

國立交通大學  
機械工程學系碩士班  
碩士論文

含裂縫太陽能電池基板面內共振的  
電子光斑干涉檢測

In-plane Resonance Measurement of Cracked Photovoltaic Cell  
Substrates Using Electronic Speckle Pattern Interferometry

研究生：賴佑年

指導教授：尹慶中 博士

中華民國九十九年七月

含裂縫太陽能電池基板面內共振的電子光斑干涉檢測  
In-plane Resonance Measurement of Cracked Photovoltaic Cell  
Substrates Using Electronic Speckle Pattern Interferometry

研究生：賴佑年

Student：Yu-Nien Lai

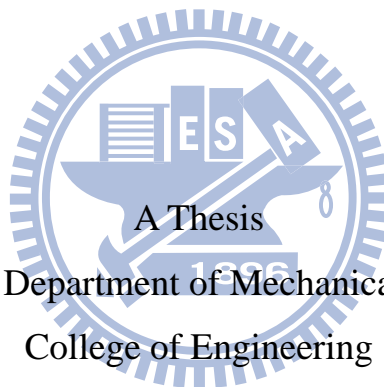
指導教授：尹慶中 博士

Advisor：Dr. Ching-Chung Yin

國立交通大學

機械工程學系碩士班

碩士論文



Submitted to Department of Mechanical Engineering  
College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

In

Mechanical Engineering

July 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

# 含裂縫太陽能電池基板面內共振的電子光斑干涉檢測

研究生：賴佑年

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

基板面積愈來愈大，厚度愈來愈薄是矽基太陽能電池的發展趨勢。矽的剛性高、韌性低，製程中矽基板容易產生寬度細微的裂縫，造成模組程序或日後應用上發生災難性破損。以目視或機器視覺辨識這些裂縫耗費時間甚巨。本文應用電子光斑干涉術，量測太陽能電池基板的面內共振模態，研發基板裂縫的全域光學非破壞檢測技術。平板結構之面外共振的模態密度高，不易辨識裂縫對於共振模態的影響，故採取模態間隔較疏之面內共振檢測裂縫位置。本研究採用一片壓電纖維複材作為致動器，黏貼於基板邊緣，驅動基板產生面內振動。以振幅擾動電子光斑干涉術量測太陽能電池基板之低階面內共振模態，證實數值分析完整太陽能電池基板面內共振結果的正確性。含裂縫太陽能電池基板的結構剛性減少，面內共振頻率較完整的電池基板低，裂縫兩側面內位移之不連續突顯出裂縫的存在，電子光斑條紋朝向裂縫處偏移，成功地標示出裂縫位置。

關鍵詞：電子光斑干涉術、太陽能電池、面內共振模態量測、裂縫偵測

# In-plane Resonance Measurement of Cracked Photovoltaic Cell Substrates Using Electronic Speckle Pattern Interferometry

Student: Yu-Nien Lai

Advisor: Dr. Ching-Chung Yin

Department of Mechanical Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

The trend of silicon-based photovoltaic cells is toward increasing wafer size and decreasing substrate thickness. However, silicon has high stiffness and low toughness. Micro-defects having tiny crack width are frequently generated in the brittle cell substrates during manufacture and results in catastrophic failure in module process or later application. It is very time consuming to detect those defects by human eyes or machine vision technology. This thesis develops a full-field optical nondestructive technique to detect defects in cell substrates by application of electronic speckle pattern interferometry (ESPI) to measure its in-plane resonant vibration. The modal density of out-of-plane resonant vibration is high for a planar structure. It is of difficulty to identify the influence of cracks in accordance with out-of-plane resonance. The in-plane resonance featuring clear modal separation has potential to detect the crack and its position. An active fiber composite adhered to one edge of the cell substrate is used to actuate in-plane vibration. Lower in-plane resonant modes are measured by the amplitude-fluctuation ESPI method. Numerical analysis of in-plane vibration for the integrated photovoltaic cells has been validated by experimental measurement. The cracked cell substrate has lower resonant frequency for in-plane vibration than the integrated one due to lower stiffness. The discontinuous displacement field across the crack faces characterizes the appearance of defect. Further, the speckle fringes intensively moving toward the crack could be an indication of the crack position.

Keywords: Electronic speckle pattern interferometry, Photovoltaic cell, In-plane resonant modes, Crack detection

## 誌 謝

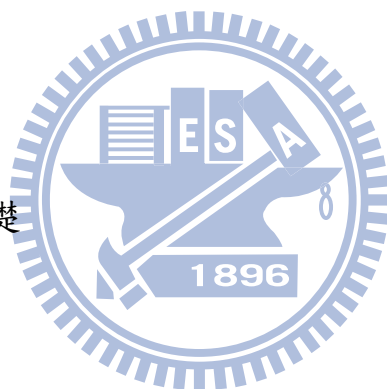
首先感謝恩師尹慶中 博士兩年來細心栽培與指導，使本論文能順利完成，在此致上由衷的謝意。並感謝黃順發老師、何旭川老師及蕭國模老師在百忙之中抽空前來擔任口試委員，對本論文不吝指正，提出許多精闢的建議，使本論文內容更完備。

感謝非破壞評估實驗室博士班學長游泰和、許世明、王多聞、劉育翔及溫子達的關心與幫助，引領我適應研究所的生活，並於研究過程中提供許多寶貴的意見與經驗。特別感謝碩士班學長鍾重光、黃康哲及學姐張逸涵，於我碩一時在學業上的勉勵與經驗之分享，亦感謝同學鄭博毅與吳昱瑾，在研究的路上給予扶持與鼓勵，有幸與你們一起度過碩士生涯，讓我學習到許多不同的事物，增加自己的眼界。學弟吳家宇、鄭智遠、黃室維、湯士杰、蔡慶芳與蔡旻軒，感謝在過去一年的支持與陪伴，讓我順利跨過生活上的瓶頸，並讓我生活增色不少，在此預祝你們能順利畢業。並感謝顏同學於大學及研究所畢業前近四年的陪伴與支持，與好友舜子平日的關心與鼓勵。

最後，感謝我最摯愛的雙親與弟弟，讓我在求學路上能夠在挫折中，仍能夠爬起繼續向上前進，有你們的支持讓我能有勇氣面對挑戰。本論文亦要感謝久元電子提供硬體上的支援，讓本論文能順利完成。謹以此論文獻給我摯愛的家人、師長及好友。

# 目 錄

	頁次
中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表目錄	vi
圖目錄	vii
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究背景	2
1.3 文獻回顧	3
1.4 內容簡述	5
第二章 電子光斑理論基礎	7
2.1 光斑干涉技術	7
2.2 電子光斑干涉術	8
2.2.1 面外振動的量測	8
2.2.2 面內振動的量測	11
第三章 數值模擬分析與討論	13
3.1 三維有限元素分析	13
3.2 面內共振頻率與模態	13
3.2.1 完整的太陽能矽基板	14
3.2.2 含裂縫的太陽能矽基板	15
3.3 結果與討論	17
第四章 實驗量測與結果討論	18
4.1 共振頻率量測系統	18



4.1.1 雷射都卜勒振動儀	18
4.1.2 面內共振頻率	19
4.2 電子光斑干涉術之面內振動量測	19
4.2.1 完整太陽能電池面內振動模態	20
4.2.2 含缺陷太陽能電池面內振動模態	21
4.3 實驗結果與討論	21
第五章 結論與未來展望	23
5.1 實驗結果與數值模擬分析之結論	23
5.2 未來展望	24
參考文獻	25
附表	27
附圖	31



## 表目錄

表 1	太陽能電池基板材料參數	27
表 2	LDV 量測太陽能電池基板 S1 試片的面內共振頻率	28
表 3	LDV 量測太陽能電池基板 S2 試片的面內共振頻率	28
表 4	LDV 量測太陽能電池基板 S1 與 S2 試片面內共振頻率之誤差	29
表 5	LDV 量測完整與含缺陷的太陽能基板 S1 試片共振頻率之比較	29
表 6	完整太陽能電池基板面內共振頻率的計算值與 AF-ESPI 驅動頻率比較	30
表 7	LDV 量測完整太陽能電池基板的面內共振頻率與 AF-ESPI 驅動頻率比較	30





## 圖目錄

圖 2.1	典型的光斑圖	31
圖 2.2	電子光斑干涉術面外振動量測架構	31
圖 2.3	電子光斑干涉術面內振動量測架構	32
圖 3.1	5 吋太陽能電池矽基板幾何尺寸(a)上視圖、(b)側視圖	33
圖 3.2	完整太陽能電池矽基板有限元素網格	33
圖 3.3	太陽能電池矽基板的模擬施力	34
圖 3.4	含裂縫太陽能電池矽基板的有限元素模型	35
圖 3.5	完整太陽能電池矽基板的面內位移頻率響應曲線	35
圖 3.6	太陽能電池矽基板面內共振頻率 20.08kHz 對應之振形	36
圖 3.7	太陽能電池矽基板面內共振頻率 20.08kHz 對應之振形(a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量	36
圖 3.8	太陽能電池矽基板面內共振頻率 25.2kHz 對應之振形	37
圖 3.9	太陽能電池矽基板面內共振頻率 25.2kHz 對應之振形(a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量	37
圖 3.10	太陽能電池矽基板面內共振頻率 27.28kHz 對應之振形	38
圖 3.11	太陽能電池矽基板面內共振頻率 27.28kHz 對應之振形(a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量	38
圖 3.12	太陽能電池矽基板面內共振頻率 29.36kHz 對應之振形	39
圖 3.13	太陽能電池矽基板面內共振頻率 29.36kHz 對應之振形(a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量	39
圖 3.14	太陽能電池矽基板面內共振頻率 39.76kHz 對應之振形	40
圖 3.15	太陽能電池矽基板面內共振頻率 39.76kHz 對應之振形(a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量	40
圖 3.16	太陽能電池矽基板面內共振頻率 48.16kHz 對應之振形	41
圖 3.17	太陽能電池矽基板面內共振頻率 48.16kHz 對應之振形(a)X 方向位移	

分量、(b)Z 方向位移分量	41
圖 3.18 含裂縫太陽能電池矽基板的面內位移頻率響應曲線	42
圖 3.19 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 19.2kHz 對應之振形	42
圖 3.20 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 19.2kHz 對應之振形(a)X 方向 位移分量、(b)Z 方向位移分量	43
圖 3.21 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 20.24kHz 對應之振形	43
圖 3.22 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 20.24kHz 對應之振形(a)X 方 向位移分量、(b)Z 方向位移分量	44
圖 3.23 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 24.48kHz 對應之振形	44
圖 3.24 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 24.48kHz 對應之振形(a)X 方 向位移分量、(b)Z 方向位移分量	45
圖 3.25 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 27.2kHz 對應之振形	45
圖 3.26 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 27.2kHz 對應之振形(a)X 方向 位移分量、(b)Z 方向位移分量	46
圖 3.27 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 29.28kHz 對應之振形	46
圖 3.28 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 29.28kHz 對應之振形(a)X 方 向位移分量、(b)Z 方向位移分量	47
圖 3.29 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 35.68kHz 對應之振形	47
圖 3.30 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 35.68kHz 對應之振形(a)X 方 向位移分量、(b)Z 方向位移分量	48
圖 3.31 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 39.44kHz 對應之振形	48
圖 3.32 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 39.44kHz 對應之振形(a)X 方 向位移分量、(b)Z 方向位移分量	49
圖 3.33 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 47.84kHz 對應之振形	49
圖 3.34 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 47.84kHz 對應之振形(a)X 方 向位移分量、(b)Z 方向位移分量	50

圖 4.1	太陽能電池 X-Z 座標平面之定義	51
圖 4.2	雷射都卜勒振動儀量測實驗之試片治具	51
圖 4.3	雷射都卜勒振動儀實驗架構示意圖	52
圖 4.4	太陽能電池下緣黏貼主動式壓電纖維複材作為激振源	52
圖 4.5	以 LDV 量測面內共振頻率之太陽能電池及量測點(a)試片 S1、(b)試片 S2	53
圖 4.6	LDV 量測太陽能電池 S1 試片 A 點之面內振動的頻率響應曲線	54
圖 4.7	LDV 量測太陽能電池 S1 試片 A 點之面內振動的相位頻率響應曲線	54
圖 4.8	LDV 量測太陽能電池 S1 試片 B 點之面內振動的頻率響應曲線	55
圖 4.9	LDV 量測太陽能電池 S1 試片 B 點之面內振動的相位頻率響應曲線	55
圖 4.10	LDV 量測太陽能電池 S1 試片 C 點之面內振動的頻率響應曲線	56
圖 4.11	LDV 量測太陽能電池 S1 試片 C 點之面內振動的相位頻率響應曲線	56
圖 4.12	LDV 量測太陽能電池 S2 試片 A 點之面內振動的頻率響應曲線	57
圖 4.13	LDV 量測太陽能電池 S2 試片 A 點之面內振動的相位頻率響應曲線	57
圖 4.14	LDV 量測太陽能電池 S2 試片 B 點之面內振動的頻率響應曲線	58
圖 4.15	LDV 量測太陽能電池 S2 試片 B 點之面內振動的相位頻率響應曲線	58
圖 4.16	LDV 量測太陽能電池 S2 試片 C 點之面內振動的頻率響應曲線	59
圖 4.17	LDV 量測太陽能電池 S2 試片 C 點之面內振動的相位頻率響應曲線	59
圖 4.18	含裂縫太陽能電池基板照片(a)試片整體照片、(b)缺陷放大照片	60
圖 4.19	LDV 量測含裂縫太陽能電池基板面內振動的頻率響應曲線	61
圖 4.20	LDV 量測含裂縫太陽能電池基板面內振動的相位頻率響應曲線	61

圖 4.21	電子光斑干涉術量測面內振動的光路架設照片	62
圖 4.22	LabVIEW 圖控程式介面(a)實驗參數面板、(b)影像擷取面板	63
圖 4.23	自動化電子光斑面內振動實驗流程圖	64
圖 4.24	完整太陽能電池基板於 19.8kHz 驅動頻率下之 X 方向位移分量 (a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線	65
圖 4.25	完整太陽能電池基板於 19.8kHz 驅動頻率下之 Z 方向位移分量 (a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線	66
圖 4.26	完整太陽能電池基板於 29.85kHz 驅動頻率下之 X 方向位移分量 (a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線	67
圖 4.27	完整太陽能電池基板於 29.85kHz 驅動頻率下之 Z 方向位移分量 (a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線	68
圖 4.28	完整太陽能電池基板於 38.65kHz 驅動頻率下之 X 方向位移分量 (a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線	69
圖 4.29	完整太陽能電池基板於 38.65kHz 驅動頻率下之 Z 方向位移分量 (a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線	70
圖 4.30	完整太陽能電池基板於 48.25kHz 驅動頻率下之 X 方向位移分量 (a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線	71
圖 4.31	完整太陽能電池基板於 48.25kHz 驅動頻率下之 Z 方向位移分量 (a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線	72
圖 4.32	含裂縫太陽能電池基板於 19.06kHz 驅動頻率下之 X 方向位移分量 (a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬之位移等高線	73
圖 4.33	含裂縫太陽能電池基板於 19.06kHz 驅動頻率下之 Z 方向位移分量 (a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬之位移等高線	74
圖 4.34	AF-ESPI 量測(a)完整、(b)含裂縫之太陽能電池基板面內共振模態之	

X 方向振形光斑條紋

75

圖 4.35 AF-ESPI 量測(a)完整、(b)含裂縫之太陽能電池基板面內共振模態之

Z 方向振形光斑條紋

76



# 第一章 緒 論

## 1.1 前言

人類邁入 21 世紀，環保意識日漸高漲，地球的能源逐漸消耗枯竭。台灣缺乏天然資源，百分之九十以上的能源必須從國外進口，因此我們應該多利用一些天然資源，如太陽能、風能發電等。台灣地處亞熱帶區，陽光充足，日照量大，非常適合開發太陽能做為替代能源。除了曝曬與集光點燃等直接利用太陽能的方法外，也可以將太陽能轉換成熱能及電能，進一步加以使用。例如：太陽能計算機、太陽能手電筒及日常生活中常用到的太陽能熱水器。

太陽能的發展歷史可溯至 19 世紀即發現之「光起電力」行為。1950 年代，隨著半導體物性的逐漸了解及製程技術的進步，第一個太陽能電池 (photovoltaic cell) 於 1954 年誕生在美國的貝爾實驗室。1973 年發生石油危機，讓世界各國警覺到能源開發的重要性。美國於 1983 年在加州建立世界上最大的太陽能電廠，它的發電量高達 16 百萬瓦特。非洲南部的國家位於赤道附近，陽光充足，也成立了許多太陽能發電專案，鼓勵偏遠的鄉村地區安裝低成本的太陽能電池發電系統。

近年來，台灣廠商對太陽能電池產業的投資逐漸感到興趣，主要原因除了國際市場的需求外，台灣日照充足，是個非常適合利用太陽能電力的地方。另一因素是台灣官方從 1999 年起，開始大力推展太陽能電池發電，並且著手推動各項獎勵措施，投入這一個事業的業者明顯增加。

太陽能電池通常以矽為主材料，可以分為單晶矽、多晶矽與非晶矽三大類。矽原子具高度的週期性排列，單晶矽的成長以柴氏長晶法 (Czochralski method) 為主，將高濃度的多晶矽熔融在坩鍋中，再把晶體插入矽熔融液中，以適當的速率旋轉，並緩慢地往上拉引，長成矽晶柱，再將晶柱切割成 100-200 $\mu\text{m}$  的單晶矽晶板。多晶矽是指材料由許多不同的小單晶所構成，其製作方法是把熔融的矽鑄造固化而成。而非晶矽則是指整個材料中，只在幾個原

子或分子範圍內，原子排列具週期性，在大部分材料中，甚至根本沒有週期性的原子排列結構。通常以化學氣相沉積法(chemical vapor deposition, CVD)作為製作方法，在基板上長成非晶矽的薄膜。由於材料的晶體結構不同，各材料的光電特性也會有所不同。

單晶矽太陽能電池的光電轉換效率最高，使用年限也較長，適合用於發電廠或交通照明號誌的使用。在切割與再加工的手續上，多晶矽的太陽能電池較單晶矽困難，其效率也較低，製程簡單與成本低廉是它的優勢。因此，在部分低功率的電力應用系統上，採用這類的太陽能電池。非晶矽的太陽能電池價格最低，生產速率最快，所以非晶矽的太陽能電池較常應用於消費型電子商品，新的應用也不斷地研發中。

## 1.2 研究背景

由於純度高的矽礦日漸減少，現今太陽能電池矽基板的厚度愈來愈薄，矽屬於高剛度脆性材料，製程中的損傷容易產生寬度細微的裂縫，這些裂縫以自動化光學檢測的檢出率很低。若太陽能矽基板在生產時已存有裂縫，經過錫焊串聯成模組(module)的過程，很容易破碎，連帶已串聯的部分都無法使用，造成成本的消耗。

太陽能電池裂縫檢測在近十年內是相當熱門的研究，本研究應用電子光斑干涉術(electronic speckle pattern interferometry, ESPI)量測太陽能電池基板的面內共振模態，做為全域光學檢測太陽能電池基板裂縫位置的方法。太陽能電池基板裂縫的檢測方法莫不盡量將裂縫與周遭的差異放大，以便提高檢出率。Rakotoniaina *et al* [1]於2004年，利用超音波鎖相熱影像法(ultrasound lock-in thermography, ULT)檢測太陽能電池基板，此法是將超音波入射於太陽能矽基板內，彈性波會使裂縫面發生摩擦，局部產生熱量，再以熱影像儀擷取溫度分佈影像，檢測矽晶板的裂縫位置。

同年，Zhuang *et al* [2]利用數位影像處理的技巧，以自動化光學檢測太陽

能電池的裂縫與缺陷之位置。數位影像的像素(pixel)可以視為一個矩陣，矩陣中的每一個元素是由 0(全黑)~255(全白)的數字所組成。當太陽能電池中含有裂縫或缺角時，以光電耦合元件(charge-coupled device, CCD)擷取到的影像矩陣裏，對應的像素值會與相鄰像素值存在差異，運用灰階轉換、影像調節等數位影像處理的演算法，可進行裂縫、缺角及電極斷線的檢測。

太陽能電池吸收可見光，轉換成電能。Fuyuki *et al* [3]於 2005 年，根據這種特性將太陽能電池通電激發出可見光，這種方法稱為電激螢光(electroluminescence, EL)。透過物鏡以光電耦合元件擷取影像，分析影像中的光強度，以光強的不同判別太陽能電池的瑕疵位置。這種檢測原先是用來判斷太陽能電池在製程中需要摻入雜質的良莠，Trupke *et al* [4]於 2007 年，利用光激螢光(photoluminescence, PL)方法，將能量高於能階的光照射太陽能電池，太陽能電池的電子吸收光源能量後，躍遷至較高的能階，隨後又會自發性地掉至低能階，掉落過程釋出的能量以光的形式釋放。再以光電耦合元件擷取影像。從影像的亮暗，判別太陽能電池的瑕疵位置。電激螢光及光激螢光的好處是全域檢測，發電效能差的瑕疵與雜質處不發光呈現暗區，缺點是無法區分表面刮痕與裂縫。

Belyaev *et al* [5-6]於 2006 年及 Dallas *et al* [7]於 2007 年，提出超音波共振(resonance ultrasonic vibrations, RUV)，利用壓電換能器(piezoelectric transducer)激振矽基板，並用聲波探頭(acoustic probe)感測面內振動訊號，訊號經過快速傅立葉轉換(fast Fourier transform, FFT)得到頻譜圖。根據矽基板的面內共振頻率、頻率響應函數(frequency response function)的頻寬與峰值的高低，判斷矽基板是否存在裂縫及長度，RUV 方法的實驗數據都只是針對尚未進行太陽能製程的矽基板，有關太陽能電池的檢測數據尚未見諸文獻。

### 1.3 文獻回顧

1971 年，Butters與Leendertz [8]首先提出電子光斑干涉術，利用雷射光照



射在待測物體與參考鏡面上，並將兩道光反射進入電視照相機後，於待測物變形前後各擷取一光斑圖形，將兩圖照度相減，獲得干涉條紋。這種全域且非接觸式的光學量測技術，應用在圓板的面外振動模態量測上，可獲得清晰的共振模態振形影像。

1977年，HΦgmoen與LΦkberg [9]在於時間平均(time-average)ESPI量測系統中，加入參考光相位調制技術(reference beam modulation)，可針對微小振動振幅及相位進行即時量測，大幅提高ESPI在振動量測的解析度。

1996年，Wang *et al* [10]提出振幅擾動電子光斑干涉術(amplitude-fluctuation ESPI, AF-ESPI)，並比較影像相加法與影像相減法。振幅擾動電子光斑干涉術較類似於影像相減法，不同於影像相減法的參考影像是在靜態中抓取，AF-ESPI的參考影像是在振動時抓取。研究中對於單邊固定之複合材料平板進行面外振動分析，發現AF-ESPI的方式可以提升條紋清晰度與解析度。

應用電子光斑干涉術進行振動量測實驗的研究文獻很多。2000年，Huang與Ma [11]利用雷射都卜勒振動儀(laser Doppler vibrometer, LDV)量得圓形鋁板的面外共振頻率，以共振頻率驅動圓形鋁板，再以AF-ESPI量測含裂縫的圓型鋁板共振模態，與數值模擬分析比對，由AF-ESPI共振模態圖中干涉條紋的不連續，可判斷裂縫位置。

