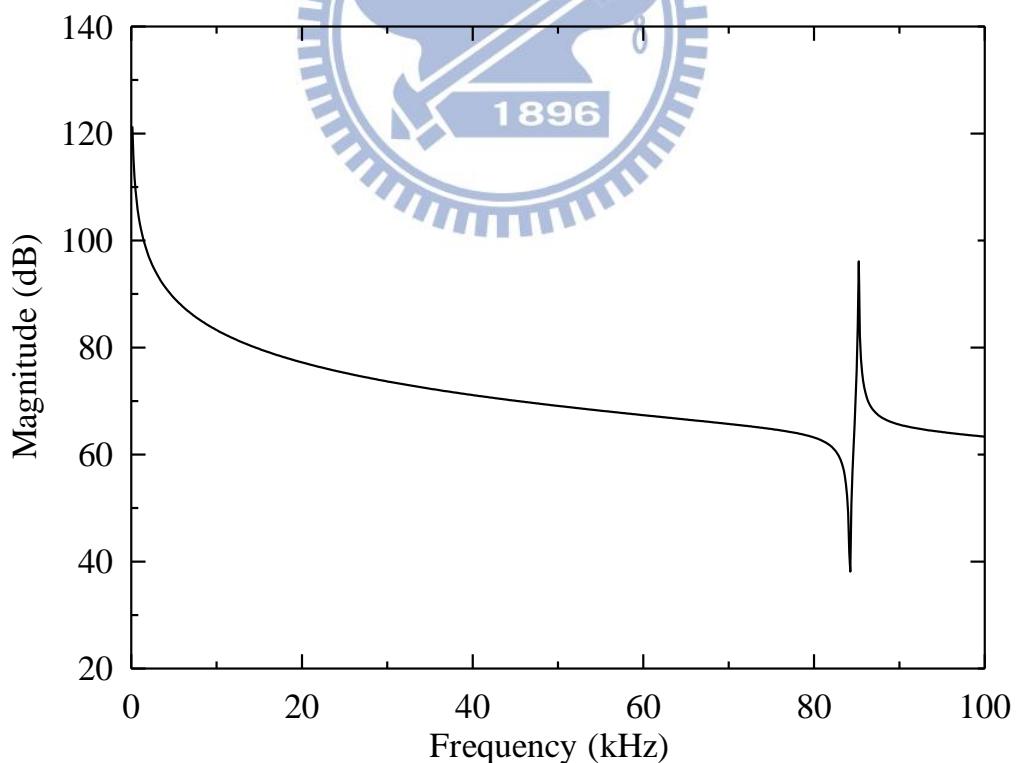


圖 2.14 錐形壓電換能器阻抗頻率響應計算曲線

### 第三章 面內振動的數值模擬分析

本章以有限元素法模擬太陽能電池的振動響應，介紹太陽能電池的尺寸，以 ANSYS 軟體模擬太陽能電池自然振動，並整理數值分析太陽能電池的面內自然模態及位移頻率響應曲線。

#### 3.1 面內共振模態

電子光斑干涉術可分為面外位移及面內位移兩種量測系統，量測太陽能電池的面內共振模態的優點如下：太陽能電池上層材質為矽基板、下層為多孔隙鋁材，且兩者中間還有鋁矽共晶結構，故在厚度方向是不對稱的結構，試片受激振外力時較容易產生面外變形。面內共振模態數目比面外共振模態數目要少，共振模態密度(modal density)也較小。本研究設計錐形壓電換能器，用於量測太陽能電池的面內共振頻率，再以量測到的共振頻率激振太陽能電池，應用電子光斑干涉面內位移量測系統擷取太陽能電池的面內共振模態。

#### 3.2 太陽能電池面內振動分析

本節介紹單晶與多晶太陽能電池在不同邊界條件下的面內振動模態分析。首先將太陽能電池所有節點的厚度方向拘束( $U_z=0$ )進行數值分析，然後進行自由邊界條件之太陽能電池模擬。無拘束條件之太陽能電池的所有面外、面內及耦合的自然模態都會發生，且數量非常龐大。若將面內方向位移量較小的模態捨去，只留下面內方向位移量較大模態，此時的自然模態與  $z$  方向位移固定之模擬結果幾乎相同。因此在分析太陽能電池的自然

模態時，設定的拘束條件為  $Uz = 0$ 。為了使模擬更接近真實情況，以冷鑲埋製作太陽能電池的試片(圖 3.1)，採用光學顯微鏡拍攝太陽能電池厚度方向的斷面影像(圖 3.2、3.3)，瞭解矽基板、多孔性鋁結構及匯流電極的厚度。

### 3.2.1 太陽能電池模態分析

太陽能電池振動分析計算採用之材料係數如表 3.1 及 3.2 所列。多晶太陽能電池的寬度為 156 mm、矽基板厚度 187  $\mu\text{m}$ 、多孔性鋁結構厚度 30  $\mu\text{m}$ 、電極厚度 12  $\mu\text{m}$ 。單晶太陽能電池為八邊形結構，四邊邊長為 126 mm、四個截角的邊長為 21 mm。太陽能電池的裂縫可以分為表面裂縫(surface crack)及貫穿裂縫(thru-thickness cracks)，矽基板表面刮傷受製程的熱及壓力等外在因素影響，形成裂縫，裂縫延展至破壞韌性較大的鋁矽共晶結構層而停止，即為表面裂縫，貫穿裂縫是裂縫完全穿透太陽能電池。

將模態分析所得之多晶太陽能電池 x、y 方向面內變形，以等高線圖繪出，如表 3.3-1、3.3-2 所列。面內變形  $Ux$  及  $Uy$  等高線圖相同，代表太陽能電池上的電極對於電池的對稱性及自然模態的影響很小。表 3.4-1 及 3.4-2 所列為單晶太陽能電池面內變形的等高線圖。

### 3.2.2 太陽能電池時諧分析

本研究也探討了太陽能電池時諧分析之收斂性，將有限元素模型的元素數目設為 48,984、73,320 與 97,656。圖 3.4 所示為多晶太陽能電池的位移頻率響應，隨著元素數目增加，頻率響應曲線有向上提升的趨勢，而自然頻率發生之位置則幾乎相同。本研究數值分析多晶太陽能電池採用元素數目 97,656 之切割方式，有限元素網格如圖 3.5 所示。單晶太陽能電池使用 98,712 個有限元素，單晶太陽能電池的有限元素模型如圖 3.6 所示。

太陽能電池時諧分析的邊界條件分成兩種，如表 3.5 所列，一種是激振力平行電極的方向，另一種則是垂直電極的方向，檢測面內位移  $U_x$  及  $U_y$ 。上述兩種邊界皆為一側施加時諧外力、另一側滾支承固定，應用時諧分析求得兩種邊界條件下 x、y 方向的位移頻率響應圖，分別如圖 3.7、3.8 所示。從兩張圖比較得知，激振外力與位移同方向所量測之響應 dB 值較高。所以在進行 ESPI 實驗時，應該以換能器夾持方向與檢測方向相同效果較好。多晶太陽能電池在面內方向的位移頻率響應如圖 3.9 所示，圖中峰值所對應的頻率即為太陽能電池之自然頻率，在 6、21.25、26.25、32、42.25、51.5、56.5、66.25 與 76.25 kHz，量測面內位移  $U_x$ 、 $U_y$  時都有同樣自然頻率。單晶太陽能電池在面內方向的位移頻率響應參考圖 3.10 所示，在量測  $U_x$ 、 $U_y$  位移時自然頻率落在 6、25.25、31、47.25、48.5、56.5、60 與 74.25 kHz，具有相當一致的結果。

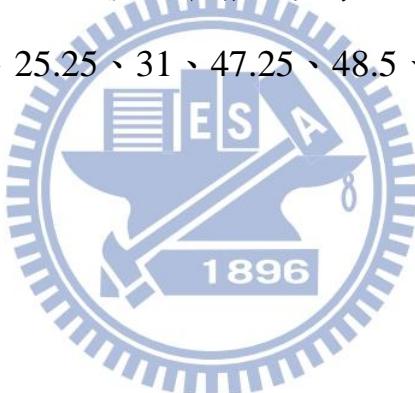


表 3.1 模擬分析採用之多晶太陽能電池材料係數

	密度 $\rho$ ( $kg / m^3$ )	楊氏係數 $E$ ( $GPa$ )	蒲松比 $\nu$
Poly-silicon	2330	160	0.28
Gridline and busbar (Ag)	10500	72	0.28
Al layer	2700	43	0.35

表 3.2 單晶太陽能電池材料係數

彈性常數( $GPa$ )	密度 $\rho$ ( $kg / m^3$ )	蒲松比 $\nu$
$E_x = 169$	2330	$\nu_{xy} = 0.064$
$E_y = 169$		$\nu_{yz} = 0.36$
$E_z = 130$		$\nu_{zx} = 0.28$
$G_{xy} = 50.9$		
$G_{yz} = 79.6$		
$G_{zx} = 79.6$		

表 3.3-1 多晶太陽能電池面內自然頻率及模態分析結果(I)

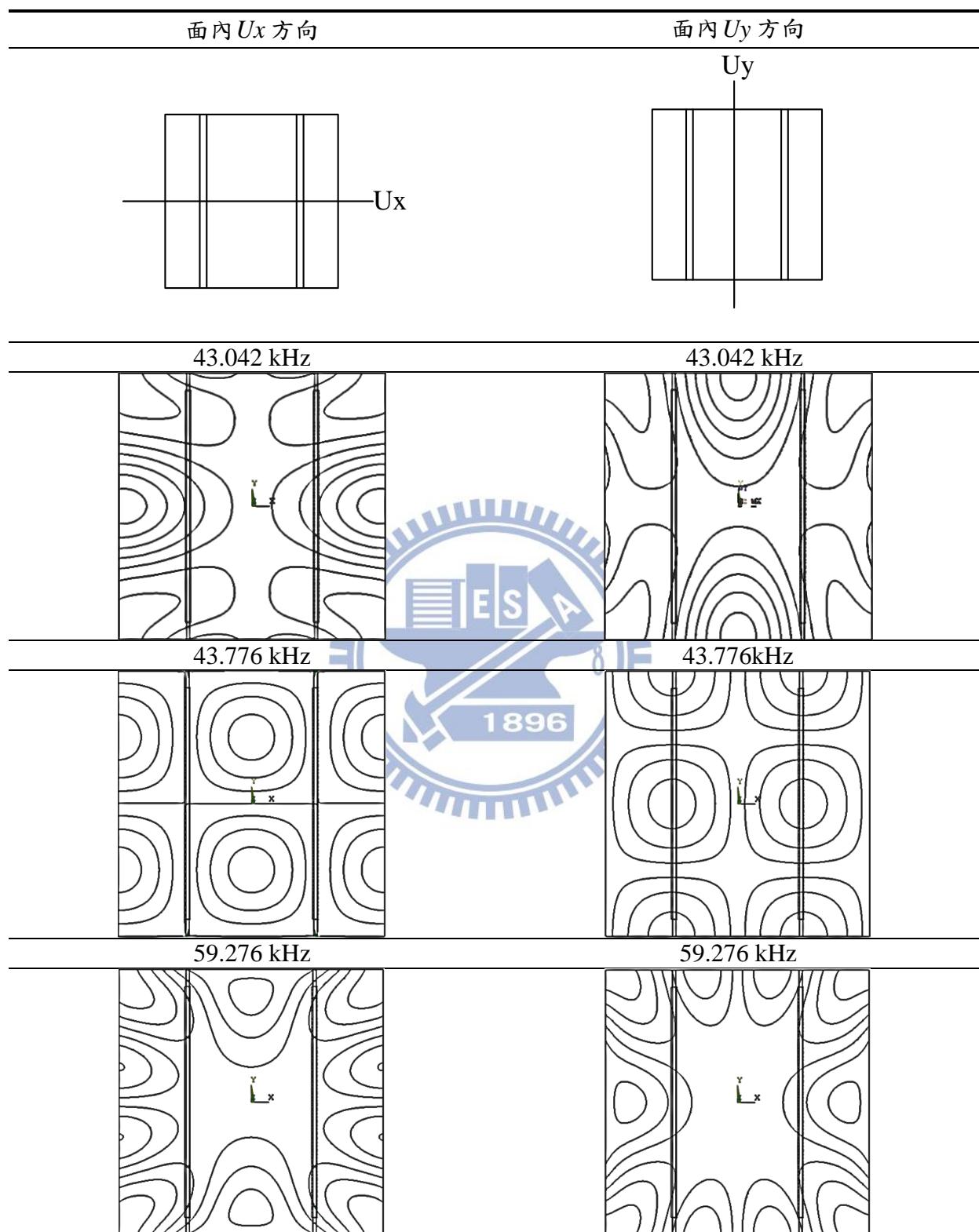


表 3.3-2 多晶太陽能電池面內自然頻率及模態分析結果(II)

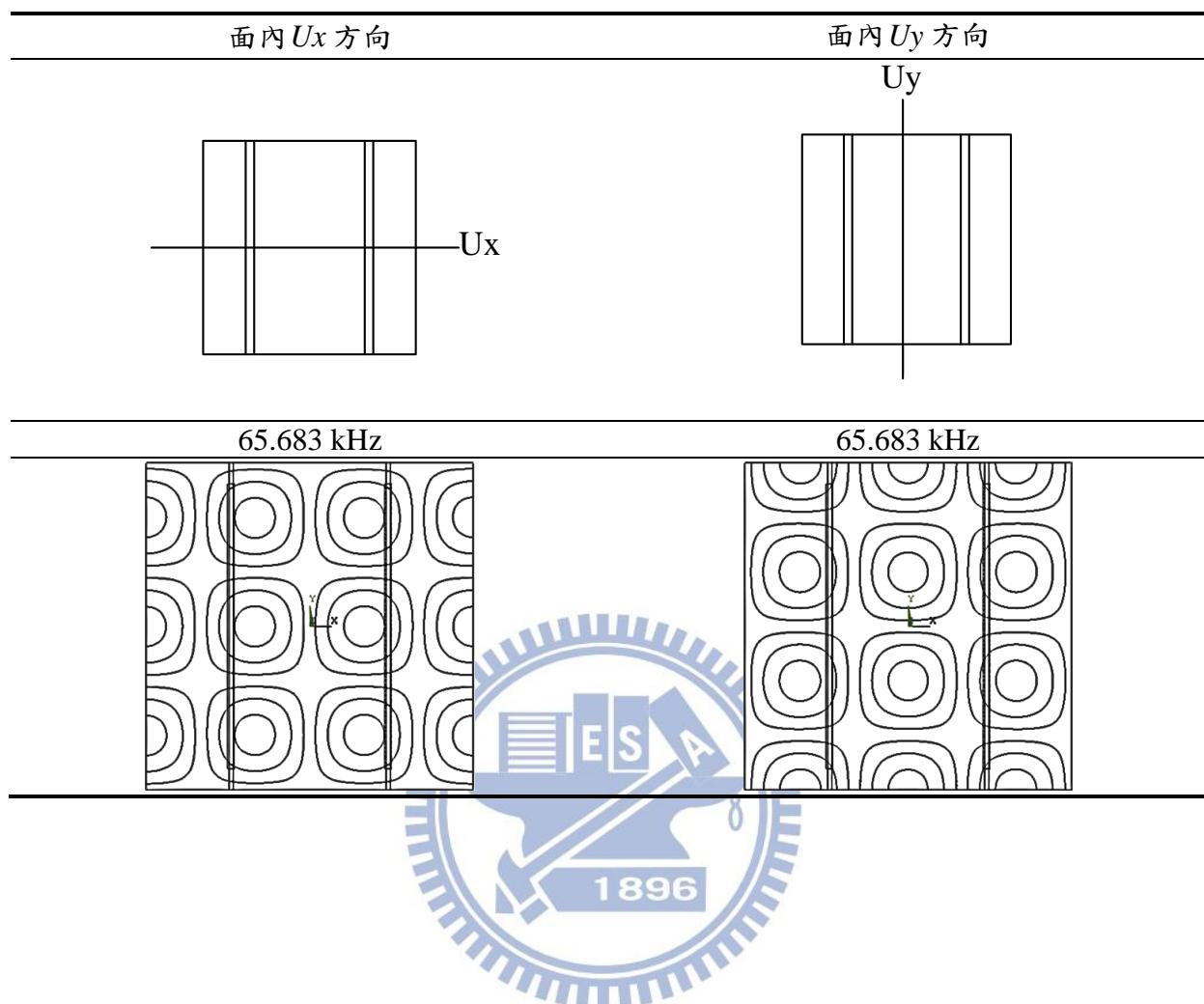


表 3.4-1 單晶太陽能電池面內自然頻率及模態分析結果(I)

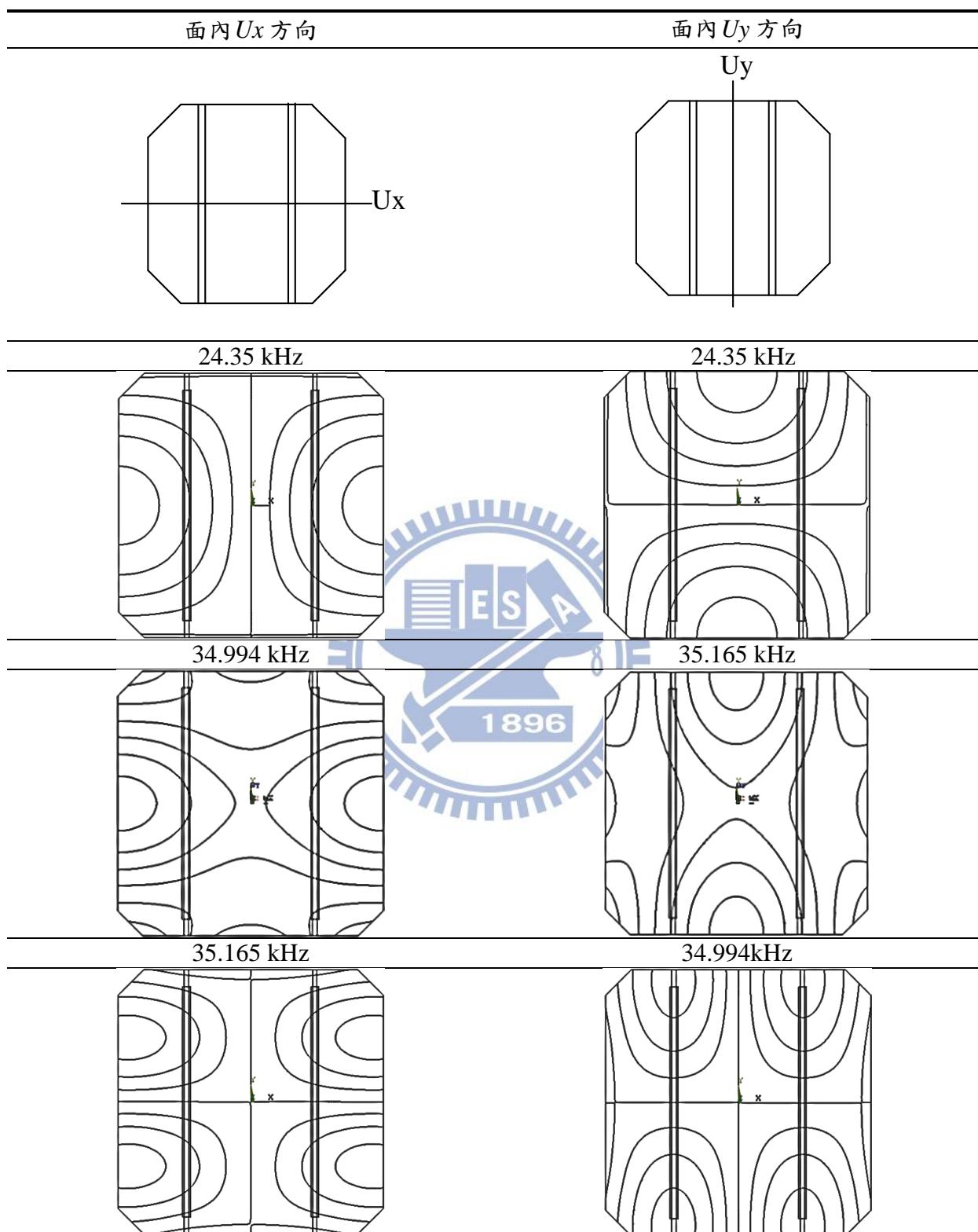


表 3.4-2 單晶太陽能電池面內自然頻率及模態分析結果(II)

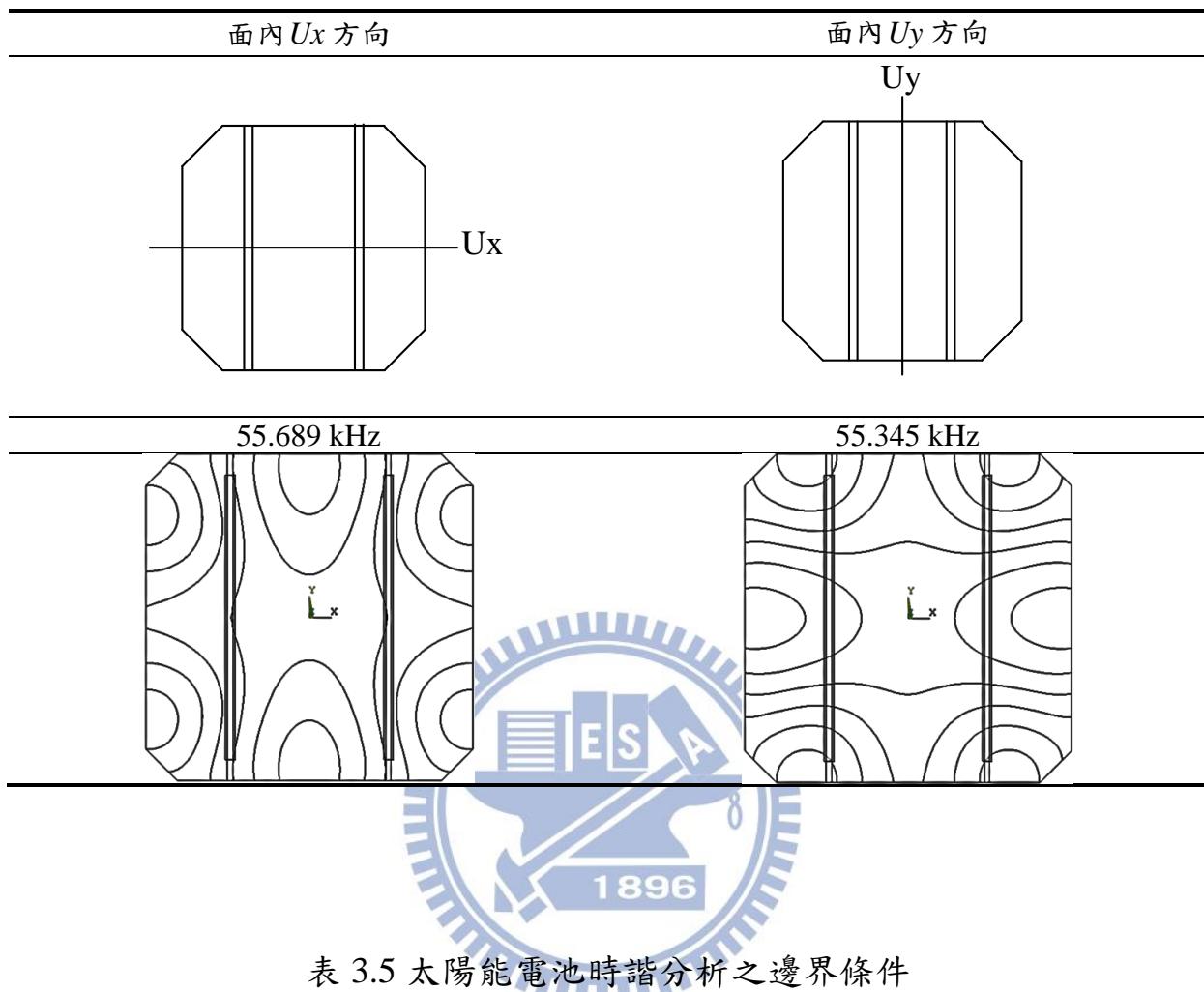


表 3.5 太陽能電池時諧分析之邊界條件

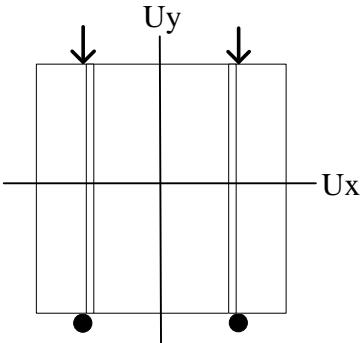
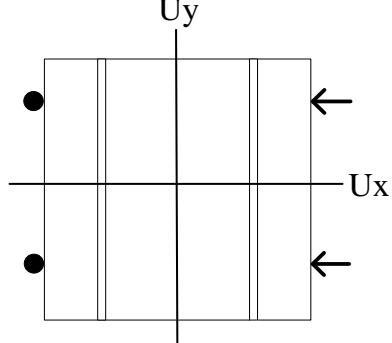
夾持方向	平行電極方向	垂直電極方向
邊界條件	一側 $U_y = 0$ 一側時諧外力 $F_y$	一側 $U_x = 0$ 一側時諧外力 $F_x$
示意圖		



圖 3.1 太陽能電池冷鑲埋

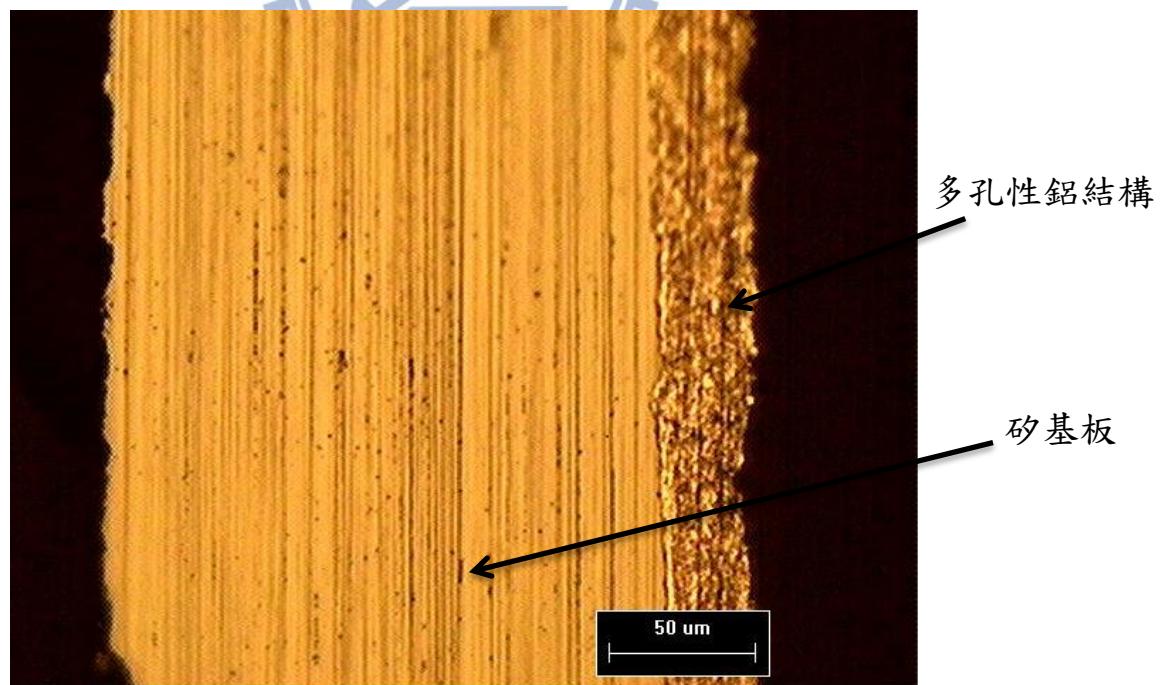


圖 3.2 多晶太陽能電池剖面的電子顯微鏡影像 1

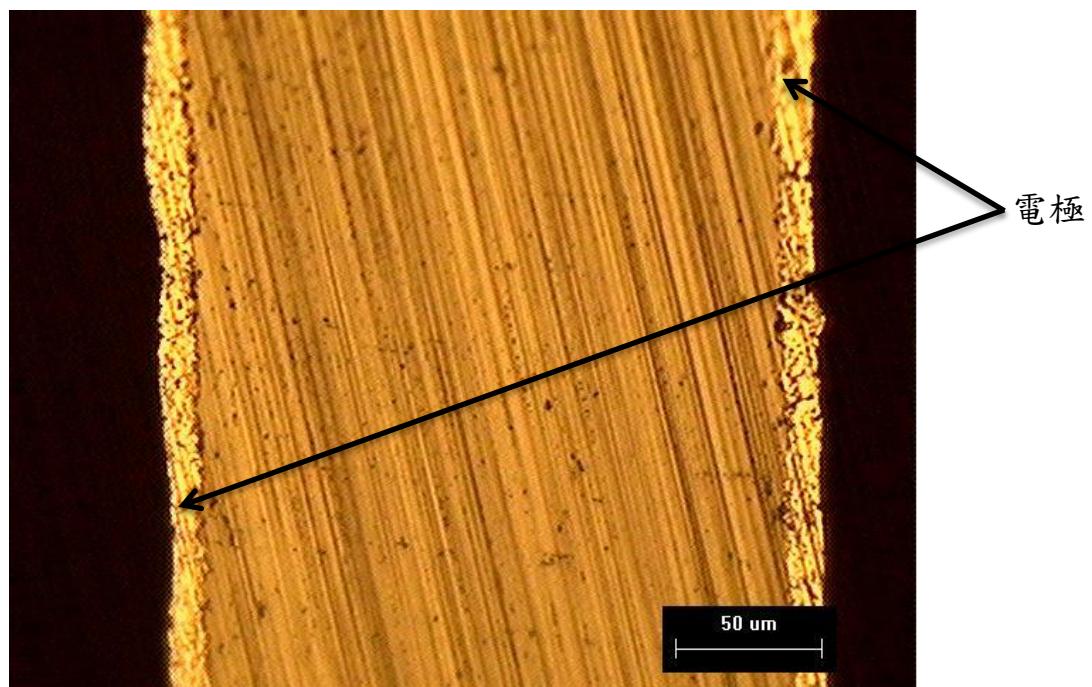


圖 3.3 多晶太陽能電池剖面的電子顯微鏡影像 2

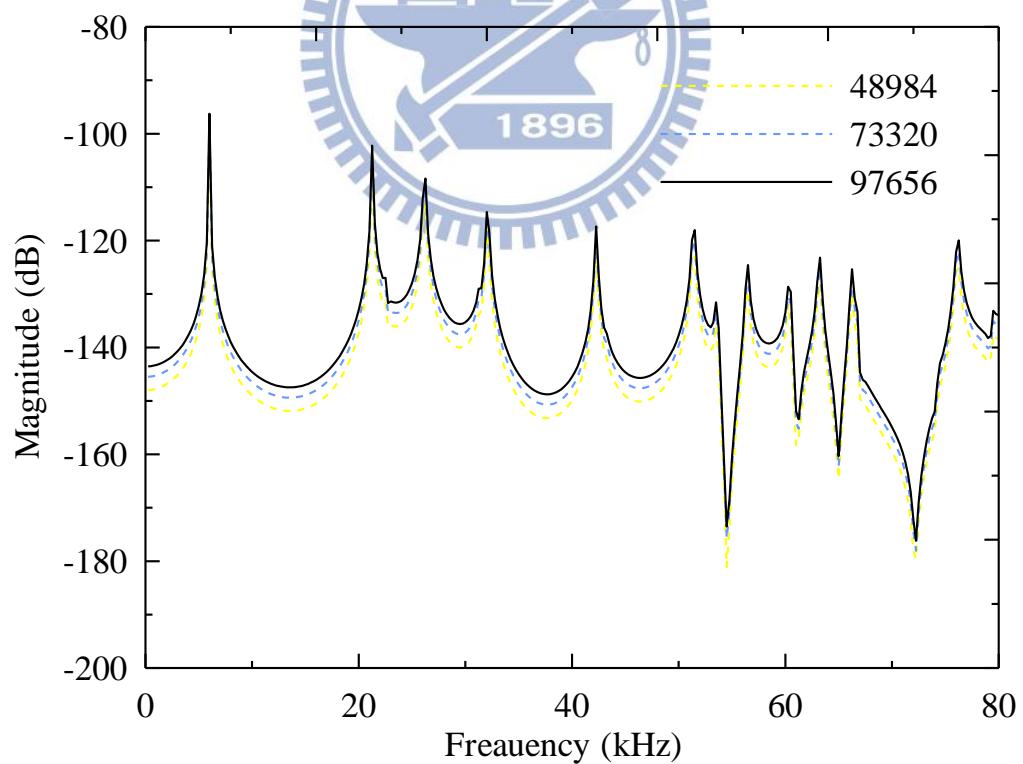
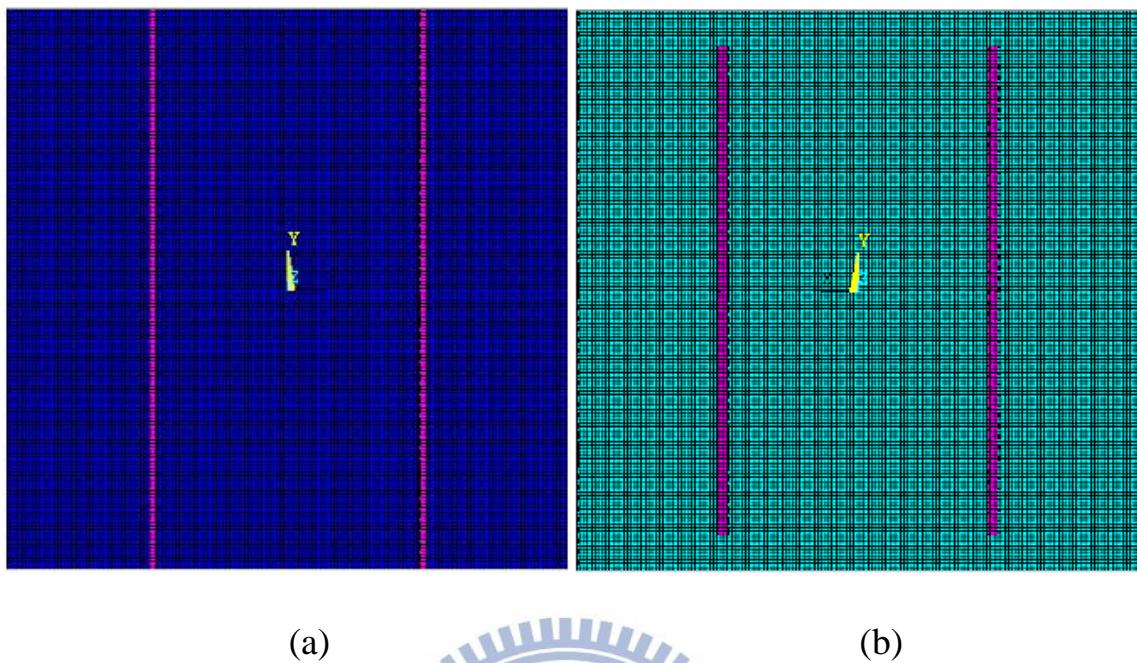