電子光斑干涉術擷取的光斑影像包含高頻雜訊。2003年，Murukeshan *et al* [12]採用Matlab軟體進行電子光斑干涉術的影像處理，運用傅立葉光學(Fourier optics)的觀念，將空間域的影像轉換至空間頻率域(spatial frequency)，濾掉高頻的雜訊，再將濾波後的空間頻域訊號轉回空間域。由此種訊號處理的方式，讓干涉條紋的影像清晰度提升。

2005年，Zarate *et al* [13]利用電子光斑干涉術量測平板的靜態面外熱變形，首先在矩形鋁板(6061 aluminum plate)上製造三種不同方向的裂縫，分別為與矩形長邊垂直、平行及夾45度角的狀況。在這三種條件的鋁板背面加熱，

讓鋁板熱膨脹產生面外變形。由於裂縫的兩側變形量不同，造成干涉條紋的位移不連續，可得知鋁板的裂縫位置。

2008年，Ma *et al* [14]採用阻抗分析儀量測壓電陶瓷(piezoceramics)與壓電複合材料(piezo-laminated composites)的面內共振頻率，並利用AF-ESPI量測壓電材料的面內共振模態，與數值模擬結果比對驗證，最後將阻抗分析儀、AF-ESPI與數值模擬分析所得面內共振頻率做誤差的比較。

## 1.4 研究目的

Belyaev *et al* [5-6]於2006年及 Dallas *et al* [7]於2007年提出超音波共振量測的想法，由面內共振頻率的變化量偵測矽基板裂縫的長度，惟超音波共振無法確切找出裂縫位置。因此，本研究納入電子光斑干涉術作為裂縫檢測的方法。電子光斑干涉術是一種非接觸式的光學檢測法，分為面內(in-plane)與面外(out-of-plane)量測。面外量測是利用雷射光照射在待測物體上與參考物平面上，並將兩道光反射進入光電耦合元件後，於待測物變形前後各擷取一光斑圖形，將兩圖照度相減而獲得干涉條紋。面內量測則是將雷射光先分光，再將兩道光入射至待測物上。由於不需拍全像底片且不需在暗房中操作，比傳統的全像(holography)技術在時間及空間上都方便許多，所以被廣泛運用到物體的靜態與動態之全域量測。

本研究以ESPI拍攝太陽能矽基板的面內振動模態，從振動模態找出裂縫所在。並以數值分析軟體進行完整與含缺陷的太陽能矽基板之時諧分析，模擬出面內共振頻率與模態。最後，將實驗量測與數值模擬結果相互比對，探討結合電子光斑干涉術與超音波共振法，偵測太陽能電池基板裂縫位置的可行性。

## 1.5 內容簡述

全文分為五章。第一章介紹研究動機及目的與文獻回顧，第二章說明電子光斑干涉術的理論。第三章應用有限元素套裝軟體ANSYS，對於太陽能電

池矽基板結構進行振動分析。首先對完整無缺陷之太陽能電池矽基板作時諧分析，找到面內的共振頻率與共振模態。其次，對含有裂縫的模型做時諧分析，探討裂縫對於太陽能電池矽基板各共振模態的影響。

第四章整理討論實驗量測的結果。先利用雷射都卜勒振動儀量測無缺陷的太陽能電池矽基板之面內共振頻率，以該頻率驅動面內共振，再以電子光斑干涉術得到共振模態之振形。其次，製造含裂縫的試片，再以電子光斑干涉術量測面內共振模態之振形。最後，比較無裂縫與含裂縫時共振模態之振形，辨識裂縫的位置，並與數值分析結果互相比對與討論。

第五章為本文的結論與未來展望，總結前兩章之結果與比較，展望未來可以改進及深入研究的方向。



## 第二章 電子光斑理論基礎

本章第一部分先介紹電子光斑技術，第二部分則參考 Wang *et al*[10]及 Huang 與 Ma [11]的研究，綜合整理電子光斑干涉術與理論基礎。

### 2.1 光斑干涉技術

當雷射光束自粗糙物體表面反射至一屏面時，屏面上將佈滿明暗相間的亮斑與暗斑，這些明暗相間雜亂的斑點稱為光斑(speckle)，如圖 2.1 所示。光斑的形成需符合以下條件：第一、待測物必須表面粗糙，為了使散射的光斑均勻，粗糙表面的深度必須大於波長。第二、光源的同調度要高，例如可採用雷射。光斑是光由粗糙表面散射形成的，因此光斑本身就攜帶著粗糙表面的信息。光斑不但可以研究待測物表面的粗糙度，也可以研究待測物的形狀與位置的變化。

光的干涉術(interferometry)主要是應用同調光(coherent light)相位一致的特性，將之分成兩道光路入射至待測物及參考物表面，待測物體表面發生變形時，將會造成光程的變化。光程的變化會造成這兩道光干涉相位之改變，於成像面上呈現明暗相間的條紋。

光斑干涉術是由全像干涉技術的基礎發展出來的。全像術剛開始時，只應用在光滑有規則的表面，後來運用於量測物體的變形與振動，最後發展到可量測任意形狀的粗糙表面。雖然全像術已發展許久，但仍有部分缺點不易克服，例如需要高解析度底片。於是光斑干涉術便漸漸發展起來，加上半導體科技的進步，影像感測元件取代傳統的底片，及時、快速的優點使光斑干涉術成為具應用價值的一種新技術。

### 2.2 電子光斑干涉術

電子光斑干涉術(ESPI)是一種應用影像感測元件及電子處理技術，記錄低空間頻率(low spatial frequency)的全像干涉術。此種技術具有即時、全域與非接

觸等量測優點，應用在靜態量測，可以獲得待測物變形量，在動態量測時，可以得到待測物的振形，是一種用途廣泛的光學量測方法。根據量測位移方向的不同，可分為面外量測與面內量測兩種系統架構。面外量測主要是量測垂直待測物表面的位移，面內量測則是量測平行待測物表面之位移。

本研究主要為太陽能電池矽基板的面內振動量測。電子光斑干涉術的振動量測是針對待測物的穩態振動特性，其運動對時間而言是具有時諧因子，最廣為採用的量測方法是應用均時法。均時法的特點主要是利用 CCD，在曝光時間內連續感測並儲存物體振動時的影像，進行影像處理。處理後的影像在物體節線區(nodal lines)會較亮，所以能夠很清楚看到全域干涉圖的節線位置。若以數學式表示，均時法所得到的條紋皆由零階貝索函數(zero-order Bessel function)控制，這種現象與實驗所觀察到相符合。以下就電子光斑干涉術面外與面內振動量測原理作說明。

### 2.2.1 面外振動的量測

Jones 與 Wykes [15]曾提到當物體靜止時，CCD 所擷取的光強度可以表示為

$$I_1 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\phi_o - \phi_r) \quad (2.1)$$

其中， $I_o$ 是照射於待測物的物光強度； $I_r$ 是照射於參考平面的參考光強度，如圖 2.2 所示。

待測物體開始振動後，會造成物光與參考光之間產生一相位改變 $\Delta\phi$ 。假設待測物的振動振幅為  $A$ ，則相位差可表示為

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \frac{4\pi}{\lambda} A(1 + \cos\theta_0) \cos\omega t \\ &= \Gamma A \cos\omega t \end{aligned} \quad (2.2)$$

其中， $\Gamma = \frac{4\pi}{\lambda}(1 + \cos\theta_0)$ 為位移靈敏度的值，大小與系統架構有關， $\theta_0$ 為物光與觀察方向之夾角， $\omega$ 為振動的角頻率(angular frequency)。

由於 CCD 在取樣時間內，會持續累積物體在不同時刻的振動影像，可視為直接對影像相加，再對時間做平均。當待測物處於振動狀態時，CCD 相機所記錄之光強度為

$$I_2 = I_o + I_r + \frac{2}{\tau} \sqrt{I_o I_r} \int_0^\tau \cos[(\phi_o - \phi_r) + \Gamma A \cos \omega t] dt \quad (2.3)$$

此處， $\tau$  為取像時間將上式簡化後，再做積分，即

$$\begin{aligned} \int_0^\tau \cos[(\phi_o - \phi_r) + \Gamma A \cos \omega t] dt &= \text{Re} \left\{ \int_0^\tau \exp[i(\phi_o - \phi_r) + i\Gamma A \cos \omega t] dt \right\} \\ &= \text{Re} \left\{ e^{i(\phi_o - \phi_r)} \int_0^\tau \exp(i\Gamma A \cos \omega t) dt \right\} \end{aligned} \quad (2.4)$$

而

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right) = \cos(\omega t) \quad (2.5)$$

將(2.5)式代回(2.4)式中，得

$$\begin{aligned} &\text{Re} \left\{ e^{i(\phi_o - \phi_r)} \int_0^\tau \exp(i\Gamma A \cos \omega t) dt \right\} \\ &= \text{Re} \left\{ e^{i(\phi_o - \phi_r)} \int_0^\tau \exp\left[i\Gamma A \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right)\right] dt \right\} \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\text{因為 } e^{iz \sin \theta} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(z) e^{in\theta} \quad (2.7)$$

與(2.6)式對應得  $z = \Gamma A$ 、 $\theta = \frac{\pi}{2} - \omega t$ ，代回(2.6)式中

$$\begin{aligned} &\text{Re} \left\{ e^{i(\phi_o - \phi_r)} \int_0^\tau \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\Gamma A) e^{in(\frac{\pi}{2} - \omega t)} dt \right\} \\ &= \text{Re} \left\{ e^{i(\phi_o - \phi_r)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\Gamma A) e^{in\frac{\pi}{2}} \frac{e^{-in\omega t} - 1}{-in\omega} \right\} \end{aligned} \quad (2.8)$$

當曝光時間  $\tau$  遠大於待測物振動週期時，即  $\tau \gg \frac{2k\pi}{\omega}$ ，除非  $n=0$ ，否則其值為零，

故(2.4)式可簡化為

$$\int_0^\tau \cos[(\phi_o - \phi_r) + \Gamma A \cos \omega t] dt = \tau [\cos(\phi_o - \phi_r)] J_0(\Gamma A) \quad (2.9)$$

將(2.8)式代入(2.3)式中，得到

$$I_2 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} [\cos(\phi_o - \phi_r)] J_0(\Gamma A) \quad (2.10)$$

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

將靜止與振動時的光強度相減，即(2.10)式減去(2.1)式可表示為

$$I = I_2 - I_1 = 2\sqrt{I_o I_r} [\cos(\phi_o - \phi_r)] [J_0(\Gamma A) - 1] \quad (2.11)$$

1996年，Wang *et al* [10]提出之 AF-ESPI，採用 CCD 擷取兩個振幅不同的影像，進行影像相減處理，其基本理論如下：

首先對於正在振動的試片擷取一張影像作參考，而光強的表示式為

$$I_1 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left\{ I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos \left[ (\phi_o - \phi_r) + \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta_0) A \cos \omega t \right] \right\} dt \quad (2.12)$$

其中， $\theta_0$ 為物光與觀測方向之夾角，如圖 2.2 所示。

令  $\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta_0)$ ，仿照影像相減的推導方式，參考影像之光強為

$$I_1 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} [\cos(\phi_o - \phi_r)] J_0(\Gamma A) \quad (2.12)$$

調整激振振幅產生  $\Delta A$  之微量變化，擷取第二張影像，此時之光強度為

$$I_2 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left\{ I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos [(\phi_o - \phi_r) + \Gamma (A + \Delta A) \cos \omega t] \right\} dt \quad (2.13)$$

其中

$$\begin{aligned} & \int_0^\tau \cos [(\phi_o - \phi_r) + \Gamma (A + \Delta A) \cos \omega t] dt \\ &= \text{Re} \left\{ e^{i(\phi_o - \phi_r)} \int_0^\tau \exp[i\Gamma (A + \Delta A) \cos \omega t] dt \right\} \\ &= \text{Re} \left\{ e^{i(\phi_o - \phi_r)} \int_0^\tau \exp(i\Gamma A \cos \omega t) \exp(i\Gamma \Delta A \cos \omega t) dt \right\} \end{aligned} \quad (2.14)$$

對  $\exp(i\Gamma \Delta A \cos \omega t)$  做泰勒級數展開後，忽略三次以上之高次項，再代入(2.14)

式積分後，可得

$$\int_0^{\tau} \cos[\phi + \Gamma(A + \Delta A) \cos \omega t] dt = \tau \left[ 1 - \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2 \right] J_0(\Gamma A) \quad (2.15)$$

將(2.15)代回(2.13)式，得到第二張光強

$$I_2 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\phi_o - \phi_r) \left[ 1 - \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2 \right] J_0(\Gamma A) \quad (2.16)$$

再將第二張影像減去第一張影像，即(2.16)式與(2.12)式相減，其光強度可表示為

$$\begin{aligned} I = I_2 - I_1 &= 2\sqrt{I_o I_r} \left| \cos(\phi_o - \phi_r) \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2 J_0(\Gamma A) \right| \\ &= \frac{\sqrt{I_o I_r}}{2} \left| \cos(\phi_o - \phi_r) \Gamma^2 (\Delta A)^2 J_0(\Gamma A) \right| \end{aligned} \quad (2.17)$$

由(2.17)式得，其中  $\cos(\phi_o - \phi_r)$  為一高頻項，而  $|J_0(\Gamma A)|$  變化較緩慢為低頻項。振動之振幅是由  $|J_0(\Gamma A)|$  函數控制，由零階貝索函數的特性得知，當振幅  $A=0$  時， $|J_0(\Gamma A)|$  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。

## 2.2.2 面內振動的量測

參考圖 2.3 所示之面內振動量測示意圖，假設待測物體面內振動之振幅為  $A'$ ，當試片振動時，面內振動所引發的相位改變為

$$\begin{aligned} \Delta\phi' &= \frac{2\pi}{\lambda} (2A' \cos \omega t \sin \theta') \\ &= \Gamma' A' \cos \omega t \end{aligned} \quad (2.18)$$

其中  $\Gamma' = \frac{2\pi}{\lambda} (2 \sin \theta')$ ， $\theta'$  為兩對稱物光夾角之半。

根據(2.8)式，可以得到參考影像之光強度

$$I_1 = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \left\{ I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos \left[ (\phi_o - \phi_r) + \Gamma' A' \cos \omega t \right] \right\} dt \quad (2.19)$$

仿照面外量測的推導方式，可將上式化簡為

$$I_1 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\phi_o - \phi_r) J_0(\Gamma' A') \quad (2.20)$$



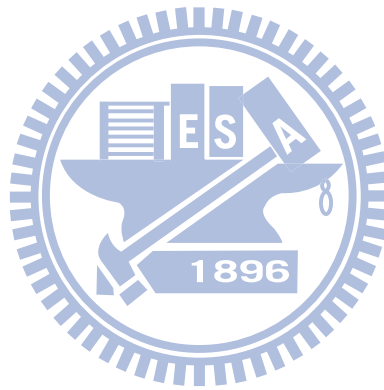
同理，假設第二張影像振幅改變  $\Delta A'$ ，則光強度為

$$I_2 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left\{ I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos \left[ (\phi_o - \phi_r) + \Gamma'(A' + \Delta A') \cos \omega t \right] \right\} dt \quad (2.21)$$

根據面外量測之推導方式，將上式以泰勒級數展開，忽略高次項，將之做積分，再將第二張影像與第一張之參考影像相減，得到的光強度為

$$\begin{aligned} I = I_2 - I_1 &= 2\sqrt{I_o I_r} \left| \cos(\phi_o - \phi_r) \frac{1}{4} \Gamma'^2 (\Delta A')^2 J_0(\Gamma' A') \right| \\ &= \frac{\sqrt{I_o I_r}}{2} \left| \cos(\phi_o - \phi_r) \Gamma'^2 (\Delta A')^2 J_0(\Gamma' A') \right| \end{aligned} \quad (2.22)$$

由(2.22)式可知，其中  $\cos(\phi_o - \phi_r)$  為一高頻項，而  $|J_0(\Gamma' A')|$  變化較緩慢為低頻項。而量測面內振動位移時，相減後之影像的亮、暗紋是由  $|J_0(\Gamma' A')|$  所影響。



## 第三章 數值分析模擬與討論

本研究以有限元素法進行數值分析，採用套裝軟體 ANSYS 10.0 (ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA)對於太陽能矽電池基板的振動特性，進行時諧分析 (harmonic analysis)。本章分為兩部分，第一部分模擬無缺陷的太陽能電池矽基板，計算面內的共振頻率；第二部分針對有裂縫的太陽能電池基板，進行時諧分析，觀察激振模態之面內位移分佈。最後，比較完整與有裂縫之太陽能矽基板的分析結果及討論。

### 3.1 三維有限元素分析

ANSYS 有限元素套裝軟體的結構動態分析程序分為前處理、分析、後處理三部分。在前處理部分，先建立邊長 5 吋之太陽能電池矽基板的幾何模型，其幾何尺寸如 3.1 圖所示，材料選用矽與錫(材料參數列於表 1)。單晶矽基板為立方材料(cubic material)，多晶矽基板則可以模擬成等向性材料(isotropic material)，太陽能電池矽基板上設有許多錫導線及摻有雜質形成 p-n 型半導體結構，本文的模擬將單晶矽基板等效為等向性材料，其數值結果與量測比較較近似。矽基板與錫條的元素採用 SOLID45 元素進行分析，此元素型態為 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。以 LESIZE 指令分割模型，將模型網格化(mesh)的元素數量減少，以便加快電腦運算的速度。網格化後之模型如圖 3.2 所示，元素數目為 9,564。在邊界條件的設定上，太陽能電池矽基板模型不做任何拘束，只在基板的下側施加一排均勻的力，模擬實驗時壓電纖維複材所施力於矽基板的狀況，如圖 3.3 所示，再進行時諧分析。後處理則是將分析所獲得的數據做後續圖形化處理。

此外，也針對含裂縫的太陽能電池矽基板進行面內共振的數值分析。參考圖 3.4 所示，令 X-Z 座標原點坐落於太陽能基板的中心。邊緣裂縫尖端位置在距離 X 軸左方 18mm，距基板上緣 10mm 處，裂縫走向平行於 Z 軸，元素數

目為 8,179。

## 3.2 面內共振頻率與模態

平板結構面外振動模態比較容易被激發，各共振模態的頻率間距較小，不容易被區分；相較於面外共振頻率，面內共振頻率的模態密度(modal density)比較小，較容易區分出不同模態。本研究分析太陽能電池矽基板的面內共振頻率及模態，並做討論。

### 3.2.1 完整之太陽能電池矽基板

針對無裂縫的太陽能電池矽基板，以 ANSYS 數值分析軟體進行時諧分析，分析頻率的範圍為 10kHz 至 50kHz，所得到的面內共振頻率分別為 20.08kHz、25.2kHz、27.28kHz、29.36kHz、39.76kHz 及 48.16kHz，頻率響應函數如圖 3.5 所示。電子光斑干涉實驗可分別量測到各位移分量的變化，因此需將各模態的 X 與 Z 方向之位移變形圖分別繪出。本研究將模型中心點定義成 X-Z 座標，討論共振模態(modal shape)的對稱(symmetric)與反對稱(anti-symmetric)性。

面內共振頻率為 20.08kHz 的振形對稱於 Z 軸，相對於 X 軸則呈現反對稱，如圖 3.6 所示。圖 3.7(a)所示為 X 方向的位移變形，呈現一個十字的圖形。Z 方向位移的色階圖如圖 3.7(b)所示，呈現往上方偏移的橢圓形而不是上下對稱。該共振模態相對於 X 軸呈現反對稱分佈，所以 Z 方向的位移會朝上方偏移。

共振頻率為 25.2kHz 的面內共振模態如圖 3.8 所示，分別對稱於 X 軸與 Z 軸。X 方向位移分量的色階圖如圖 3.9(a)所示，Z 方向位移分量的色階圖如圖 3.9(b)所示。圖 3.10 所示為共振頻率為 27.28kHz 之面內共振模態，基板的上下、左右皆向內收縮變形，屬於對稱 X 軸與 Z 軸的模態。其中，X 方向的位移分量分佈圖如圖 3.11(a)所示，Z 方向位移分量的色階則如圖 3.11(b)所示。

面內共振頻率為 25.2kHz 的共振模態的 X 方向位移分量與 Z 方向位移分量呈現 180° 的相位差，前者收縮時，後者膨脹，反之亦然。然而 27.28kHz 的面內共振模態的 X 與 Z 方向位移分量的相位一致，同時膨脹收縮。

圖 3.12 所示為共振頻率為 29.36kHz 的面內共振模態，其變形相對於 X 軸為反對稱分佈，相對於 Z 軸則為對稱分佈。X 方向位移分量的色階圖如圖 3.13(a) 所示 X 軸上方與下方結構的 X 方向位移分量的相位差 180°，Z 方向位移分量圖則如圖 3.13(b) 所示。圖 3.14 所示為共振頻率為 39.76kHz 的面內共振模態，相對於 X 軸與 Z 軸都屬於對稱分佈。其中，X 方向的位移分量變形如圖 3.15(a) 所示，Z 方向位移分量則如圖 3.15(b) 所示。此共振模態的 X、Z 方向位移分量的相位一致，同時膨脹或收縮。最後，共振頻率為 48.16kHz 的面內共振模態對於 X 軸呈反對稱分佈，相對於 Z 軸呈現對稱的變形分佈，如圖 3.16 所示。X 方向的位移變形圖如圖 3.17(a) 所示，Z 方向位移變形圖則如圖 3.17(b) 所示。X 軸上、下方結構的 X 方向位移分量具有 180° 的相位差，上方結構膨脹時，下方結構收縮，反之亦然。

### 3.2.2 含裂縫太陽能矽基板

含裂縫之太陽能電池矽基板的時諧分析頻率範圍自 10kHz 至 50kHz，面內共振頻率分別為 19.2kHz、20.24kHz、24.48kHz、27.2kHz、29.28kHz、35.68kHz、39.44kHz 與 47.84kHz，頻率響應曲線如圖 3.18 所示。含裂縫太陽能電池矽基板的面內共振頻率較完整者小。有裂縫的狀態下，基板的結構剛性較弱，所以共振頻率應該較低。太陽能電池矽基板的上下表面沒有導線結構剛性的減弱，通常會導致其他面內與面外耦合的共振模態被激振出來。

圖 3.19 所示為含裂縫太陽能矽電池基板面內共振頻率為 19.2kHz 的振形，對應矽基板的共振頻率為 20.08kHz。此模態的 X 方向位移於裂縫兩側存在不連續，且十字形的節線變成左右不對稱，如圖 3.20(a) 所示。該模態在 Z 方向的位移，如圖 3.20(b) 所示，與圖 3.7(b) 所示之完整太陽能矽基板的面內共

振模態比較，裂縫的影響比較不大。主要裂縫的長度方向垂直 X 方向與 Z 方向平行，所以 X 方向位移相較於 Z 方向變形的位移，其不對稱性會較明顯。

圖 3.21 所示為含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率為 20.24kHz 的振形，此模態跟完整太陽能矽基板的前幾個模態比對，並沒有對應的關係，屬於結構受損後被額外激振出來的共振模態，X 方向位移分量與 Z 方向位移分量的相位差  $180^\circ$ ，前者膨脹時，後者收縮。X 方向位移如圖 3.22(a)所示，Z 方向位移如圖 3.22(b)所示。10mm 長度之裂縫恰好位於 X 方向位移的節線附近，因此裂縫兩側位移的不連續不是很明顯。