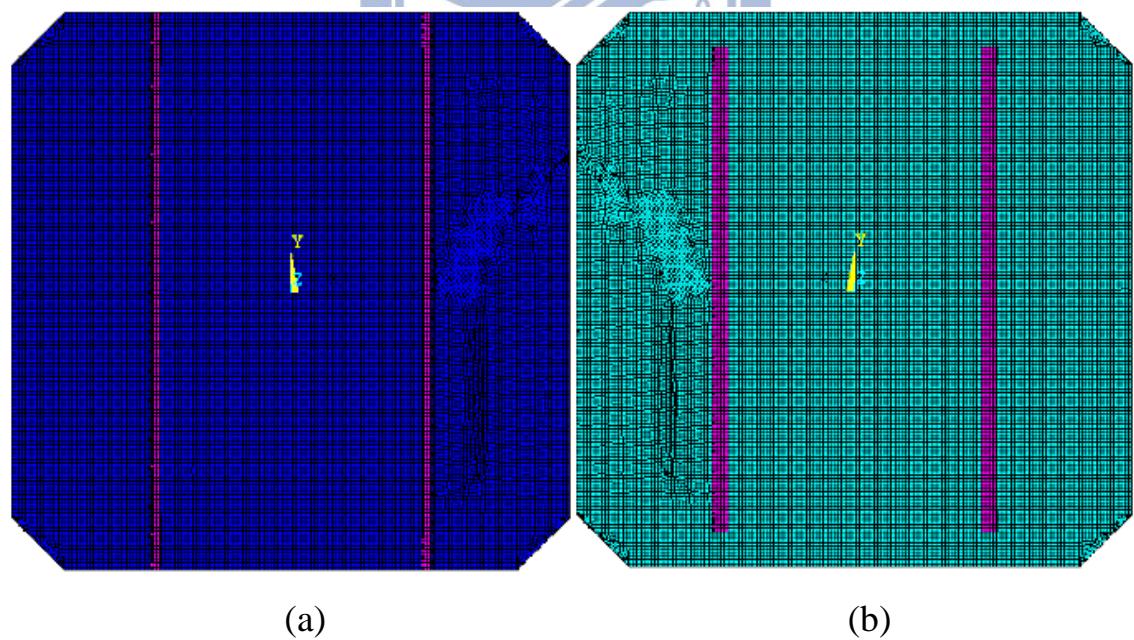
圖 3.4 不同元素數目計算多晶太陽能電池之面內振動頻率響應曲線



(a)

(b)

圖 3.5 多晶太陽能電池有限元素模型(a)正面、(b)背面



(a)

(b)

圖 3.6 單晶太陽能電池有限元素模型(a)正面、(b)背面

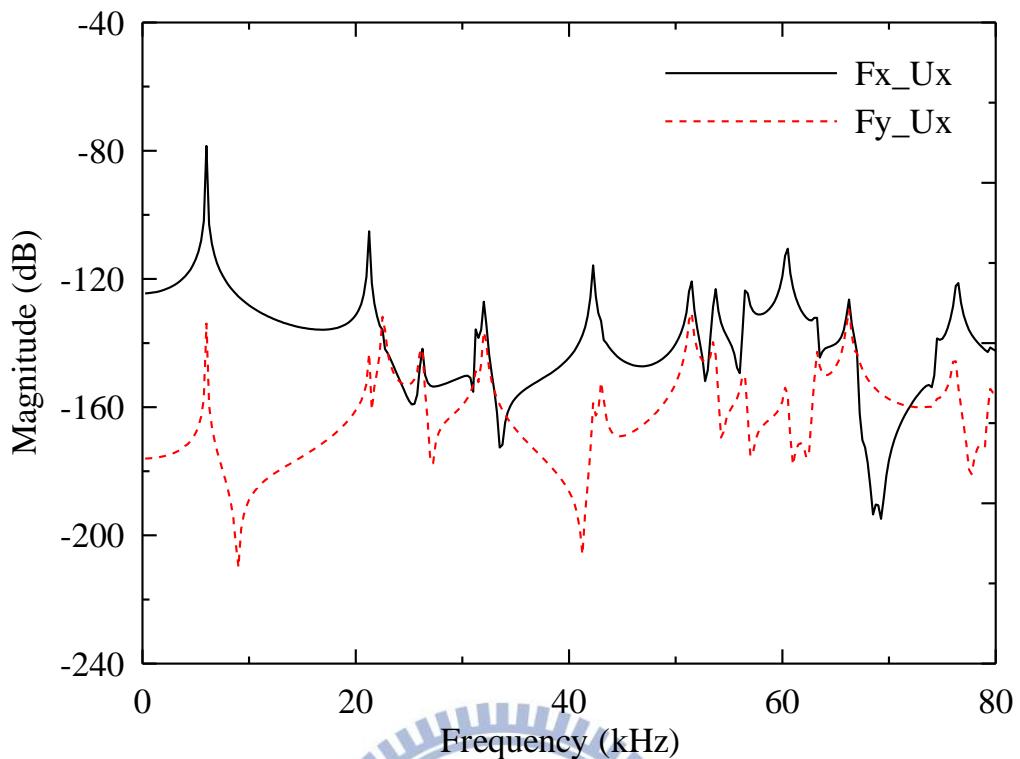


圖 3.7 垂直( $F_x$ )與平行( $F_y$ )電極激振之面內  $U_x$  的位移頻率響應計算曲線

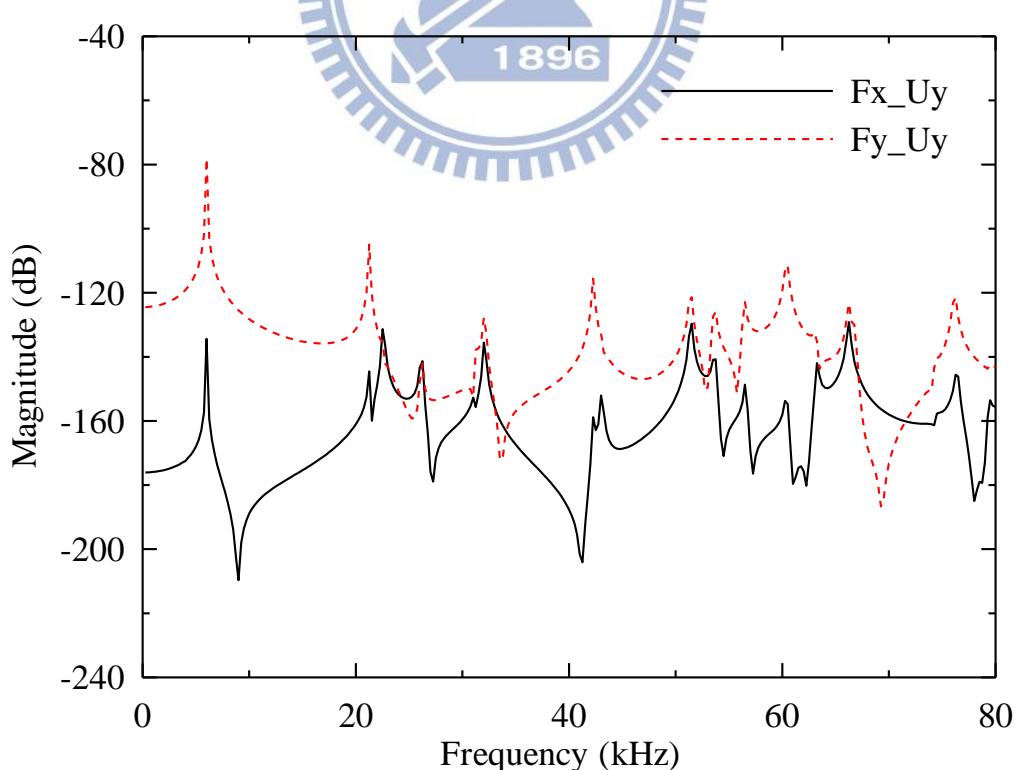


圖 3.8 垂直( $F_x$ )與平行( $F_y$ )電極激振之面內  $U_y$  的位移頻率響應計算曲線

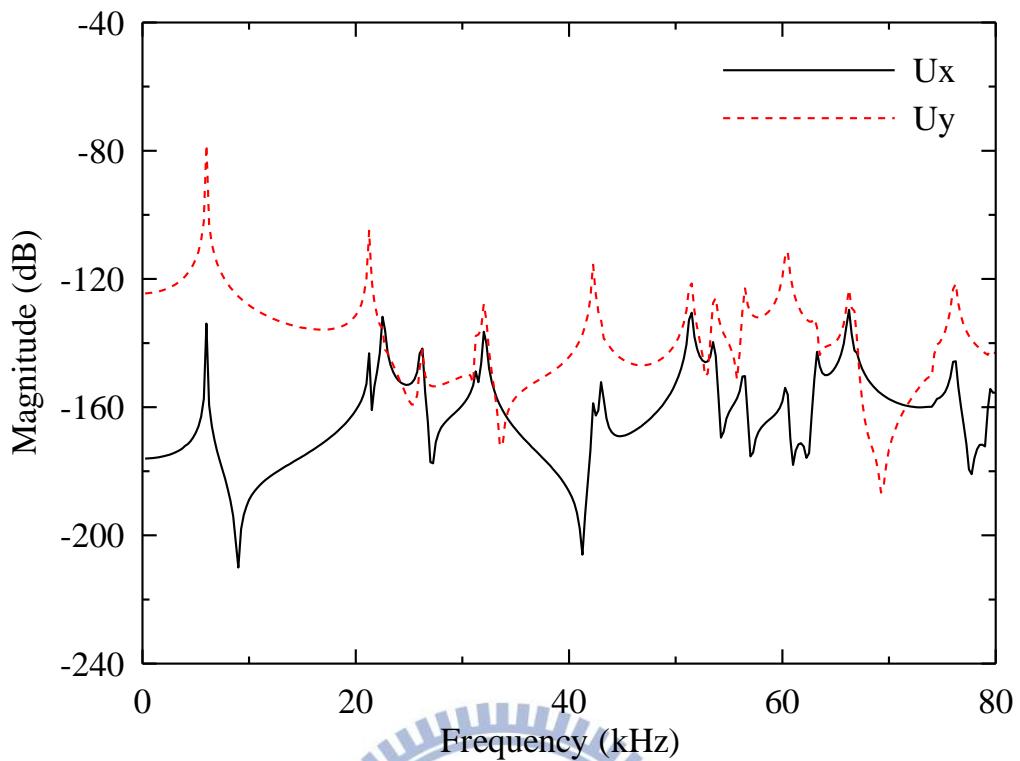


圖 3.9 多晶太陽能電池面內振動位移頻率響應計算曲線

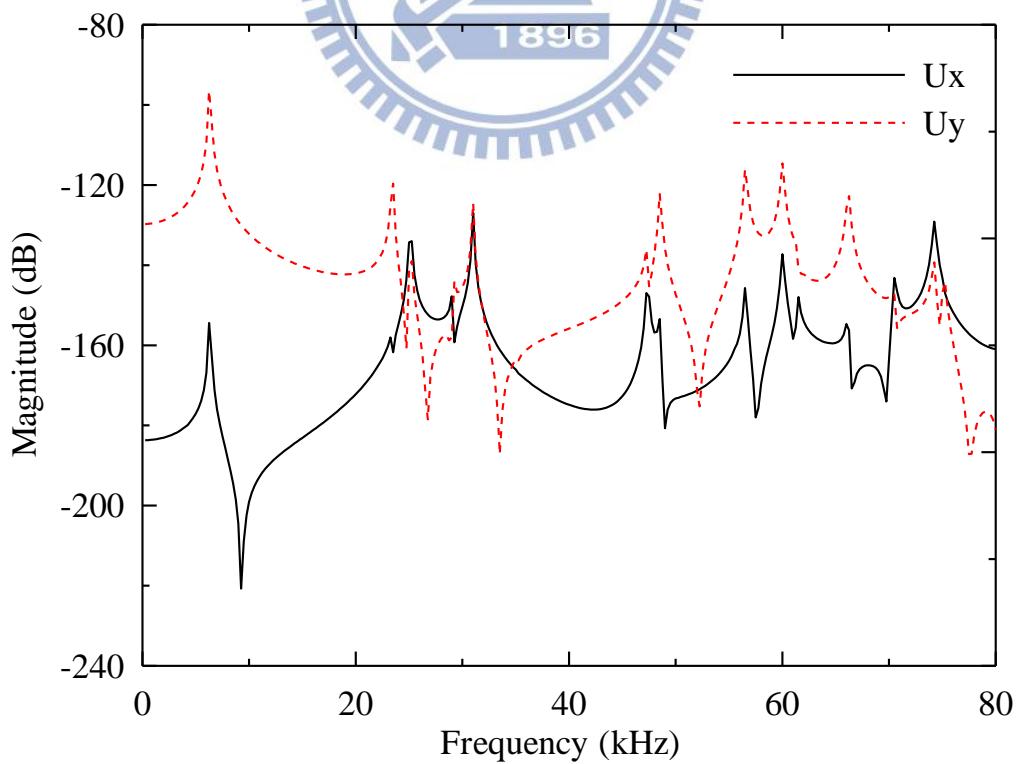


圖 3.10 單晶太陽能電池面內振動位移頻率響應計算曲線

## 第四章 實驗量測結果與討論

本研究使用自行設計研發的錐形換能器量測矽晶太陽能電池的面內共振頻率，以下介紹錐形壓電換能器的製作方式及換能器的頻率響應曲線。並配合面內電子光斑干涉術量測系統，拍攝太陽能電池的面內共振模態。探討含裂縫之太陽能電池共振頻率及共振模態的變化，評估實驗裝置的可行性。

### 4.1 面內模態共振實驗裝置

本研究的錐形壓電換能器是採用疊層壓電片(PZT-4, 寰辰科技)並聯而成，製作的方式是將三片厚度 0.7 mm 之圓形壓電陶瓷 PZT-4 與四片厚度 0.1 mm 銅片，以環氧樹脂黏合，相鄰壓電片的電位相同，壓電片與銅片交錯堆疊成並聯型壓電片。錐形換能器的鋁合金部分與疊層壓電片以 Chemtronics-CW2400 雙液型導電銀膠黏合，圖 4.1 為結構示意圖，實體照片如圖 4.2 所示。夾持錐形壓電換能器之基座如圖 4.3 所示。太陽能電池面內振動頻率響應函數的量測裝置如圖 4.4 所示，將電池放置在方形基座中央，由兩側的錐形壓電換能器夾持住試片。以 LabVIEW 程式操作 NI-4461 訊號擷取卡，應用弦波掃頻方式，將一側錐形換能器為振源激振太陽能電池，另一側的換能器感測訊號，再經前級放大器(preamplifier)將訊號增益。

#### 4.1.1 錐形壓電換能器的有效量測範圍

錐形壓電換能器的阻抗頻率響應函數的量測採用網路分析儀 HP-8751A (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)，獲得結構的共振頻

率。圖 4.5 所示為量測示意圖，將錐形壓電換能器固定在圖 4.3 的夾持基座，量測頻率範圍為 5 Hz~100 kHz，共有四個待測之錐形壓電換能器。第一個換能器的量測結果如圖 4.6 所示，在 79.3 kHz 處有一個阻抗低點，此頻率稱為共振頻率，數值分析結果為 84.375 kHz，兩者誤差為 6.3%。第二個換能器的量測結果如圖 4.7 所示，在 78.6 kHz 有一阻抗低點，與數值分析結果誤差為 7.35%。第三個換能器量測結果如圖 4.8 所示，阻抗低點在 80.8 kHz，與數值模擬誤差為 4.42%。圖 4.9 所示為第四個換能器的量測結果，阻抗低點發生在 80.5 kHz，與數值模擬誤差為 4.81%。四枚壓電換能器的平均共振頻率為 79.8 kHz，樣本標準差為 1.03 kHz。

實驗量測錐形壓電換能器的共振頻率都比數值模擬分析值低。導致誤差的原因可能是並聯疊層壓電片所使用的銅片及環氧樹脂所致。為了避免錐形壓電換能器自身的共振特性影響待測試件的頻率響應，進行太陽能電池面內振動頻率響應函數量測時，量測的頻率範圍設為 0~70 kHz。

#### 4.1.2 太陽能電池面內共振頻率量測

量測太陽能電池頻率響應曲線的實驗系統照片如圖 4.10 所示。多晶太陽能電池為正方形試片(圖 4.11)，其量測結果如圖 4.12 所示。單晶太陽能電池的四個角被截掉形成八邊形試片(圖 4.13)，其量測結果如圖 4.14 所示。圖 4.12 及 4.14 的實線代表換能器感測的電壓訊號頻率響應 dB 值，虛線為相位角，頻率響應曲線在相位角發生劇烈改變處出現峰值，此頻率即為太陽能電池的面內共振頻率。進行 ESPI 量測面內位移實驗時，將量測到太陽能電池的共振頻率，作為激振電池試片的頻率，拍攝太陽能電池的面內共振模態。

## 4.2 ESPI 量測面內位移實驗與結果

溫子達[17]曾成功地提出一有效檢測太陽能電池裂縫之方法，太陽能電池上的層材質為矽基板，下方為多孔隙鋁質材料(圖 4.15)，上下層材料的熱膨脹係數不同，加熱太陽能電池會產生面外彎曲變形。太陽能電池製程中容易產生不易察覺之缺陷，這些缺陷經過複雜的製程，會成長為裂縫缺陷。太陽能電池矽材料的破壞韌性比鋁矽共晶結構小很多，裂縫由表面往厚度方向延展通常會在共晶結構附近停止，而形成表面裂縫(圖 4.16)。表面裂縫附近的光斑干涉條紋會呈現 V 形輪廓，兩側條紋數相同；貫穿裂縫的干涉條紋則會有斷開現象，裂縫兩側的條紋數目不同。

本研究採用振動方法，以錐形壓電換能器激振太陽能電池，擷取太陽能電池的光斑干涉條紋，檢測無缺陷與含裂縫之太陽能電池，由裂縫處光斑干涉條紋的不連續特徵，可判斷太陽能電池裂縫的位置。電子光斑干涉量測面內位移的實驗架構如圖 4.17 所示，太陽能電池夾具平放於光學桌面，方便將太陽能電池相對於量測系統旋轉 90 度或改變錐形壓電換能器的夾持方向。

本研究量測面內位移的 ESPI 實驗設備如下：

1. 波長 523.1 nm 之綠光半導體雷射(Spectra-Physics Excelsior-532-50)。
2. 40X 物鏡與 25X 針孔(pin hole)組成之空間濾波器(spatial filter)。
3. 分光鏡(beam-splitter)及反射鏡(mirror)。
4. 函數產生器(Tektronix AFG3102)。
5. 功率放大器(NF HSA4051)。
6. CCD 相機(Basler A102f，1392×1040 畫素)。
7. LabVIEW 圖形化程式，與 Matlab 套裝軟體。

雷射光經分光鏡分成物光及參考光兩道光束，再分別經過反射鏡射入空間濾波器，將平行光轉為球面光，兩同光程且均勻球面光經過反射鏡，將球面光投射於平行光學桌面之太陽能電池。函數產生器輸出之單一頻率弦波經功率放大器增益後，透過錐形壓電換能器激振試片，以 CCD 相機擷取兩張不同振幅之影像，再以 Matlab 軟體進行影像處理獲得光斑干涉圖形。本實驗由 LabVIEW 程式控制實驗系統，LabVIEW 程式介面如圖 4.18 所示。

#### 4.2.1 多晶太陽能電池的量測

多晶太陽能電池的面內振動量測實驗是以夾具兩側的錐形壓電換能器夾池試片，下方以一海綿墊支撐太陽能電池，避免發生面外變形，海綿墊本身充滿許多孔隙，彈性係數小，與電池接觸時，不足以影響面內振動行為。量測無缺陷多晶太陽能電池的面內共振頻率與 ESPI 能夠清晰拍攝共振模態之激振頻率分別如表 4.1 所列，兩者有些微的差異。錐形壓電換能器夾持太陽能電池時，夾持力的鬆緊會造成共振頻率變動，夾持力越大，共振頻率會越低。當錐形壓電換能器平行柵狀匯流電極(y)方向激振，拍攝  $U_x$  及  $U_y$  位移分量的 ESPI 影像與數值模擬之自然模態等位移線比較如表 4.2-1、4.2-2 所列，模擬分析結果與 ESPI 影像相似，此時，數值模擬的邊界條件為面內位移無拘束，面外位移拘束不動。第一面內共振模態的  $U_y$  位移分量無法以 ESPI 拍到清晰影像。第二面內共振模態的  $U_x$  位移分量之干涉條紋數目明顯比  $U_y$  位移分量多。然而，平行 y 方向量測的第四面內共振模態之干涉條紋數目比 x 方向多。不論是在平行 x 方向或 y 方向清晰拍攝 ESPI 影像的激振頻率差異不大，差異最大的是第二面內共振模態，惟差距僅 0.94 kHz。

倘若將錐形壓電換能器的激振方向相對於太陽能電池旋轉 90 度，在垂直柵狀匯流電極(x)方向激振電池，進行 ESPI 面內振動位移量測實驗，表 4.3-1、4.3-2 列出與模擬分析的比較，兩者頗為相似，惟無法清晰拍攝第一面內共振模態( $U_x$  及  $U_y$ )與第二面內模態( $U_y$ )的 ESPI 影像。第三面內共振模態在平行 x 方向量測的干涉條紋比 y 方向量測的條紋數多，第四共振模態在 x 方向量測的干涉條紋數目比 y 方向條紋數目少。當錐形壓電換能器垂直柵狀匯流電極方向激振太陽能電池，ESPI 能夠清晰拍攝面內共振模態  $U_x$  及  $U_y$  位移分量的激振頻率非常接近。

#### 4.2.2 單晶太陽能電池的量測

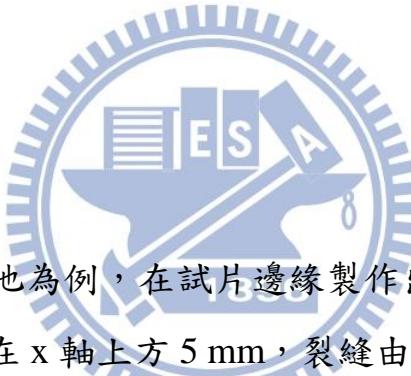
表 4.4 比較面內振動量測裝置獲得單晶太陽能電池之面內共振頻率與能夠清晰拍攝 ESPI 影像之激振頻率，兩者有些微的差異。將單晶太陽能電池放置於面內振動量測實驗裝置，使錐形壓電換能器在平行柵狀匯流電極(y)方向激振，ESPI 影像與數值模擬之自然模態等位移曲線相似，如表 4.5-1、4.5-2 所列。然而，在 x 方向量測之第二面內共振模態與在 y 方向量測之第三、第四面內共振模態都無法獲得清晰的 ESPI 影像。

將面內共振模態裝置旋轉 90 度，使錐形壓電換能器在垂直柵狀匯流電極(x)方向激振單晶太陽能電池，ESPI 影像與數值模擬結果如表 4.6-1、4.6-2 所列。只有第一面內共振模態可以被清晰地拍攝  $U_x$  及  $U_y$  位移分量的 ESPI 影像，第三面內共振模態的  $U_y$  位移分量之 ESPI 影像也可以被清楚拍攝，其餘共振模態皆無法清楚拍攝。若垂直柵狀匯流電極方向激振，所得到影像的光斑干涉條紋數較少，解析度也比較差。

## 4.3 含缺陷太陽能電池的量測

太陽能電池的裂縫種類可分成表面裂縫與貫穿裂縫，表面裂縫由矽材料表面沿厚度方向延展至矽鋁共晶結構附近停止。貫穿裂縫則是裂縫穿過共晶結構及背面的鋁材料，貫穿整個太陽能電池。本研究將自製的人工鑽石金字塔形壓頭裝放在洛克式(Rockwell)硬度測試機(hardness tester)上，在太陽能電池的邊緣壓出缺陷，隨後以鉛筆尾端的橡皮擦輕敲缺陷尖端，使缺陷慢慢延展生成裂縫，如圖 4.19、4.20 所示。含裂縫太陽能電池的有限元素模型是在電池模型上製作一斷面，將斷面上的共用結點分開，當模型靜止無外力作用時，斷面上結點重合(圖 4.21)；若受張力作用，斷面處結點即會分開(圖 4.22)。

### 4.3.1 貫穿裂縫



先以多晶太陽能電池為例，在試片邊緣製作出貫穿裂縫，參考圖 4.23 所示，裂縫的起始位置在 x 軸上方 5 mm，裂縫由邊緣起始處沿水平方向延展，長度約 34 mm。表 4.7 比較電池面內共振模態的 ESPI 影像與含裂縫電池之面內自然模態的數值結果，虛線標示區域為裂縫位置，ESPI 影像在裂縫處的光斑干涉條紋會有不連續且斷開的趨勢。由於裂縫區的結構剛性較弱，位移梯度較大，所以數值模擬結果在裂縫區的等位移線數量較多，ESPI 實驗也有相同的趨勢，數值模擬的面內自然模態等位移線與 ESPI 光斑干涉條紋的趨勢大致吻合，數值模擬的等位移線有明顯的彎曲及變形。

表 4.7-3 及 4.7-4 比較有裂縫與完整太陽能電池的 ESPI 影像。當錐形換能器在垂直柵狀匯流電極(x)方向激振，完整電池沒有清晰的 ESPI 影像可供比較，可能原因是太陽能電池受到裂縫影響，由原本的共振模態轉變為另一個共振模態。表 4.7-1、4.7-2 則比較錐形換能器在平行柵狀匯流電極(y)

方向激振含裂縫與完整太陽能電池之驅動頻率，含裂縫的電池結構剛性變弱，前者較後者為低。表 4.7-1 列出量測 x 方向位移分量的 ESPI 影像之激振頻率，有無缺陷之電池第一面內共振模態的激振頻率之間差 0.42 kHz，含裂縫太陽能電池的干涉條紋數目比完整者少。表 4.7-2 列出面內共振模態 y 方向位移分量之 ESPI 影像，有無裂縫之第一面內共振模態的激振頻率之間差 0.65 kHz，含裂縫與完整太陽能電池的光斑干涉條紋數目相同，採用表 4.7-2 的激振與支撐條件進行電池面內共振模態的位移量測，所獲得的 ESPI 影像最能清晰判斷裂縫的位置。

單晶太陽能電池的晶格排列主要為[111]或[100]，裂縫會呈現 45 度的走勢。在單晶太陽能電池上製作一條長度約 49.5 mm 的貫穿裂縫(圖 4.24)，表 4.8 比較含裂縫電池面內共振模態的 ESPI 影像與面內自然模態的數值結果。虛線標示區為裂縫的位置，在裂縫處兩側的光斑干涉條紋會有斷開的特徵，數值模擬結果與 ESPI 影像相似，圖形偏轉趨勢也相同。含裂縫單晶太陽能電池的面內共振模態偏轉明顯，原因是裂縫為 45 度的走勢，容易破壞太陽能電池結構的對稱性。

表 4.8-1 比較完整與含貫穿裂縫之單晶太陽能電池面內共振模態的 ESPI 影像，其中，錐形換能器在平行柵狀匯流電極(y)方向激振電池，以 ESPI 量測面內共振模態的 x 方向位移分量，能夠清晰拍攝缺陷電池第一面內共振模態的激振頻率與完整電池者差 0.8 kHz，第二面內模態的激振頻率差 1.02 kHz。有缺陷電池的 ESPI 影像都有偏轉的情況，光斑干涉條紋數目也比完整太陽能電池少。表 4.8-2 比較清晰拍攝各面內共振模態  $U_y$  位移分量之 ESPI 影像及激振頻率，有無缺陷電池之第一面內共振模態的激振頻率差 0.28 kHz，第二面內共振模態之激振頻率差 0.8 kHz，第二面內共振模態的 ESPI 影像可清楚判斷出裂縫的位置。含貫穿裂縫與完整太陽能電池的光斑干涉條紋數目相同，且斷開特徵明顯，易於判斷裂縫所在的位置。表 4.8-3

列出錐形換能器在垂直柵狀匯流電極(x)方向激振，以 ESPI 量測面內共振模態的 x 方向位移分量，有無裂縫之太陽能電池在第一面內共振模態的激振頻率之間差 0.24 kHz，光斑干涉條紋數目相同，ESPI 影像有偏轉現象。表 4.8-4 列出 ESPI 量測面內共振模態的 y 方向位移分量，有無貫穿裂縫電池之第一面內共振模態的激振頻率差 1.57 kHz，完整與含貫穿裂縫之太陽能電池的光斑干涉條紋清晰度都較差。

參考表 4.7-2、4.7-3、4.8-2 與 4.8-3 所列，當換能器的激振與量測方向相同，含裂縫太陽能電池的 ESPI 影像清晰度較好，光斑干涉條紋數目與完整太陽能電池大致相同，單晶太陽能電池尤其顯著。此實驗結果與 3.4.2 節的太陽能電池時諧分析結論一致，若激振力與量測方向相同，頻率響應曲線的振幅 dB 值會較高。



### 4.3.2 表面裂縫

太陽能電池的表面裂縫製作方式與貫穿裂縫相同，在電池邊緣壓出缺陷，使用鉛筆尾端橡皮擦輕敲缺陷尖端，裂縫很容易由缺陷處向厚度方向延展，貫穿矽材至矽鋁共晶結構附近停止。先以多晶太陽能電池為試片，製作長度約 40.4 mm 之表面裂縫(圖 4.25)。表 4.9 比較含表面裂縫之電池面內共振模態的 ESPI 影像與有限元素分析的自然模態數值結果，虛線標示區域為表面裂縫的位置，表面裂縫無法使面內位移的光斑干涉條紋產生不連續之特徵，也無法使共振模態的 ESPI 影像產生偏移，故 ESPI 面內位移量測實驗無法有效判斷出裂縫的位置。

表 4.9-1 比較完整與含表面裂縫之多晶太陽能電池的 ESPI 影像，當錐形換能器在平行柵狀匯流電極(y)方向激振，以 ESPI 量測面內共振模態的 x 方向位移分量，能夠清晰拍攝含表面裂縫電池面內共振模態的激振頻率低

於完整電池者，第一面內模態的激振頻率差  $0.45\text{ kHz}$ ，第二模態的激振頻率差  $0.71\text{ kHz}$ ，第三模態的激振頻率差  $0.49\text{ kHz}$ 。含裂縫電池的光斑干涉條紋數目比完整太陽能電池少，除了第二面內模態，兩者 ESPI 影像的趨勢相同。表面裂縫附近的光斑干涉條紋清晰度較差，例如： $42.8\text{ kHz}$  激發的第一面內共振模態，右邊裂縫區之干涉條紋明顯比左邊模糊，第二、第三共振模態也有相同現象。表 4.9-2 列出換能器在平行柵狀匯流電極(y)方向激振，以 ESPI 量測面內共振模態的 y 方向位移分量，有無裂縫之電池第一共振模態的激振頻率相差  $0.65\text{ kHz}$ ，惟 ESPI 影像趨勢相同。製造表面裂縫時，在邊緣壓出的缺陷貫穿整個太陽能電池，裂縫起始處的光斑干涉條紋呈現貫穿裂縫的斷開特徵，無法以面內共振模態的光斑干涉條紋之不連續特徵判斷表面裂縫位置。



#### 4.4 實驗結果與討論

量測錐形壓電換能器之阻抗頻率響應函數的結果顯示，四個換能器的一致性比預期的要好，足以量測太陽能電池面內共振頻率。量測獲得之共振頻率與清晰拍攝 ESPI 位移共振模態的激振頻率有些微差異，可能的原因是太陽能電池厚度方向的非對稱性造成面內共振模態耦合了面外位移。

含裂縫太陽能電池之面內共振模態的位移量測結果顯示，若缺陷為貫穿裂縫，能夠清楚拍攝面內共振模態之 ESPI 影像的激振頻率有下降的趨勢，在裂縫處的光斑干涉條紋會有斷開的特徵。含貫穿裂縫之電池面內共振模態的 ESPI 影像與時諧分析的數值結果一致，當激振方向與量測方向相同，電池頻率響應曲線的振幅 dB 值較高，ESPI 影像也較清晰。含表面裂縫多晶太陽能電池面內共振模態的 ESPI 量測實驗之激振頻率有下降的趨勢，裂縫處的光斑干涉條紋清晰度較差，裂縫附近沒有不連續的特徵。根

據 ESPI 光斑干涉條紋在貫穿裂縫附近的斷開特徵，可以檢測出裂縫之位置，然而，卻無法偵測出表面裂縫，只能以激振頻率的下降，判斷太陽能電池是否有表面裂縫存在。

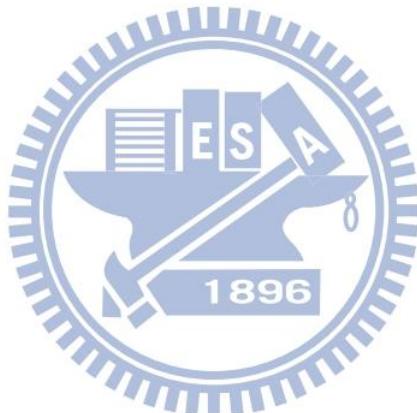


表 4.1 多晶太陽能電池 ESPI 激振頻率與面內共振頻率比較

Mode	(a) ESPI Driving Frequency (kHz)	(b) Measured Frequency (kHz)	Deviation=
1	43.25	43.534	0.6
2	46.59	46.24	0.75
3	57.23	57.21	0.03
4	68.22	68.79	0.84

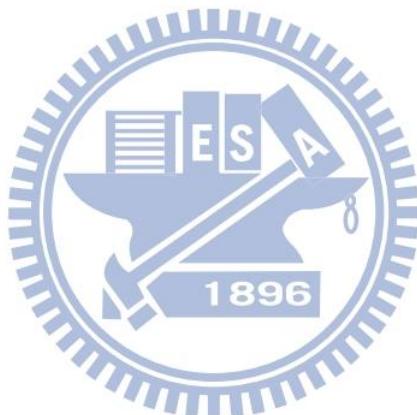


表 4.2-1 多晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(y 方向激振)結果比較(I)

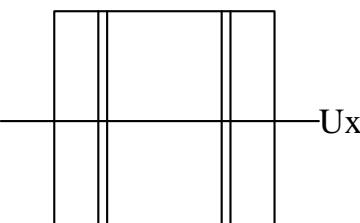
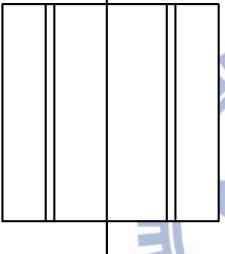
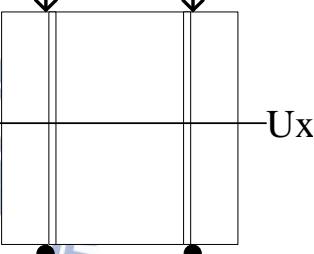
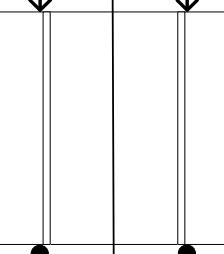
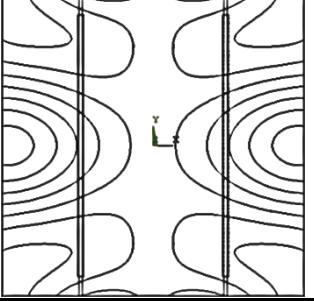
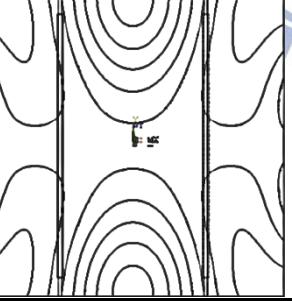
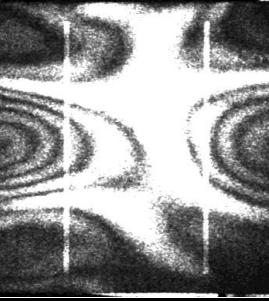
多晶太陽能電池			
數值模擬	ESPI 實驗		
檢測 x 方向	檢測 y 方向	一側時諧外力、一側 $Uy = 0$ ， 檢測 x 方向	一側時諧外力、一側 $Uy = 0$ ， 檢測 y 方向
			
43.042 kHz	43.042 kHz	43.25 kHz	拍攝不到結果
			

表 4.2-2 多晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(y 方向激振)結果比較(II)

數值模擬	數值模擬	數值模擬	數值模擬
43.776 kHz	43.776 kHz	46.59 kHz	46.53 kHz
59.276 kHz	59.276 kHz	57.23 kHz	57.18 kHz
65.683 kHz	65.683 kHz	68.22 kHz	68.26 kHz

表 4.3-1 多晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(x 方向激振)結果比較(I)

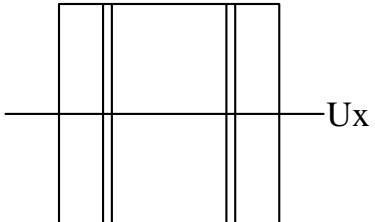
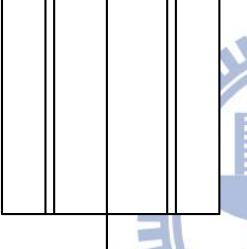
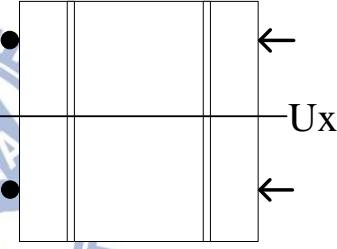
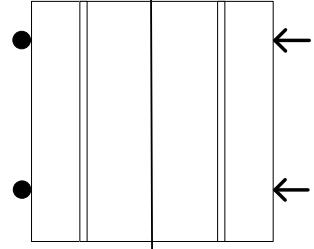
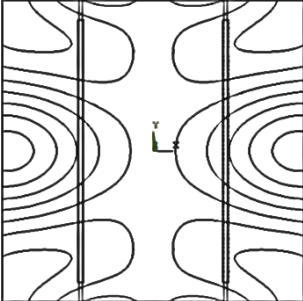
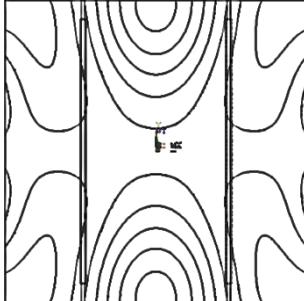
多晶太陽能電池			
數值模擬		ESPI 實驗	
檢測 x 方向	檢測 y 方向	一側時諧外力、一側 $U_x = 0$ ， 檢測 x 方向	一側時諧外力、一側 $U_x = 0$ ， 檢測 y 方向
			
43.042 kHz	43.042 kHz	拍攝不到結果	
		拍攝不到結果	

表 4.3-2 多晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(x 方向激振)結果比較(II)

數值模擬	43.776 kHz	43.776 kHz	46.02 kHz	ESPI 實驗
				拍攝不到結果
	43.776 kHz	43.776 kHz	46.02 kHz	
				57.2 kHz
	59.276 kHz	59.276 kHz	57.21 kHz	
				68.48 kHz
	65.683 kHz	65.683 kHz	68.48 kHz	
				68.42 kHz
	68.42 kHz			

表 4.4 單晶太陽能電池 ESPI 激振頻率與面內共振頻率比較

Mode	(a) ESPI Driving Frequency (kHz)	(b) Measured Frequency (kHz)	Deviation= $\left  \frac{(a)-(b)}{(a)} \right  \times 100\%$
1	20.45	20.461	0.05
2	32.1	32	0.3
3	47.22	48.236	2.1

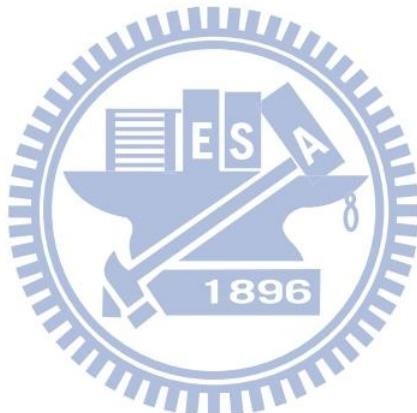


表 4.5-1 單晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(y 方向激振)結果比較(I)

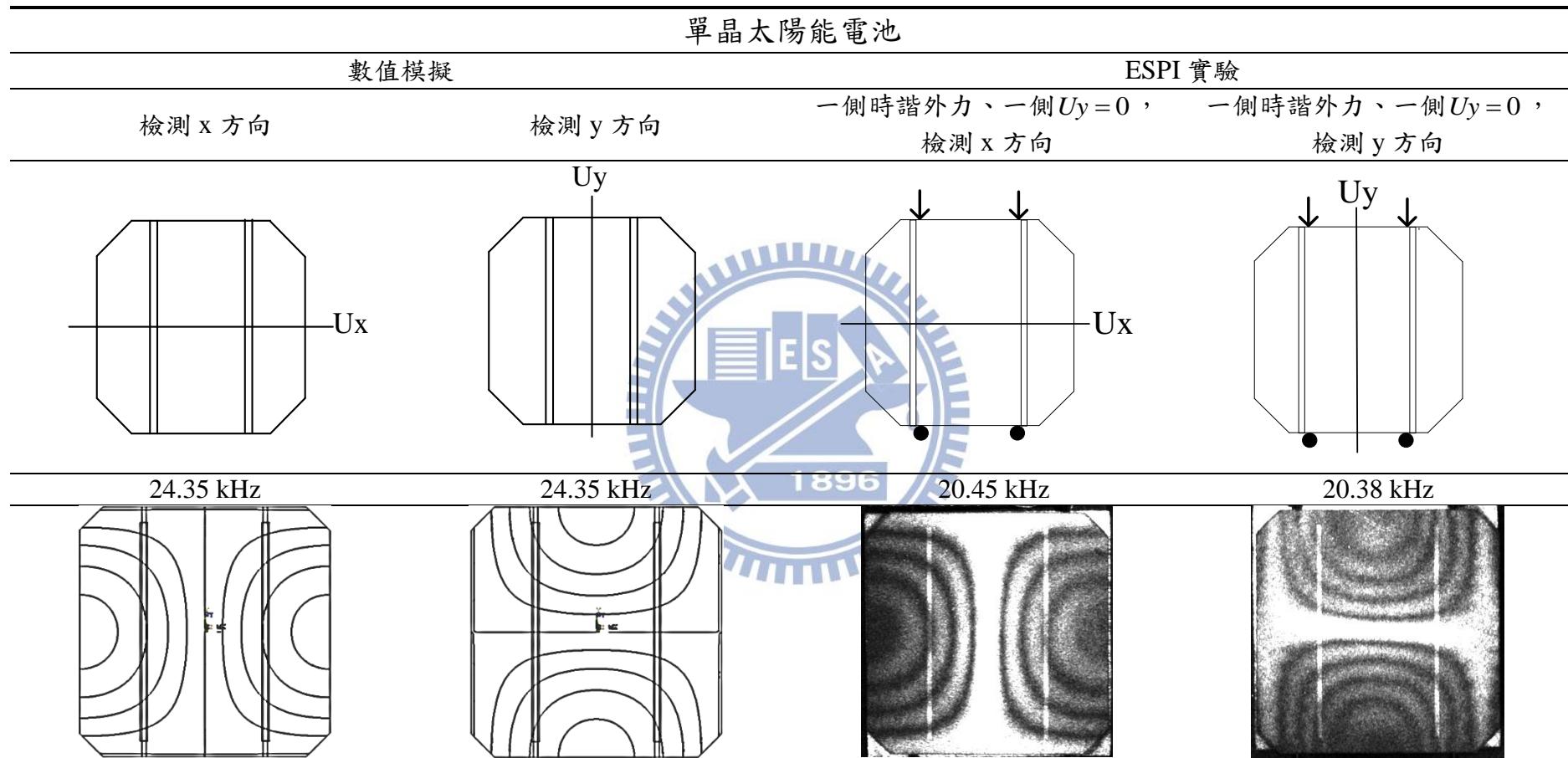


表 4.5-2 單晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(y 方向激振)結果比較(II)

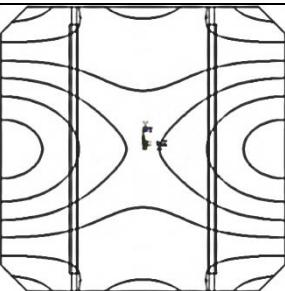
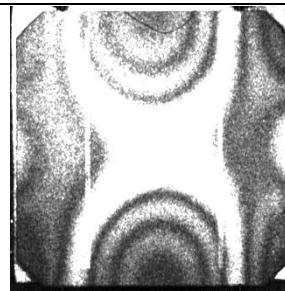
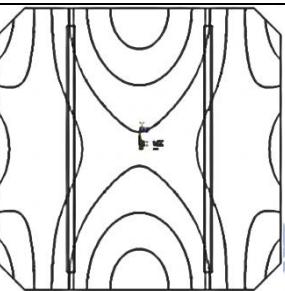
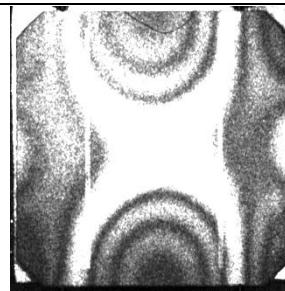
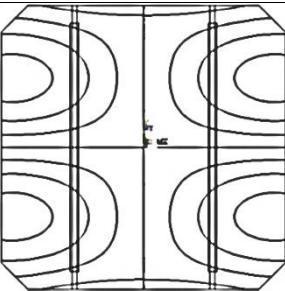
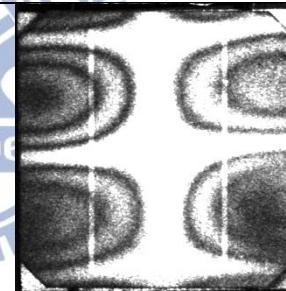
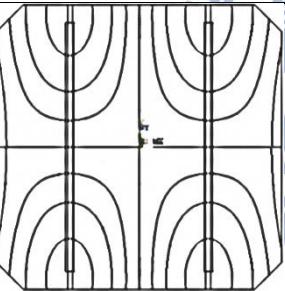
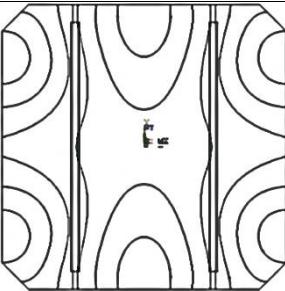
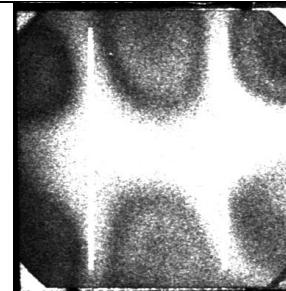
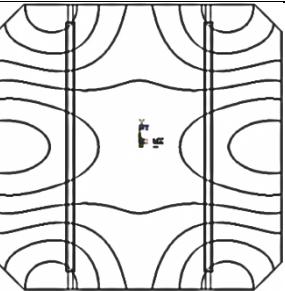
數值模擬	ESPI 實驗
34.994 kHz	32.1 kHz 拍攝不到結果
	
35.165 kHz	32.1 kHz 拍攝不到結果
	
35.165 kHz	32.1 kHz 拍攝不到結果
	
34.994 kHz	32.1 kHz 拍攝不到結果
	
55.689 kHz	47.22 kHz 拍攝不到結果
	
55.345 kHz	
	

表 4.6-1 單晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(x 方向激振)結果比較(I)

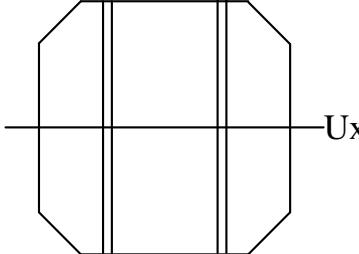
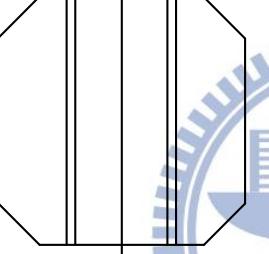
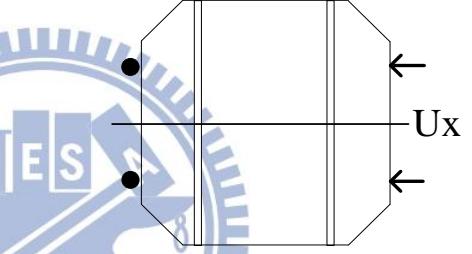
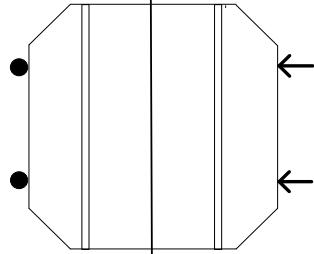
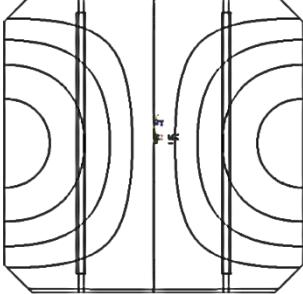
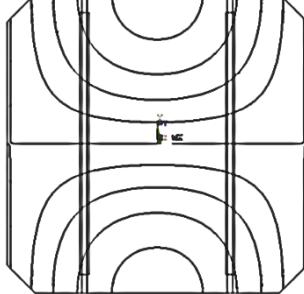
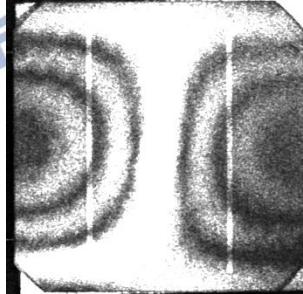
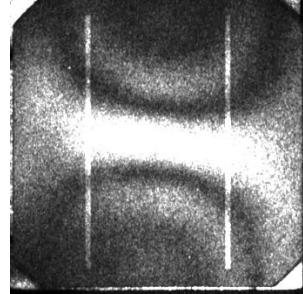
單晶太陽能電池			
數值模擬	ESPI 實驗		
檢測 x 方向	檢測 y 方向	一側時諧外力、一側 $U_x = 0$ ， 檢測 x 方向	一側時諧外力、一側 $U_x = 0$ ， 檢測 y 方向
			
24.35 kHz	24.35 kHz	20.37 kHz	20.2 kHz
			

表 4.6-2 單晶太陽能電池數值模擬與 ESPI 實驗(x 方向激振)結果比較(II)

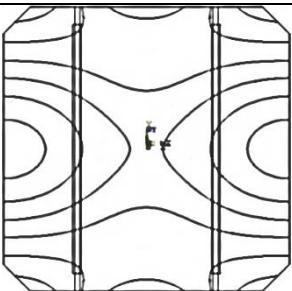
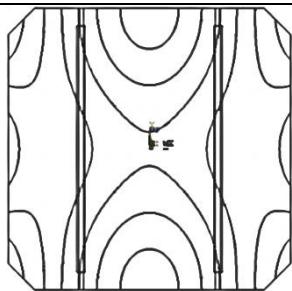
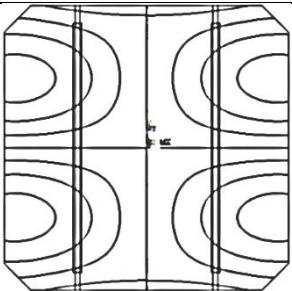
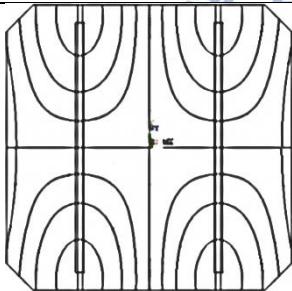
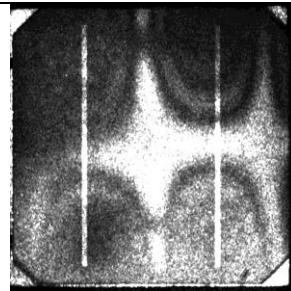
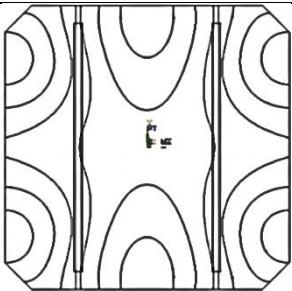
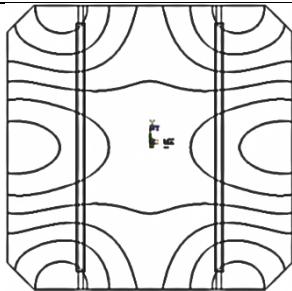
數值模擬		ESPI 實驗	
34.994 kHz	35.165 kHz	拍攝不到結果	拍攝不到結果
			
35.165 kHz	34.994 kHz	拍攝不到結果	31.92 kHz
			
55.689 kHz	55.345 kHz	拍攝不到結果	拍攝不到結果
			

表 4.7-1 貫穿裂縫之多晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(I)

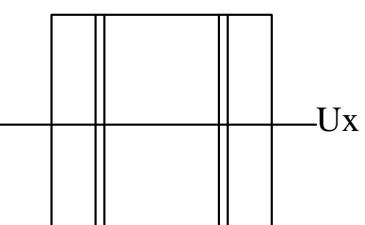
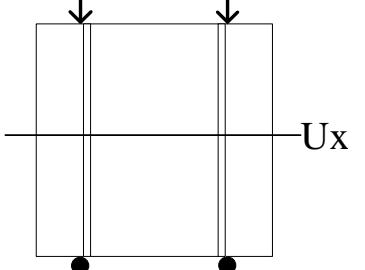
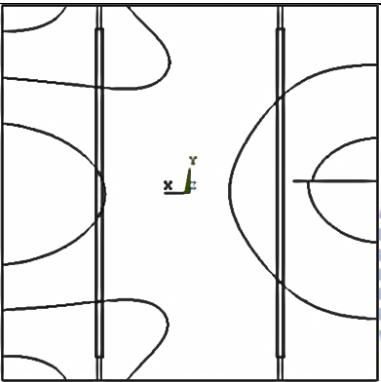
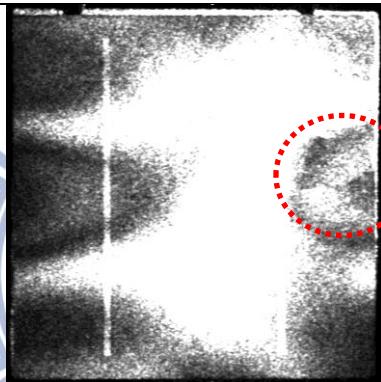
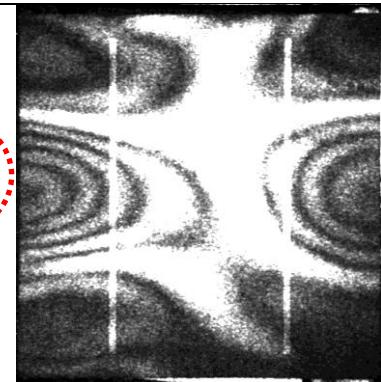
貫穿裂縫之多晶太陽能電池		
數值模擬	ESPI 實驗	
檢測 x 方向	一側時諧外力、一側 $Uy = 0$ ， 檢測 x 方向	
		
31.186 kHz	42.83 kHz (貫穿)	43.25 kHz (完整)
		

表 4.7-2 貫穿裂縫之多晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(II)

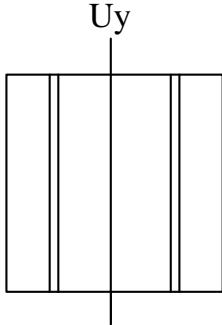
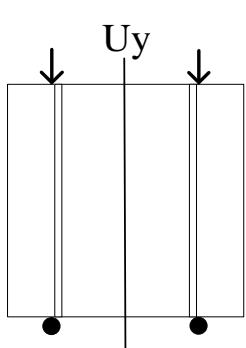
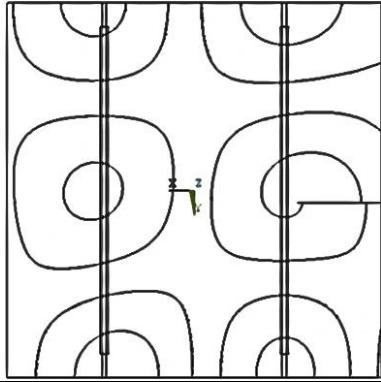
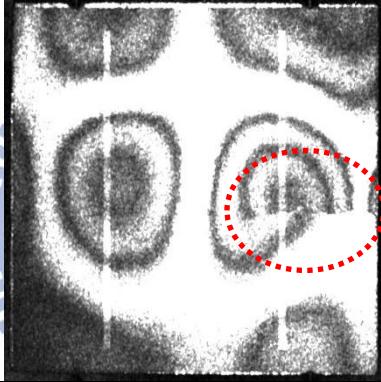
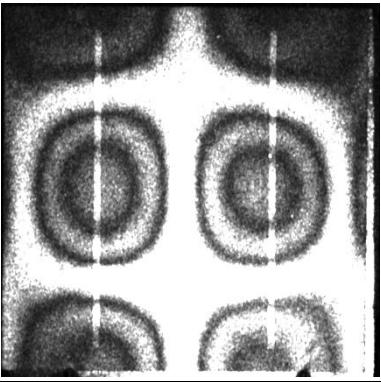
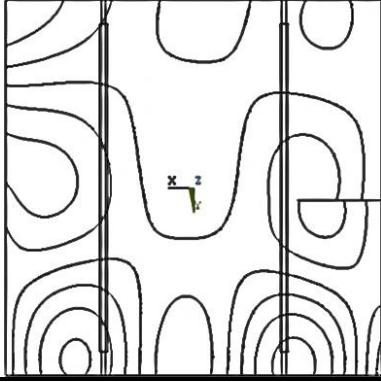
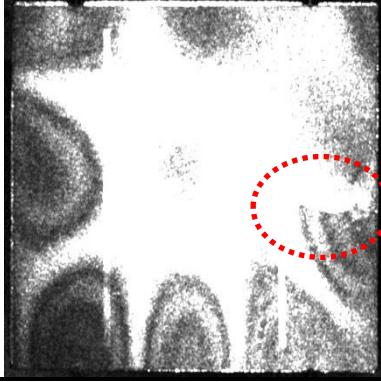
貫穿裂縫之多晶太陽能電池		
數值模擬	ESPI 實驗	
檢測 y 方向	一側時諧外力、一側 $Uy = 0$ ， 檢測 y 方向	
		
43.706 kHz	45.88 kHz (貫穿)	46.53 kHz (完整)
		
52.684 kHz	56.35 kHz (貫穿)	無對應之實驗
		

表 4.7-3 貫穿裂縫之多晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(III)