接下來討論共振頻率分別為 24.48kHz 與 27.2kHz 的面內共振模態。圖 3.23 所示為共振頻率為 24.48kHz 的面內共振模態，所對應的完整太陽能矽基板共振頻率為 25.2kHz。X 方向位移分量如圖 3.24(a)所示，Z 方向位移分量如圖 3.24(b)所示。共振頻率為 27.2kHz 的面內共振模態如圖 3.25 所示，其對應完整矽基板的面內共振頻率為 27.28kHz。該振形的 X 方向位移分量如圖 3.26(a)所示，Z 方向位移則如圖 3.26(b)所示。兩共振模態在裂縫兩側的 X 方向的位移分量不連續，Z 方向的位移分量不連續的現象不明顯，卻造成基板面內共振模態左右不對稱的變化。

圖 3.27 所示為含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率為 29.28kHz 的共振模態，對應之完整矽基板的共振頻率為 29.36kHz。X 方向的位移分量分佈如圖 3.28(a)所示，Z 方向的位移分量則如圖 3.28(b)所示。裂縫所處的位置恰巧在 X 方向位移的節線附近，所以裂縫兩側沒有明顯的位移不連續現象。共振頻率為 35.68kHz 的面內共振模態如圖 3.29 所示，此模態跟完整矽基板的前幾個面內共振模態比對，並沒有對應關係，亦屬於結構減損後被激振出來的額外共振模態。圖 3.30(a)、(b)所示為 X、Z 方向的位移分量圖，雖然此模態在裂縫兩側的 X 方向位移分量不連續，但完整的太陽能矽基板並無此共振模態，將來不考慮用此模態作為偵測太陽能電池基板裂縫的存在。

接下來，觀察面內共振頻率為 39.44kHz 的共振模態，如圖 3.31 所示，其

對應完整矽基板的共振頻率為 39.76kHz。圖 3.32(a)、(b)所示為 X、Z 方向位移分量分佈圖。此模態於 X 與 Z 方向的位移分量在裂縫兩側皆有不連續的變形量，前者的差異比較明顯。最後分析共振頻率為 47.84kHz 的面內共振模態，其振形如圖 3.33 所示，所對應之完整矽基板的共振頻率為 48.16kHz。X、Z 方向位移分量如圖 3.34(a)、(b)所示。裂縫的位置造成共振模態產生不對稱。

### 3.3 數值模擬分析之結果與討論

由數值模擬分析的結果，可以比較完整與含裂縫之太陽能電池矽基板對應的共振模態與共振頻率。根據完整矽基板的面內共振模態圖，可知共振頻率為 25.2kHz、27.28kHz 與 39.76kHz 之振形對 X 軸與 Z 軸皆具對稱分佈的共振模態，而共振頻率為 20.08kHz、29.36kHz 與 48.16kHz 的振形則是僅對 Z 軸對稱，對於 X 軸呈現反對稱分佈。X 軸上、下方基板的 X 方向位移分量相位差  $180^\circ$ 。太陽能電池矽基板的裂縫位置若不在面內共振模態的節線上，便可觀察到裂縫兩側面內位移的不連續及共振模態的不對稱性。含有裂縫的太陽能電池矽基板本身結構剛性較弱，會激發出在完整矽基板分析中所沒有出現的共振模態，例如：頻率為 20.24kHz 與 35.68kHz 的共振模態。

## 第四章 實驗量測與結果討論

本章根據雷射都卜勒振動儀量測太陽能電池矽基板的面內共振頻率，將之微調作為激振頻率，應用電子光斑面內干涉術量測對應的共振模態，所得的振形再與數值分析之結果互相比對與討論。

### 4.1 共振頻率量測系統

本研究先將主動壓電纖維複材黏貼於太陽能電池矽基板的下緣，採用雷射都卜勒振動儀 LV-1720A (Ono Sokki Corporation, Tokyo, Japan)配合頻譜分析儀 NF-FRA5087 (NF Corporation, Yokohama, Japan)，量測太陽能電池矽基板面內振動之頻率響應曲線，獲得面內共振頻率。

#### 4.1.1 雷射都卜勒干涉振動儀

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

為了方便描述太陽能電池矽基板共振頻率量測實驗架構，採用如圖 4.1 所示之 XZ 座標系統定義電池基板的平面位置。先利用真空幫浦吸住太陽能電池矽基板，在平行 YZ 平面的矽基板邊緣貼上反光貼紙，實物照片如圖 4.2 所示，方便 LDV 量測矽基板之 XZ 平面的面內共振頻率，實驗架構如圖 4.3 所示。頻譜響應的量測是以頻譜分析儀 NF-FRA5087 輸出振幅 3 伏特的交流訊號，掃頻範圍自 10kHz 至 80kHz 的正弦波訊號，透過電源功率放大器 HF-HSA4051 將訊號增益 40 倍後，輸出至黏貼於太陽能電池矽基板的主動壓電纖維複材，實物照片

如圖 4.4 所示，激振太陽能電池矽基板。再以都卜勒干涉儀量測矽基板邊緣反光貼紙位置的面內振動響應，所量到的振動訊號輸入至頻譜分析儀後，獲得太陽能電池基板面內振動的頻率響應函數。

#### 4.1.2 面內共振頻率

本研究為了確認每片太陽能電池基板之面內共振頻率的一致性，量測每片電池基板的面內共振頻率，做為比較。

首先於 S1 與 S2 試片的上緣，分別在邊長 1/2 處(A)、1/3 處(B)及邊緣處(C)取三點貼上反光貼紙，量測各點面內振動的頻率響應函數，如圖 4.5 所示。S1 試片之 A、B、C 三點的頻率響應與相位分別示於圖 4.6 至圖 4.11，圖 4.12 至圖 4.17 所示則為 S2 試片之 A、B、C 三點的頻譜與相位。量得的訊號與數值模擬分析之頻率範圍相同，整理後找出兩試片在 10kHz 至 50kHz 間的面內共振頻率，詳列於表 2 與表 3。

太陽能電池矽基板本身為脆性材料，裂縫製作時，容易造成大範圍的崩落，本實驗所製造之裂縫試片如圖 4.18 所示，由圖 4.18(b)中可看出缺陷處製作有裂縫的延伸。將此試片上緣邊長 1/2 處貼上反光貼紙，依照前述相同的實驗架構，量測出有裂縫之太陽能電池矽基板的面內共振頻率，實驗所得頻率響應曲線與相位分別如圖 4.19 與圖 4.20 所示，表 4 所列為各個面內共振模態得共振頻率。

## 4.2 電子光斑干涉術之面內振動量測

電子光斑干涉實驗量測面內振動的光學架設如圖 4.21 所示，實驗採用波長為 523.1nm 的綠光半導體雷射(Spectra-Physics Excelsior-532-50)，入射光經分光鏡(beam-splitter)分成兩道光束，分別入射於反光鏡上，再折射至空間濾波器(spatial filter)中，折射光經空間濾波器擴束後，再分別投射於待測物表面，以 CCD 相機(Basler A102f, 1392×1040 畫素)擷取影像。最後，將所擷取的影像經影像處理獲得光斑干涉條紋。



本實驗藉由 LabVIEW 與 Matlab 影像處理程式，將兩者結合做自動化量測。首先於 LabVIEW 圖控程式介面設定實驗參數，如圖 4.22 所示，由個人化電腦的 GPIB 介面卡，下達指令至函數產生器(Tektronix AFG3102)，調變頻率及電壓，輸出正弦訊號，經功率放大器(Piezo Amplifier Model EPA104)增益後，驅動壓電纖維複材(AFC)，激振太陽能電池矽基板，再由 CCD 自動擷取影像。最後應用 Matlab 軟體做影像相減的運算，將相減後的影像寫入個人電腦，實驗流程如圖 4.23 所示。

#### 4.2.1 完整太陽能基板面內振動模態

本研究利用 AF-ESPI 方法量測太陽能電池矽基板的面內共振模態，激振頻率分別為 19.8kHz、29.85kHz、38.65kHz、48.25kHz，量測數據將與數值模擬電池基板面內振動之 X 方向及 Z 方向位移的等高線比較。

首先，以 19.8kHz 作為驅動頻率，所得電池基板之 X 方向位移分量如圖 4.24 所示，而 Z 方向位移分量則如圖 4.25 所示。兩者與數值模擬分析的位移等高線圖趨勢相符，條紋最亮處的位移為零，稱為節線。其次，將驅動頻率調為 29.85kHz，獲得 X 方向位移分量的光斑條紋，如圖 4.26 所示，其與數值分析的位移等高線圖趨勢相符。Z 方向位移分量的光斑條紋，如圖 4.27 所示，中心節線交叉的特徵與數值模擬的位移等高線是相符，但上下兩側的等位移線卻無法清楚地辨識，與數值模擬獲得之位移等高線有些許的差異。

接下來，將激振頻率設為 38.65kHz，量得電池基板 X 方向位移分量的光斑條紋，如圖 4.28 所示，其與數值分析獲得的位移等高線，有些許的不對稱產生，在黏貼主動式壓電纖維複材的地方，不對稱的狀況較明顯。電池基板 Z 方向位移分量的光斑條紋如圖 4.29 所示，圖 4.29(a)右方的節線與圖 4.29(b)之數值模擬的位移等高線較相似，但圖中左邊卻相差較多，此處恰好是黏貼主動式壓電纖維複材處。最後，激振頻率設為 48.25kHz，所量得電池基板的 X 方向位移分量光斑條紋如圖 4.30 所示，此模態與數值分析的等高線圖相差較多。Z 方向位移

分量的光斑條紋如圖 4.31 所示，與數值模擬之等高線圖比較，差異較大也是發生在鄰近黏貼主動式壓電纖維複材處。

根據 AF-ESPI 量測的電池基板面內共振模態光斑條紋，高頻的共振模態較驅動頻率為 19.8kHz 的共振模態不清晰，比較容易出現節線的不對稱。光斑條紋在鄰近黏貼主動壓電纖維複材與數值計算獲得的位移等高線比較容易存在差異。因此，本研究建議以 19.8kHz 的電池基板 X 及 Z 方向位移分量光斑條紋做為基準，比較完整與含裂縫太陽能電池矽基板的面內共振模態之變化，判斷裂縫所在位置。

#### 4.2.2 含缺陷太陽能電池基板面內共振模態

本小節針對兩種不同缺陷的太陽能電池基板進行 AF-ESPI 面內共振模態的量測，量測結果再與數值分析獲得的位移等高線做比較。圖 4.32 所示為激振頻率為 19.56kHz 的電池基板 X 方向位移分量光斑條紋，Z 方向位移分量的光斑條紋則如圖 4.33 所示。圖 4.32(a) 中間的十字節線朝下方缺陷處彎曲，與數值分析獲得的位移等高線圖趨勢吻合。圖中右下方有三條等位移條紋而左下方僅有兩條，推斷有缺陷的區塊剛性較弱，所以位移梯度較大，產生的光斑條紋數目較多。圖 4.33(a) 中的 U 形節線則朝向裂縫處偏移，推論也與剛性的分佈有關。

### 4.3 實驗結果與討論

本節分為兩部分討論。第一部份針對雷射都卜勒振動儀、AF-ESPI 量測之面內共振模態與 ANSYS 數值模擬結果，比較所得的面內共振頻率及激振電池面板的驅動頻率。第二部份則討論完整與含裂縫之太陽能電池基板面內共振之電子光斑實驗，進行振形之比較與討論。

第一部分先針對雷射都卜勒振動實驗做討論，以 S1 試片作為基準與 S2 試片的結果比較，兩者量測的共振頻率最大偏差為 6.835%，其他共振頻率的偏差皆在 5% 以下，表 4 詳列兩試片之共振頻率量測值的偏差。太陽能電池基板在製

程中摻入雜質的均勻度不同，或是網版印刷金屬導線的歪斜，都可能導致每片太陽能電池基板在振動量測時產生偏差，但誤差量並不大。表 5 詳列完整之 S1 試片與含裂縫太陽能電池基板的面內共振頻率量測值。

表 6 比較 AF-ESPI 實驗的激振頻率及 ANSYS 分析獲得完整太陽能電池基板的面內共振頻率。其中，有兩組頻率無法激發出太陽能電池基板的面內共振模態，可能是數值模擬模型的簡化，沒考慮到太陽能電池黏貼主動式壓電纖維複材後，對整體邊界條件的影響。其他各組頻率的偏差皆在 3% 以下。表 7 比較 LDV 量測完整太陽能電池基板的面內共振頻率與 AF-ESPI 的激振頻率，誤差範圍也都小於 3%。含裂縫的太陽能電池基板的驅動頻率為 19.06kHz，對應 LDV 量測得到的共振頻率為 18.506kHz，兩者偏差約 2.99% 亦小於 3%。實驗的誤差在於固定太陽能電池矽基板的邊界條件之改變所造成，但偏差皆於 3% 以內。

第二部分比較完整與含裂縫之太陽能電池基板面內共振模態的差異。完整之太陽能電池基板的第一個共振頻率為 19.8kHz，含裂縫太陽能電池基板則為 19.06kHz。對於同一共振模態，含裂縫太陽能電池基板的面內共振頻率會小於沒有缺陷的狀況，主要是結構的剛性變弱所造成。AF-ESPI 量測獲得兩者的 X 方向位移分量光斑條紋如圖 4.34 所示。含裂縫試片之 AF-ESPI 量測的共振模態有不對稱的振形產生，中間節線也會有彎曲的現象。Z 方向位移分量光斑條紋則如圖 4.35 所示，含缺陷試片的 U 形光斑條紋會往缺陷處產生偏移，其不對稱的現象相對於 X 方向位移的振形較不明顯。推斷是所設計的裂縫垂直 X 軸，對 X 方向位移分量的光斑條紋影響較大。

## 第五章 結論與未來展望

本研究採用電子光斑干涉術量測太陽能電池基板的面內共振模態，由模態變化觀察裂縫的位置。實驗利用主動壓電纖維複材黏貼於太陽能電池下緣，做為致動元件，並以雷射都卜勒振動儀量測面內共振頻率，作為激振電池基板的驅動頻率，最後以電子光斑法量測太陽能電池基板之面內共振模態。並藉助套裝軟體 ANSYS 分析太陽能電池之共振模態，與實驗做比對。

### 5.1 實驗與數值模擬分析之結論

針對完整及含缺陷的太陽能電池基板，先進行雷射都卜勒振動儀量測電池基板的面內共振頻率。實驗數據顯示含裂縫電池基板的面內共振頻率低於完整者，與數值模擬結果相符。以面內共振頻率量測值激振太陽能電池基板，再採用 AF-ESPI 量測面內振動模態。

應用數值分析完整之太陽能電池基板面內共振模態與共振頻率，可以確定 AF-ESPI 量測獲得的光斑條紋對應的電池基板共振模態。ANSYS 分析於 20.08 kHz 的 X 與 Z 方向之面內共振模態與驅動頻率為 19.8kHz 的 AF-ESPI 量測之面內振形吻合，驗證本研究簡化後的數值分析模型之可行性。簡化後的模型在建模上比較簡易，也能減少電腦的運算時間與硬碟容量的消耗。雖然量測與數值計算的高頻共振模態不完全吻合，但仍可獲得合理的一致性。

在含裂縫太陽能電池基板的數值分析中，電池基板面內共振頻率為 19.06kHz 的 X 方向位移等高線之中間節線會往裂縫彎曲，裂縫兩側的位移不連續。AF-ESPI 量測之面內共振模態在 X 方向之振形也有同樣的現象產生，裂縫兩側的光斑條紋數目存有差異，這是兩側位移不連續所造成的。而 Z 方向的振形發生節線往裂縫處偏移，這種現象與數值分析的結果有些差異。

本研究以 AF-ESPI 確認數值分析模型的正確性，因為裂縫的存在局部減損電池的剛性，AF-ESPI 量測之面內共振模態的光斑條紋會往裂縫處靠近，顯

示位移梯度增加。雖然無法清晰地由面內共振模態光斑條紋的不連續找出規律性，偵測裂縫位置，本研究仍可由完整及含缺陷的太陽能電池基板之面內共振模態的比較，推斷裂縫或缺陷所在的區域。

## 5.2 未來工作與展望

本研究將主動壓電纖維複材黏貼於太陽能電池邊緣，做為致動器，以雷射都卜勒振動儀量測得到的電池基板面內共振頻率激振基板。實驗分成兩個階段進行，邊界條件不容易維持一致，激振電池基板的驅動頻率通常都會與先前的量測值不一致。未來希望以自製的錐形超音波探頭做為感應器，量測面內共振頻率與激振實驗都在同一個測試台上進行，減少誤差。致動器的設計也可朝不破壞太陽能電池基板的方向改進，達到非破壞檢測的目的，減少太陽能基板試片之消耗。

目前，以 AF-ESPI 量測基板面內共振模態，其空間解析度尚未能觀察出太陽能電池基板於裂縫兩側光斑條紋的不連續，僅能看出有裂縫處的等位移條紋數目較多。未來可探討 AF-ESPI 量測面內共振模態所能量到之最小裂縫長度。

## 參考文獻

- [1] J. P. Rakotoniaina, O. Breitenstein, M. H. Al Rifai, D. Franke and A. Schnieder (2004), "Detection of cracks in silicon wafers and solar cells by lock-in ultrasonic thermography," *Proceedings of PV Solar conference*, 640-643.
- [2] Z. Fu, Y. Zhao, Y. Liu, Q. Cao, M. Chen, J. Zhang and J. Lee (2004), "Solar cell crack inspection by image processing," *International conference on the business of electronic product reliability and liability*, 77-80.
- [3] T. Fuyuki, H. Kondo, H. Yamazaki, Y. Takahashi and Y. Uraoka (2005), "Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon cells by electroluminescence," *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 262108.
- [4] T. Trupke, R. A. Bardos, M. C. Schubert and W. Warta (2007), "Fast photoluminescence imaging of silicon wafers," *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 044107.
- [5] 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.
- [6] A. Belyaev, O. Polupan, W. Dallas, S. Ostapenko, D. Hess and J. Wohlgemuth (2006), "Crack detection using resonance ultrasonic vibrations in Si wafers," *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 111907-1.
- [7] W. Dallas, O. Polupan and S. Ostapenko (2007), "Resonance ultrasonic vibrations for crack detection in photovoltaic silicon wafers," *Measurement Science and Technology*, **18**, 852-858.
- [8] J. N. Butters and J. A. Leendertz (1971), "Speckle patterns and holographic techniques in engineering metrology," *Optics Laser Technol.*, **3**(1), 26-30.
- [9] K. Høfmoen and O. J. Løkkberg (1977), "Detection and measurement of small vibrations using electronic speckle pattern interferometry," *Applied Optics*, **16**(7), 1869-1875.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] E. A. Zarate, E. Custodio, C. G. Treviño-Palacios, R. Rodríguez-Vera and H. J. Puga-Soberanes (2005), “Defect detection in metals using electronic speckle pattern interferometry,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **88**, 217-225.
- [14] 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.
- [15] R. Jones and C. Wykes, *Holographic and speckle interferometry: A discussion of the theory, and practice and application of the techniques*, 2nd Edition, Cambridge : Cambridge University Press, 1989.
- [16] 楊國光，*近代光學測試技術*，p.210，浙江大學出版社，杭州，1997年。

表 1 太陽能電池基板材料參數

材料	密度 $\rho$ (g/m <sup>3</sup> )	楊氏係數 $E$ (GPa)	蒲松比 $\nu$
矽	2,400	145	0.3
錫條	7,400	40	0.28





表 2 LDV 量測太陽能電池基板 S1 試片的面內共振頻率

Node	Frequency (kHz)						
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6	Mode 7
A	19.3	22.04	26.04	29.73	38.8	44.69	47.77
B	19.3	22.59	26.24	29.73	38.48	45.1	47.77
C	19.3	22.04	26.03	29.98	38.5	41.125	47.37

表 3 LDV 量測太陽能電池基板 S2 試片的面內共振頻率

Node	Frequency (kHz)						
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6	Mode 7
A	19.45	22.6	27.82	29.98	38.8	44.32	47.77
B	19.45	22.6	27.32	29.73	38.48	44.32	47.37
C	19.45	22.6	27.32	29.73	38.9	43.23	47.77

表 4 LDV 量測太陽能電池基板 S1 與 S2 試片面內共振頻率之偏差

Measured point	$\text{deviation} = \left  \frac{(S2) - (S1)}{(S1)} \right  \times 100\%$						
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6	Mode 7
A	0.777	2.541	6.835	0.841	0	1.678	0
B	0.777	0.044	4.04	0	0	1.596	0.837
C	0.777	2.541	4.956	0.834	1.039	0	0.844

表 5 LDV 完整與含缺陷的太陽能電池基板 S1 試片面內共振頻率量測值之比較

Mode	Resonant frequency (kHz)	
	無缺陷	含缺陷
1	19.3	18.506
2	22.04	20.279
3	26.04	20.792
4	29.73	23.554
5	38.8	28.999
6	44.69	33.683
7	47.77	43.59
8	—	46.978

表 6 完整太陽能電池基板面內共振頻率的計算值與 AF-ESPI 驅動頻率之比較

Mode	(a) Driving Frequency (kHz)	(b) Calculated	
		Resonant Frequency (kHz)	deviation $= \left  \frac{(a) - (b)}{(b)} \right  \times 100\%$
1	19.8	20.08	1.394
2	—	25.2	—
3	—	27.28	—
4	29.85	29.36	1.669
5	38.65	39.76	2.792
6	48.25	48.16	0.187

表 7 LDV 量測完整太陽能電池基板的面內共振頻率與 AF-ESPI 驅動頻率比較

Mode	(a) LDV measured resonant frequency (kHz)	(b) Driving Frequency in AF-ESPI	deviation $= \left  \frac{(a) - (b)}{(b)} \right  \times 100\%$
	1		
2	22.04	—	—
3	26.04	—	—
4	29.73	29.85	0.402
5	38.8	38.65	0.388
6	44.69	—	—
7	47.77	48.25	0.995

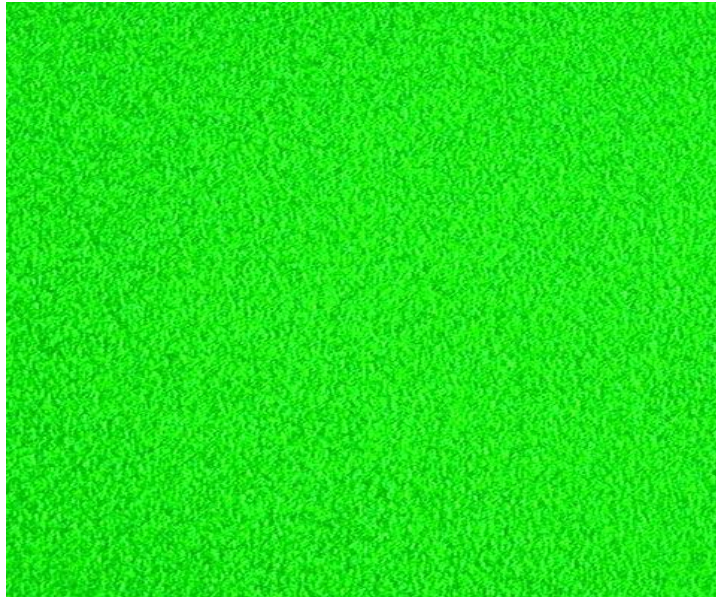


圖 2.1 典型的光斑圖(speckle)

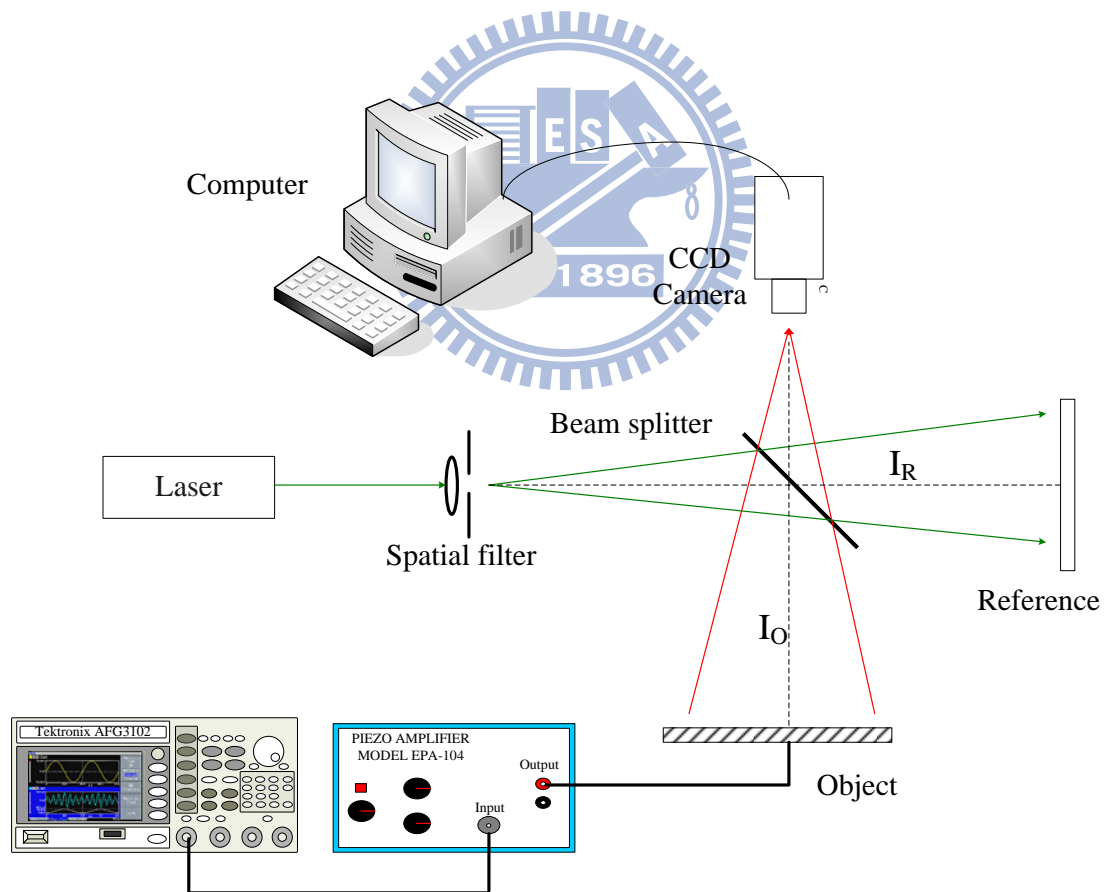


圖 2.2 電子光斑干涉術面外振動量測架構

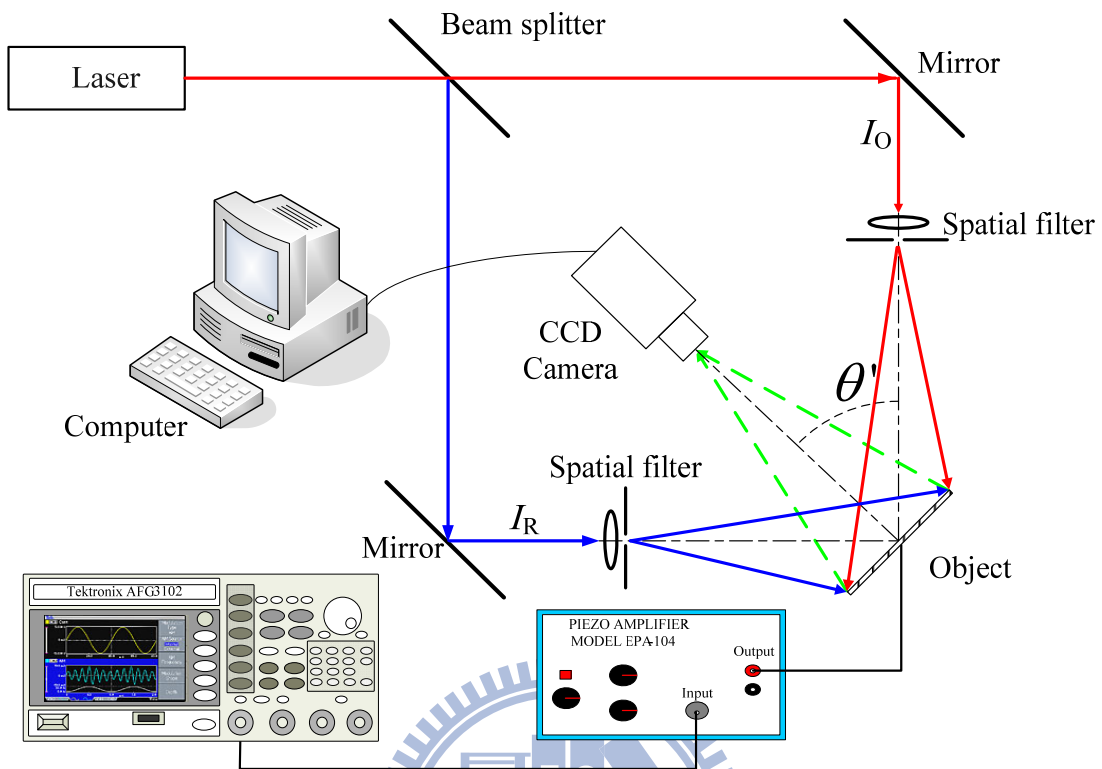
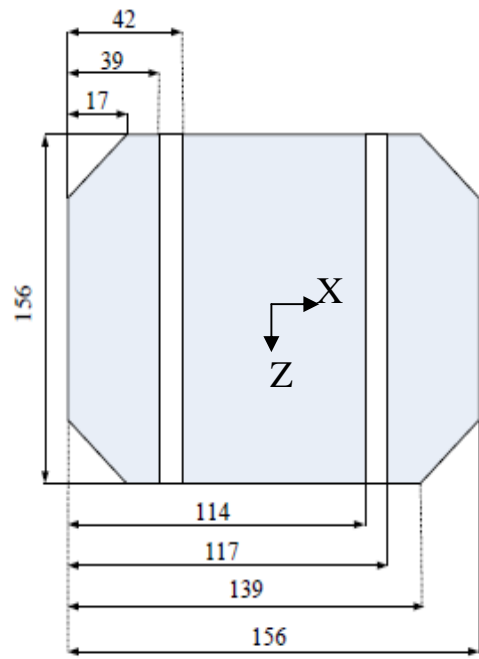
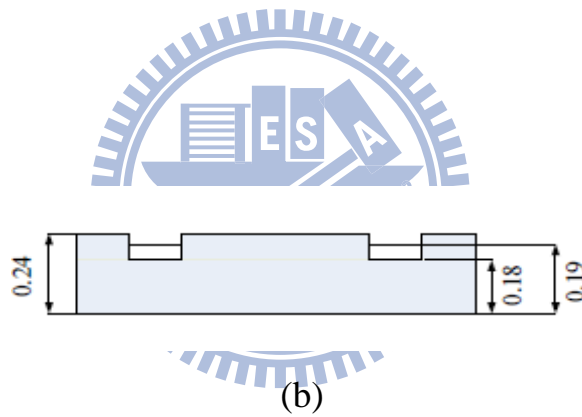


圖 2.3 電子光斑干涉術面內振動量測架構



單位：mm

(a)



單位：mm

(b)

圖 3.15 吋太陽能電池矽基板幾何尺寸(a)上視圖、(b)側視圖

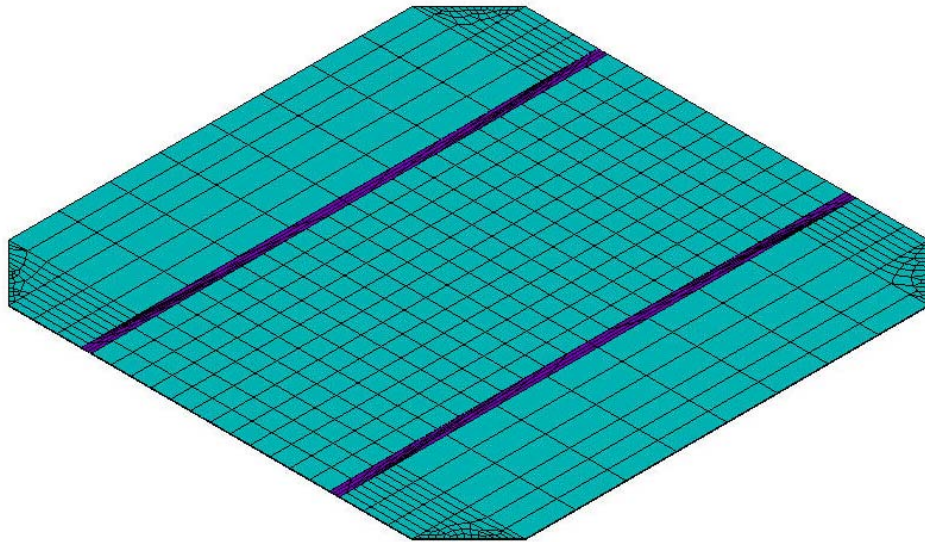


圖 3.2 完整太陽能電池矽基板有限元素網格

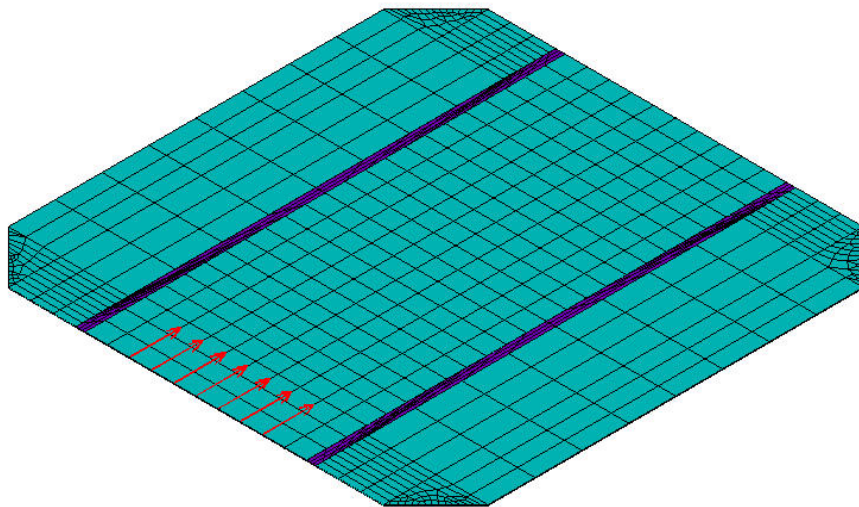
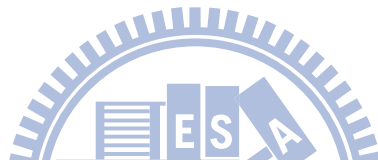


圖 3.3 太陽能電池矽基板的模擬施力

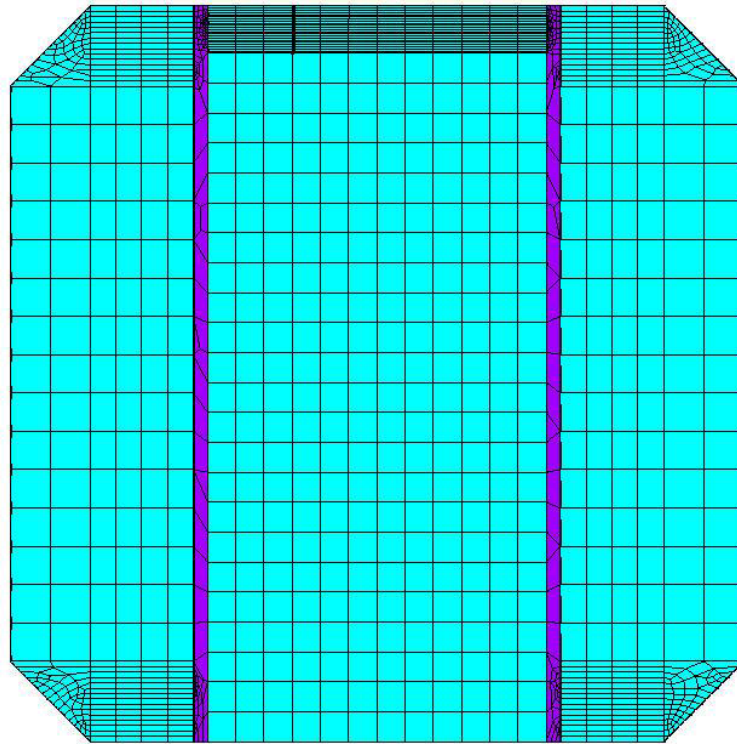


圖 3.4 含裂縫太陽能電池矽基板的有限元素模型

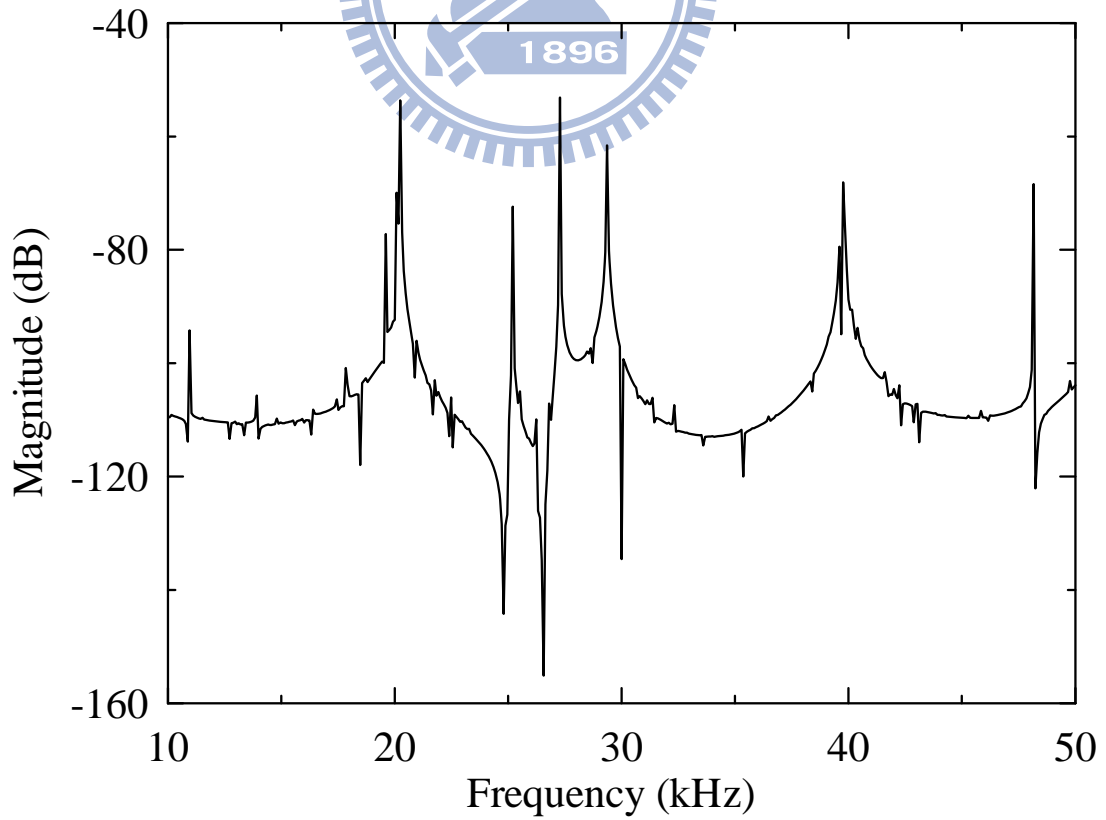


圖 3.5 完整太陽能電池矽基板的面內位移頻率響應曲線



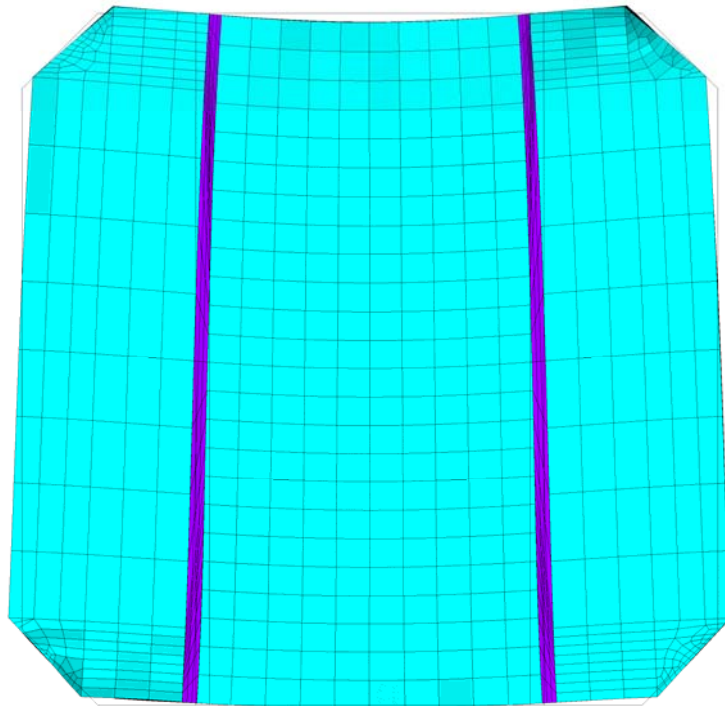
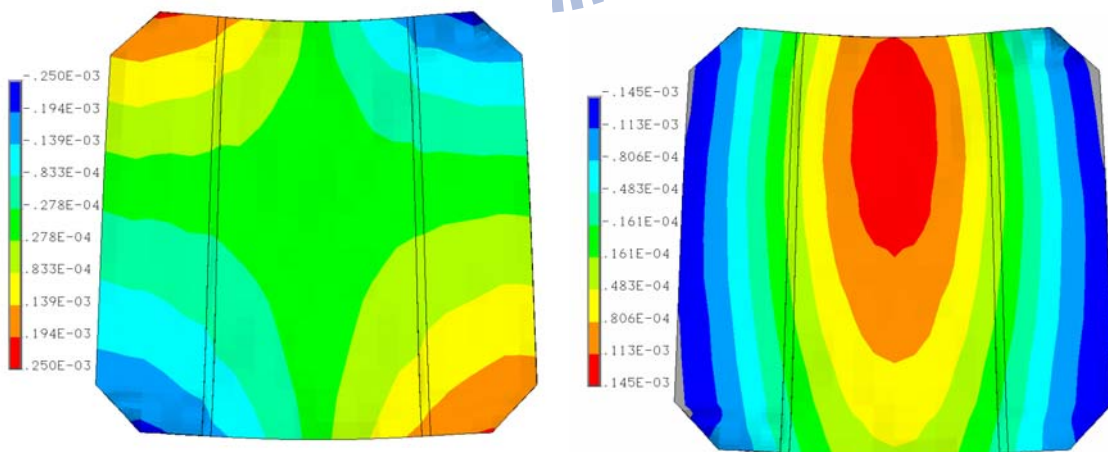


圖 3.6 太陽能電池矽基板面內共振頻率 20.08kHz 對應之振形



(a)

(b)