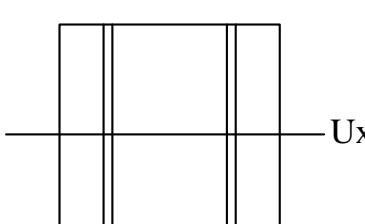
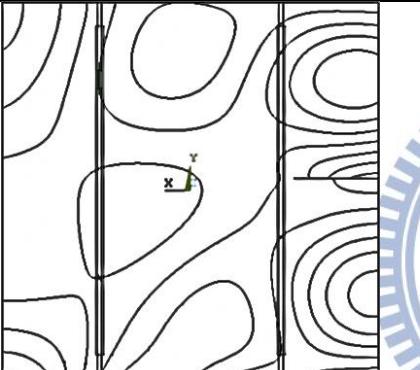
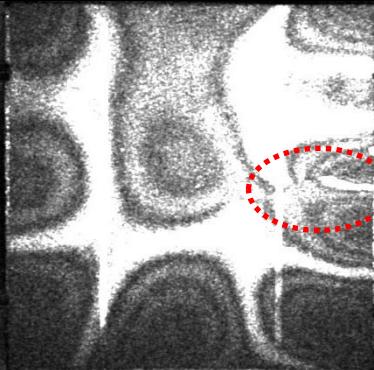
貫穿裂縫之多晶太陽能電池		
數值模擬	ESPI 實驗	
檢測 x 方向	一側時諧外力、一側 $U_x = 0$ ， 檢測 x 方向	
		
51.175 kHz	57.62 kHz (貫穿)	無對應之實驗
		

表 4.7-4 貫穿裂縫之多晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(IV)

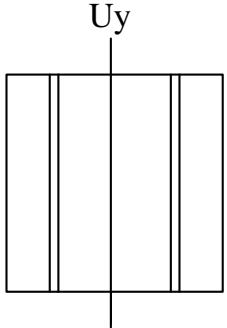
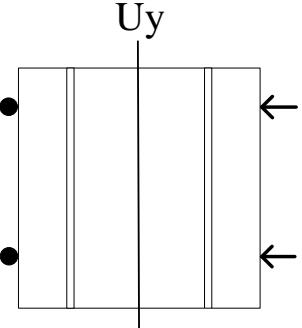
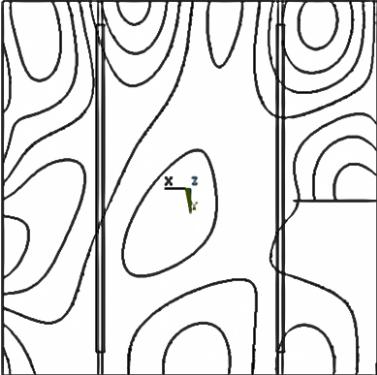
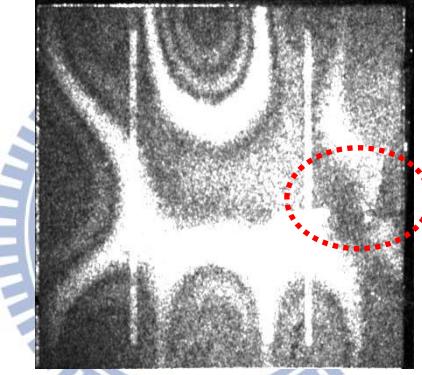
貫穿裂縫之多晶太陽能電池	
數值模擬	ESPI 實驗
檢測 y 方向	一側時諧外力、一側 $Ux = 0$ ， 檢測 y 方向
 58.996 kHz	 55.77 kHz (貫穿)
	無對應之實驗
	

表 4.8-1 貫穿裂縫之單晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(I)

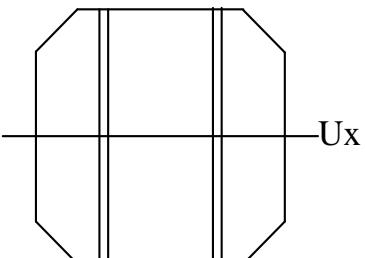
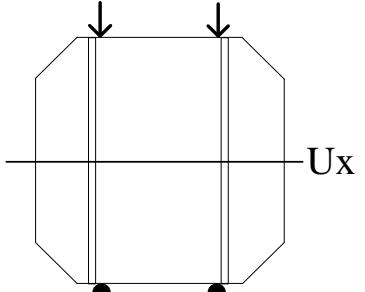
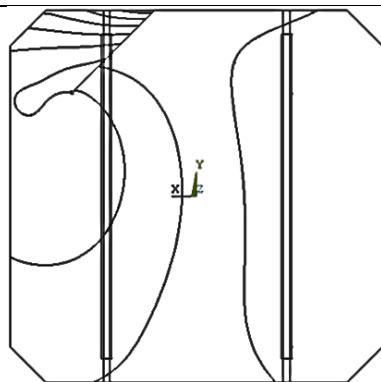
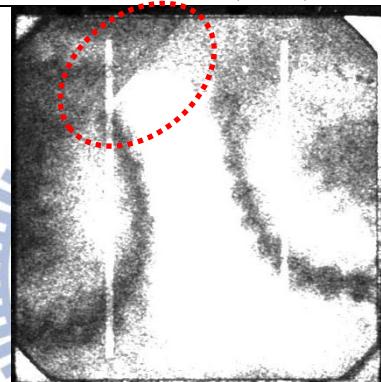
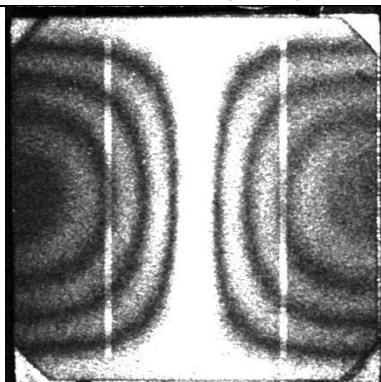
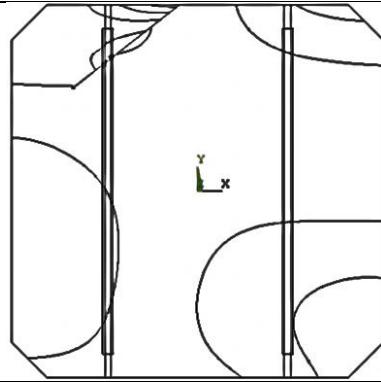
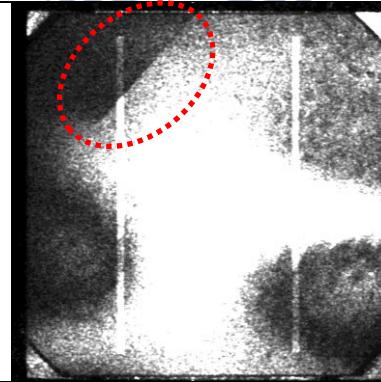
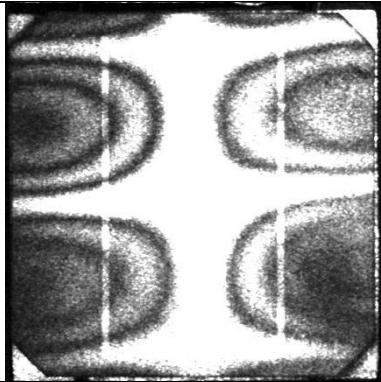
貫穿裂縫之單晶太陽能電池		
數值模擬	ESPI 實驗	
檢測 x 方向	一側時諧外力、一側 $Uy = 0$ ， 檢測 x 方向	
		
30.042 kHz	19.65 kHz (貫穿)	20.45 kHz (完整)
		
33.518 kHz	31.08 kHz (貫穿)	32.1 kHz (完整)
		

表 4.8-2 貫穿裂縫之單晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(II)

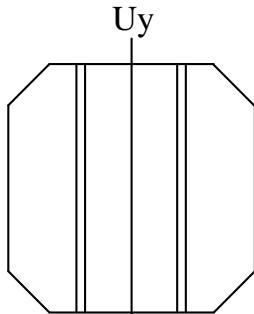
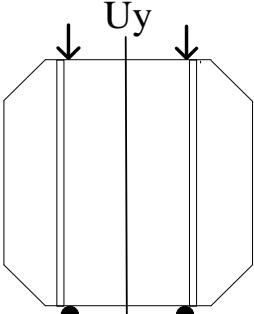
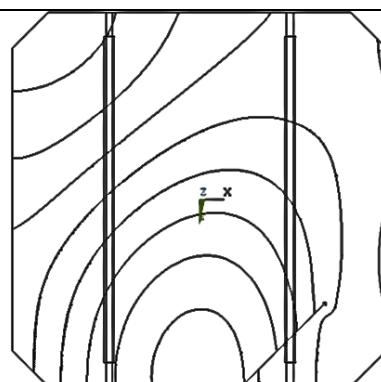
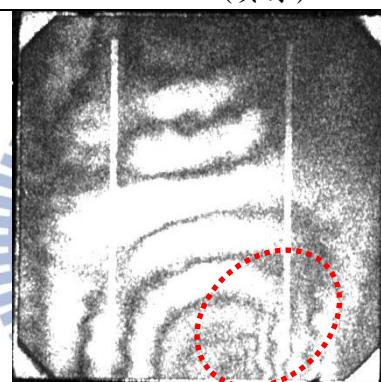
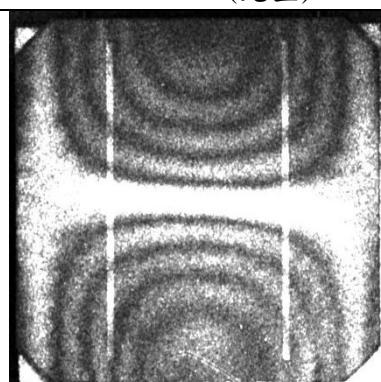
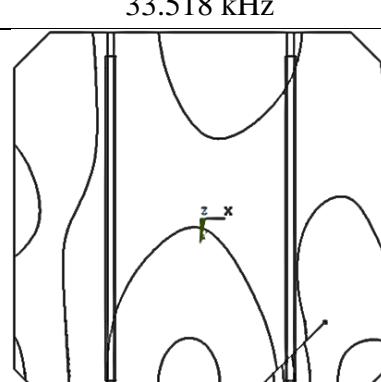
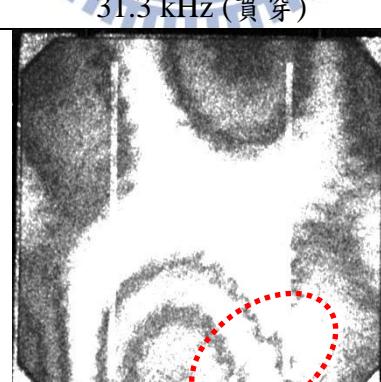
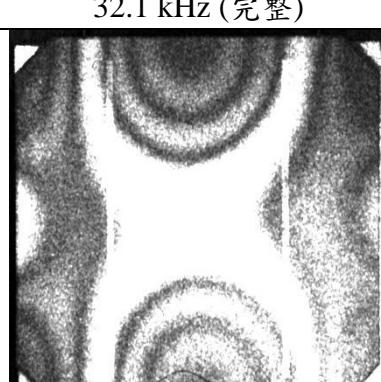
貫穿裂縫之單晶太陽能電池		
數值模擬	ESPI 實驗	
檢測 y 方向	一側時諧外力、一側 $Uy = 0$ ， 檢測 y 方向	
		
24.573 kHz	20.1 kHz (貫穿)	20.38 kHz (完整)
		
33.518 kHz	31.3 kHz (貫穿)	32.1 kHz (完整)
		

表 4.8-3 貫穿裂縫之單晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(III)

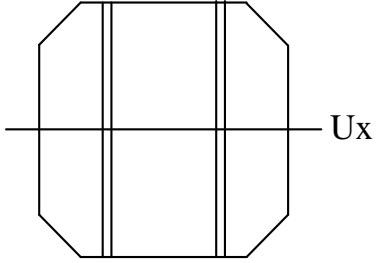
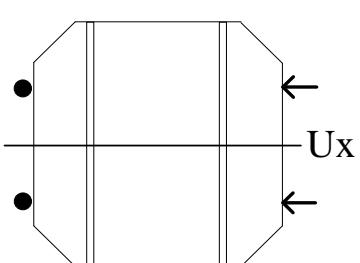
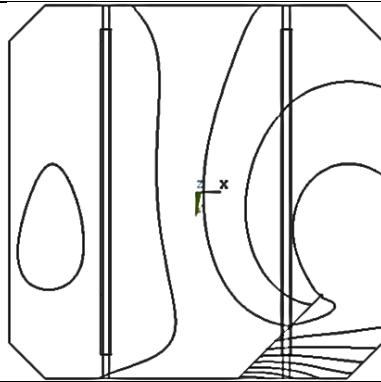
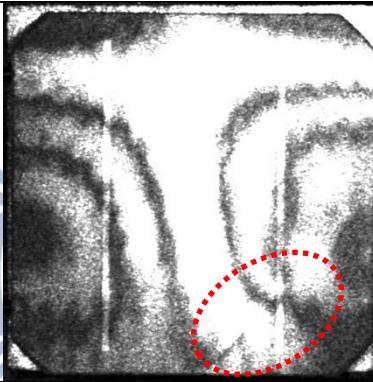
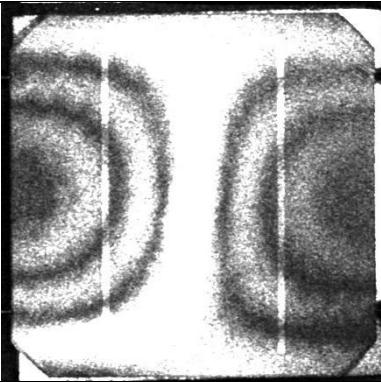
貫穿裂縫之單晶太陽能電池		
數值模擬	ESPI 實驗	
檢測 x 方向	一側時諧外力、一側 $U_x = 0$ ， 檢測 x 方向	
		
30.042 kHz	20.13 kHz (貫穿)	20.37 kHz (完整)
		

表 4.8-4 貫穿裂縫之單晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(IV)

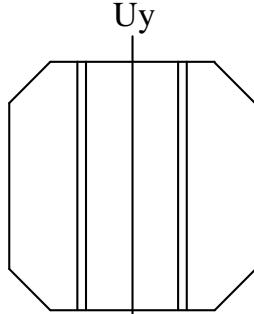
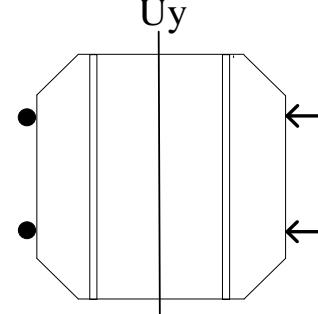
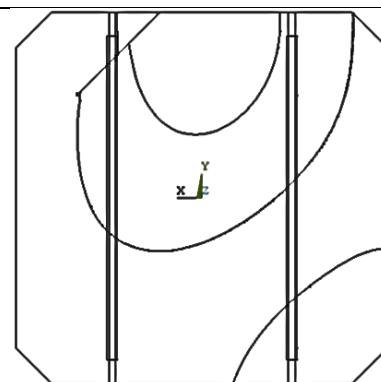
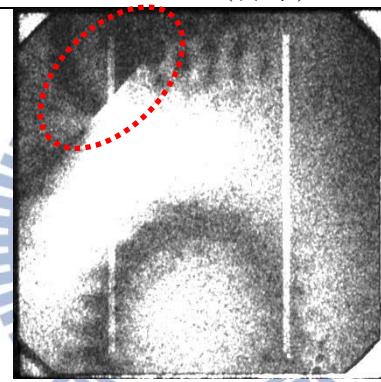
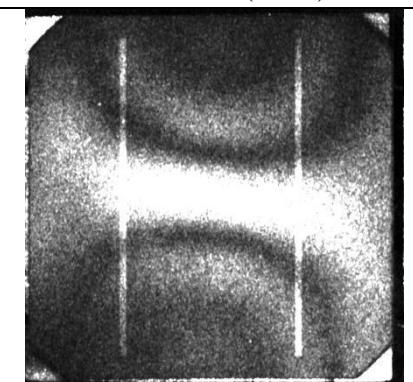
貫穿裂縫之單晶太陽能電池		
數值模擬	ESPI 實驗	
檢測 y 方向	一側時諧外力、一側 $U_x = 0$ ， 檢測 y 方向	
		
24.573 kHz	18.8 kHz (貫穿)	20.37 kHz (完整)
		

表 4.9-1 表面裂縫之多晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(I)

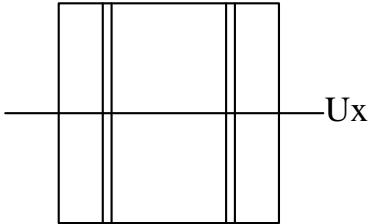
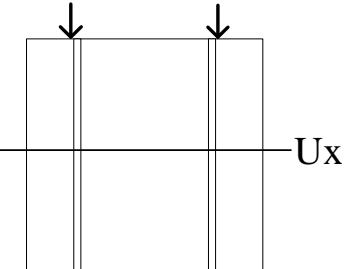
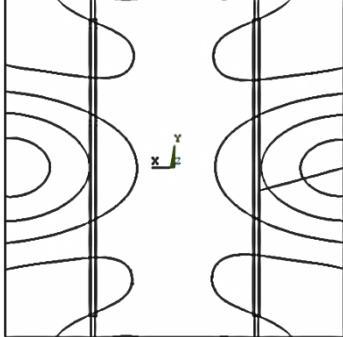
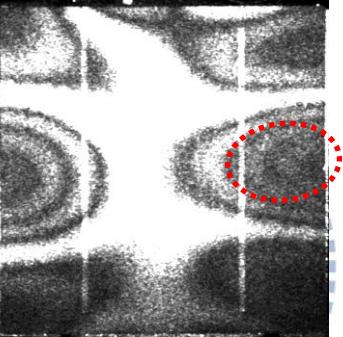
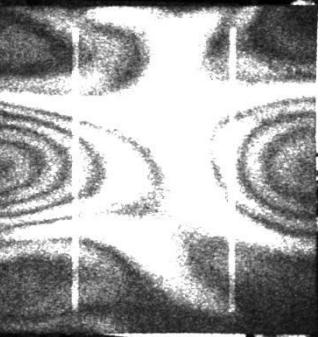
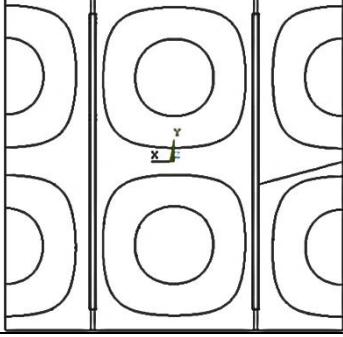
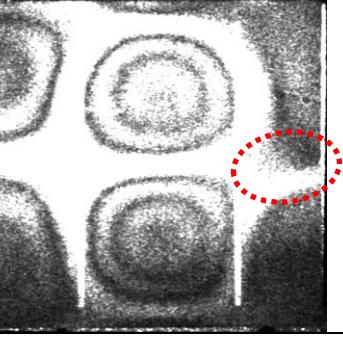
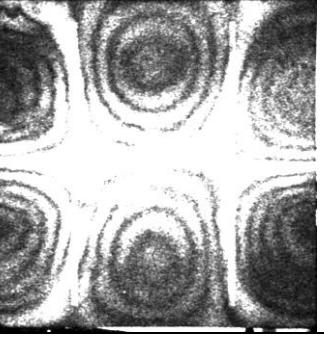
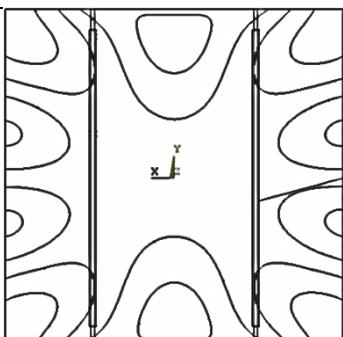
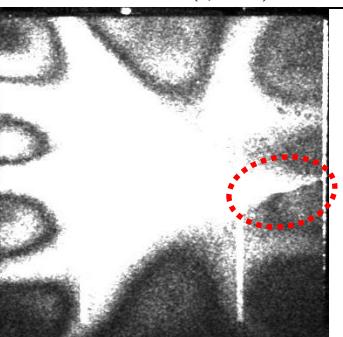
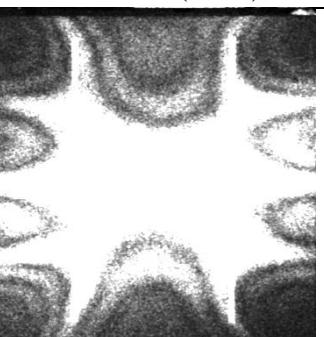
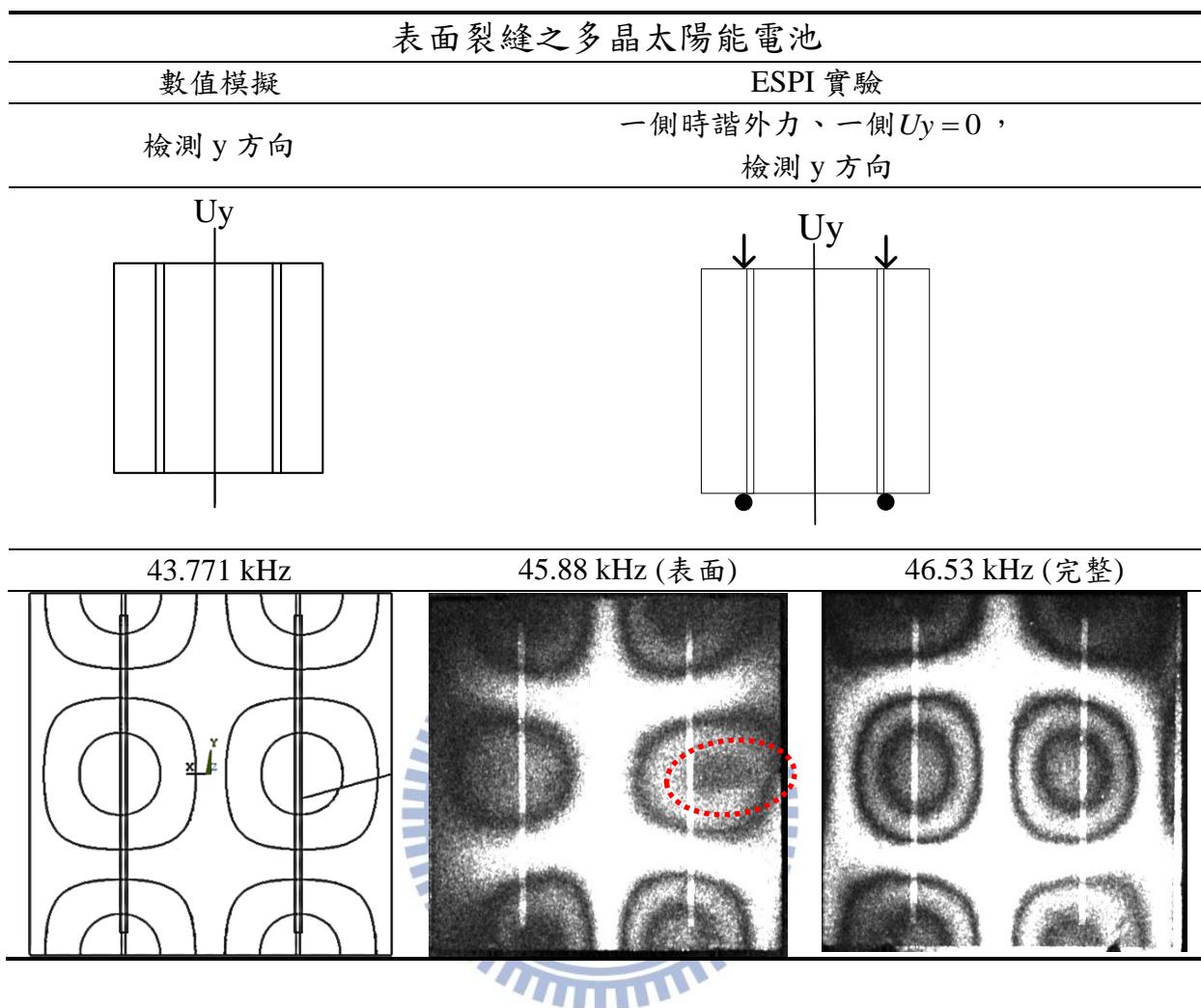
表面裂縫之多晶太陽能電池		
數值模擬	ESPI 實驗	
檢測 x 方向	一側時諧外力、一側 $Uy = 0$ ， 檢測 x 方向	
		
43.031 kHz	42.8 kHz (表面)	43.25 kHz (完整)
		
43.771 kHz	45.88 kHz (表面)	46.59 kHz(完整)
		
59.266 kHz	56.74 kHz (表面)	57.23 kHz(完整)
		

表 4.9-2 表面裂縫之多晶太陽能電池數值模擬與實驗結果(II)