圖 3.7 太陽能電池矽基板面內共振頻率 20.08kHz 對應之振形

(a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量

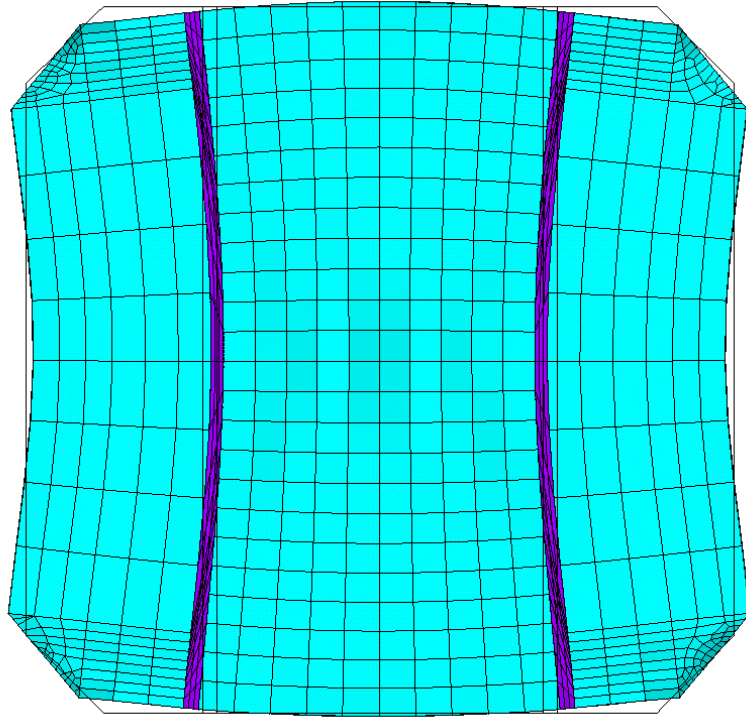


圖 3.8 太陽能電池矽基板面內共振頻率為 25.2kHz 對應之振形

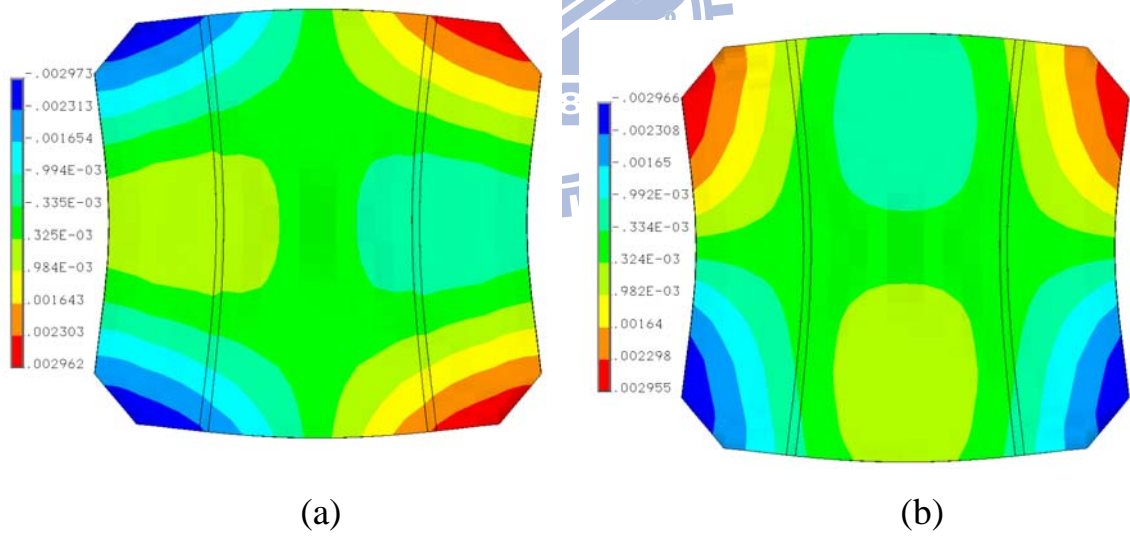


圖 3.9 太陽能電池矽基板面內共振頻率為 25.2kHz 對應之振形

(a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量

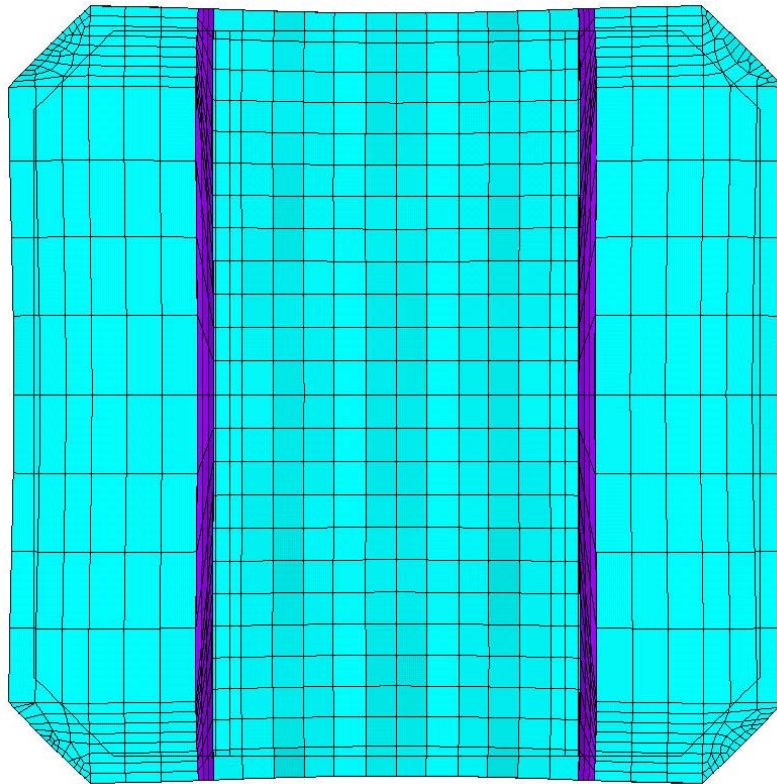
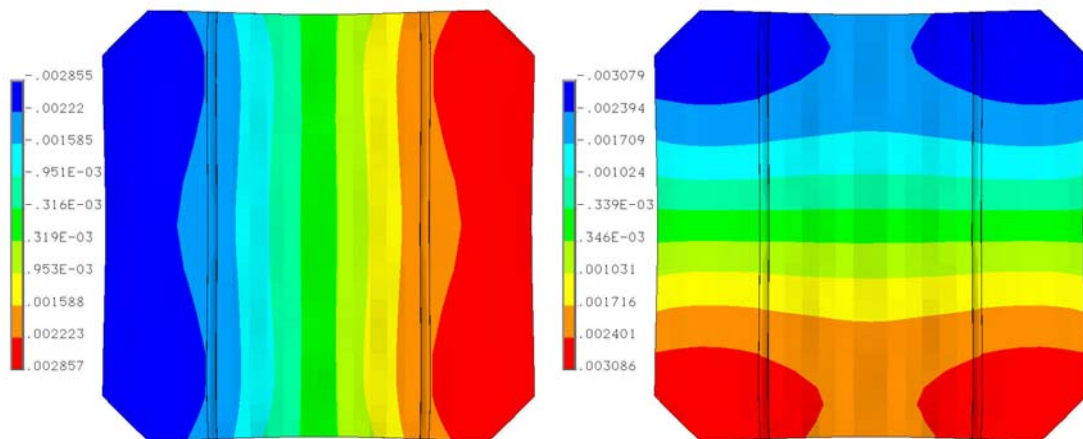


圖 3.10 太陽能電池矽基板面內共振頻率為 27.28kHz 對應之振形



(a)

(b)

圖 3.11 太陽能電池矽基板面內共振頻率為 27.28kHz 對應之振形

(a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量

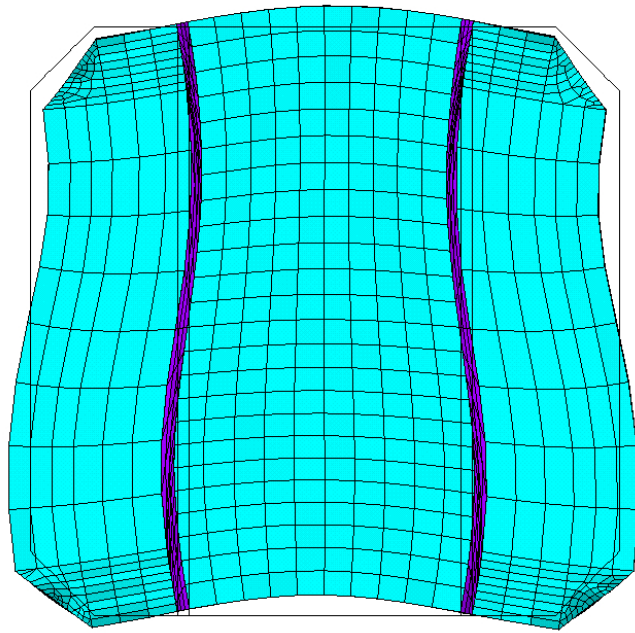


圖 3.12 太陽能電池矽基板面內共振頻率為 29.36kHz 對應之振形

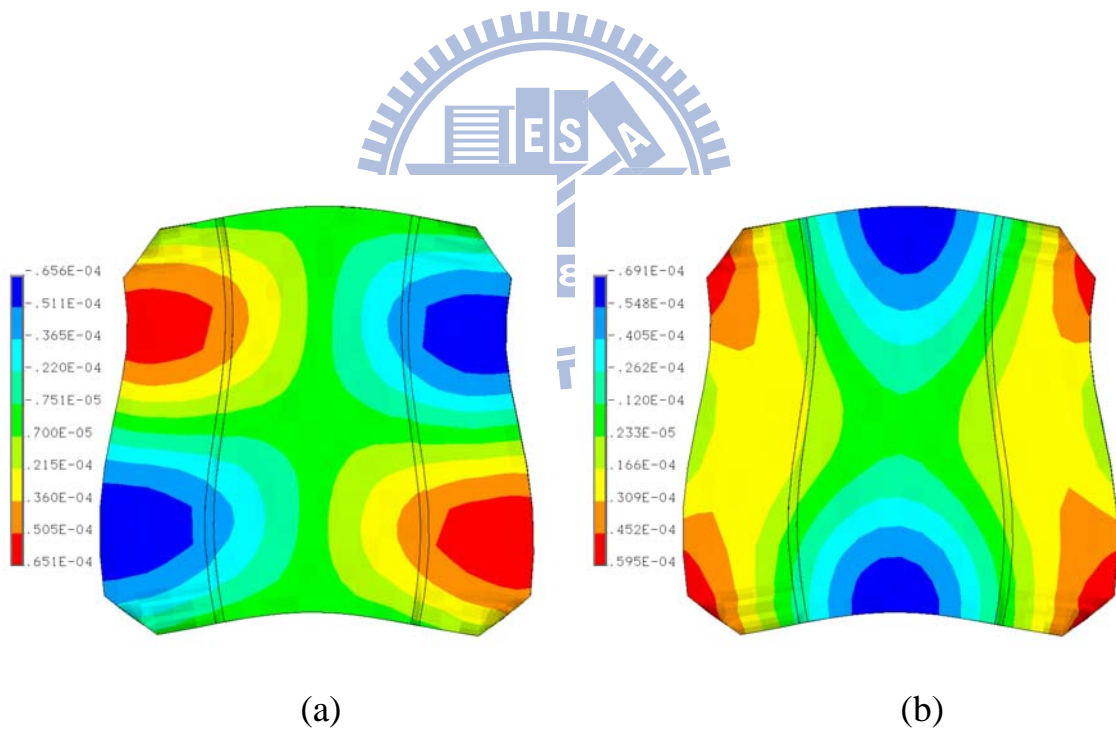


圖 3.13 太陽能電池矽基板面內共振頻率為 29.36kHz 對應之振形

(a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量

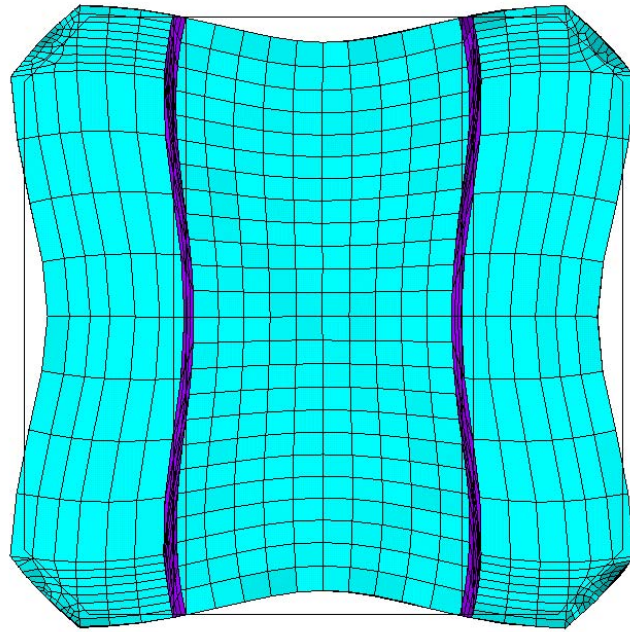


圖 3.14 太陽能電池矽基板面內共振頻率為 39.76kHz 對應之振形

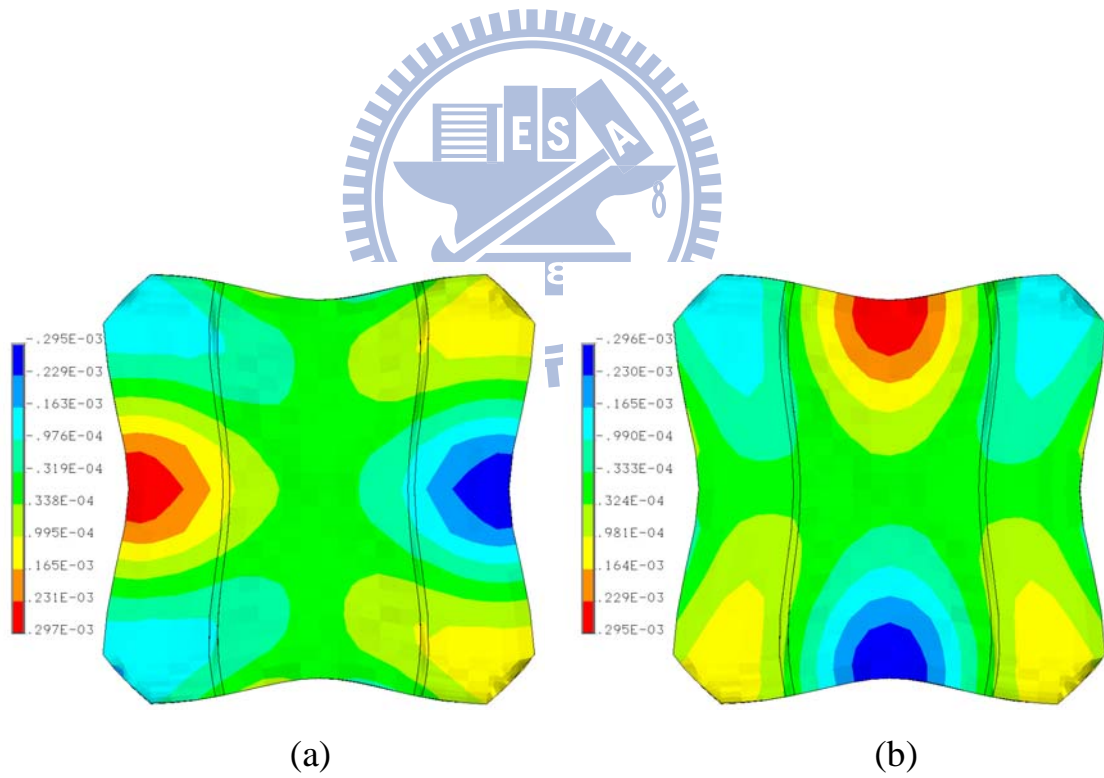


圖 3.15 太陽能電池矽基板面內共振頻率為 39.76kHz 對應之振形

(a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量

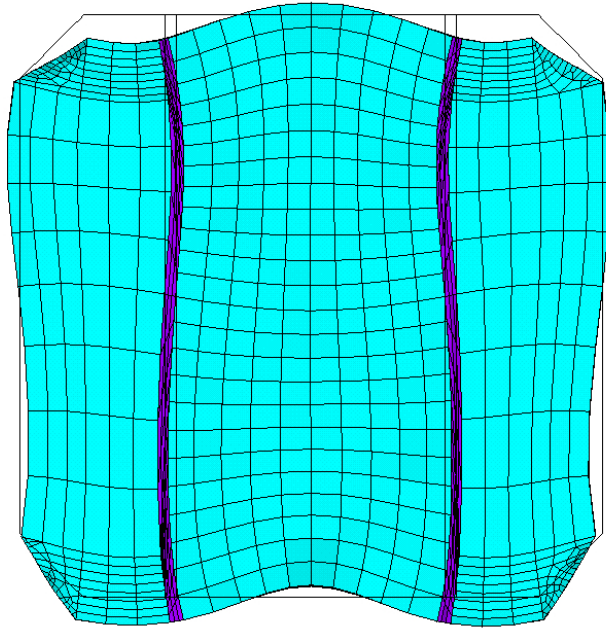


圖 3.16 太陽能電池矽基板面內共振頻率 48.16kHz 對應之振形

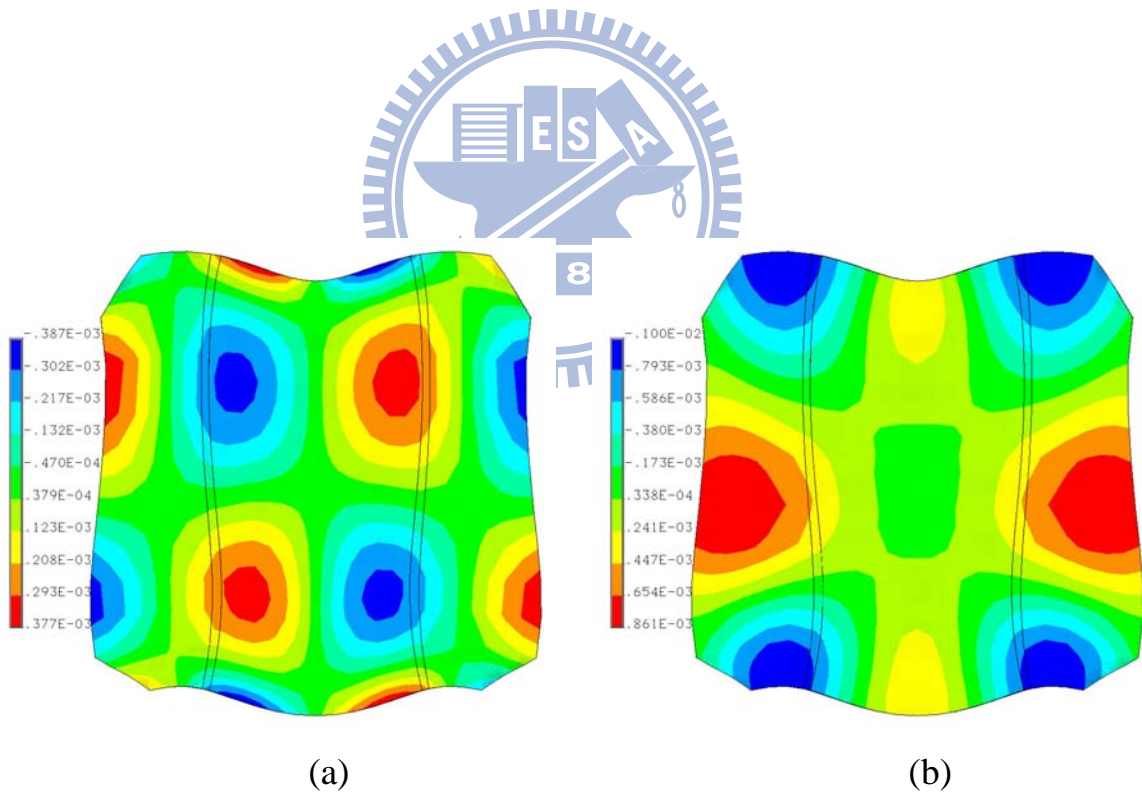


圖 3.17 太陽能電池矽基板面內共振頻率 48.16kHz 對應之振形

(a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量

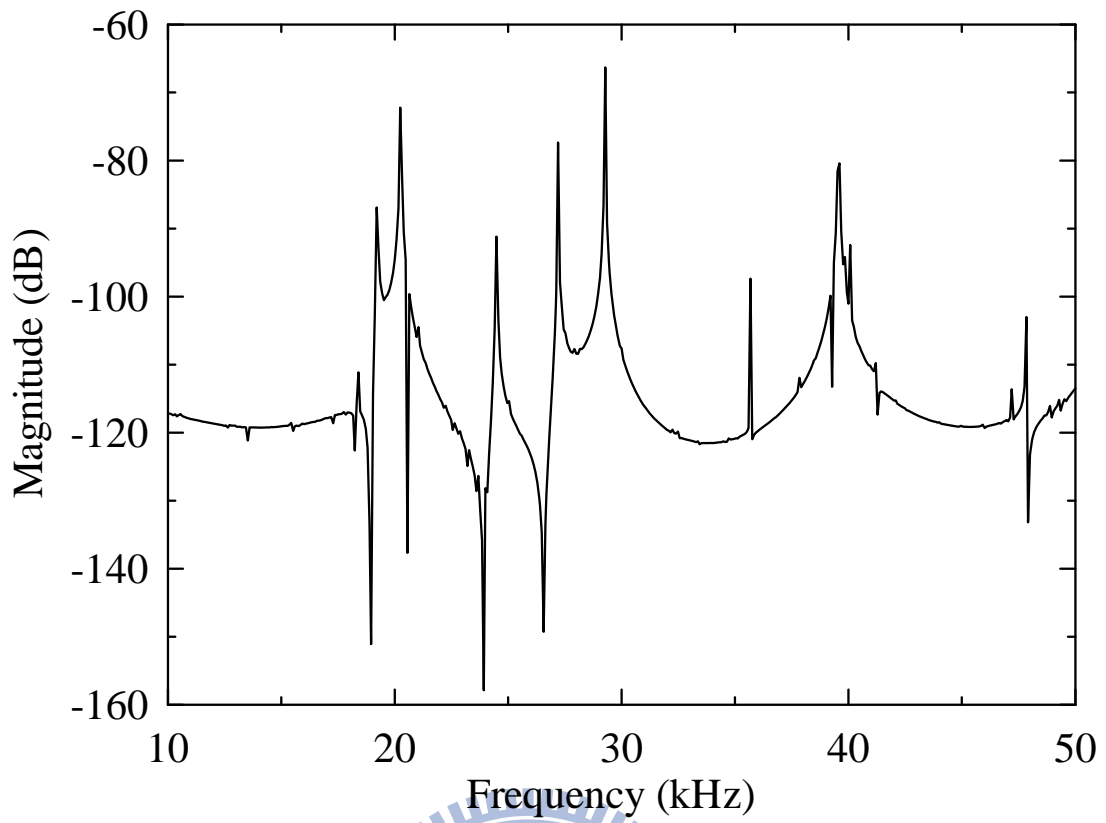


圖 3.18 含裂縫之太陽能矽基板的面內位移頻率響應曲線

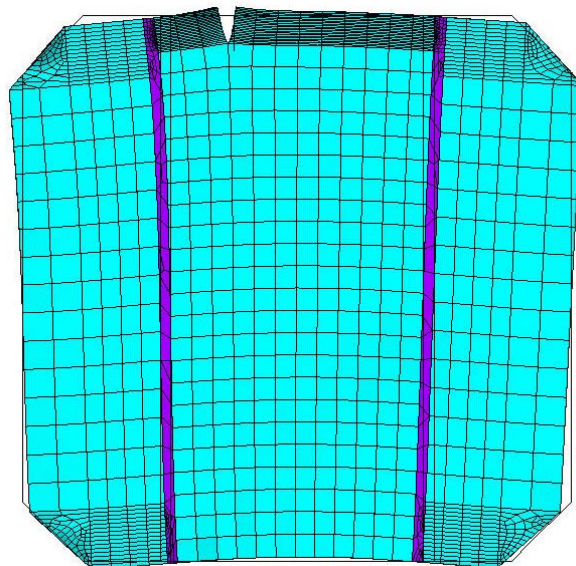


圖 3.19 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 19.2kHz 對應之振形

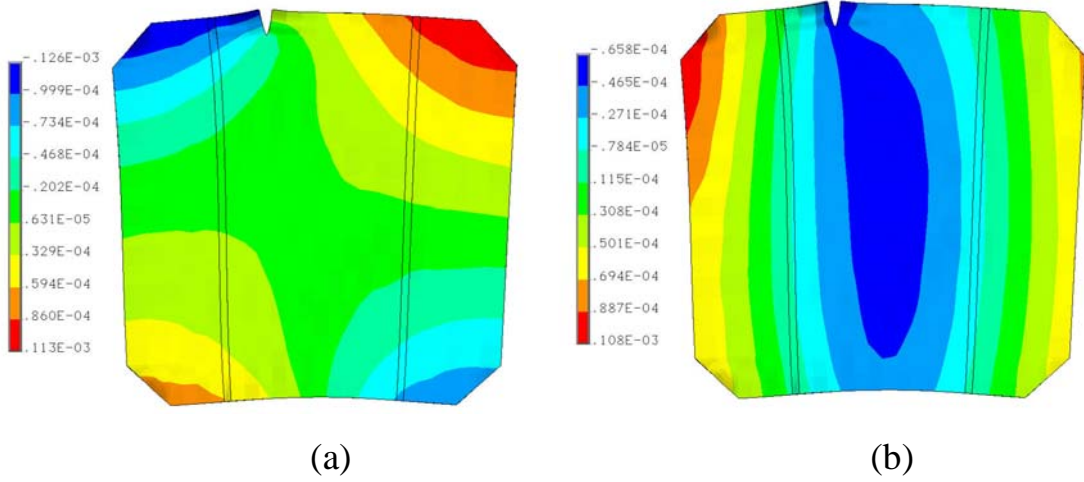


圖 3.20 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 19.2kHz 對應之振形  
 (a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量