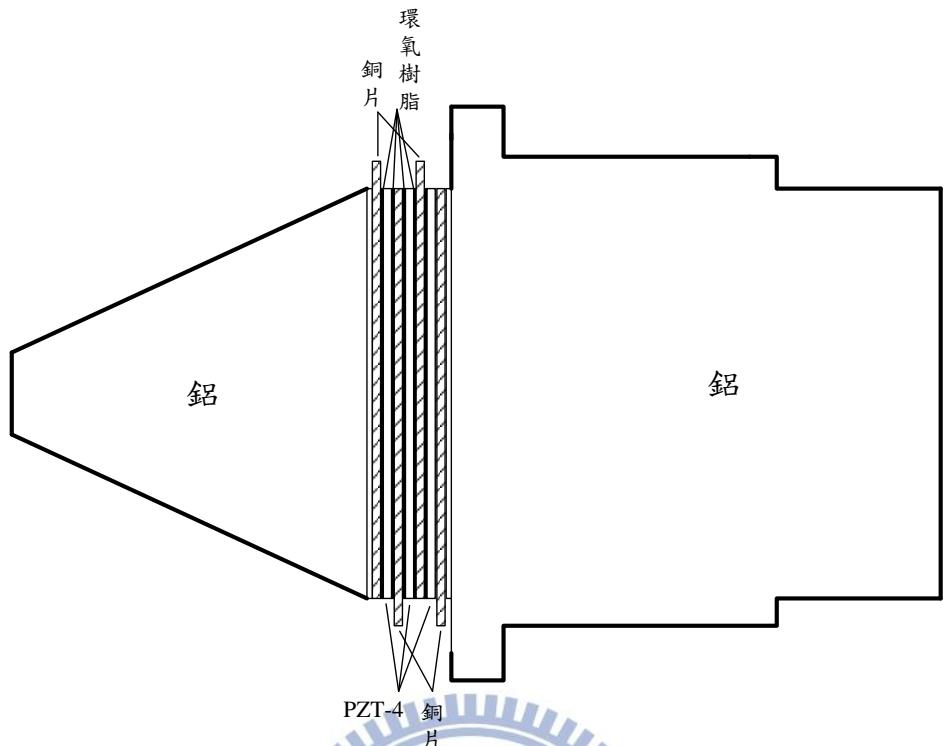


圖 4.1 錐形壓電換能器結構示意圖

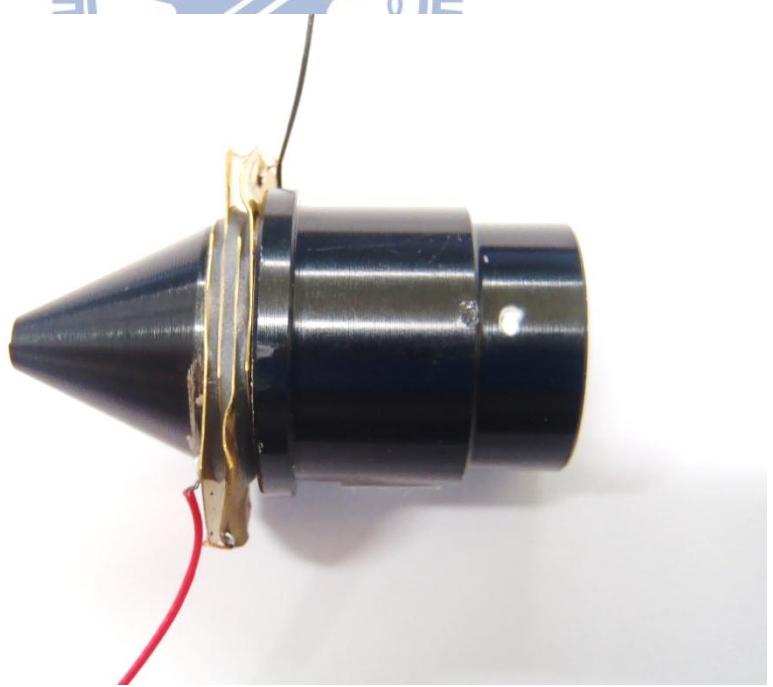


圖 4.2 錐形壓電換能器實體結構

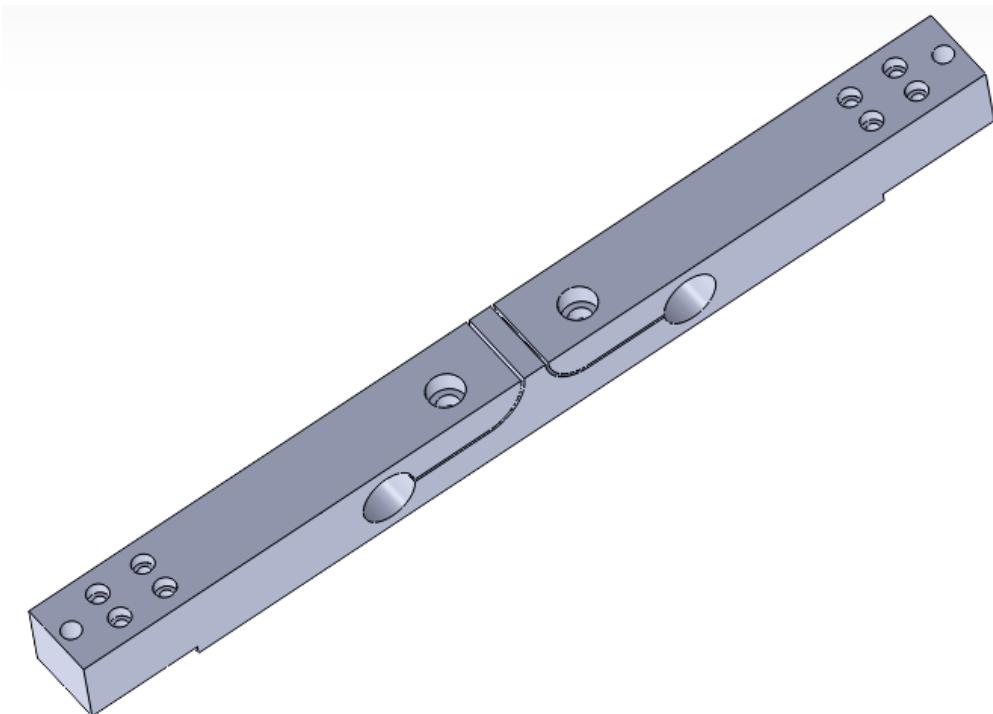


圖 4.3 錐形壓電換能器之夾持基座

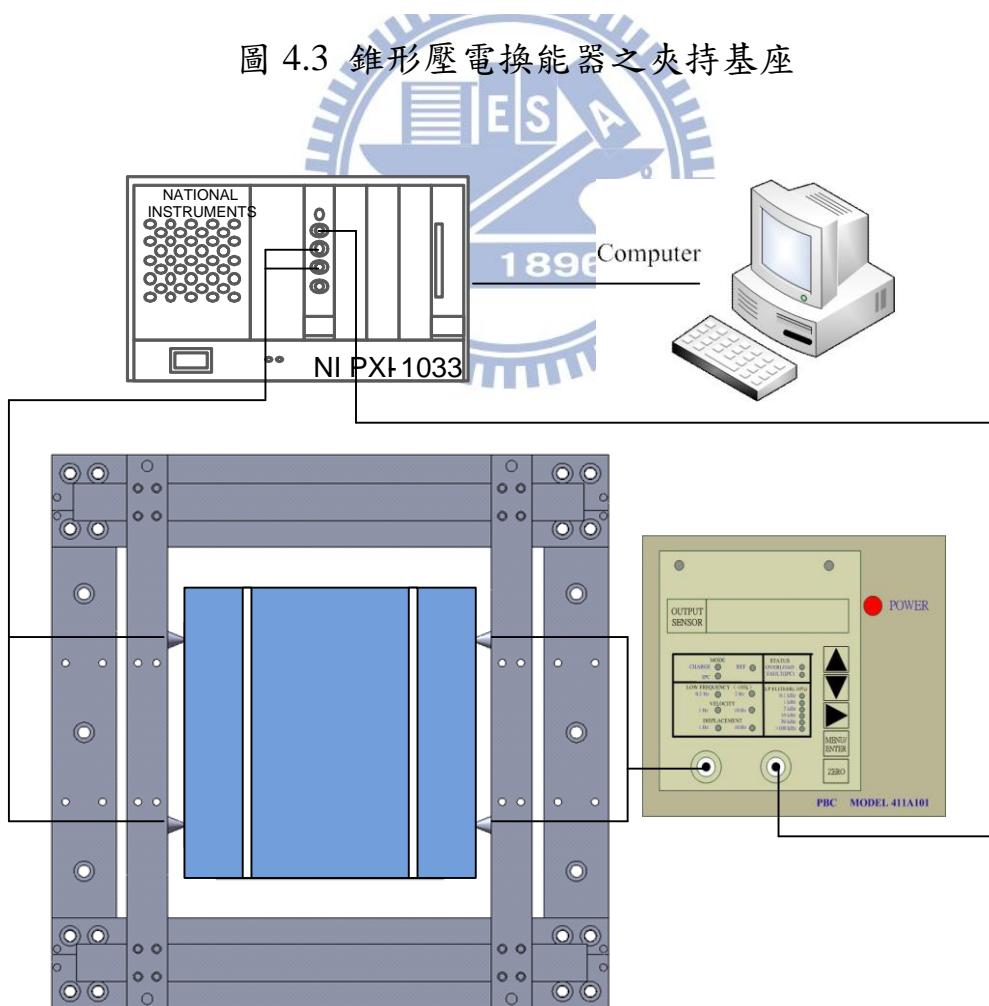


圖 4.4 面內共振頻率量測實驗架構

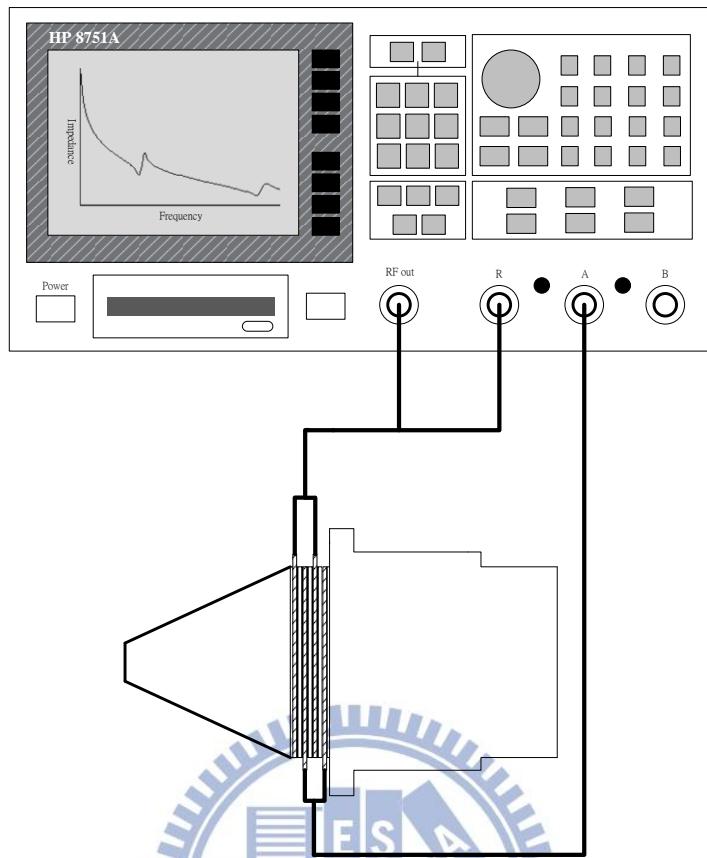


圖 4.5 錐形壓電換能器之阻抗頻率響應量測實驗架構

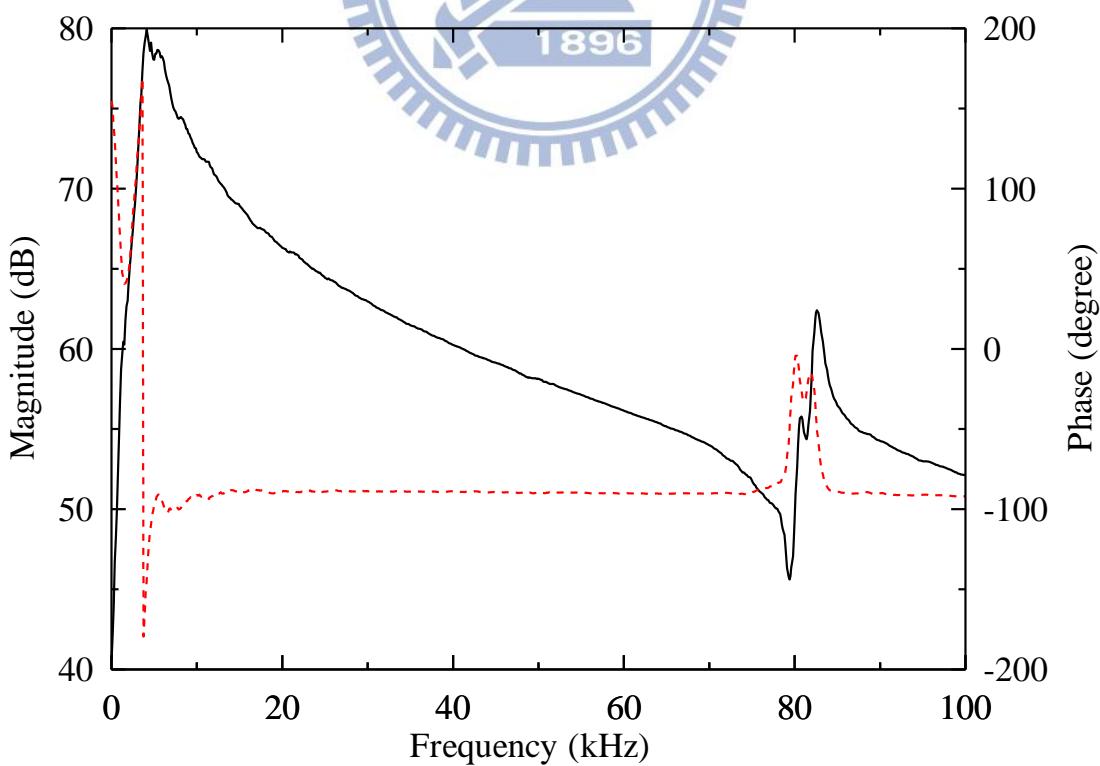
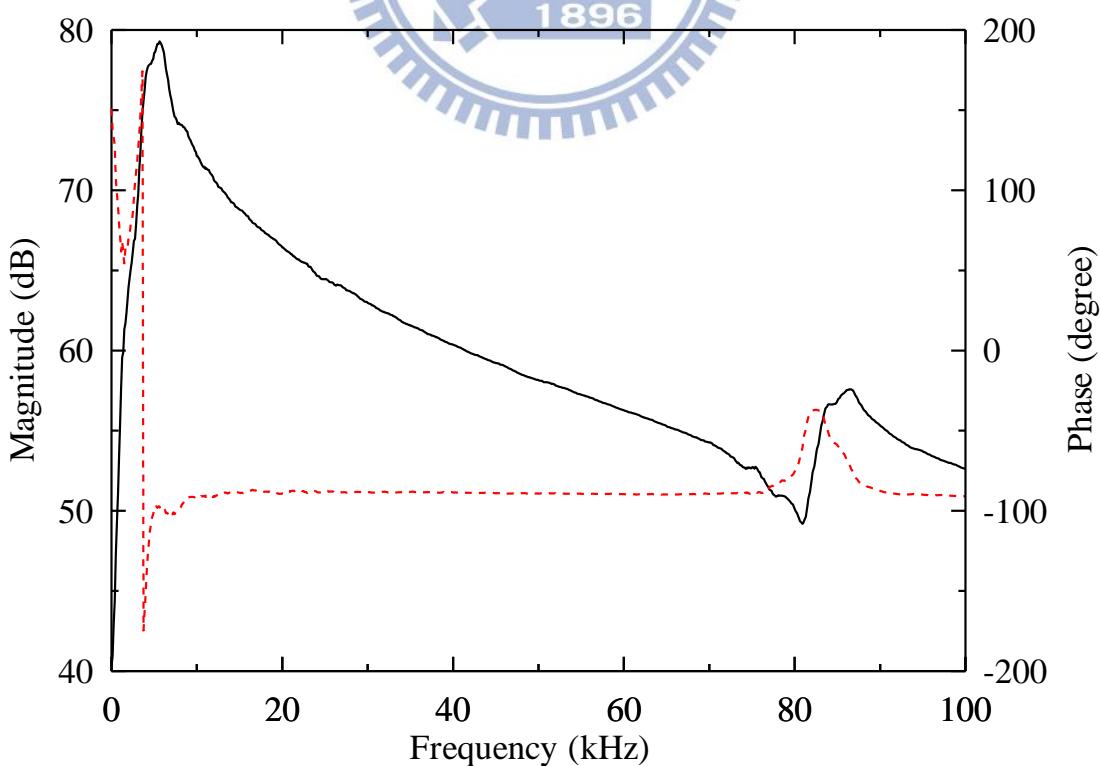
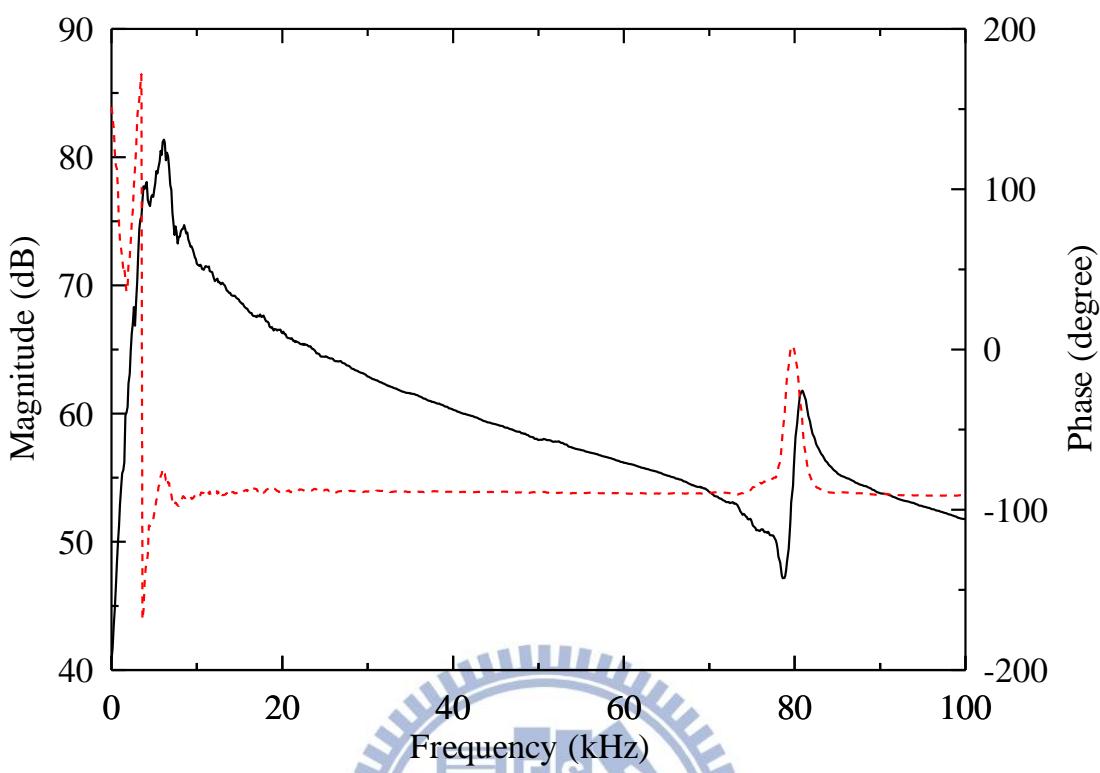


圖 4.6 第一錐形壓電換能器之阻抗頻率響應曲線



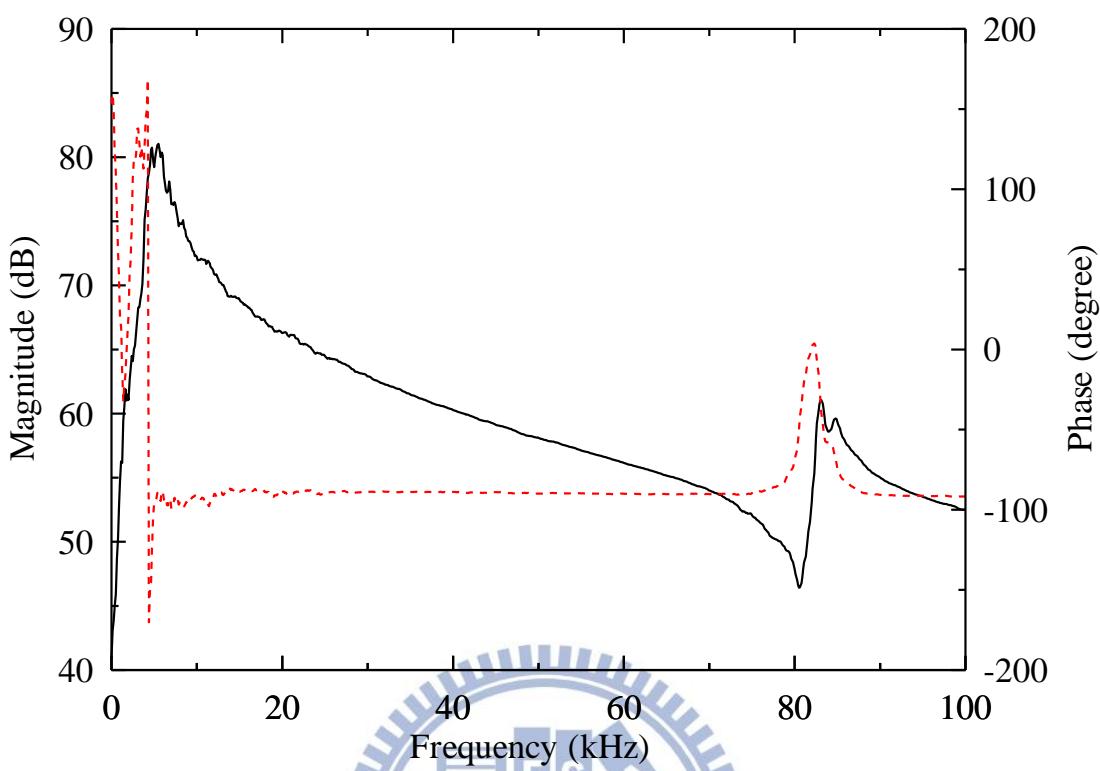


圖 4.9 第四錐形壓電換能器之阻抗頻率響應曲線

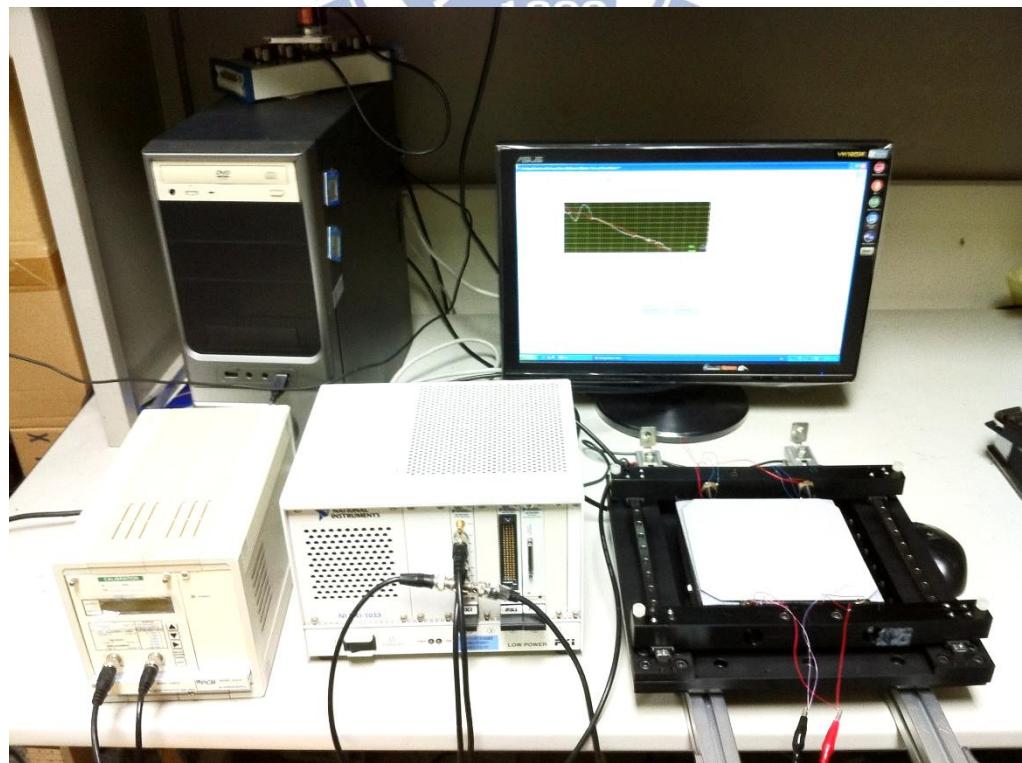


圖 4.10 太陽能電池面內共振頻率量測實驗

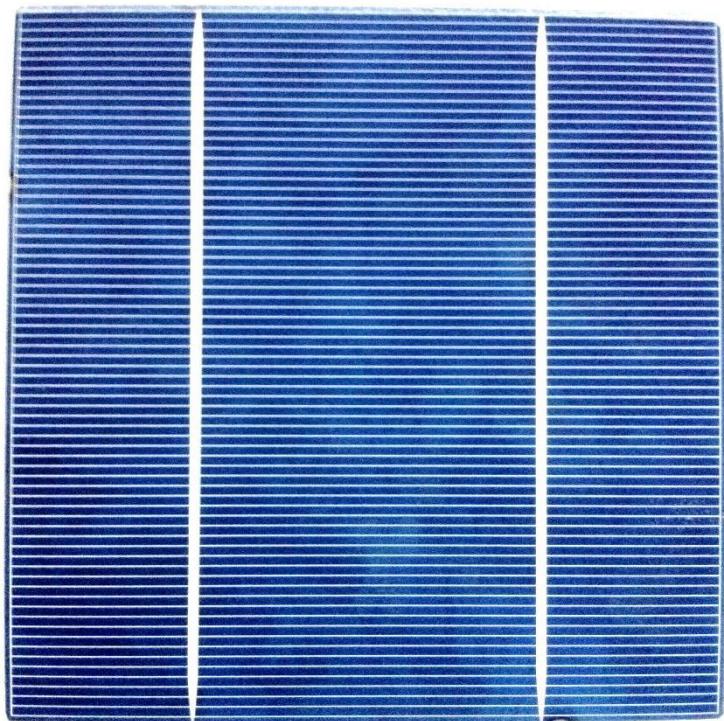


圖 4.11 多晶太陽能電池試片

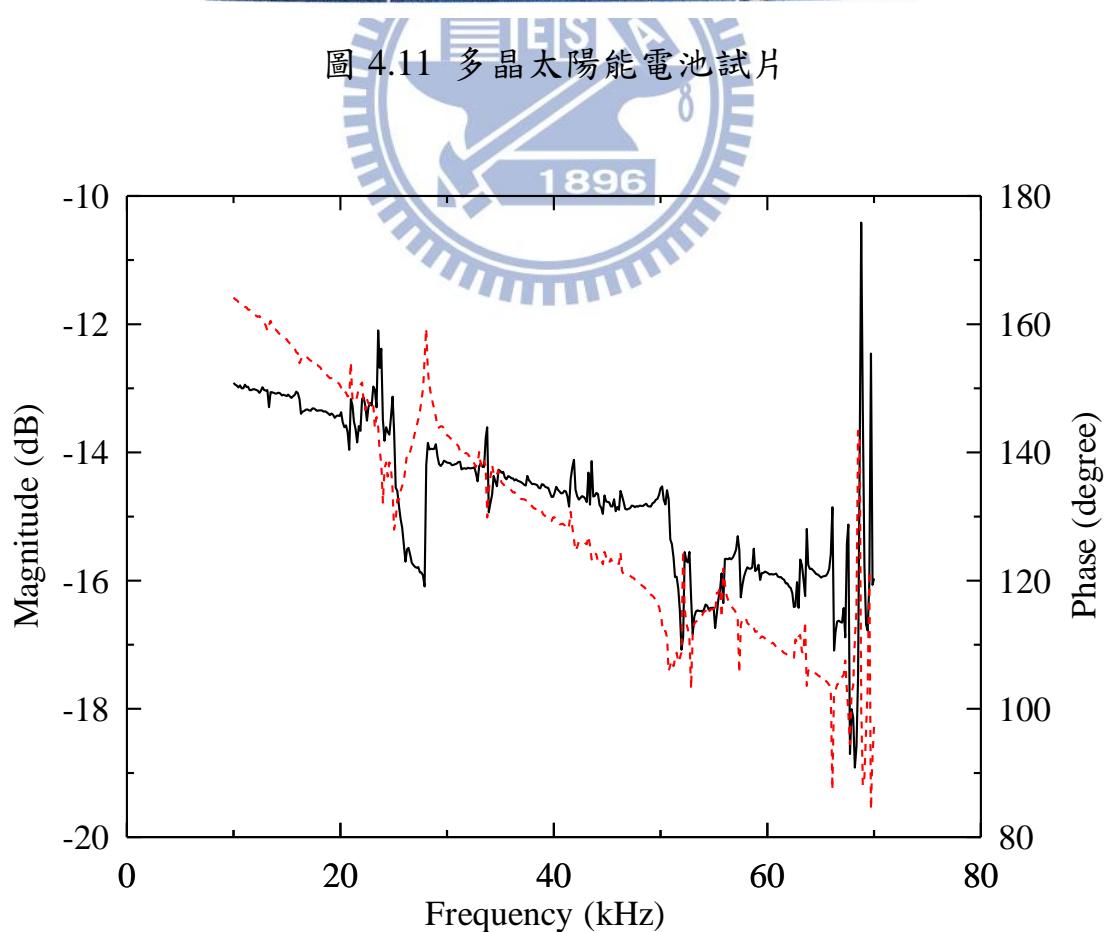


圖 4.12 多晶太陽能電池面內振動頻率響應曲線

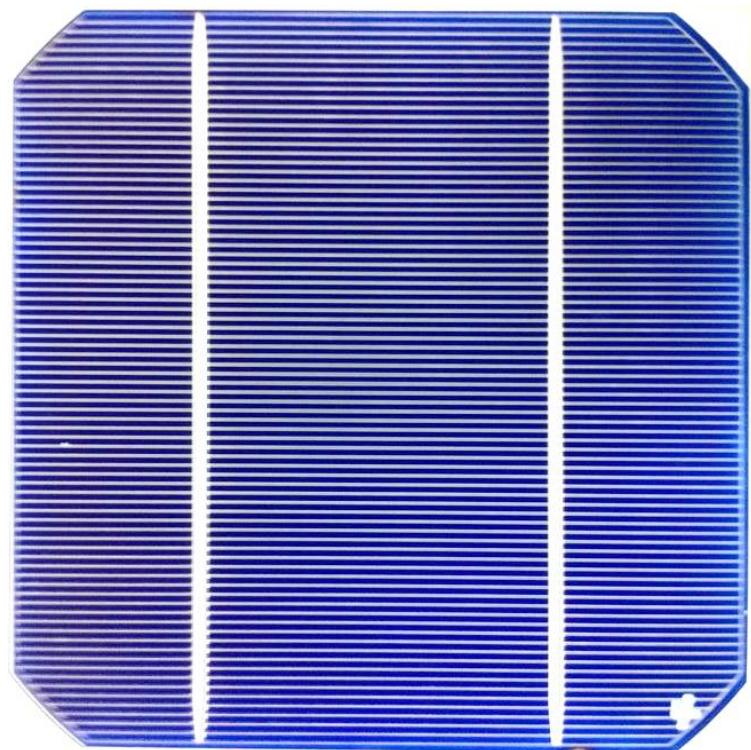


圖 4.13 單晶太陽能電池試片

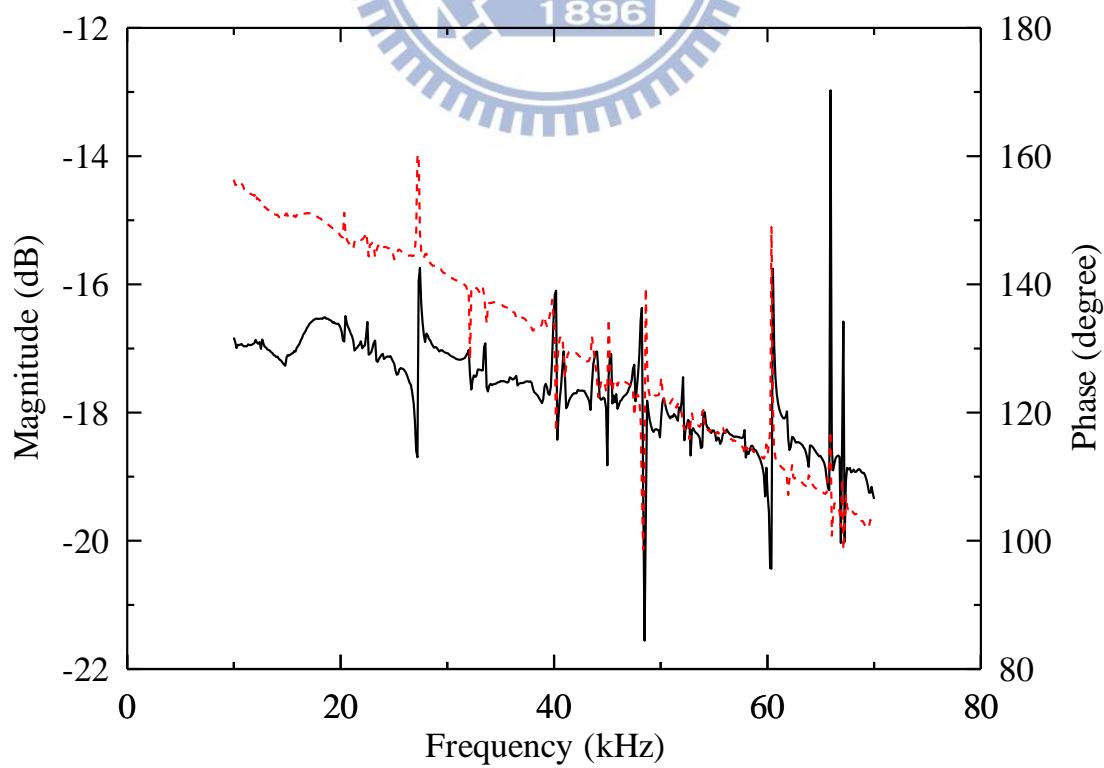


圖 4.14 單晶太陽能電池面內振動頻率響應曲線

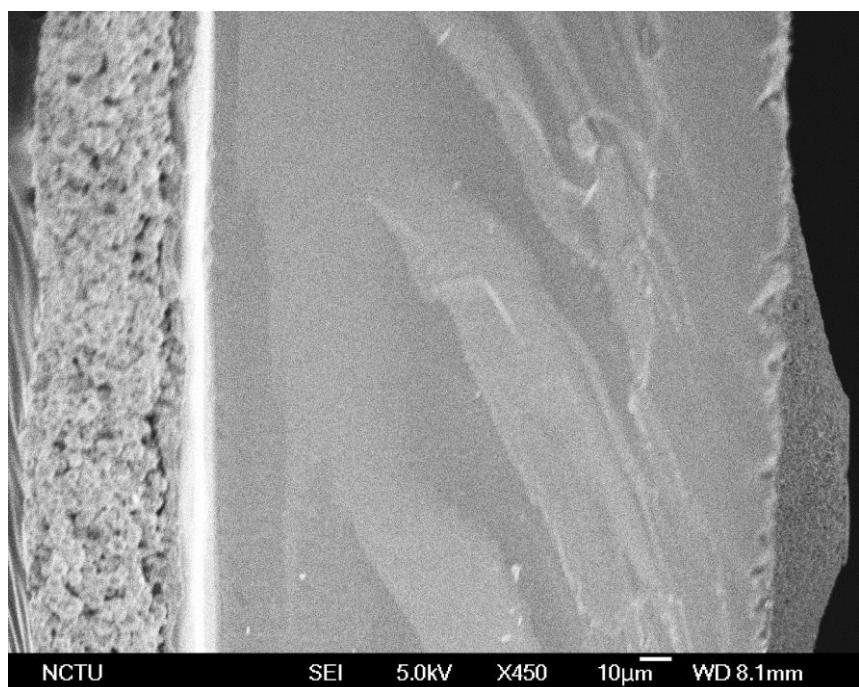


圖 4.15 多晶太陽能電池剖面圖[17]

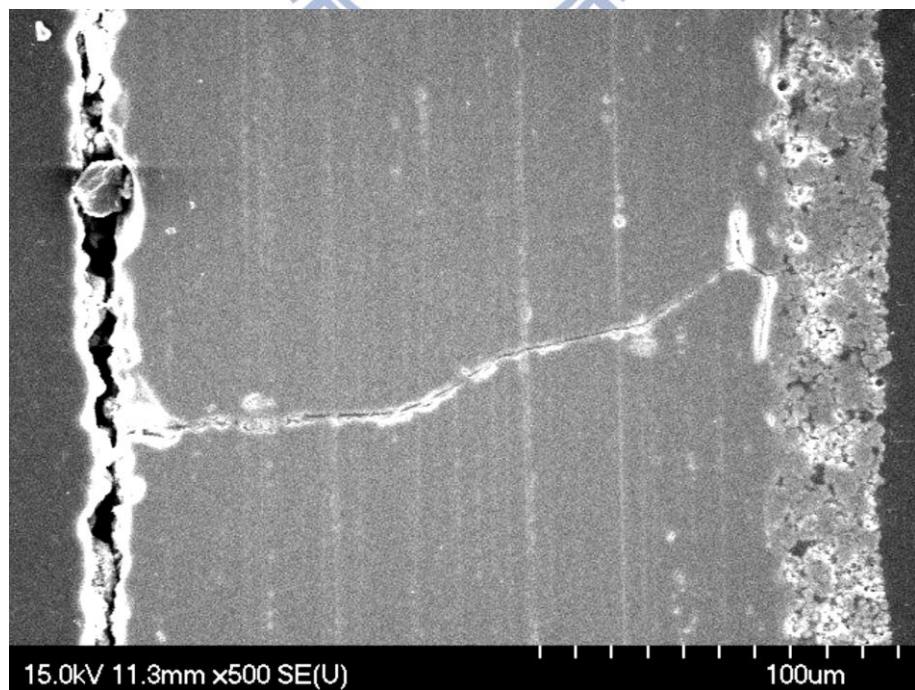


圖 4.16 含表面裂縫之多晶太陽能電池剖面圖[17]

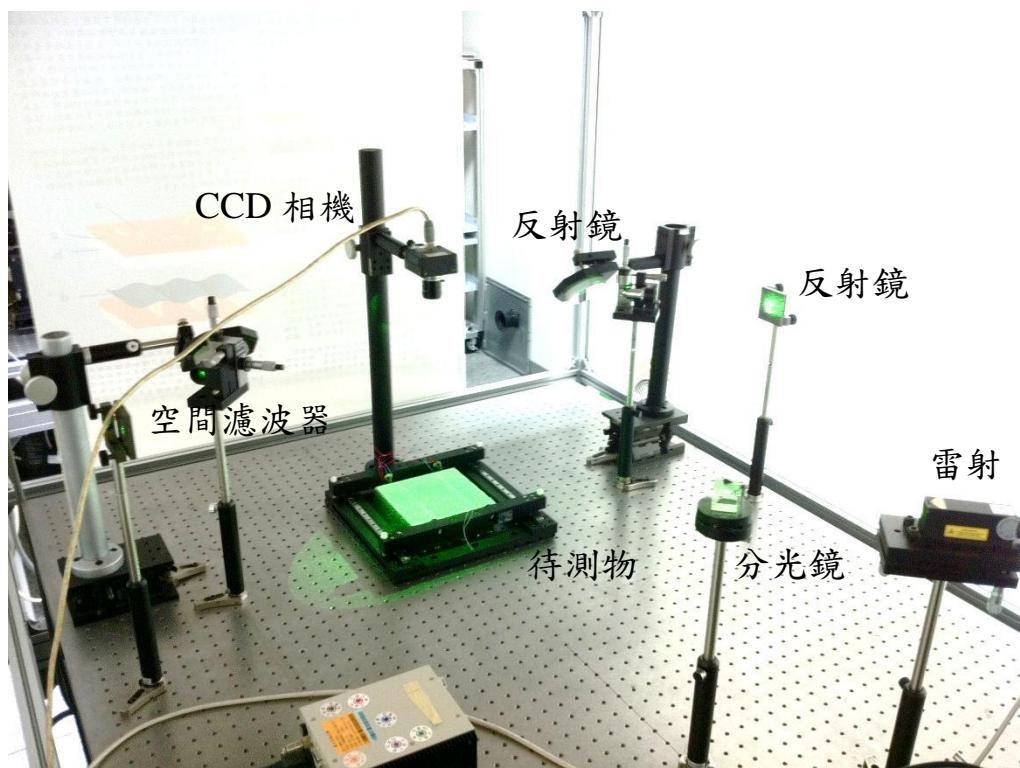


圖 4.17 面內 ESPI 光路實驗架構

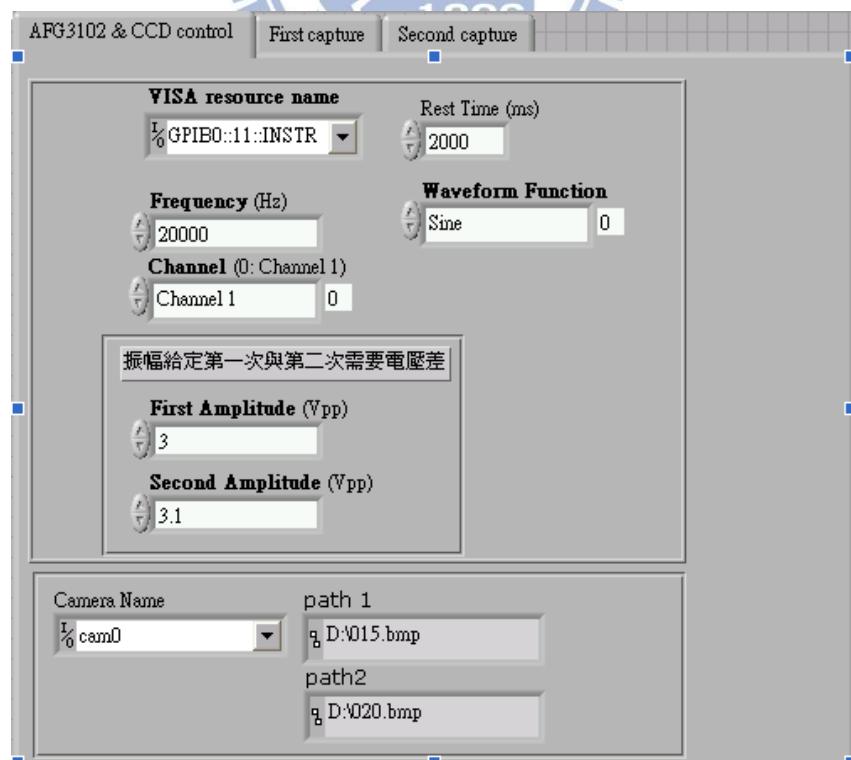


圖 4.18 面內 ESPI 實驗使用之 LabVIEW 程式介面

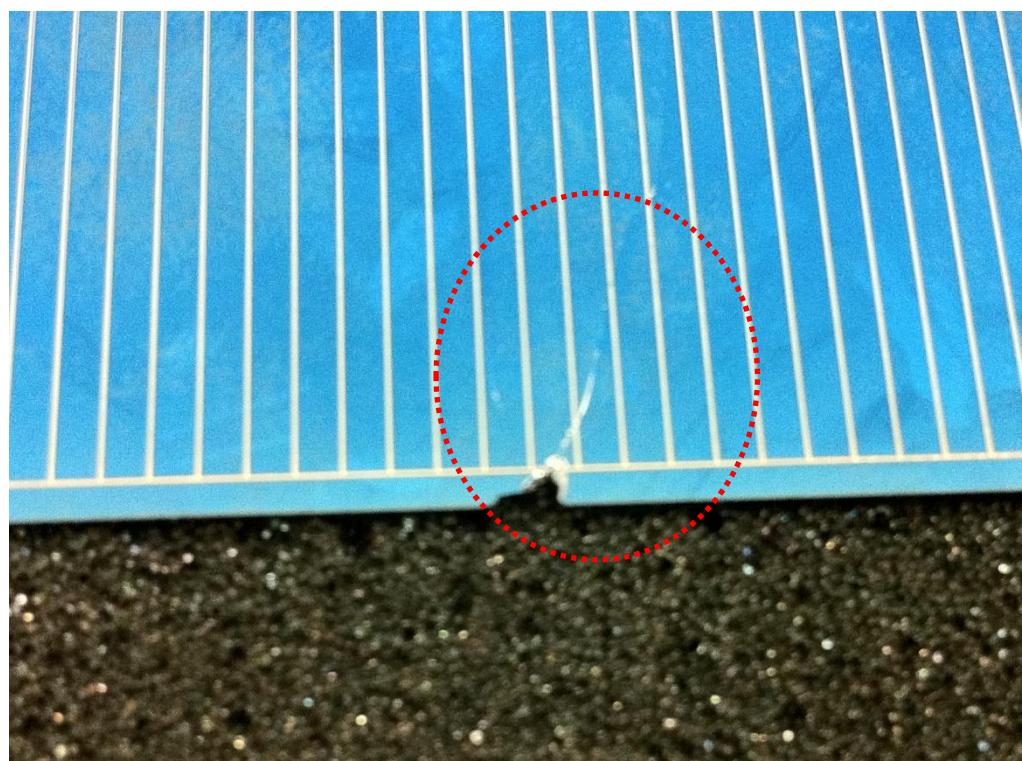


圖 4.19 表面裂縫

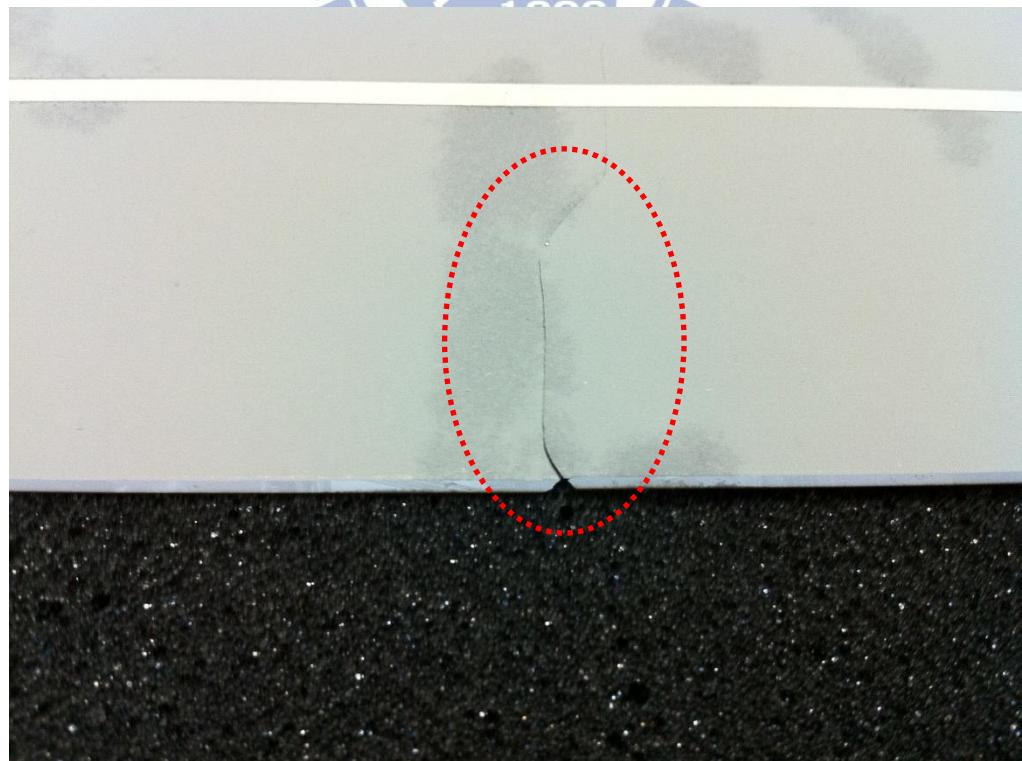


圖 4.20 貫穿裂縫

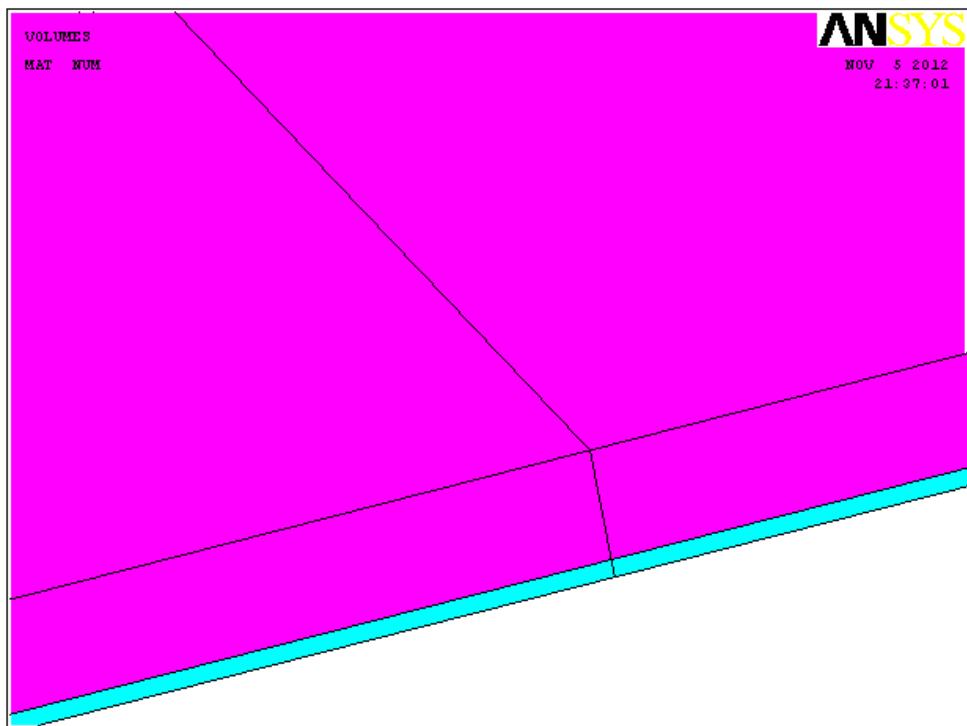


圖 4.21 有限元素模型裂縫處斷面重合

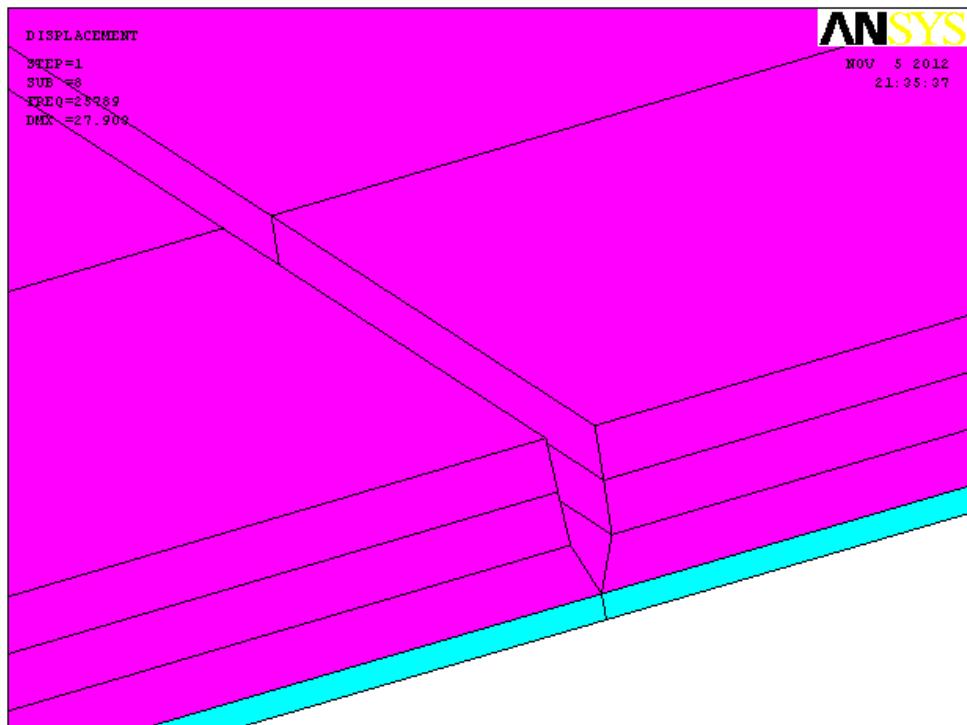


圖 4.22 有限元素模型裂縫處斷面分開

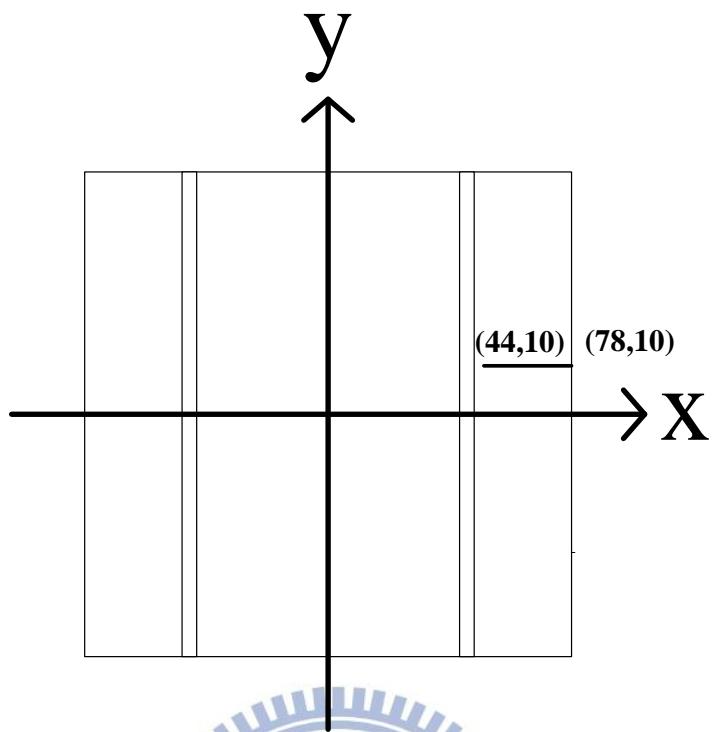


圖 4.23 多晶太陽能電池之貫穿裂縫位置示意圖

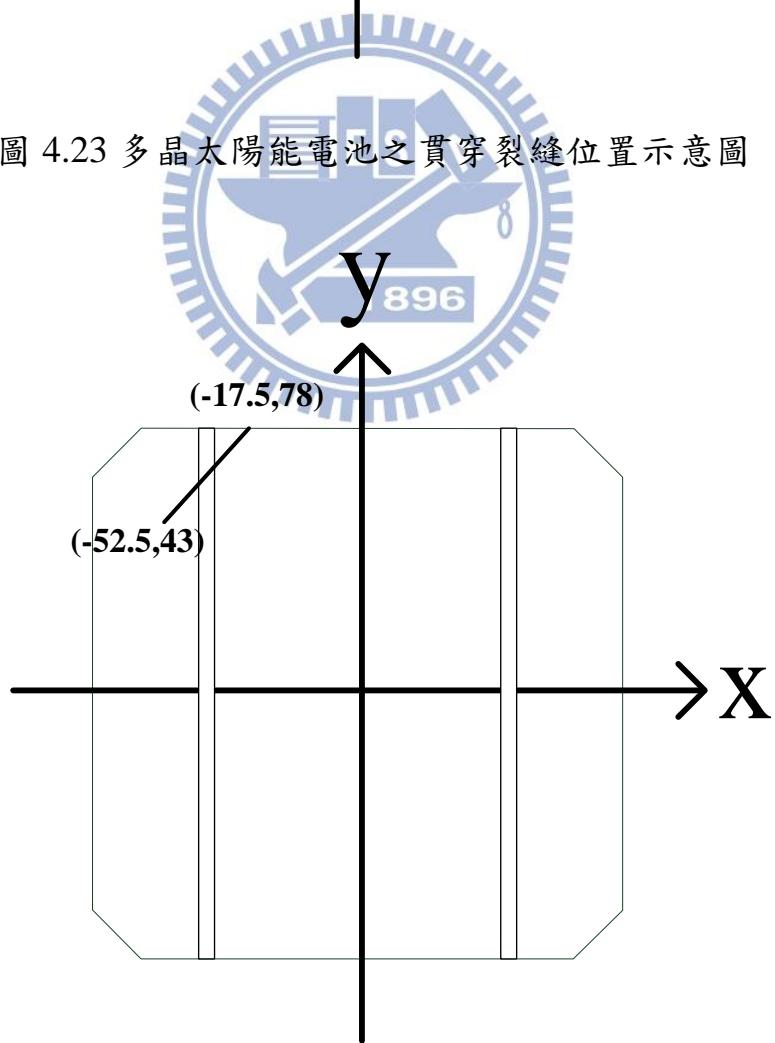


圖 4.24 單晶太陽能電池之貫穿裂縫位置示意圖

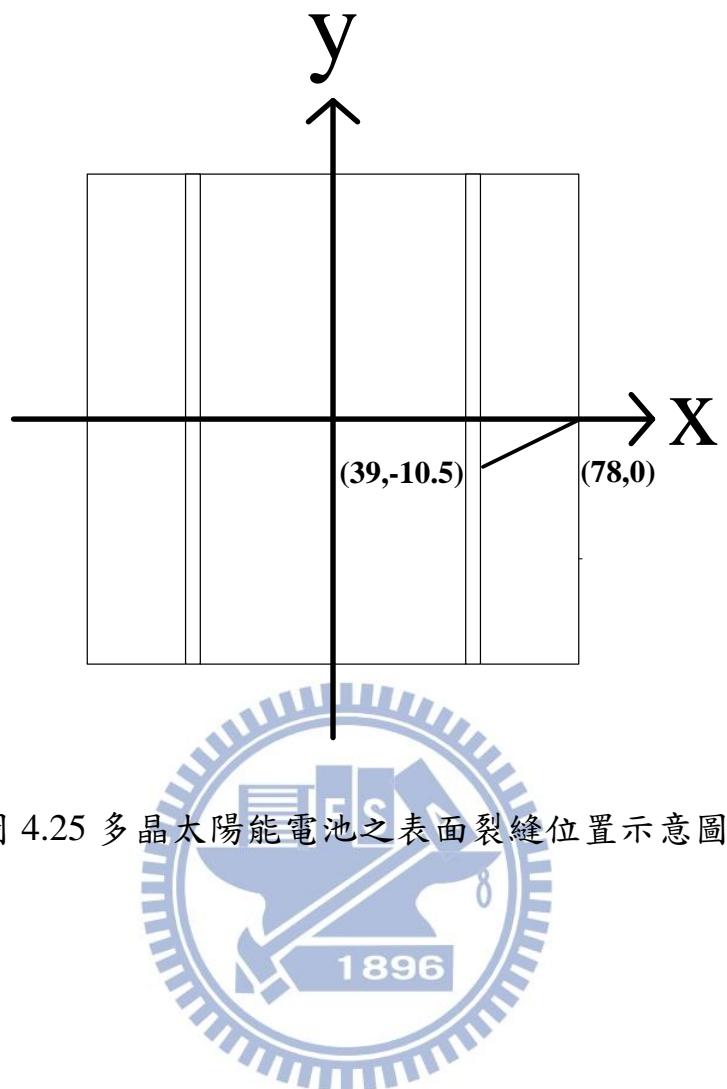


圖 4.25 多晶太陽能電池之表面裂縫位置示意圖

## 第五章 面外電子光斑干涉術實驗量測

由於面內共振模態的 ESPI 影像無法鑑別太陽能電池表面裂縫位置，本研究嘗試以面外振動實驗結合 ESPI，檢測表面裂縫。本章介紹 ESPI 面外位移量測實驗，開發量測面外共振頻率及共振模態的壓電換能器。針對含表面裂縫之多晶太陽能電池作可行性量測實驗。因為厚度方向的不對稱性，太陽能電池受到側向擠壓擾動，容易發生撓曲變形，表面裂縫附近的 ESPI 光斑干涉條紋會呈現 V 形的斜率不連續特徵，可供判斷太陽能電池表面裂縫之位置。

### 5.1 面外圓柱形壓電換能器

本研究採用如圖 4.4 所示的面內振動實驗裝置夾持太陽能電池，將錐形換能器改成圓柱形壓電換能器(圖 5.1)。換能器材質主要採用鋁合金，圓柱下方截成的平面黏貼一片寬 6 mm、長 10 mm、厚 1.3 mm 的壓電陶瓷 PZT-4。以 ANSYS 軟體之模態分析求得換能器的第一側向共振頻率，自然頻率為 13.256 kHz (圖 5.2)。確定模型結構尺寸後，對換能器進行時諧分析。在換能器前端凹陷處施加一側向時諧外力，獲得壓電片感應電位的頻率響應曲線如圖 5.3 所示。虛線為相位角，實線為感應電位之頻率響應 db 值，共振頻率為 13.25 kHz。

將壓電陶瓷 PZT-4 與鋁合金圓柱體以導電銀膠黏貼，黏合處中間設有厚度 0.1 mm 銅片，方便電線鍍接，製作完成之圓柱形壓電換能器實體如圖 5.4 照片所示。使用網路分析儀量測圓柱形壓電換能器阻抗的頻率響應函數曲線，分析方法同 4.1.1 節所述，量測頻率範圍為 5 Hz~50 kHz，實驗結果顯示第一阻抗點發生於 2.4 kHz (圖 5.5)，在第一共振頻率前方的平坦曲線可

用於量測太陽能電池的面外共振頻率。但實驗結果共振頻率前方並非一平坦曲線，相位角與阻抗 dB 值都有不規則的跳動情形。

## 5.2 多晶太陽能電池面外共振頻率量測

量測太陽能電池面外振動的實驗裝置(圖 5.6 所示)係沿用面內振動實驗的夾持框架，以圓柱形壓電換能器夾持試片，函數產生器輸出之弦波經功率放大器增益後，透過同側的圓柱形換能器激振太陽能電池，以加速規(PCB PIEZOTRONICS, 352C22)感測振動訊號，再經由前級放大器將訊號放大，電池的面外振動頻率響應函數量測結果如圖 5.7、5.8 所示。由於電池的面外共振模態密度很高，共振數目龐大，將振幅變化與相位角分開觀察，量測到的振幅訊號很小，有可能意味著側邊夾持的面內實驗架構不適合用於激振面外變形。



## 5.3 多晶太陽能電池之 ESPI 面外量測

電子光斑干涉實驗的面外量測架構如圖 5.9 所示，雷射光通過空間濾波器由平行光轉變為球面光，再經由 45 度分光鏡分為物光及參考光，物光照射在待測試片上，於待測物表面產生散射，參考光照射於參考平面，也產生散射，待測物的散射光斑與參考平面的散射光斑產生干涉後，由 CCD 相機擷取影像，再與另一張不同振幅的影像相減，進行影像處理，獲得面外振動位移的光斑干涉影像。

以含表面裂縫之多晶太陽能電池為試片，表面裂縫的位置如圖 4.25 所示，進行面外振動位移的 ESPI 量測實驗。表 5.1-1、5.1-2 列出 200 Hz 以下完整與含表面裂縫之太陽能電池面外自然模態的等位移曲線計算結果。面

外自然模態的等位移線在裂縫處有不連續的 V 型特徵，裂縫兩側的條紋數目相同，但等位移線得斜率不連續。

將含表面裂縫之多晶太陽能電池置放在振動量測實驗夾具中，以圓柱形壓電換能器夾持太陽能電池上下兩側，一側的換能器用以激振太陽能電池。圖 5.10 所示為 70 Hz 正弦波激振完整多晶太陽能電池的面外振形光斑干涉影像，相同頻率激振含表面裂縫之多晶太陽能電池的 ESPI 影像如圖 5.11 所示。圖中虛線圈處即為裂縫位置，裂縫附近的光斑干涉條紋呈現 V 型輪廓，與數值模擬結果有相同的特徵。

#### 5.4 結果與討論

本研究自行設計的圓柱形壓電換能器不適宜作為量測低頻訊號之感測器，因為換能器側向振動的頻率響應曲線在第一共振頻率前有不規則之起伏，會造成共振頻率量測的誤差，故不適合量測面外共振頻率。

本研究經過不斷的嘗試，發現 ESPI 面外位移量測實驗無法拍攝到共振模態，因為太陽能電池的面外共振模態密度很高，激振頻率附近有許多太陽能電池的共振模態，無法以單一頻率準確激振出太陽能電池的單一共振模態。此外，與 5.2 節的結論相同，圓柱形壓電換能器於側邊夾持試片，此固定方式不適合激振面外變形，故無法有效激振出面外共振模態。針對含表面裂縫之太陽能電池振動實驗結果，雖無法拍攝到面外共振模態，但以單一頻率驅動下，ESPI 影像的光斑干涉條紋呈現不連續的特徵，裂縫兩側條紋數目相同，在裂縫附近的 V 型輪廓可判斷表面裂縫的位置。

表 5.1-1 表面裂縫之多晶太陽能電池數值模擬 (I)

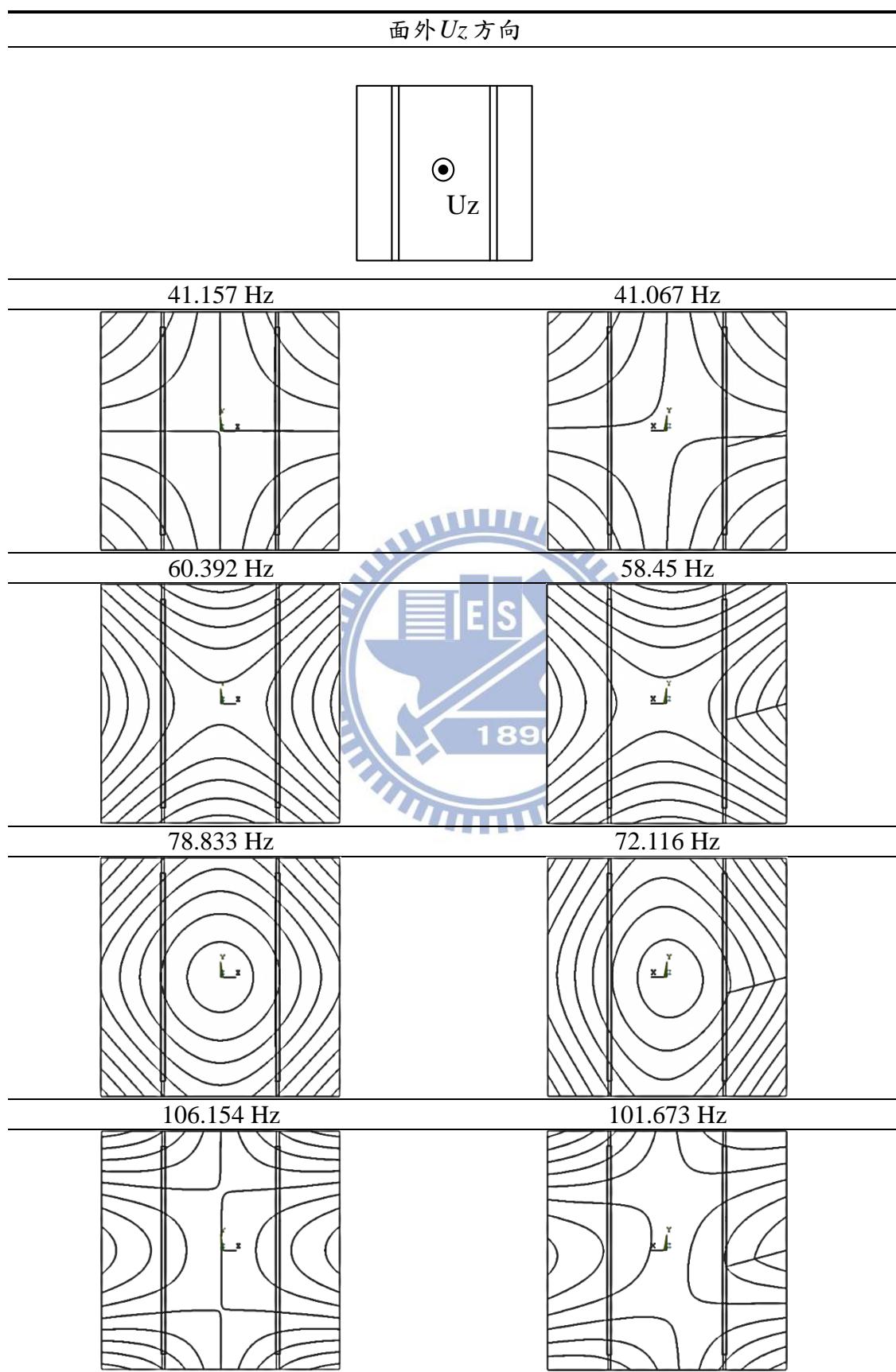
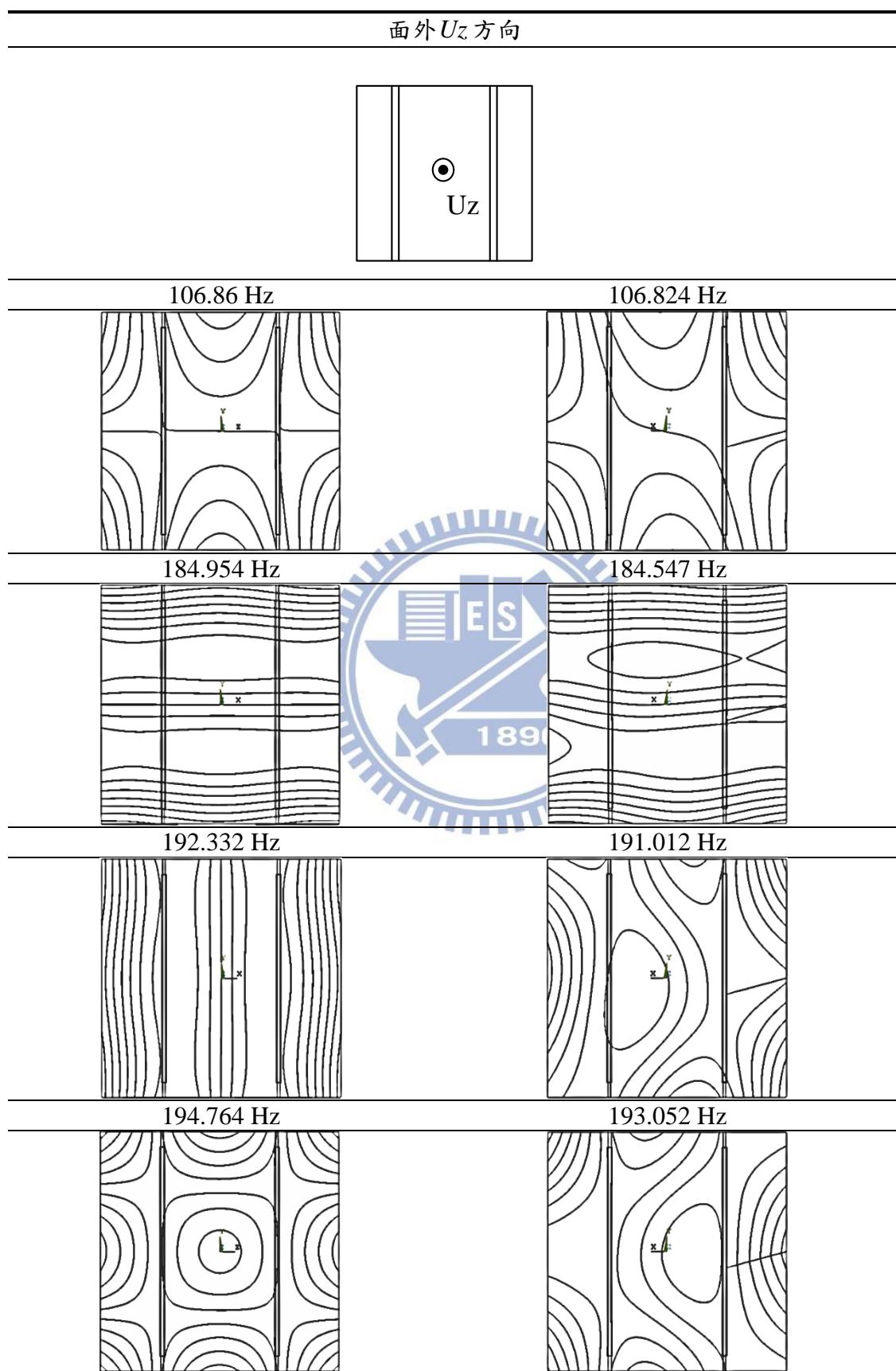