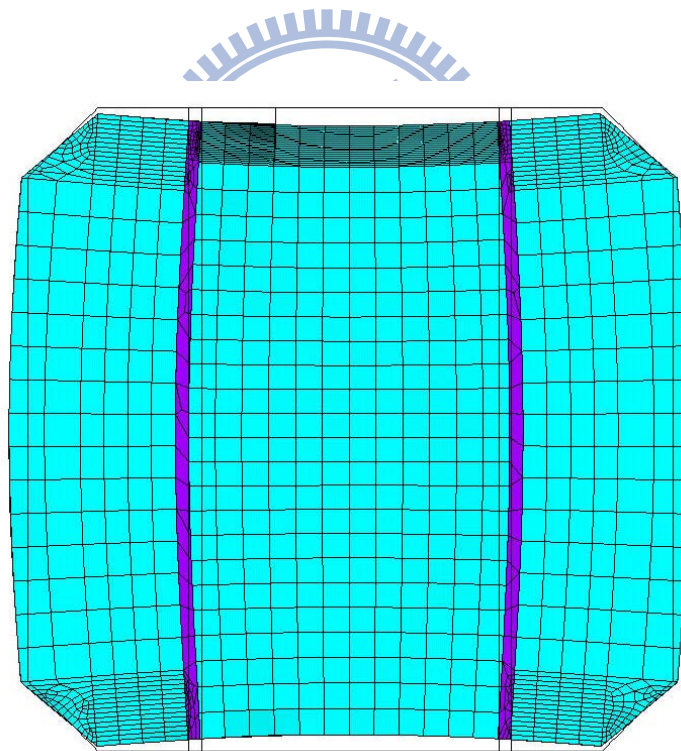


圖 3.21 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 20.24kHz 對應之振形



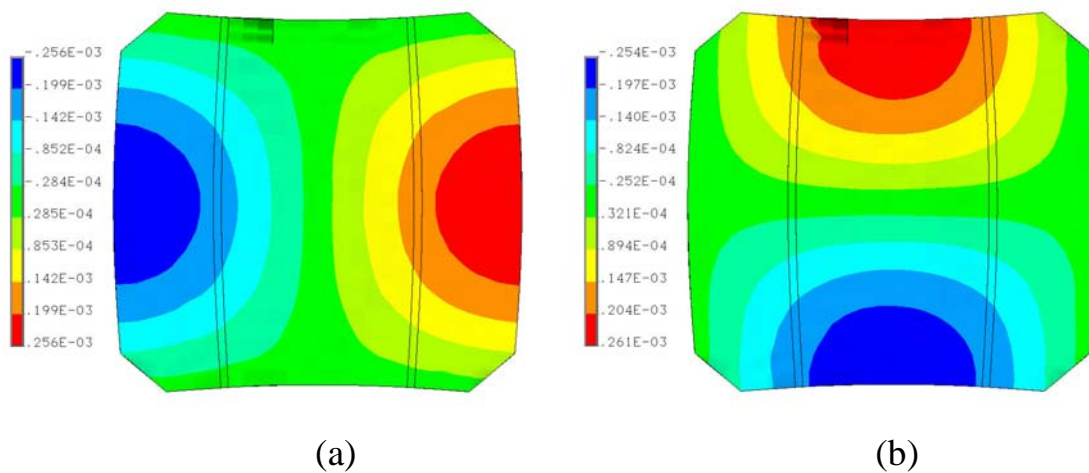


圖 3.22 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 20.24kHz 對應之振形  
 (a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量

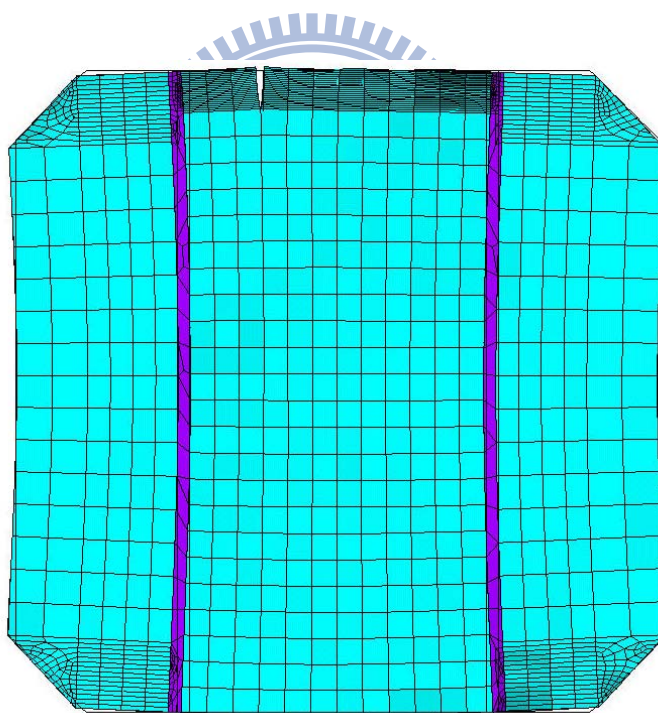


圖 3.23 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 24.48kHz 對應之振形

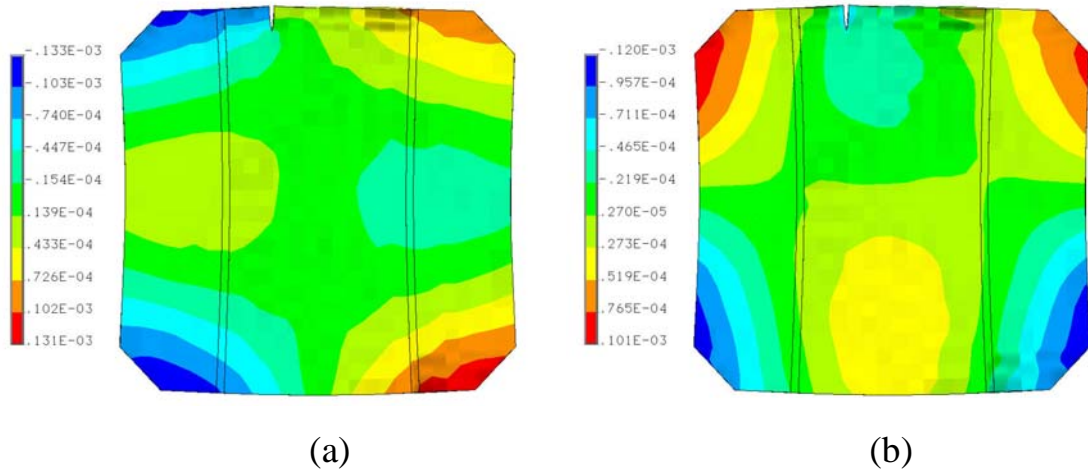


圖 3.24 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 24.48kHz 對應之振形  
 (a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量

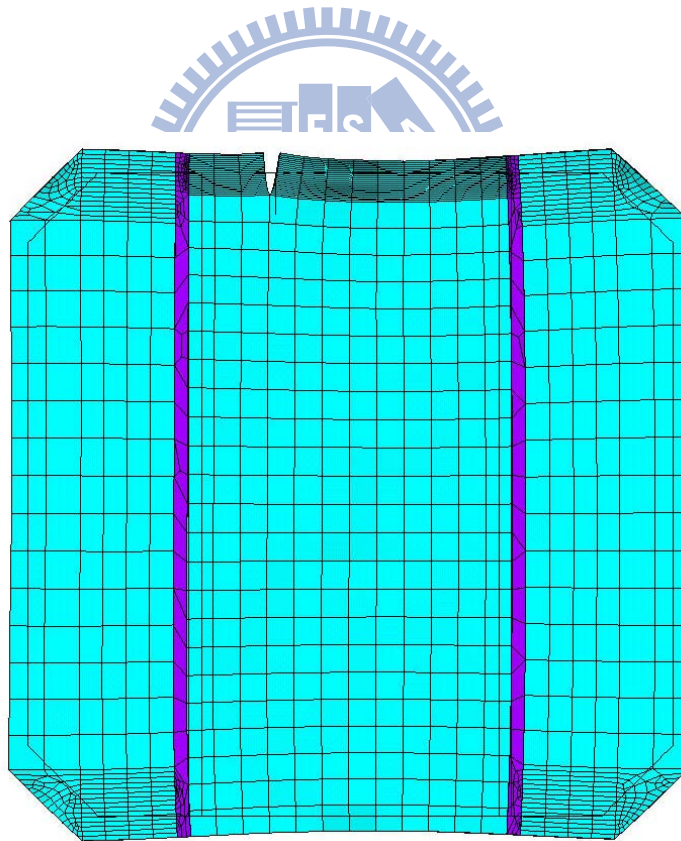


圖 3.25 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 27.2kHz 對應之振形

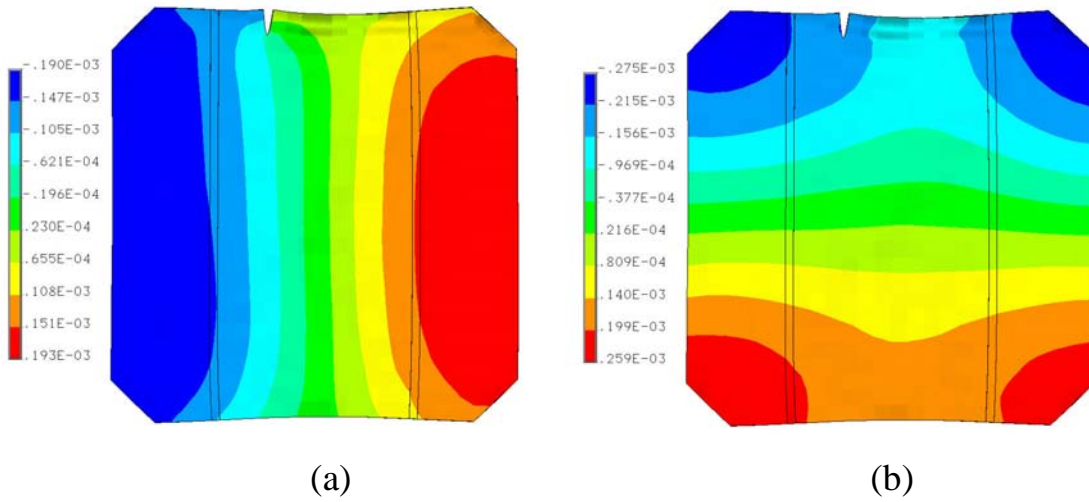


圖 3.26 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 27.2kHz 對應之振形  
 (a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量

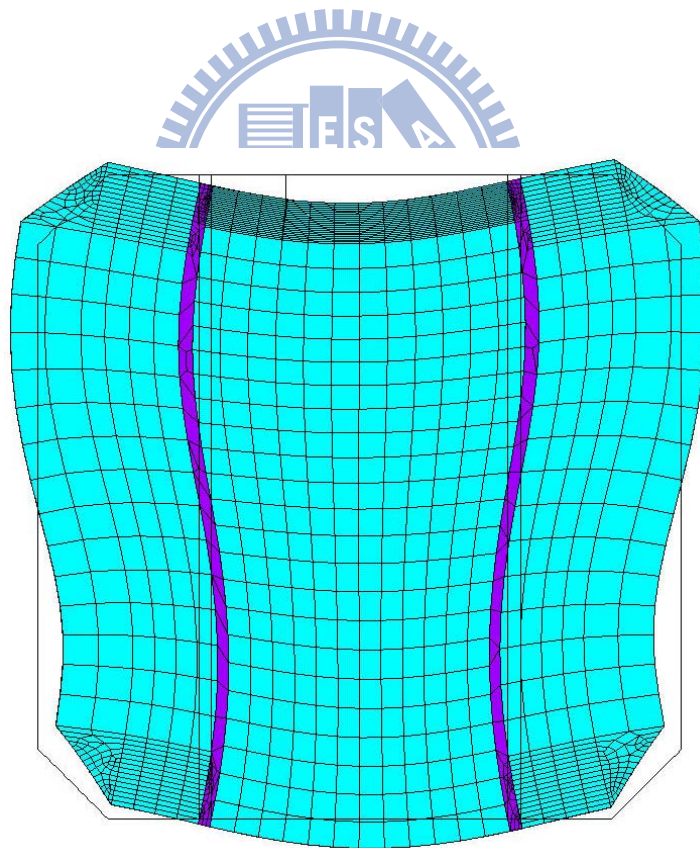
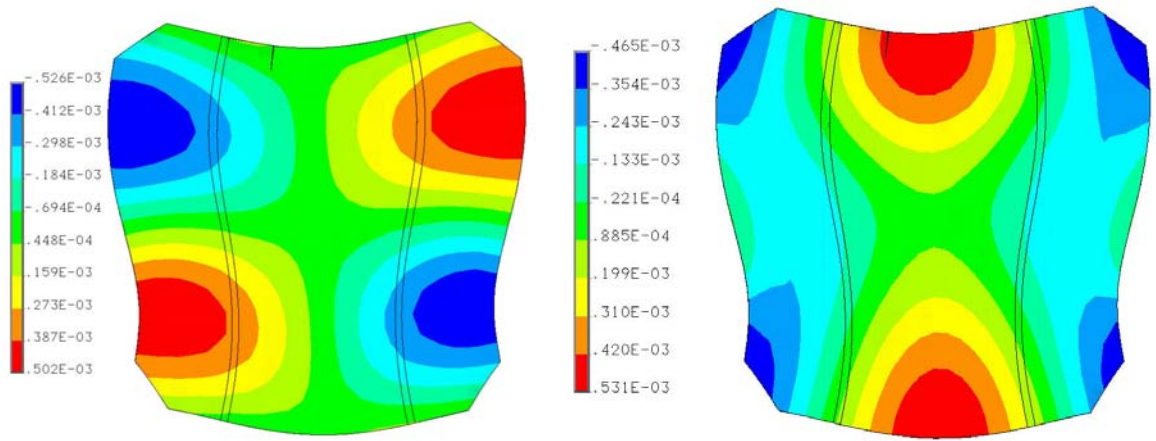


圖 3.27 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 29.28kHz 對應之振形



(a)

(b)

圖 3.28 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 29.28kHz 對應之振形

(a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量



圖 3.29 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 35.68kHz 對應之振形

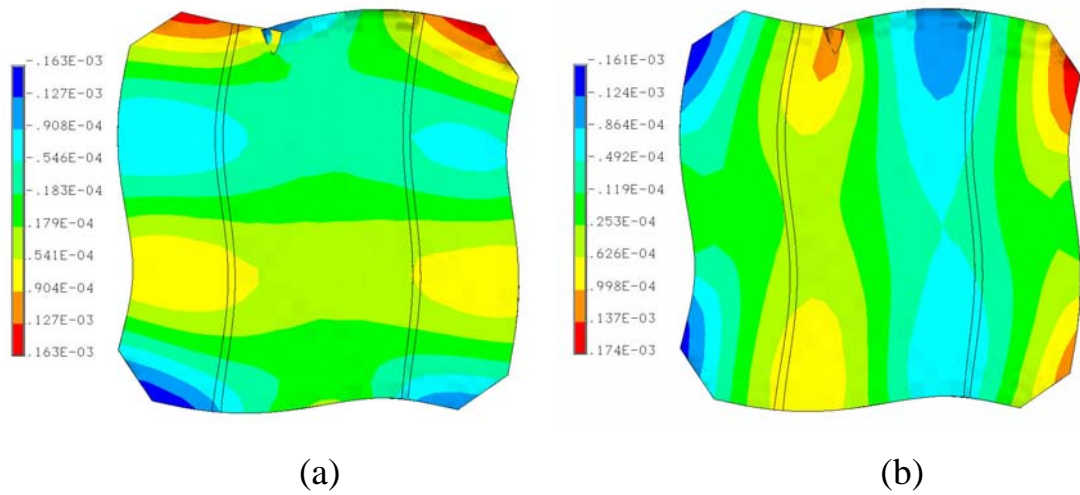


圖 3.30 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 35.68kHz 對應之振形  
 (a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量

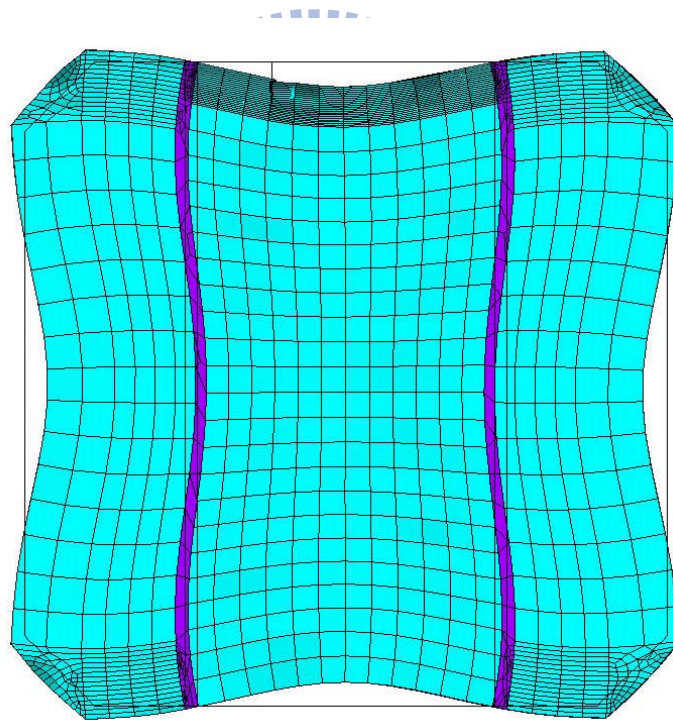


圖 3.31 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 39.44kHz 對應之振形

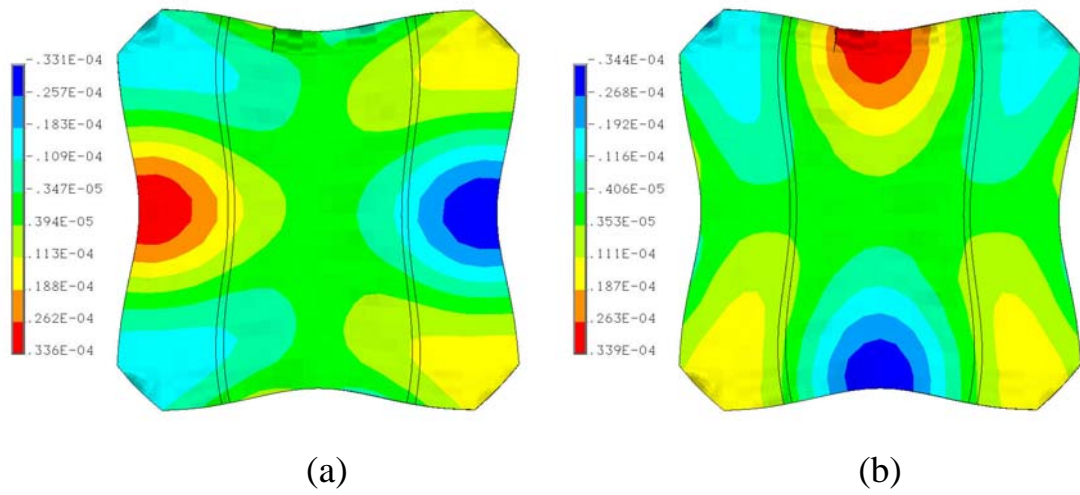


圖 3.32 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 39.44kHz 對應之振形  
 (a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量

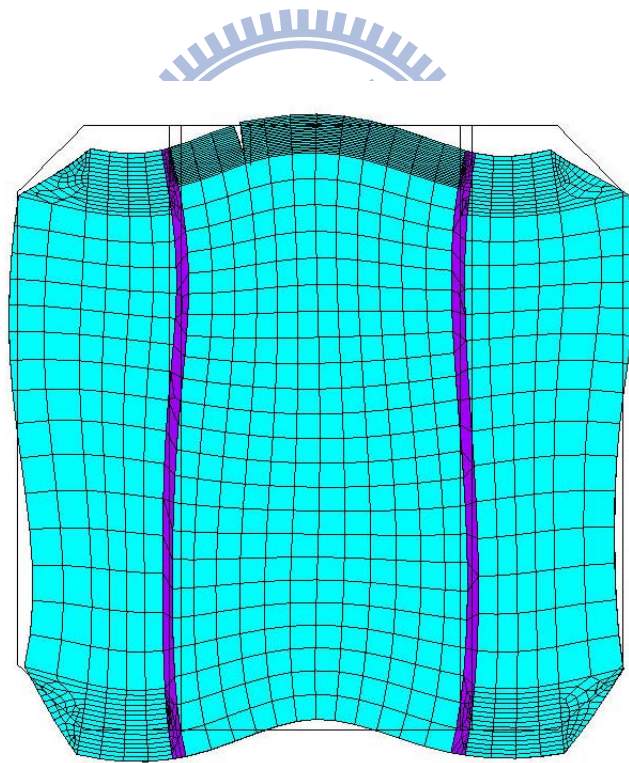


圖 3.33 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 47.84kHz 對應之振形

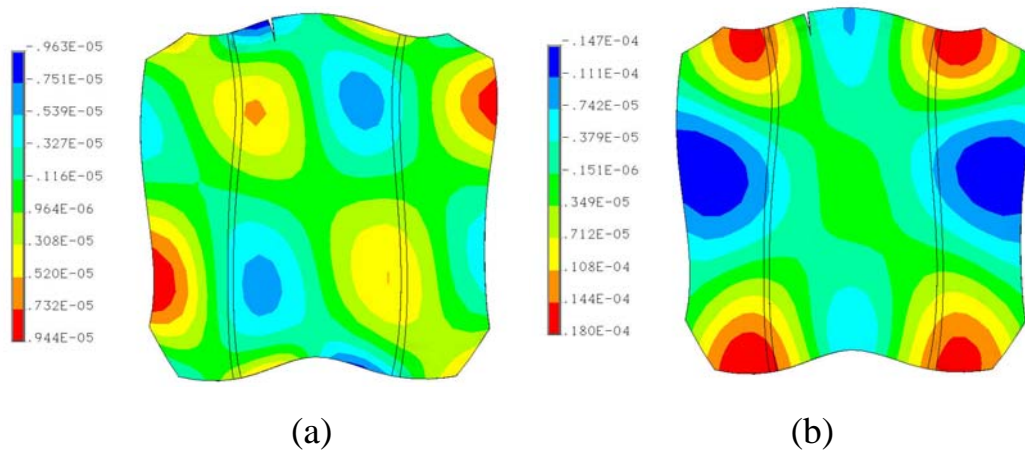
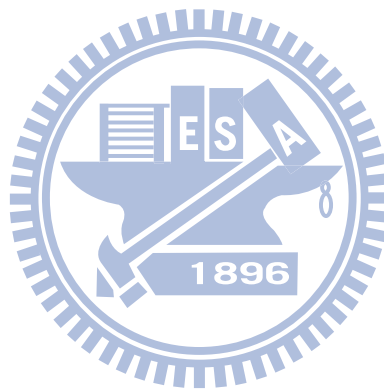


圖 3.34 含裂縫太陽能電池矽基板面內共振頻率 47.84kHz 對應之振形  
 (a)X 方向位移分量、(b)Z 方向位移分量



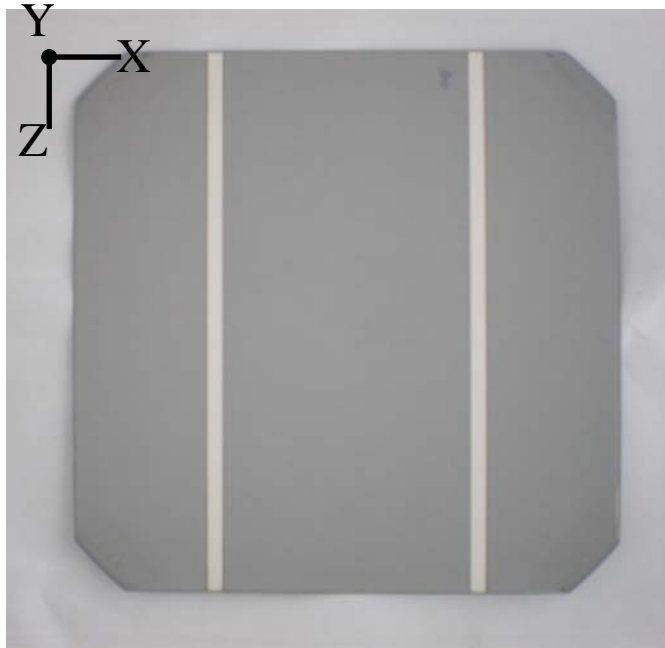


圖 4.1 太陽能電池 XZ 座標平面之定義

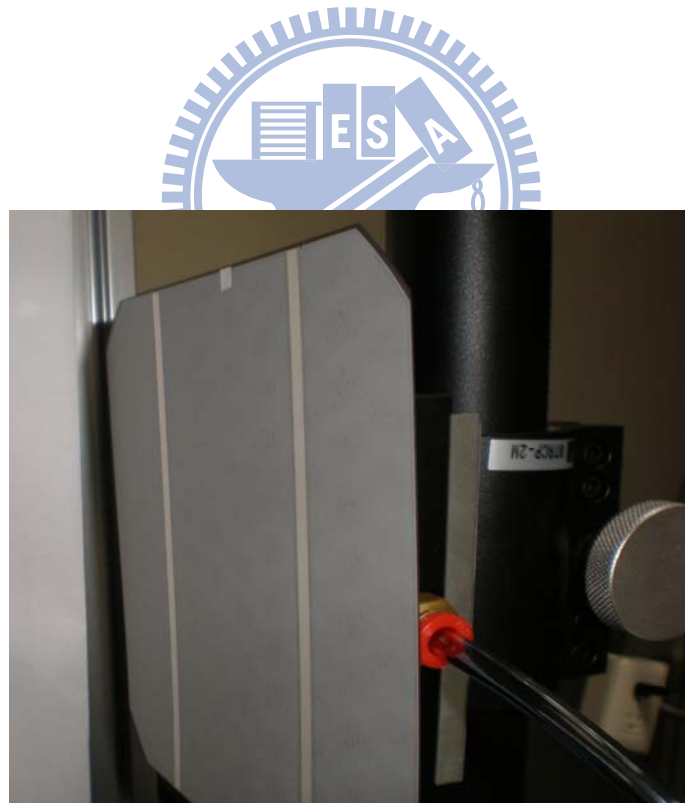


圖 4.2 雷射都卜勒振動儀實驗量測之試片治具



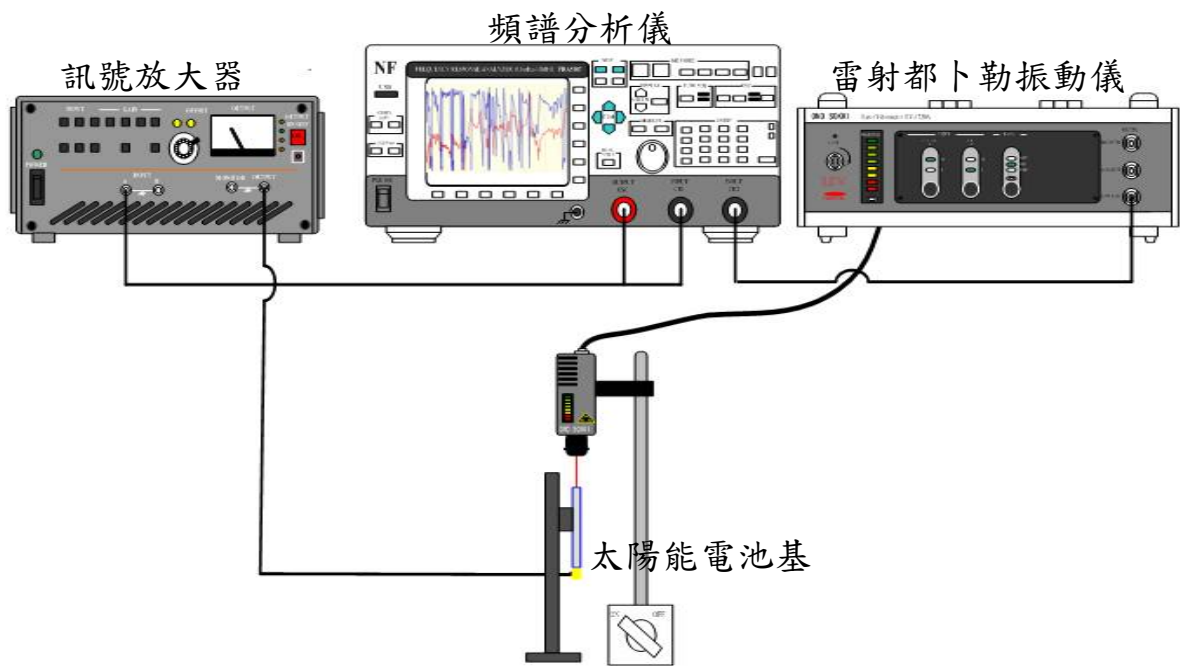


圖 4.3 雷射都卜勒振動儀實驗架構示意圖



圖 4.4 太陽能電池下緣黏貼主動式壓電纖維複材作為激振源



(a)



(b)