表 5.1-2 表面裂縫之多晶太陽能電池數值模擬 (II)



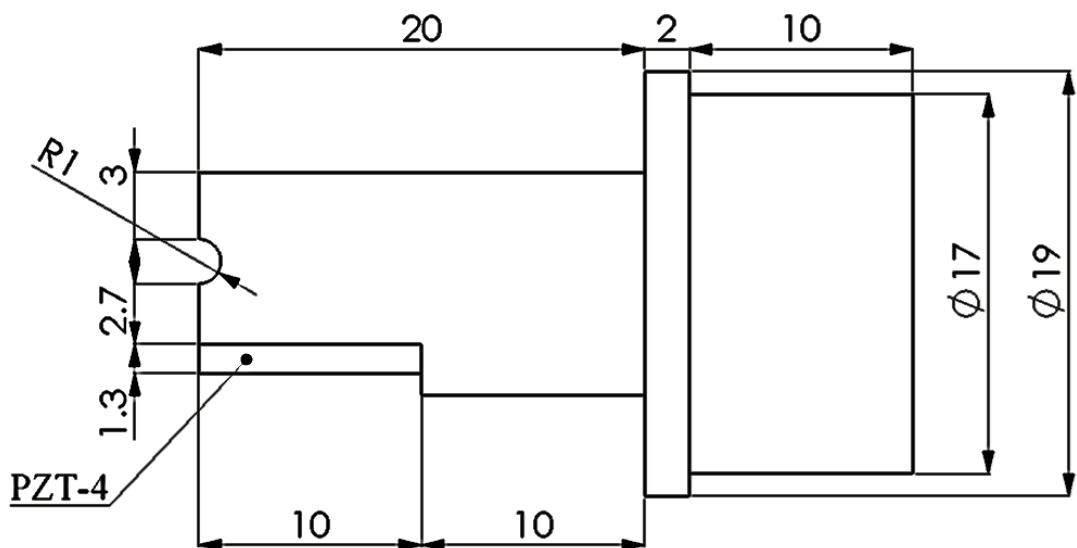


圖 5.1 面外圓柱形壓電換能器尺寸示意圖

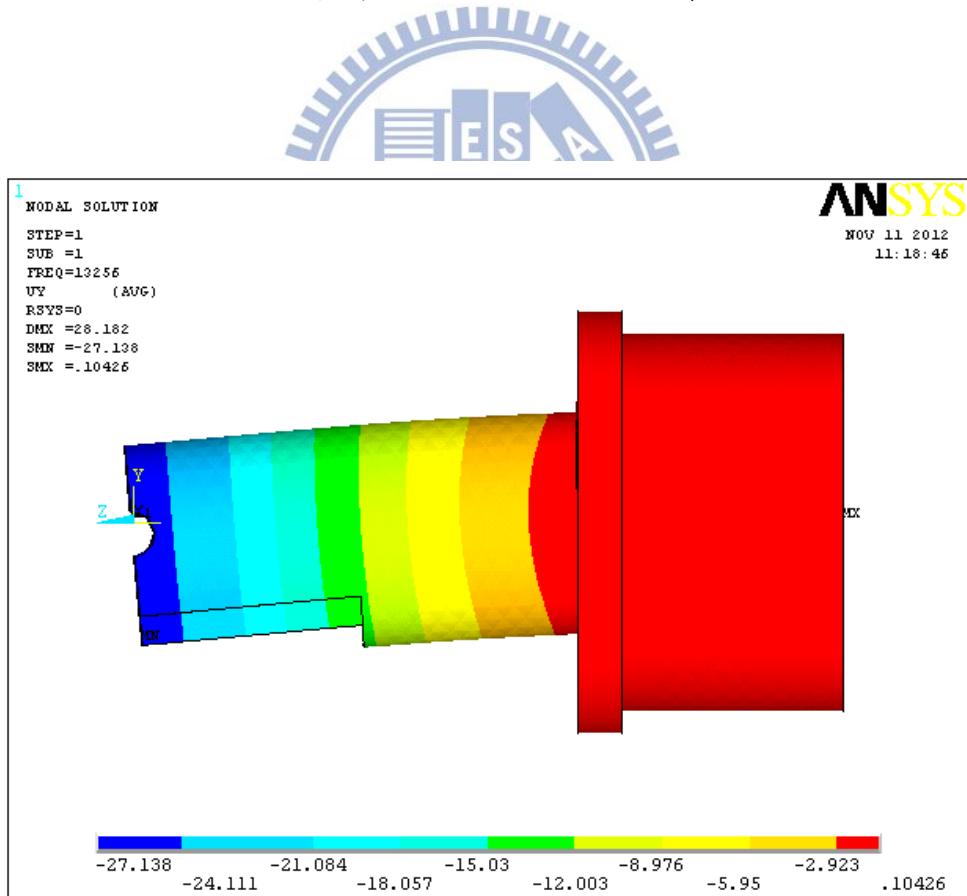


圖 5.2 圓柱形壓電換能器模態分析結果

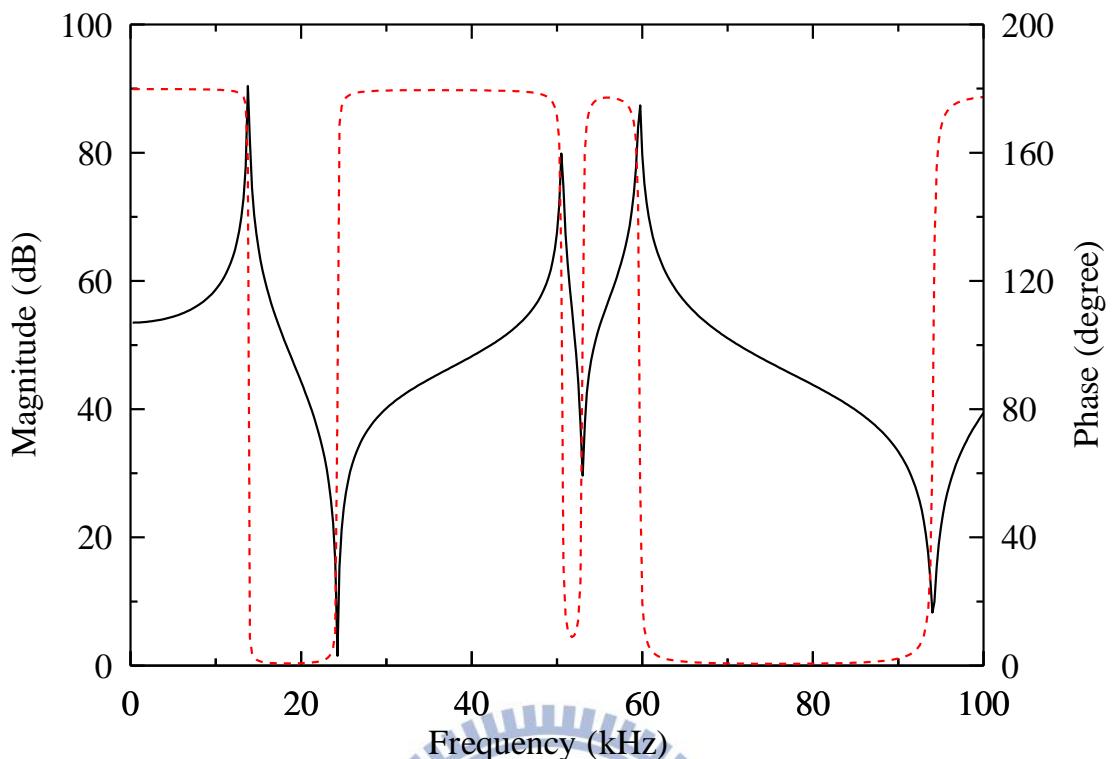


圖 5.3 圓柱形壓電換能器受時諧外力之電位頻率響應計算曲線

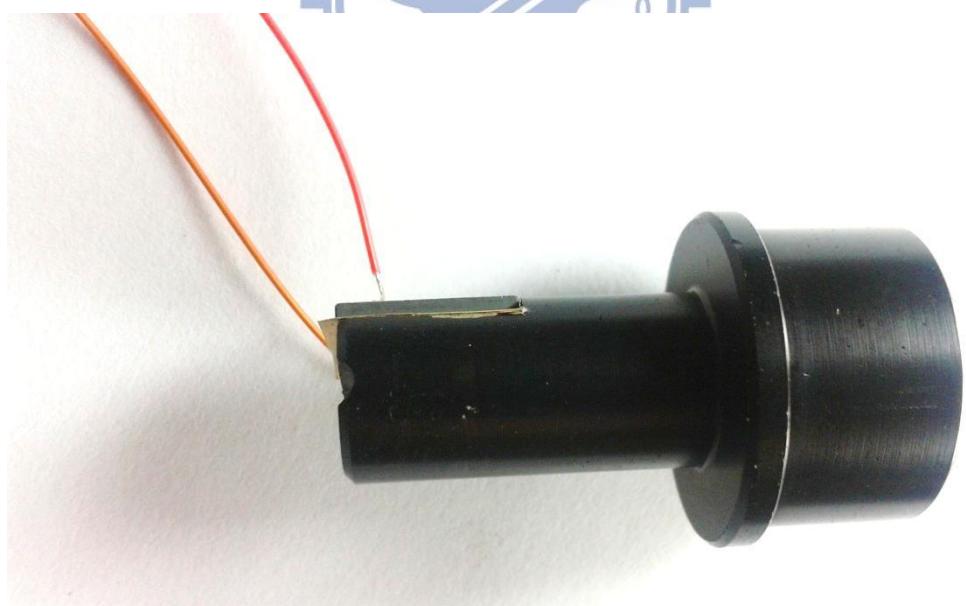


圖 5.4 圓柱形壓電換能器實體結構

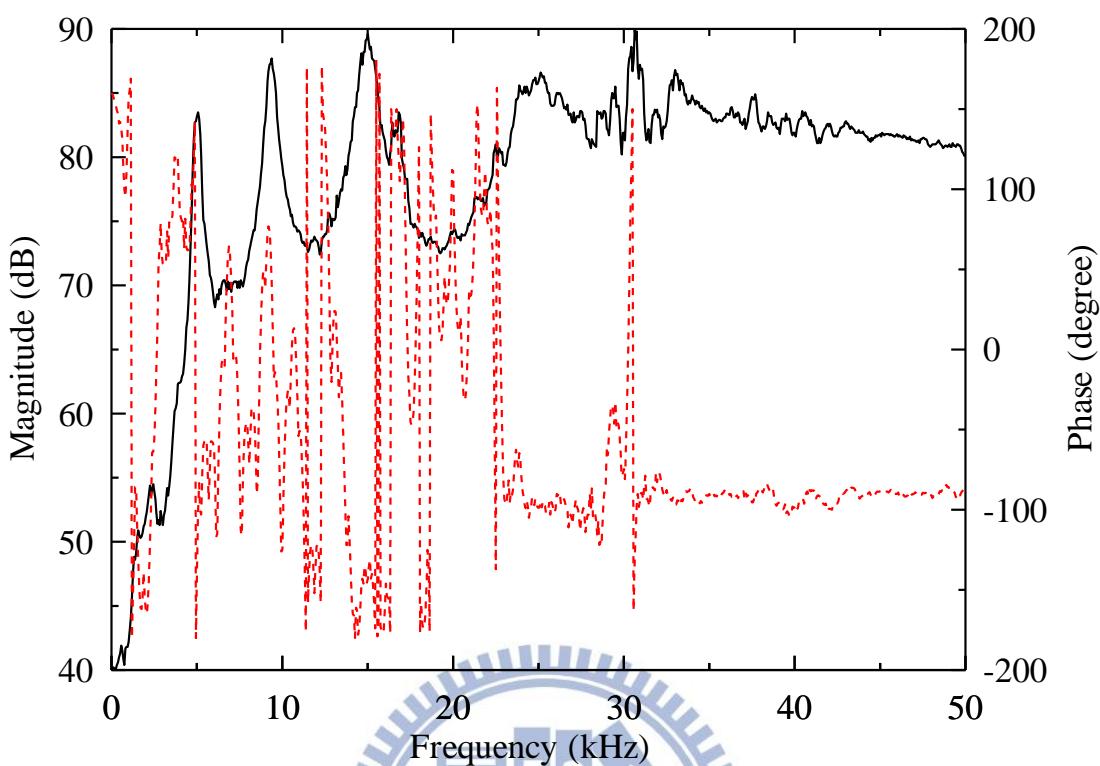


圖 5.5 圓柱形壓電換能器之阻抗頻率響應曲線

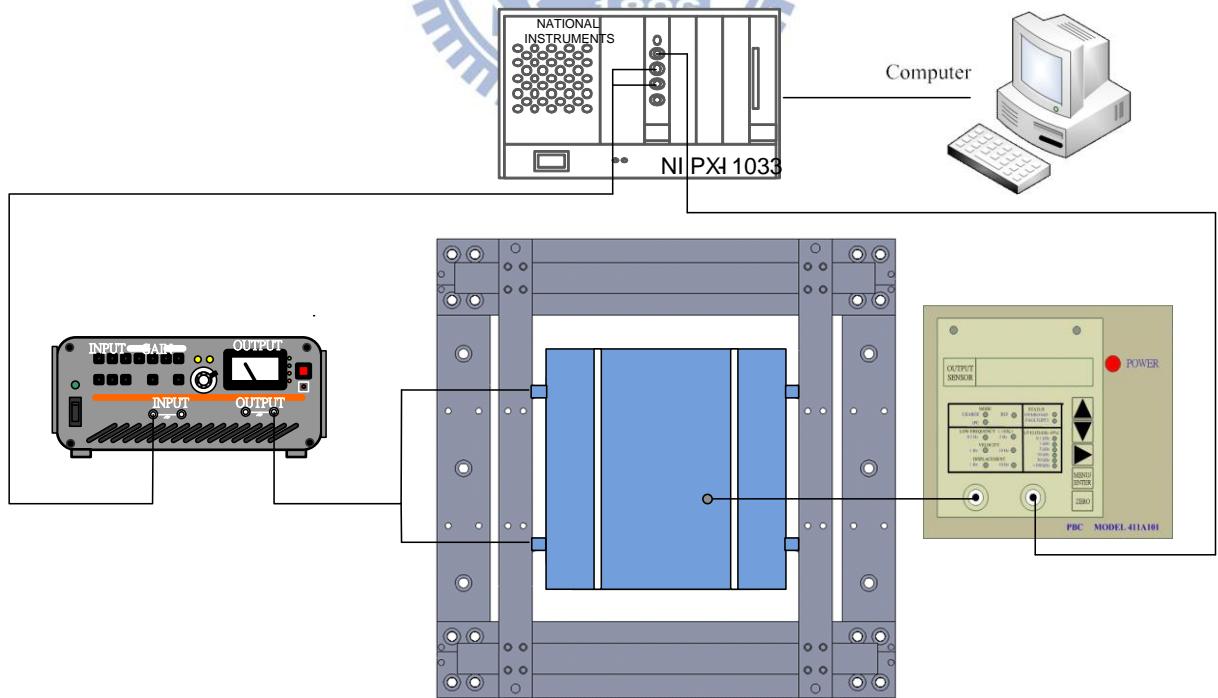


圖 5.6 面外共振頻率量測之實驗架構

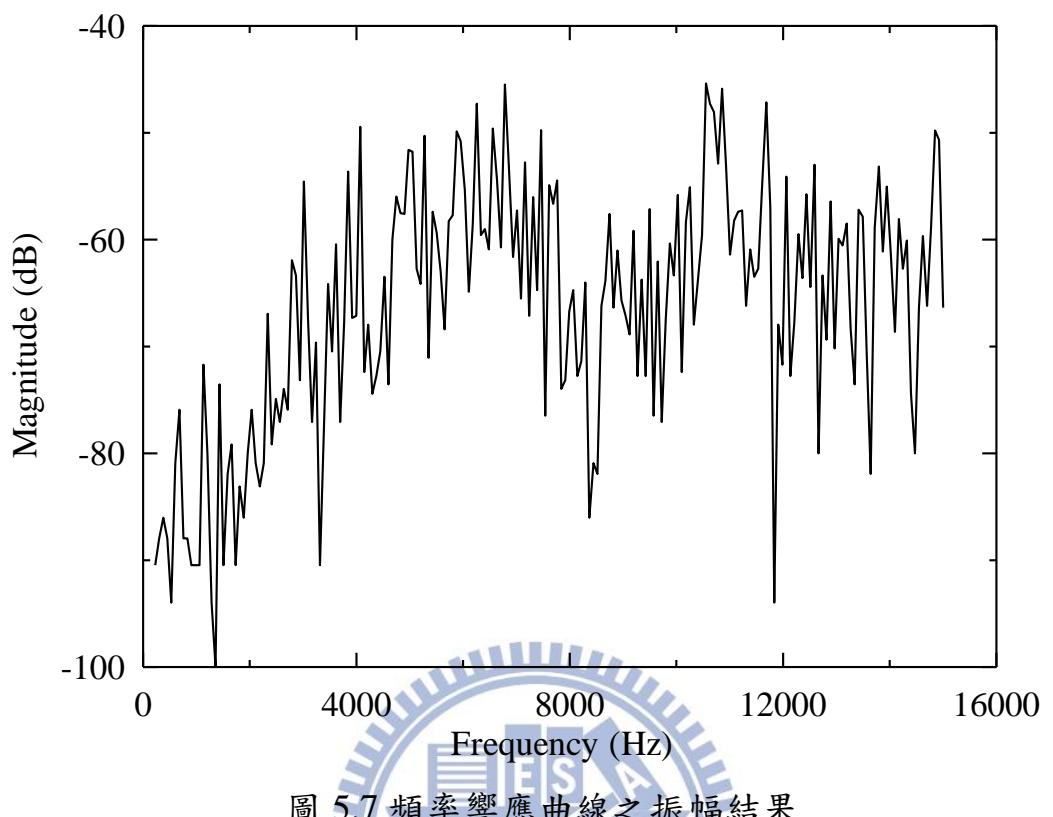


圖 5.7 頻率響應曲線之振幅結果

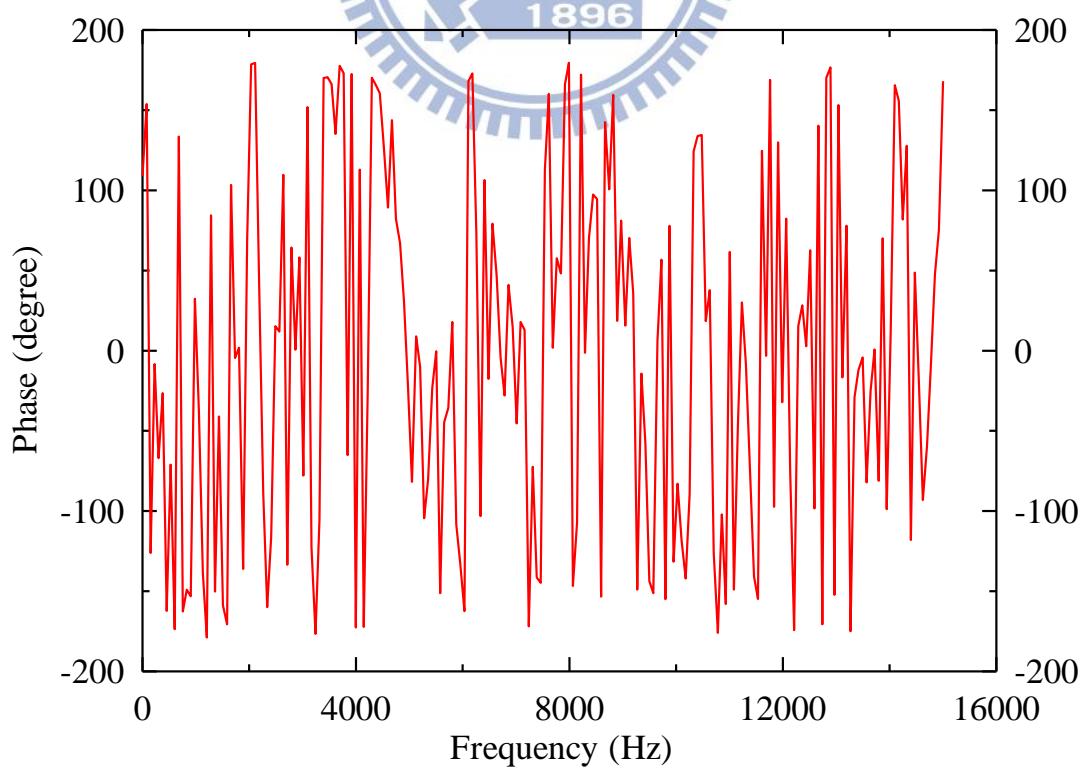


圖 5.8 頻率響應曲線之相位結果

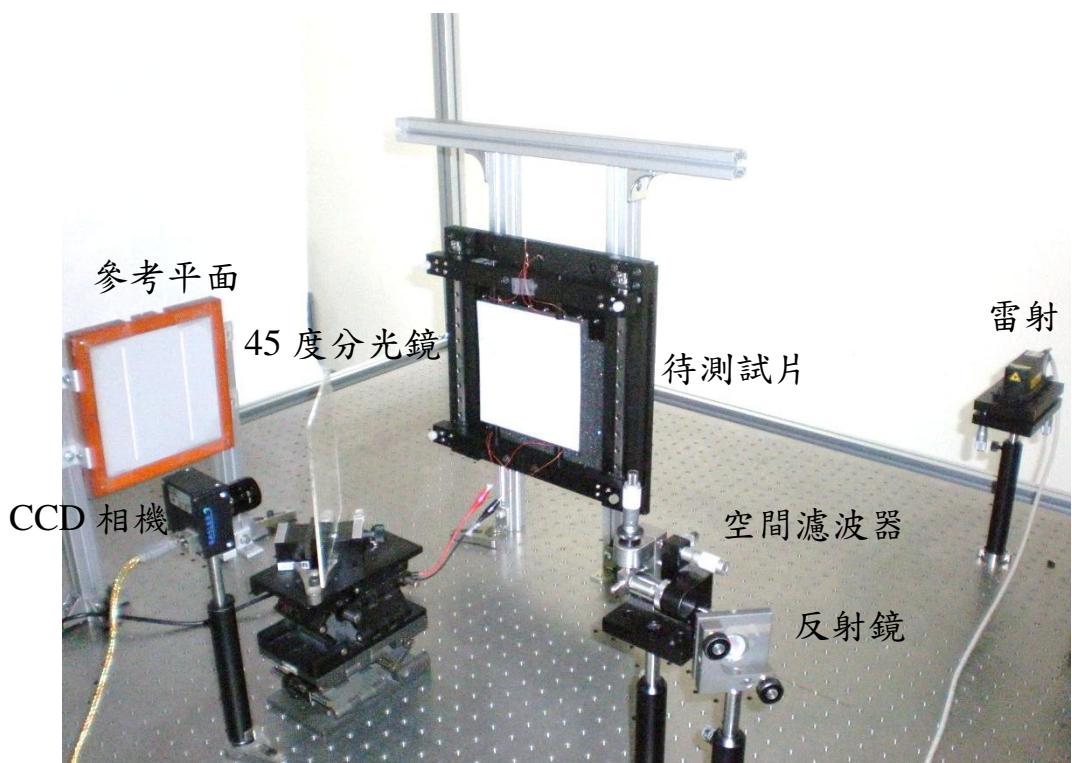


圖 5.9 面外 ESPI 實驗架構

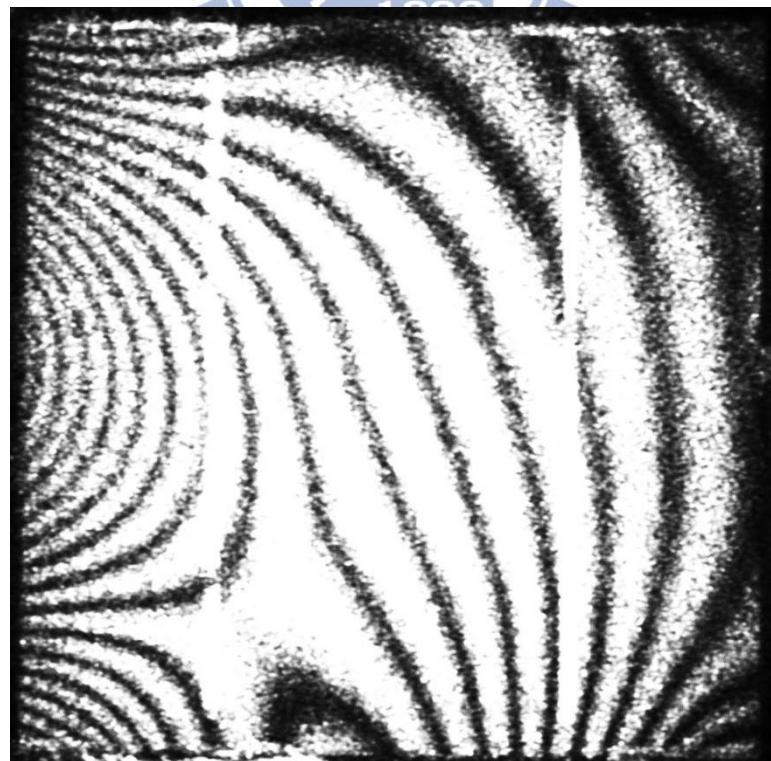


圖 5.10 完整多晶太陽能電池之 ESPI 影像

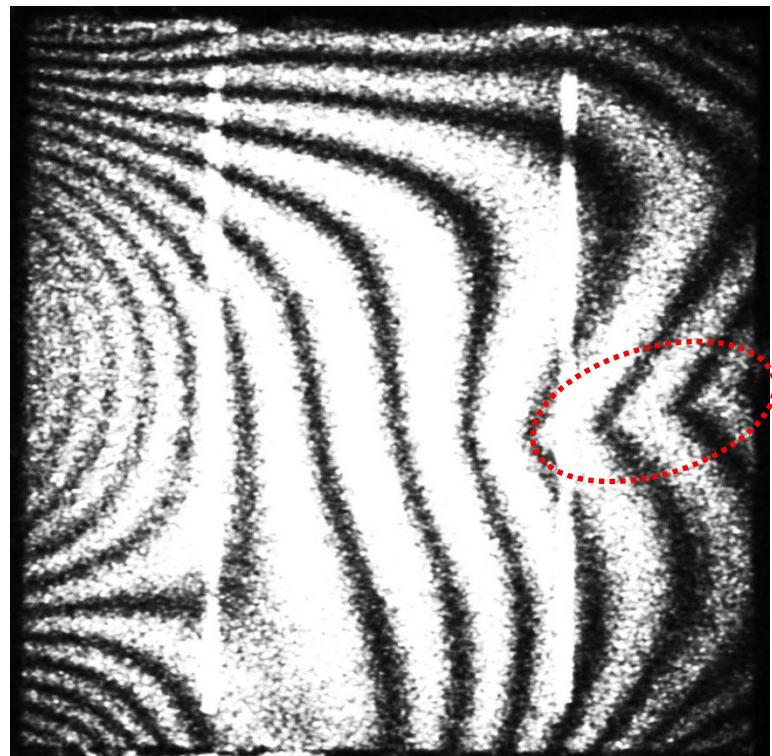


圖 5.11 含表面裂縫之多晶太陽能電池 ESPI 影像



## 第六章 結論與展望

本研究以矽晶太陽能電池為對象，採用電子光斑干涉術為檢測方法，以光斑干涉條紋或其斜率不連續之特性，成功地作為判斷太陽能電池裂縫存在的指標。數值分析採用 ANSYS 軟體，計算太陽能電池之共振頻率及共振模態，驗證了實驗的正確性。

### 6.1 結論

本研究以鄭智遠[1]實驗架構為基礎，改進換能器的致振能力與 ESPI 的光路架構，對結構較複雜之矽晶太陽能電池進行數值模擬與 ESPI 量測實驗。[1]的面內 ESPI 實驗以矽基板為主要試片，試片垂直置放於光學桌面，進行 ESPI 實驗將兩側換能器同時激振，才可拍攝到共振模態。本研究以矽晶太陽能電池為研究對象，將電池水平放置在光學桌面，容易檢測面內共振模態不同方向的位移及改變試片的激振方向。改進的實驗裝置可以避免垂直光學桌面的架設，造成夾持裝置的自重引太陽能電池邊緣的破損。因為換能器的激振能力提升，換能器以一側激振即可得清楚之共振模態。本研究以相同的支撐邊界，量測的電池共振頻率與 ESPI 拍攝清晰影像實驗的激振頻率不一致，兩頻率間的差值與錐形壓電換能器夾持太陽能電池的鬆緊有很大的關係，換能器夾持力道越大，在進行面內 ESPI 實驗時，驅動頻率越低。表 6.1 所列為本研究與[1]之單晶太陽能電池量測結果比較，兩者於前兩個面內共振模態的差異極其微小，在第三共振模態之後的 ESPI 影像則皆不相同，可能是兩研究使用不同製造廠商的太陽能電池，外在結構有明顯的差異，本研究電池在鋁材料上的柵狀匯流電極上下兩端長度各減少 10 mm。

面內 ESPI 實驗結果有四組組合，分別為換能器於 y 方向激振，量測 x、y 方向位移；x 方向激振，量測 x、y 方向位移。當試片為完整的太陽能電池，拍攝到的共振模態與數值模擬結果幾乎相同，僅在某些組合下無法拍攝到結果。換能器在不同方向激振，量測同一方向位移之 ESPI 影像大致相同(表 6.2)。代表太陽能電池上匯流電極不會影響面內共振模態的對稱性。

含貫穿裂縫之太陽能電池的面內共振模態變形數值很大，位移等高線受到裂縫位置影響而偏移的情形在單晶太陽能電池較明顯，數值模擬與實驗結果趨勢相同(表 6.3)。含貫穿裂縫太陽能電池的面內共振頻率會比完整者低，貫穿裂縫附近的光斑干涉條紋會有斜率不連續且干涉條紋斷開之特徵，運用此特徵可供判斷太陽能電池上貫穿裂縫之位置。含表面裂縫之太陽能電池的面內共振模態結果在裂縫處沒有不連續之特徵。相較完整太陽能電池，含表面裂縫之多晶太陽能電池的共振頻率降低、干涉條紋數目變少情況，惟面內 ESPI 實驗無法檢測出表面裂縫之位置。參考表 6.4 所列，貫穿裂縫的實驗與時諧分析結果一致，當面內激振與檢測方向都平行柵狀匯流電極，模擬結果的振幅較高，實驗結果的圖形較清楚。

由面外共振模態的模擬結果顯示，表面裂縫附近的干涉條紋有斜率不連續的 V 型輪廓，故含表面裂縫的太陽能電池在面外變形會有較明顯的特徵。ESPI 實驗無法拍攝到與模擬結果相同之共振模態，可能原因有兩項，其一為面外共振模態數目很多，且模態密度很高，ESPI 的驅動頻率附近有許多共振模態，所以無法準確激振出單一共振模態。其二為側邊夾持的實驗架構，不適合用在激振面外變形。面外 ESPI 的實驗結果，在表面裂縫處的干涉條紋有斜率不連續的 V 型輪廓，與模擬結果的特徵相似，可以此為依據判斷太陽能電池上表面裂縫之位置。

表 6.5 所列為貫穿裂縫與表面裂縫之 ESPI 實驗結果比較。面內 ESPI 實驗可拍攝到高頻之共振模態，干涉條紋具有對稱性。但是面外 ESPI 却無

法拍攝到共振模態。矽晶太陽能電池的面內振動模態密度低，面內位移小，適合檢測貫穿裂縫，不易檢出表面裂縫。面外振動模態密度高、面外位移大，雖無法準確激振出共振模態，但是仍可清晰拍攝單頻激振的電池振形，以面外振型容易檢出表面裂縫。

## 6.2 未來展望

在矽晶太陽能電池的製程中，大部分材料缺陷都是表面刮傷，再由刮傷成長成裂縫，裂縫缺陷又以表面裂縫為多數，故未來能以表面裂縫為主要研究課題。表面裂縫的特徵在面外變形比較容易顯現，可改良 ESPI 面外位移量測實驗架構，設計新的面外振動實驗夾具，致振器改成垂直太陽能電池表面激振，接收訊號之換能器也由表面接收。

未來可對表面裂縫做更深入的研究，像是裂縫長度與深度對共振頻率改變及 ESPI 實驗之影響，在數值模擬方面，可以對太陽能電池模型之元素類型改為接觸元素做分析，使裂縫更接近真實情形。

表 6.1-1 本研究量測太陽能電池面內共振模態與[1]之結果(I)

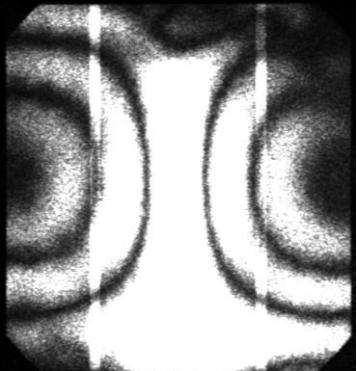
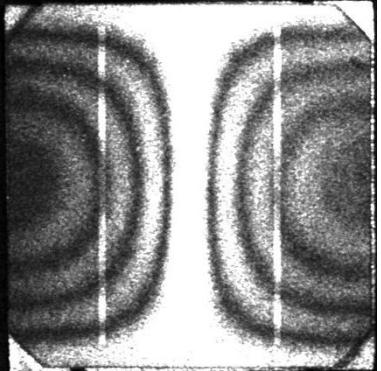
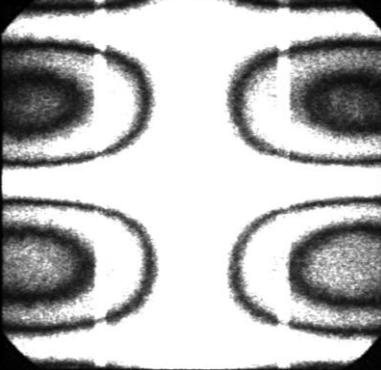
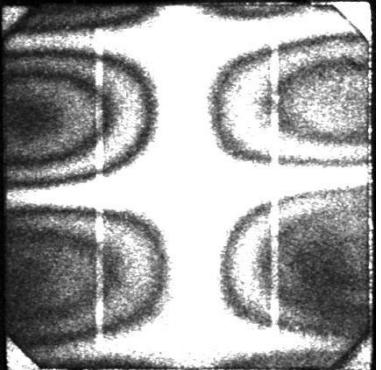
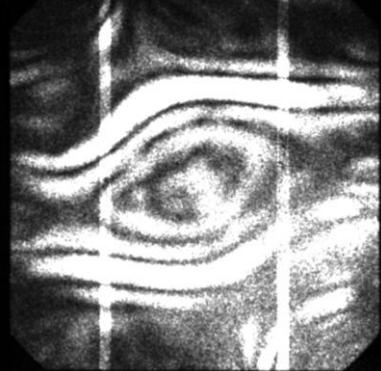
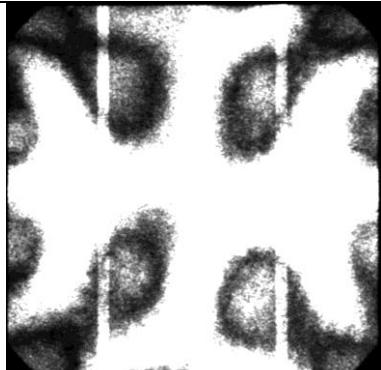
[1]	本研究
20.55 kHz	20.45 kHz
	
32.2 kHz	32.1 kHz
	
45.25 kHz	
	
47.8 kHz	
	

表 6.1-2 本研究量測太陽能電池面內共振模態與[1]之結果(II)

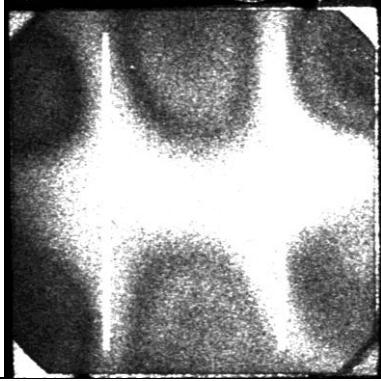
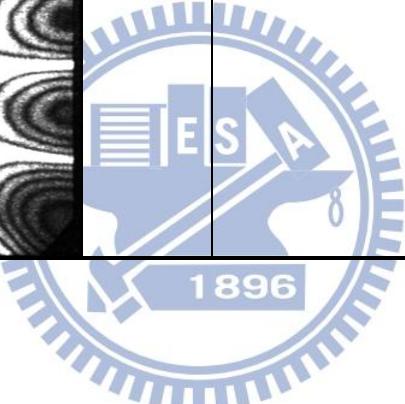
[1]	本研究
	57.23 kHz
	
58.4 kHz	 

表 6.2 多晶太陽能電池同一方向檢測之實驗結果

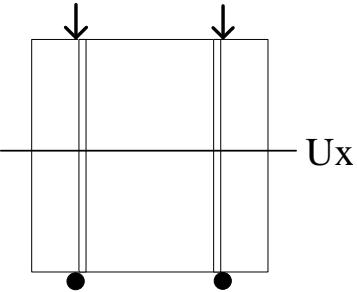
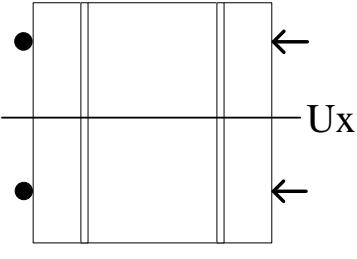
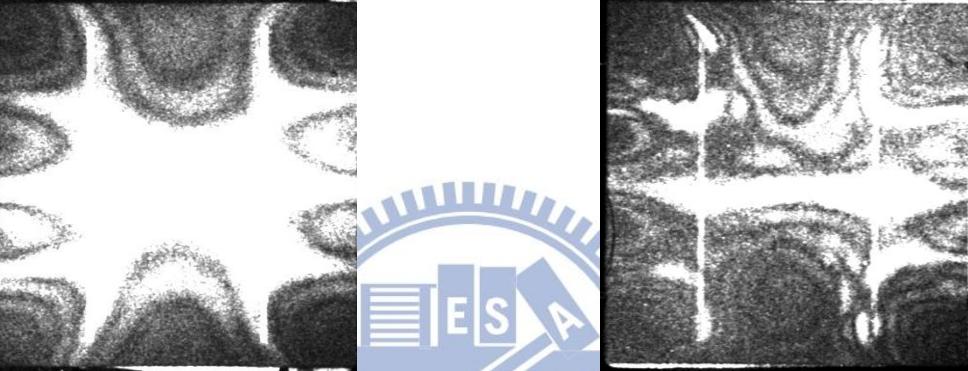
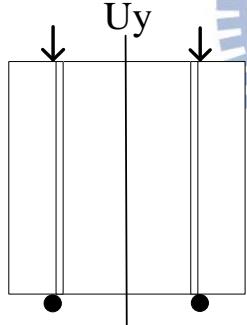
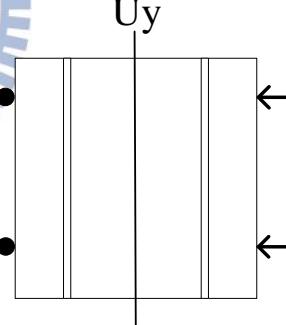
多晶太陽能電池	
	
57.23 kHz	57.21 kHz
	
	
57.18 kHz	57.2 kHz
	

表 6.3 貫穿裂縫對矽晶太陽能電池數值模擬與實驗結果

貫穿型裂縫之多晶太陽能電池		
數值模擬	ESPI 實驗	
檢測 y 方向	一側時諧外力、一側 $U_y = 0$ ， 檢測 y 方向	
43.706 kHz	45.88 kHz (貫穿)	46.53 kHz (完整)
貫穿型裂縫之單晶太陽能電池		
數值模擬	ESPI 實驗	
檢測 y 方向	一側時諧外力、一側 $U_y = 0$ ， 檢測 y 方向	
24.573 kHz	20.1 kHz (貫穿)	20.38 kHz (完整)
33.518 kHz	31.3 kHz (貫穿)	32.1 kHz (完整)

表 6.4 砷晶太陽能電池數值模擬與實驗結果

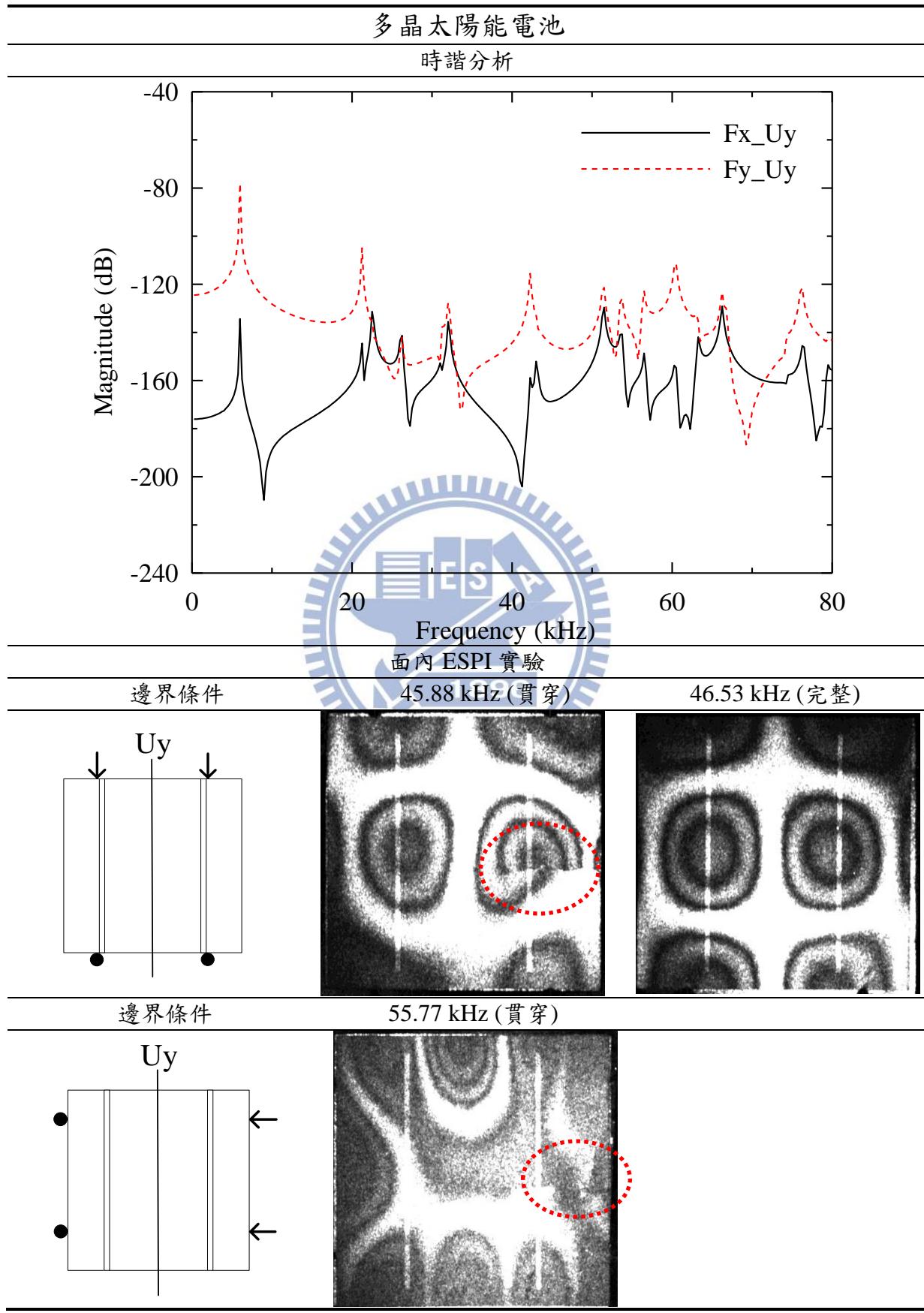


表 6.5 貫穿裂縫與表面裂縫之多晶太陽能電池實驗結果比較

貫穿裂縫(ESPI 面內位移量測)	表面裂縫(ESPI 面外位移量測)
45.88 kHz (貫穿)	70 Hz
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ESPI 面內位移量測系統可以拍攝到面內共振模態。</li> <li>2. 面內變形在 20 kHz 以下的模態密度為 <math>0.0001 \text{ } 1/\text{Hz}</math>。</li> <li>3. 面內共振頻率屬於 10 kHz 以上的高頻模態。</li> <li>4. 面內共振模態的干涉條紋具有對稱性，條紋數目少。</li> <li>5. 貫穿裂縫處之干涉條紋有斷開且斜率不連續之特徵，裂縫兩側光斑干涉條紋數不同。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ESPI 面外位移量測系統無法拍攝到太陽能電池之共振模態。</li> <li>2. 面外變形在 20 kHz 以下的模態密度為 <math>0.02725 \text{ } 1/\text{Hz}</math>。</li> <li>3. 不論高頻或低頻，拍攝得到之光斑干涉條紋差異性很小，應非共振模態。</li> <li>4. 面外振型條紋數目較多。</li> <li>5. 表面裂縫之干涉條紋有斜率不連續之 V 型輪廓，裂縫兩側光斑干涉條紋數相同。</li> </ol>

## 參考文獻

- [1] 鄭志遠 (2011), 砂基板面內共振的電子光斑干涉量測, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 新竹市, 台灣。
- [2] J. N. Butters and J. A. Leendertz (1971), “Speckle patterns and holographic techniques in engineering metrology,” *Optics Laser Technol.*, **3**(1), 26–30.
- [3] K. Høgmoen and O. J. Løkberg (1977), “Detection and measurement of small vibrations using electronic speckle pattern interferometry,” *Applied Optics*, **16**(7), 1869-1875.
- [4] W.-C. Wang, C.-H. Hwang, and S.-Y. Lin (1996), “Vibration measurement by the time-average electronic speckle pattern interferometry methods,” *Applied Optics*, **35**(22), 4502-4509.
- [5] C.-H. Huang and C.-C. Ma (2000), “Vibration of cracked circular plates at resonance frequencies,” *Journal of Sound and Vibration*, **236**(4), 637-656.
- [6] V. M. Murukeshan, Y. F. Lai, V. Krishnakumar, L. S. Ong, and A. Asundi (2003), “Development of Matlab filtering techniques in digital speckle pattern interferometry,” *Optics and Laser in Engineering*, **39**, 441-448.
- [7] C.-C. Ma, Y.-C. Lin, and H.-Y. Lin (2008), “Dynamic in-plane resonant characteristics of piezoceramic and piezolaminated composite plates,” *IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **55**(3), 526-537.
- [8] S. Ostapenko and I. Tarasov (2000), “Nonlinear resonance ultrasonic vibrations in Czochralski-silicon wafers,” *Applied Physics Letters*, **76**(16), 2217-2219.
- [9] S. Ostapenko, W. Dallas, D. Hess, O. Polupan, and J. Wohlgemuth (2006), “Crack detection and analyses using resonance ultrasonic vibrations in crystalline silicon wafers,” *IEEE*, 920-923.
- [10] S. Ostapenko, A. Belyaev, O. Polupan, W. Dallas, and D. Hes (2006), “Crack detection and analyses using resonance ultrasonic vibrations in

- full-size crystalline silicon wafers,” *Applied Physics Letters*, **88**, 111907.
- [11] A. Belyaev, O. Polupan, S. Ostapenko, D. Hess, and J. P Kalejs (2006), “Resonance ultrasonic vibration diagnostics of elastic stress in full-size silicon wafers,” *Semiconductor Science and Technology*, **21**, 254-260.
- [12] W. Dallas, O. Polupan, and S. Ostapenko (2007), “Resonance ultrasonic vibration for crack detection in photovoltaic silicon wafers,” *Measurement Science and Technology*, **18**, 852-858.
- [13] C. Hilmersson, D. P. Hess, W. Dallas, and S. Ostapenko (2007), “Crack detection in single-crystalline silicon wafers using impact testing,” *Applied Acoustics*, **69**, 755–760
- [14] A. Monastyrskyi, S. Ostapenko, O. Polupan, H. Maeckel, and M. A. Vazquez (2008), “Resonance ultrasonic vibrations for in-line crack detection in silicon wafers and Solar Cells,” *IEEE the 33th Photovoltaic Specialists Conference*.
- [15] A. Belyaev, Yu. Emirov, S. Ostapenko , I. Tarasov, V. Verstraten, M. Van Dooren, P. G. Fumei, G. Van Veghel, P. Bentz, and A. Van Der Heide (2009), “Yield enhancement for solar cell manufacturing using resonance ultrasonic vibrations inspection,” *IEEE the 34th Photovoltaic Specialists Conference*, 001918-001921.
- [16] Yu. Emirov, A. Belyaev, D. Cruson , I. Tarasov, A. Kumar, H. Wu, S. Melkote, and S. Ostapenko (2011), “Pinhole detection in si solar cell using resonance ultrasonic vibrations,” *IEEE the 37th Photovoltaic Specialists Conference*, 002161-002163.
- [17] 溫子達 (2012), 電子光斑干涉術應用於矽晶太陽能電池之裂縫檢測, 國立交通大學機械工程學系博士論文, 新竹市, 台灣。
- [18] ANSYS, *Release 11.0 Documentation for ANSYS :Element Library*. SAS IP, Inc., USA, 2007.

## 附錄

參考圖 2.2 所示之 ESPI 面內振動量測實驗系統示意圖，雷射光通過一分光鏡，分成兩亮度相同之光束，經折射鏡折射，及空間濾波器擴束後，兩均勻光團照射於待測試片上，最後由 CCD 相機擷取影像。

當物體靜止狀態時，CCD 所擷取到的光強度可以表示為

$$I_1 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\phi_o - \phi_r) \quad (2.6)$$

(2.6)式中  $I_o$ 、 $I_r$  分別為從分光鏡分出兩對稱物光之光強。

當待測物於振動狀態時，因振動使待測物產生位移，兩物光會產生相位差。假設待測物振動的振幅為  $A$ ，則相位差  $\Delta\phi$  可表示為

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (A \cos \omega t \sin \theta) = \Gamma A \cos \omega t \quad (2.7)$$

此處， $\Gamma = \frac{4\pi}{\lambda} (\sin \theta)$ ， $\Gamma$  為位移靈敏度之值，靈敏度大小與整體系統架構有關， $\theta$  為物光與 CCD 觀察方向之夾角， $\omega$  為振動角頻率。

在 CCD 取樣過程中，會連續存取物體的振動影像，再對時間平均即為均時法。當物體振動時，CCD 相機所擷取的光強度可表示為

$$I_2 = I_o + I_r + \frac{2}{\tau} \sqrt{I_o I_r} \int_0^\tau \cos[(\phi_o - \phi_r) + \Gamma A \cos \omega t] dt \quad (2.8)$$

此處， $\tau$  為 CCD 取像曝光時間，上式的積分項可重新整理為

$$\int_0^\tau \cos[(\phi_o - \phi_r) + \Gamma A \cos \omega t] dt = \operatorname{Re} \left\{ e^{i(\phi_o - \phi_r)} \int_0^\tau \exp(i\Gamma A \cos \omega t) dt \right\} \quad (2.9)$$

應用三角函數的關係，可知

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right) = \sin\frac{\pi}{2} \cos \omega t - \cos\frac{\pi}{2} \sin \omega t = \cos(\omega t) \quad (2.10)$$

將(2.10)式代回(2.9)式，可得

$$\begin{aligned} & \operatorname{Re} \left\{ e^{i(\phi_0 - \phi_r)} \int_0^\tau \exp(i\Gamma A \cos \omega t) dt \right\} \\ &= \operatorname{Re} \left\{ e^{i(\phi_0 - \phi_r)} \int_0^\tau \exp \left[ i\Gamma A \sin \left( \frac{\pi}{2} - \omega t \right) \right] dt \right\} \end{aligned} \quad (2.11)$$

因為，

$$e^{iz \sin \theta} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(z) e^{in\theta} \quad (2.12)$$

將(2.12)與(2.9)式比較，得  $z = \Gamma A$ 、 $\theta = \pi/2 - \omega t$ ，代回(2.6)式中得

$$\begin{aligned} & \operatorname{Re} \left\{ e^{i(\phi_0 - \phi_r)} \int_0^\tau \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\Gamma A) e^{in(\frac{\pi}{2} - \omega t)} dt \right\} \\ &= \operatorname{Re} \left\{ e^{i(\phi_0 - \phi_r)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\Gamma A) e^{in\frac{\pi}{2}} \frac{e^{-in\omega\tau} - 1}{-in\omega} \right\} \end{aligned} \quad (2.13)$$

假設曝光時間  $\tau$  內待測試片振動了  $k$  次，且令  $\delta$  為 CCD 曝光時間  $\tau$  與待測試片振動  $k$  次兩者時間差， $\delta$  可表為

$$\delta = \tau - \frac{2k\pi}{\omega} \quad (2.14)$$

假設待測試片於高頻狀態下進行振動， $\delta$  為一極小值，因此可簡化為

$$\tau = \frac{2k\pi}{\omega} \quad (2.15)$$

將(2.15)式代入(2.13)式中，可得

$$\operatorname{Re} \left\{ e^{i(\phi_o - \phi_r)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\Gamma A) e^{\frac{in\pi}{2}} \frac{e^{-i2kn\omega\pi} - 1}{-in\omega} \right\} \quad (2.16)$$

由(2.16)可知，當  $n=0$  時因此式不為零，其餘皆為零，因此將  $n=0$  帶入(2.13)式，可得

$$\begin{aligned} & \operatorname{Re} \left\{ e^{i(\phi_o - \phi_r)} \int_0^\tau \sum_{n=0} J_n(\Gamma A) e^{in(\frac{\pi}{2} - \omega t)} dt \right\} \\ &= \operatorname{Re} \left\{ e^{i(\phi_o - \phi_r)} J_0(\Gamma A) \int_0^\tau 1 \cdot dt \right\} = \tau [\cos(\phi_o - \phi_r)] J_0(\Gamma A) \end{aligned} \quad (2.17)$$

經整理可得

$$\int_0^\tau \cos[(\phi_o - \phi_r) + \Gamma A \cos \omega t] dt = \tau [\cos(\phi_o - \phi_r)] J_0(\Gamma A) \quad (2.18)$$

將(2.18)式代入(2.8)式中，可得

$$I_2 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} [\cos(\phi_o - \phi_r)] J_0(\Gamma A) \quad (2.19)$$

其中， $J_0$  為零階第一類貝索函數(zero-order Bessel function of the first kind)。

將(2.19)式減去(2.6)式，即為靜止與振動彼此光強度相減，可表示為

$$I = I_2 - I_1 = 2\sqrt{I_o I_r} [\cos(\phi_o - \phi_r) [J_0(\Gamma A) - 1]] \quad (2.20)$$

參考 1996 年，Wang *et al* [4] 提出的振幅變動電子光斑干涉術，採用 CCD 擷取兩振幅不同的動態影像進行影像處理，其基本理論如下。

首先擷取振動試片的影像，作為參考影像，光強可表為

$$I_1 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left\{ I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos \left[ (\phi_o - \phi_r) + \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta A \cos \omega t \right] \right\} dt \quad (2.21)$$

其中， $\theta$  為物光與 CCD 觀測方向之夾角， $A$  為擷取影像時試片的振幅。

仿照先前影像相減推導方式，可將參考光之光強可表為

$$I_1 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} [\cos(\phi_o - \phi_r)] J_0(\Gamma A) \quad (2.22)$$

將激振做微小振幅改變，擷取第二張影像，令  $\Delta A$  為振幅變化，此時光強度可表示為

$$I_2 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left\{ I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos \left[ (\phi_o - \phi_r) + \Gamma(A + \Delta A) \cos \omega t \right] \right\} dt \quad (2.23)$$

由於，

$$\begin{aligned} & \int_0^\tau \cos \left[ (\phi_o - \phi_r) + \Gamma(A + \Delta A) \cos \omega t \right] dt \\ &= \operatorname{Re} \left\{ e^{i(\phi_o - \phi_r)} \int_0^\tau \exp[i\Gamma(A + \Delta A) \cos \omega t] dt \right\} \\ &= \operatorname{Re} \left\{ e^{i(\phi_o - \phi_r)} \int_0^\tau \exp(i\Gamma A \cos \omega t) \exp(i\Gamma \Delta A \cos \omega t) dt \right\} \end{aligned} \quad (2.24)$$

將  $\exp(i\Gamma \Delta A \cos \omega t)$  以泰勒級數展開

$$\begin{aligned} \exp(i\Gamma \Delta A \cos \omega t) &= 1 + (i\Gamma \Delta A \cos \omega t) \\ &+ \frac{1}{2!} (i\Gamma \Delta A \cos \omega t)^2 + \dots \end{aligned}$$

忽略三次以上高次項後代回(2.24)式積分，可得

$$\begin{aligned} & \int_0^\tau \cos \left[ (\phi_o - \phi_r) + \Gamma(A + \Delta A) \cos \omega t \right] dt \\ &= \tau \left[ 1 - \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2 \right] J_0(\Gamma A) \cos(\phi_o - \phi_r) \end{aligned} \quad (2.25)$$

將(2.25)式代回(2.23)式，可得第二張擷取影像之光強，可表為

$$I_2 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\phi_o - \phi_r) \left[ 1 - \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2 \right] J_0(\Gamma A) \quad (2.26)$$

將兩影像相減，即(2.26)式減去(2.21)式可表示為

$$\begin{aligned}
I = I_2 - I_1 &= 2\sqrt{I_o I_r} \left| \cos(\phi_o - \phi_r) \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2 J_0(\Gamma A) \right| \\
&= \frac{\sqrt{I_o I_r}}{2} \left| \cos(\phi_o - \phi_r) \Gamma^2 (\Delta A)^2 J_0(\Gamma A) \right|
\end{aligned} \tag{2.27}$$

其中  $\cos(\phi_o - \phi_r)$  為一空間頻域高頻項，而  $|J_0(\Gamma A)|$  為變化較緩慢之空間頻域低頻項，因此可知光斑條紋亮度是由此低頻項所致。

考慮  $|J_0(\Gamma A)|$  項，令  $k_i = \Gamma A$ ，可得

$$A = \frac{k_i}{\Gamma} = \frac{\lambda k_i}{4\pi \sin \theta} \quad (i=1,2,3\dots) \tag{2.28}$$

當振幅  $A=0$  時， $|J_0(k_i)|$  為最大值，恰好對應振動時節線區影像亮度最亮的實驗結果，由(2.28)式可知振幅與波長關係正比於  $k_i$ ，其中  $k_i$  為  $|J_0(K)|$  各峰值對應之  $K$  值，這些值皆代表節線影像為最亮區域即亮紋。

同理，令  $k_j = \Gamma A$ ，可得

$$A = \frac{k_j}{\Gamma} = \frac{\lambda k_j}{4\pi \sin \theta} \quad (i=1,2,3\dots) \tag{2.29}$$

令  $k_j$  為  $|J_0(K)|=0$  的解，即對應  $|J_0(K)|$  谷值之  $K$  值，這代表節線影像最暗處即暗紋。

由(2.7)式當干涉亮紋產生，相位差為

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (A \cos \omega t \sin \theta) = 2n\pi \quad (n=0,1,2\dots) \tag{2.30}$$

整理(2.30)式得面內位移  $d_x$ ，

$$d_x = A \cos(\omega t) = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} \tag{2.31}$$

(2.31)式代表 CCD 擷取的光斑干涉圖形，每多一條干涉條紋，就增加  $\lambda/2 \sin \theta$  的面內位移。