圖 4.5 以 LDV 量測面內共振頻率之太陽能電池及量測點

(a)試片 S1，(b)試片 S2

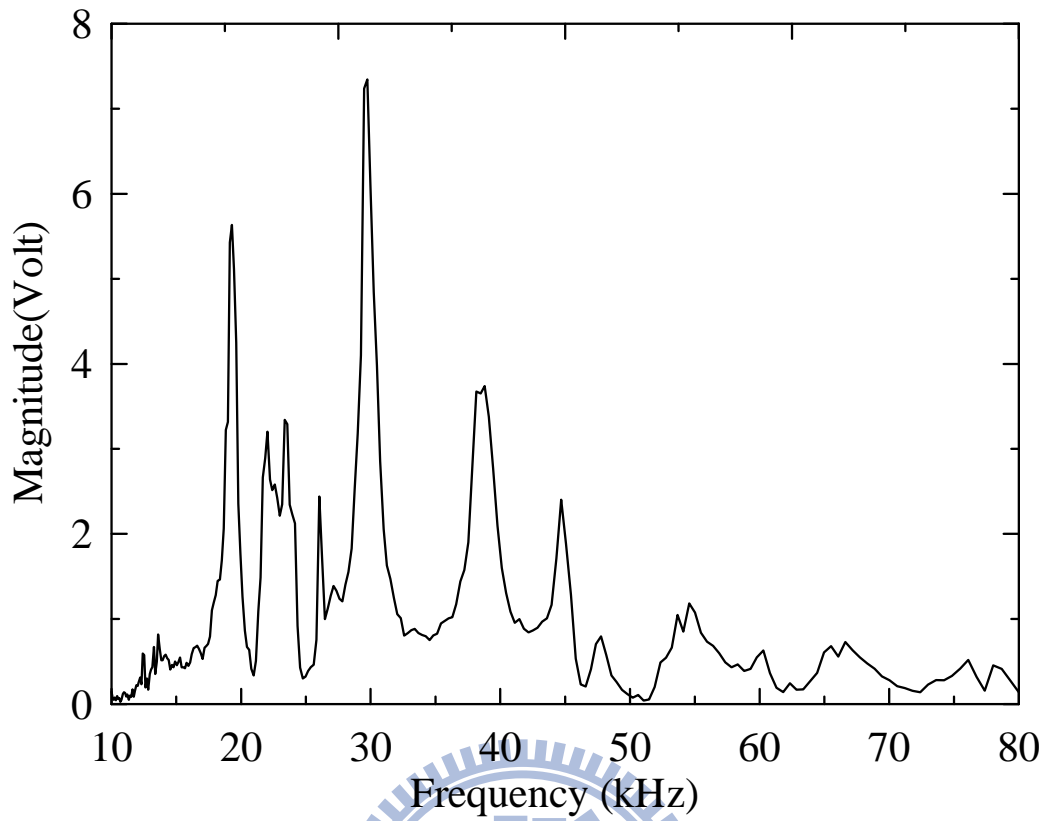


圖 4.6 LDV 量測太陽能電池 S1 試片 A 點之面內振動的頻率響應曲線

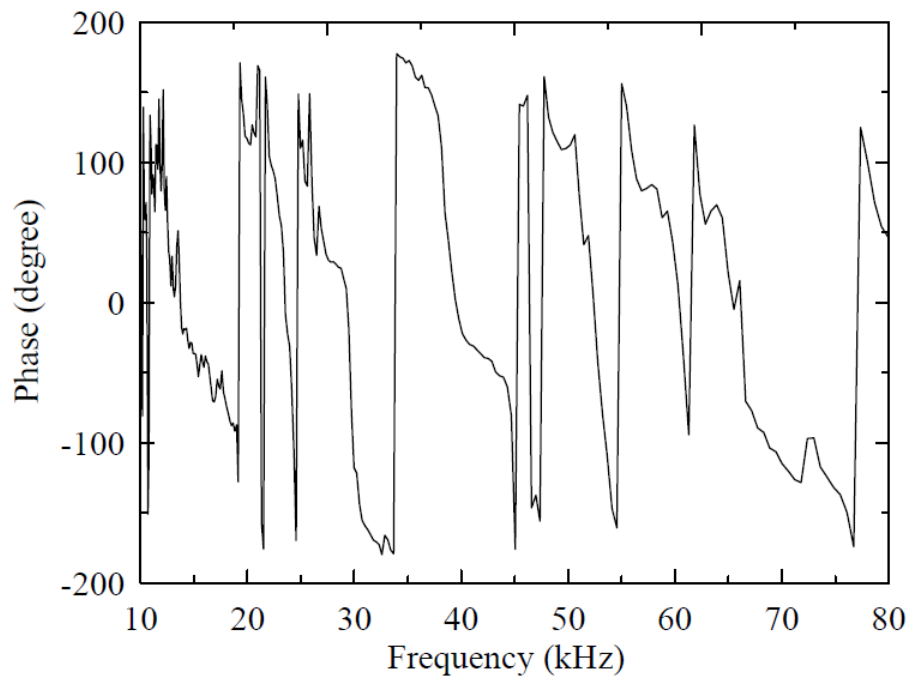


圖 4.7 LDV 量測太陽能電池 S1 試片 A 點之面內振動的相位頻率響應曲線

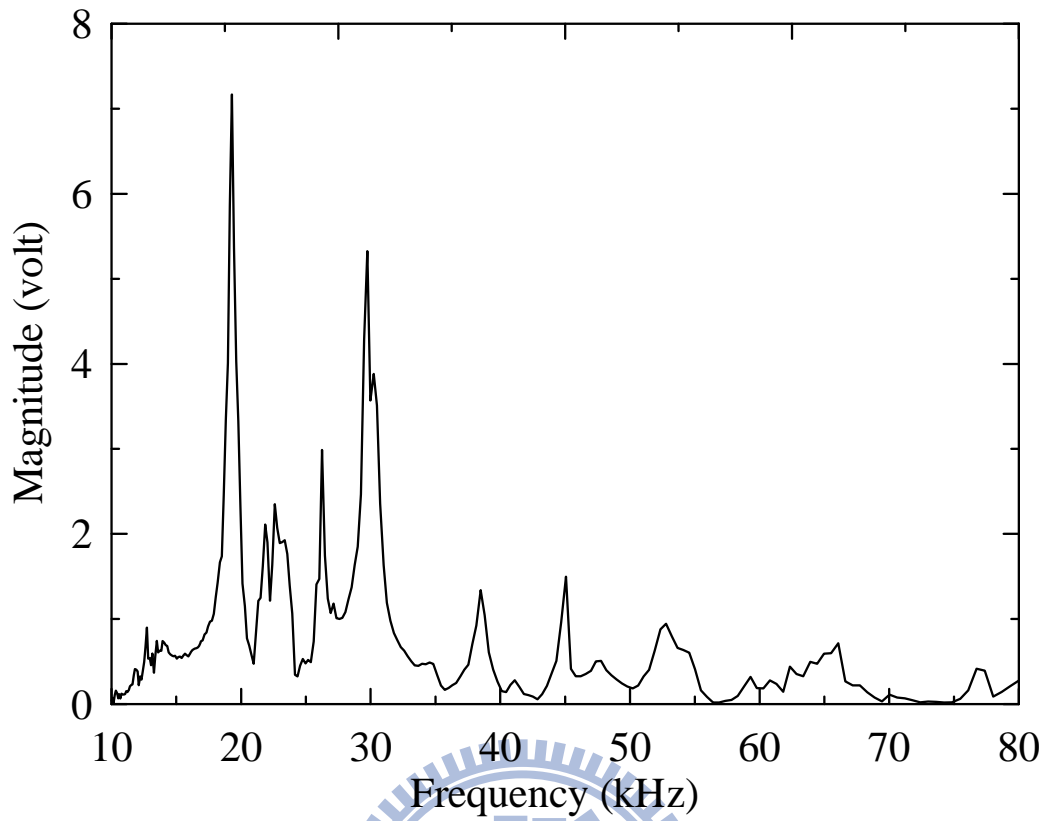


圖 4.8 LDV 量測太陽能電池 S1 試片 B 點之面內振動的頻率響應曲線

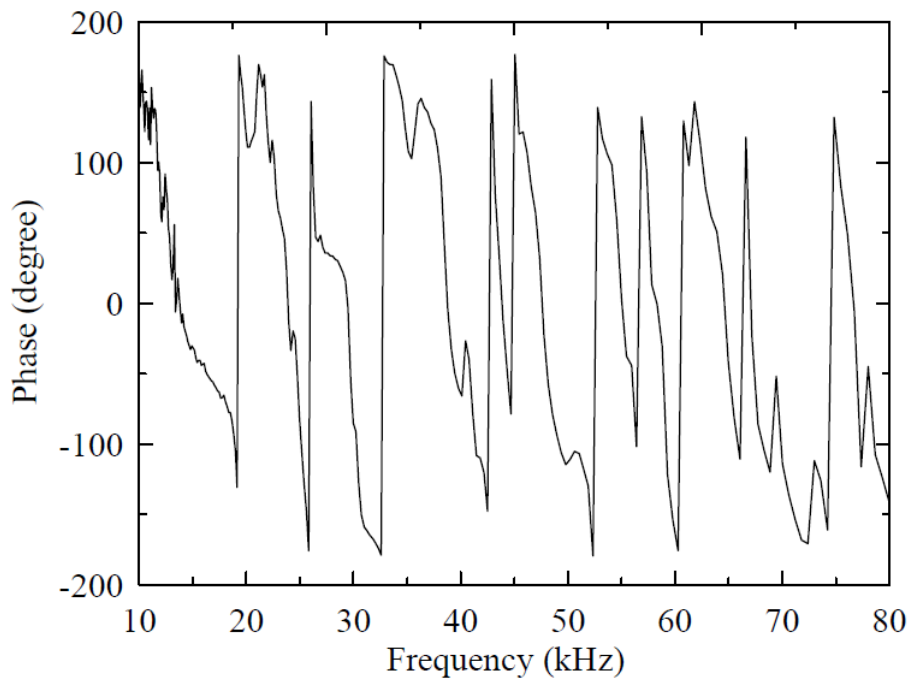


圖 4.9 LDV 量測太陽能電池 S1 試片 B 點之面內振動的相位頻率響應曲線

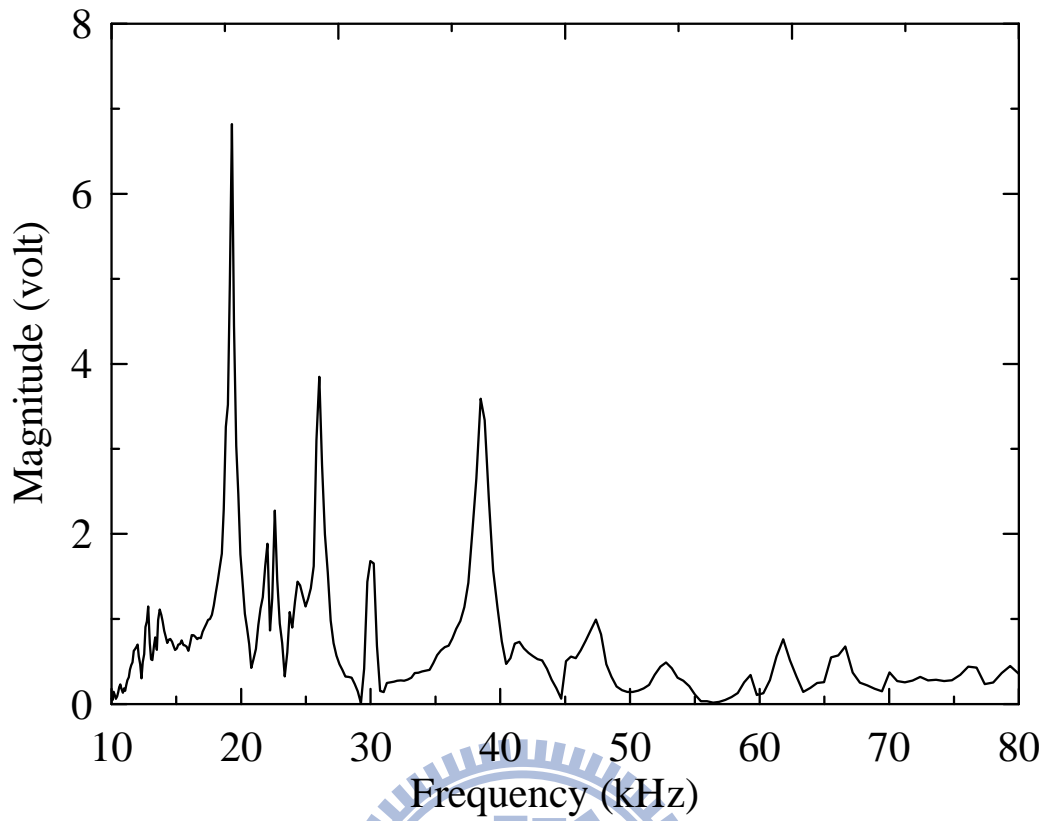


圖 4.10 LDV 量測太陽能電池 S1 試片 C 點之面內振動的頻率響應曲線

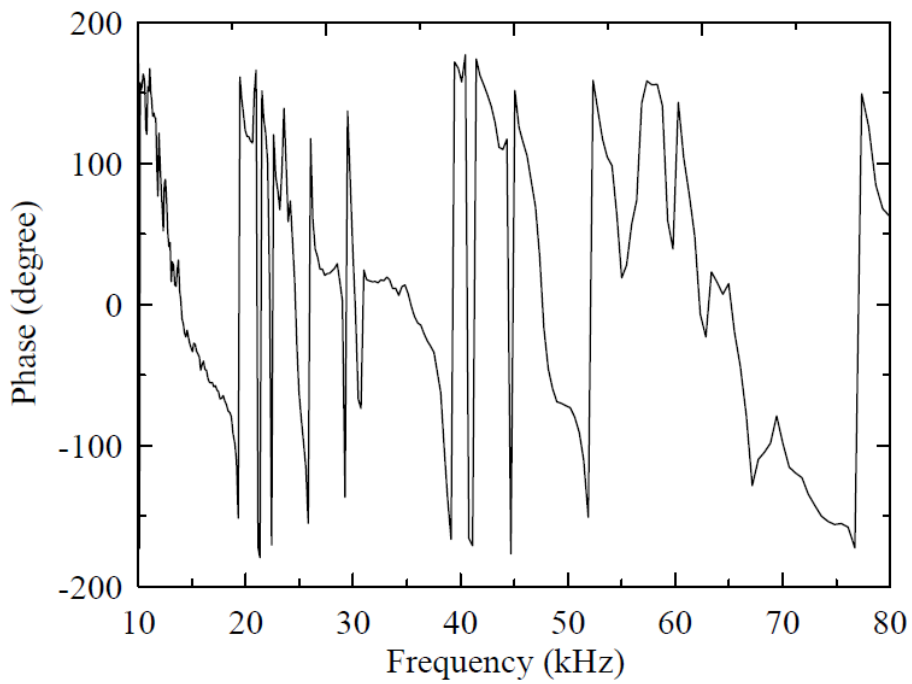


圖 4.11 LDV 量測太陽能電池 S1 試片 C 點之面內振動的相位頻率響應曲線

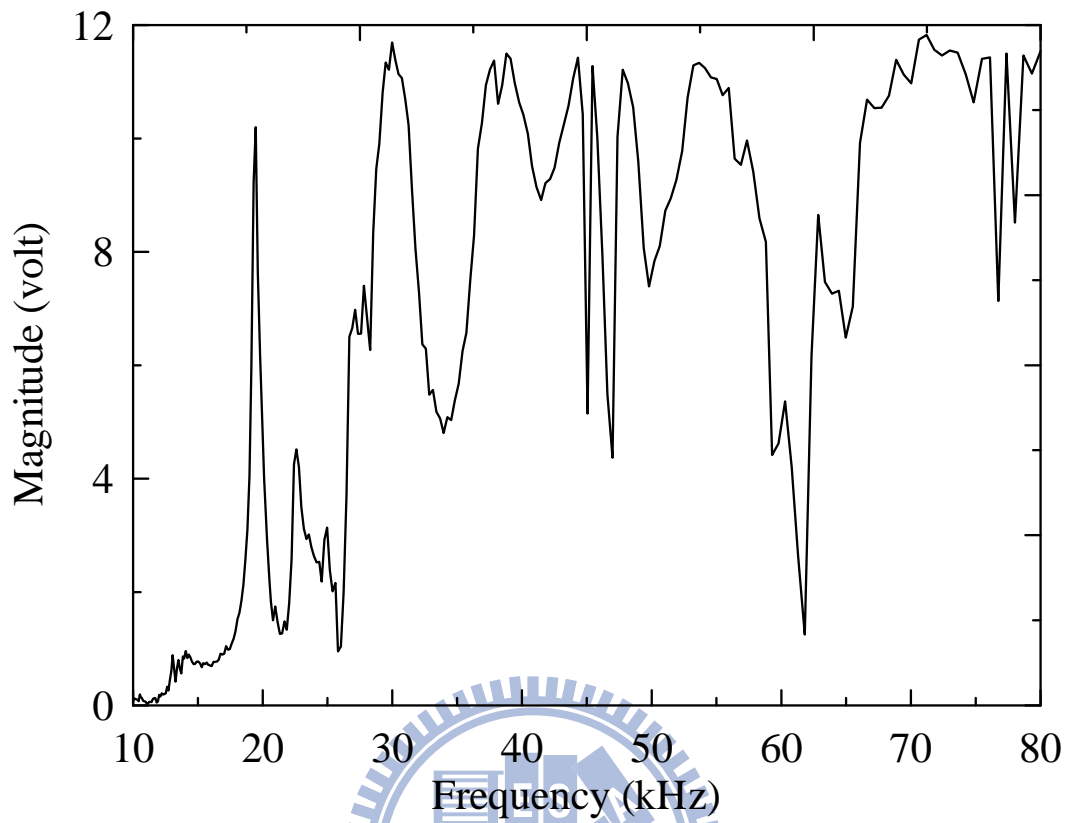


圖 4.12 LDV 量測太陽能電池 S2 試片 A 點之面內振動的頻率響應曲線

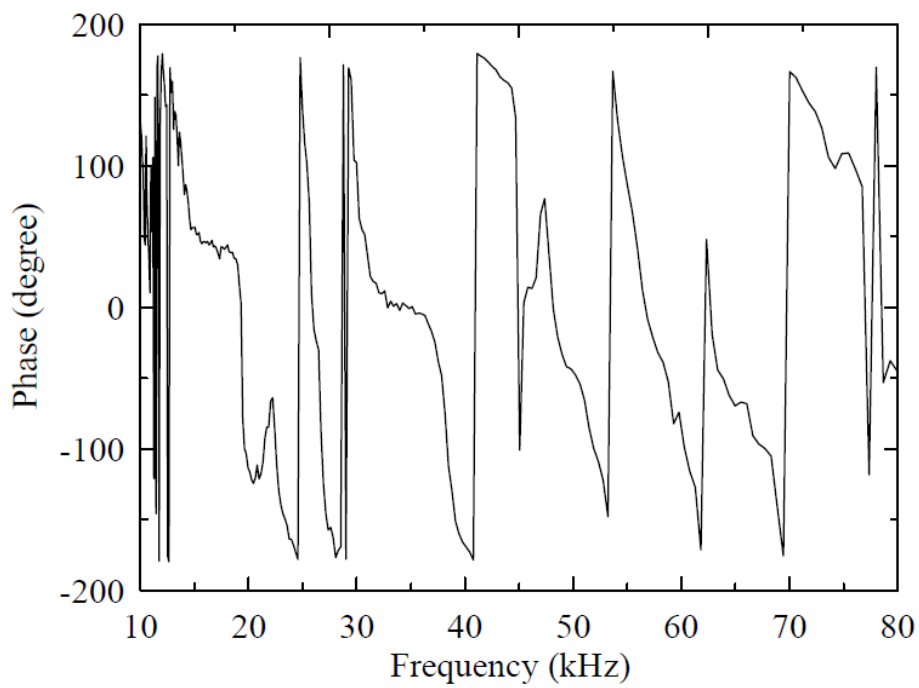


圖 4.13 LDV 量測太陽能電池 S2 試片 A 點之面內振動的相位頻率響應曲線

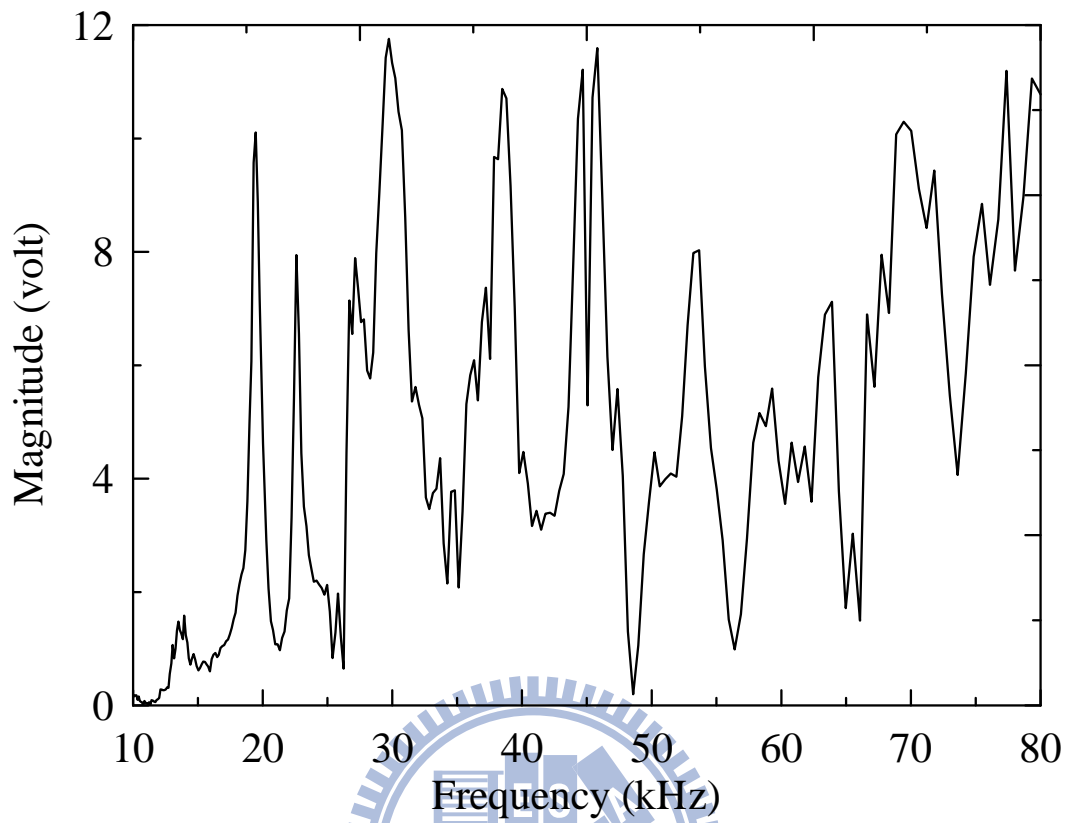


圖 4.14 LDV 量測太陽能電池 S2 試片 B 點之面內振動的頻率響應曲線

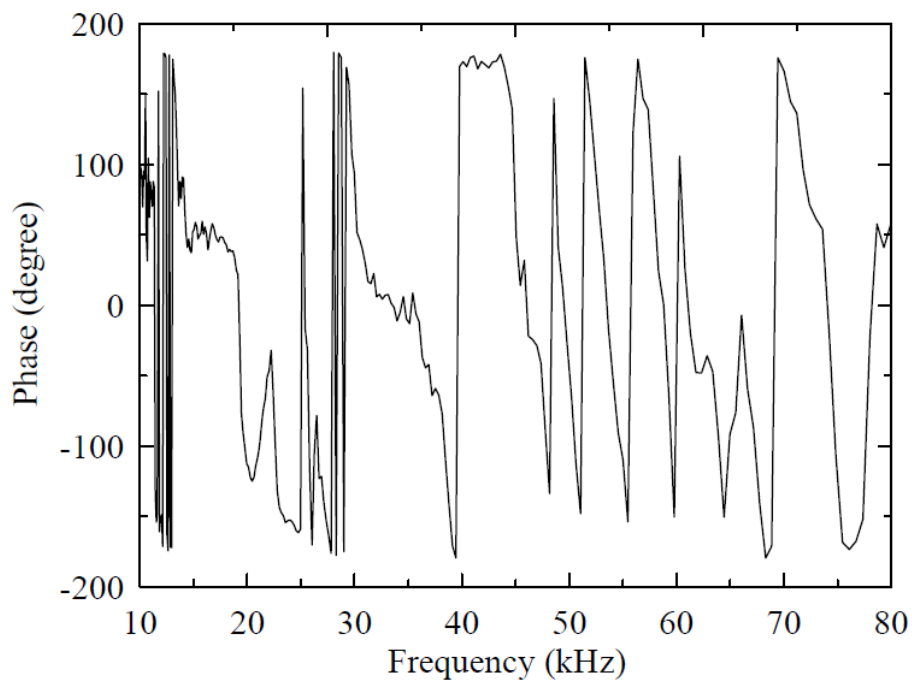


圖 4.15 LDV 量測太陽能電池 S2 試片 B 點之面內振動的相位頻率響應曲線

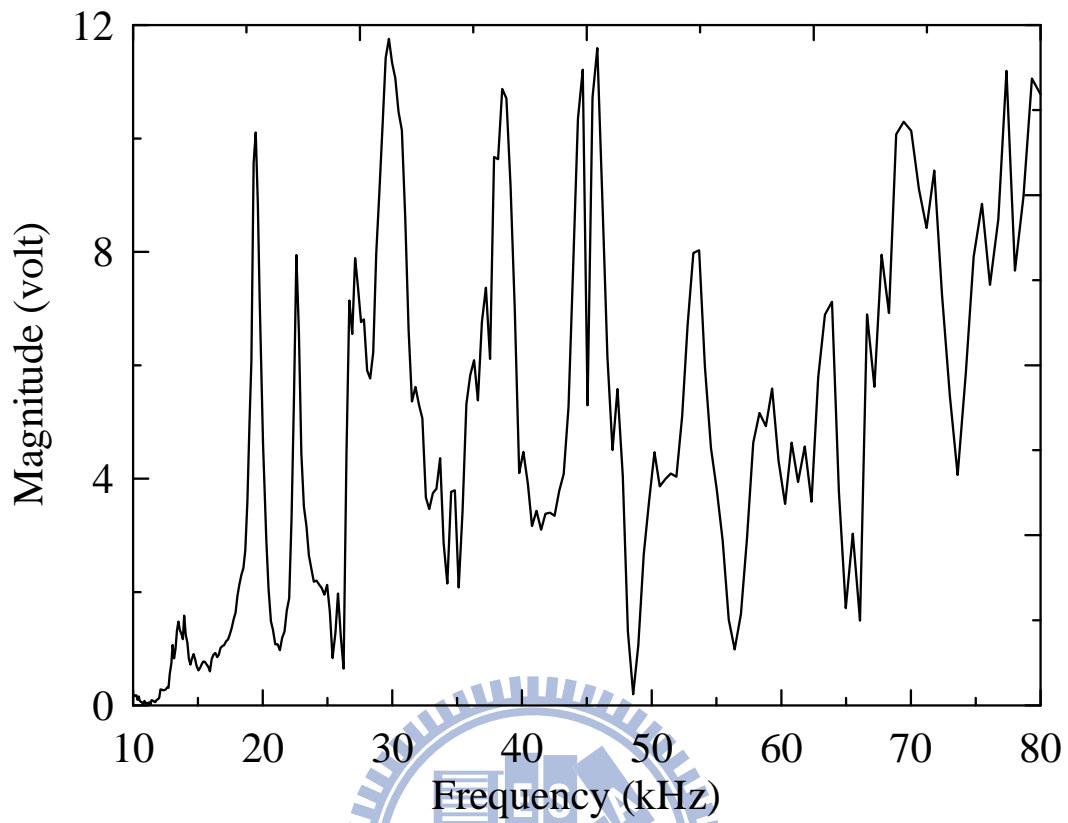


圖 4.16 LDV 量測太陽能電池 S2 試片 C 點之面內振動的頻率響應曲線

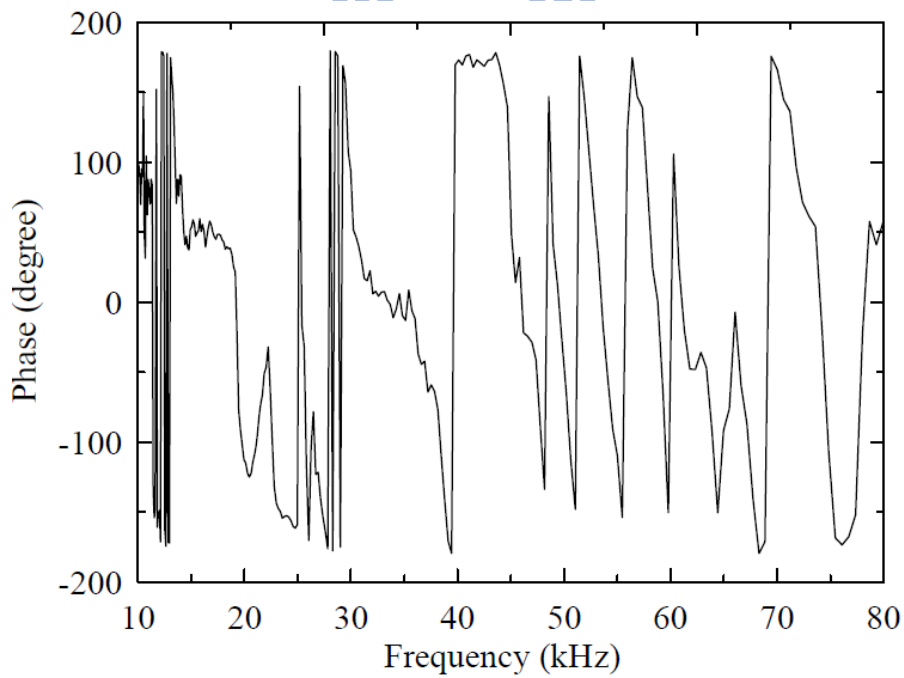
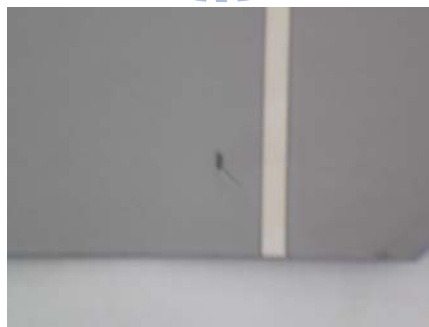


圖 4.17 LDV 量測太陽能電池 S2 試片 C 點之面內振動的相位頻率響應曲線





(a)



(b)

圖 4.18 含裂縫太陽能電池基板照片  
(a)試片整體照片、(b)缺陷放大照片

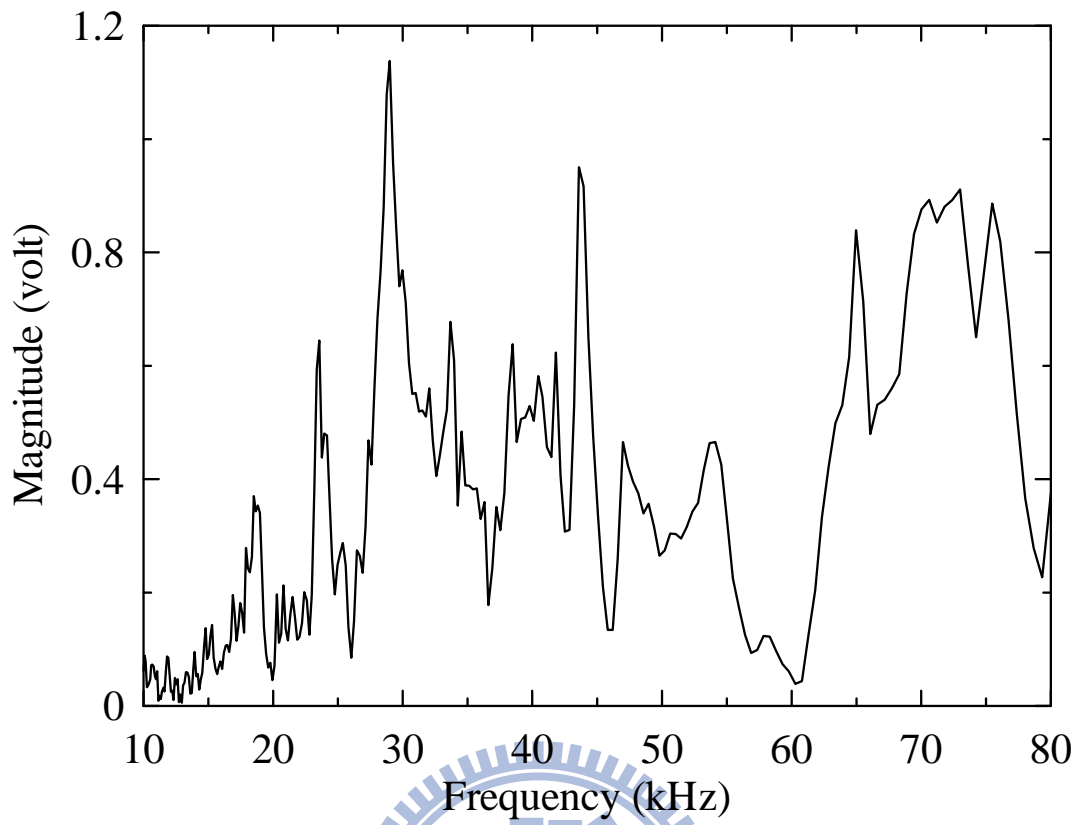


圖 4.19 LDV 量測含裂縫太陽能電池基板面內振動的頻率響應曲線

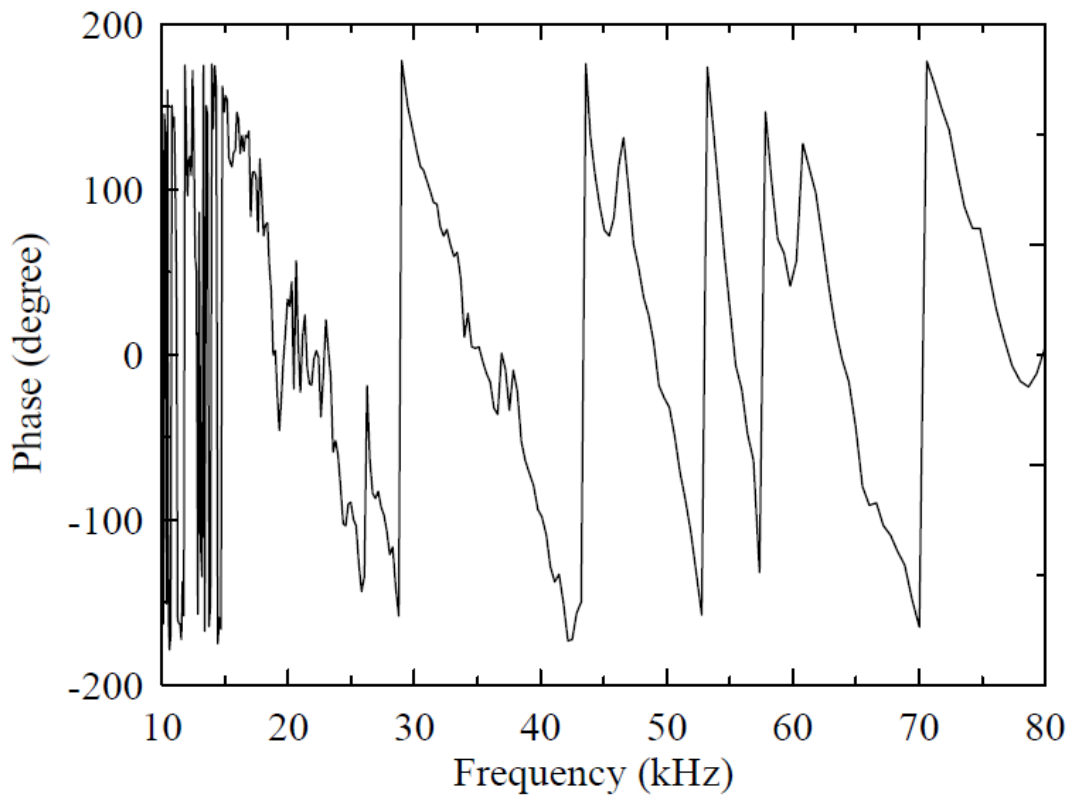


圖 4.20 LDV 量測含裂縫太陽能基板電池面內振動的相位頻率響應曲線

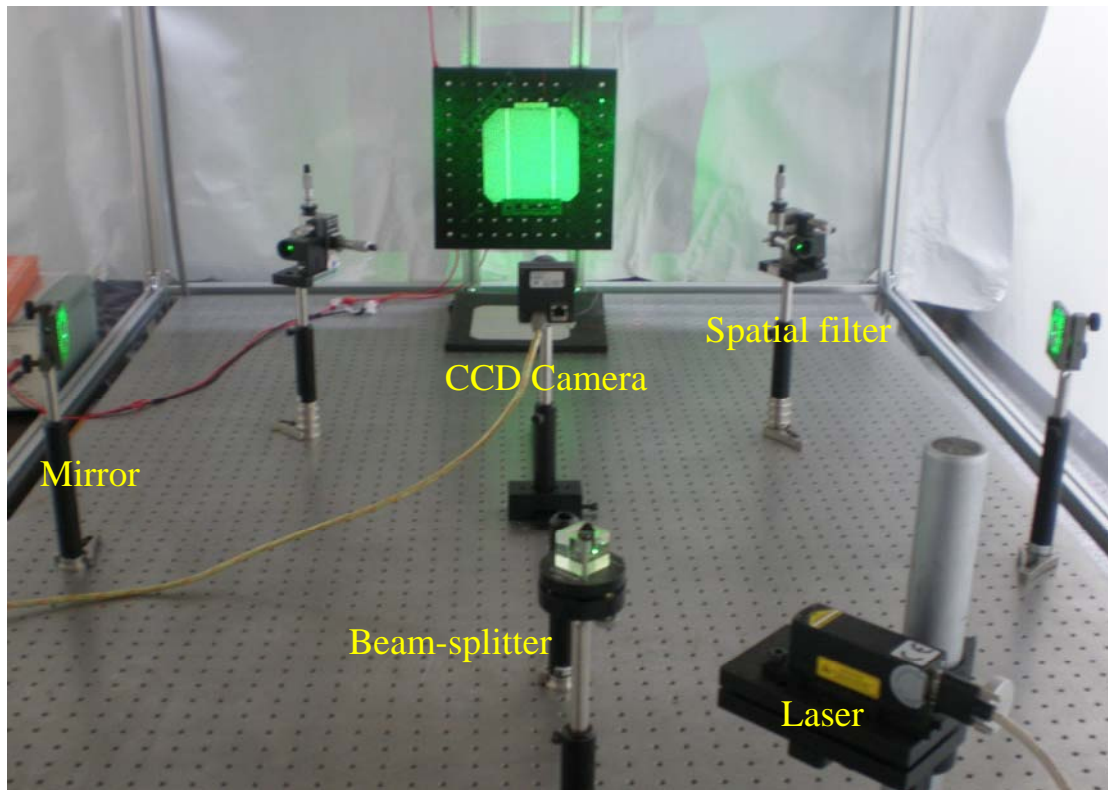
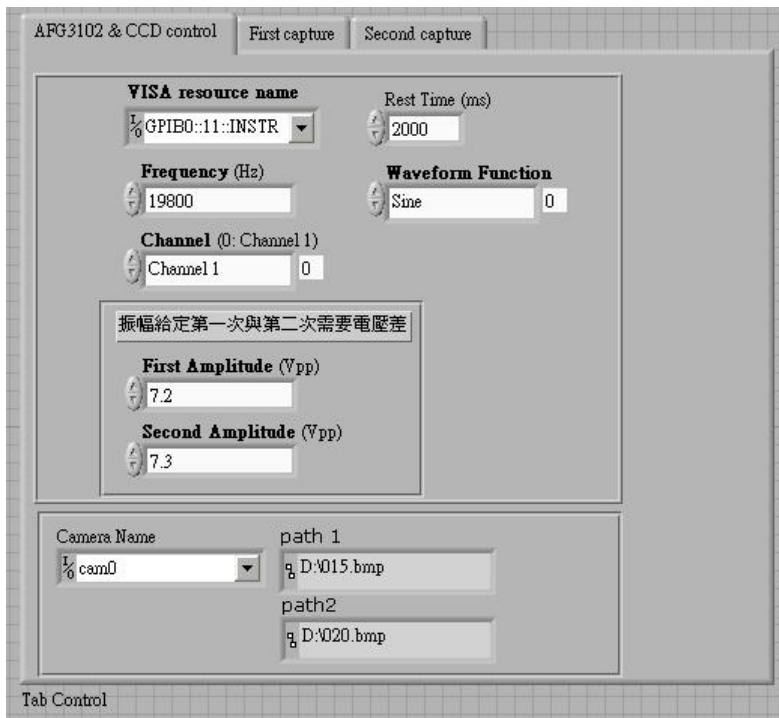
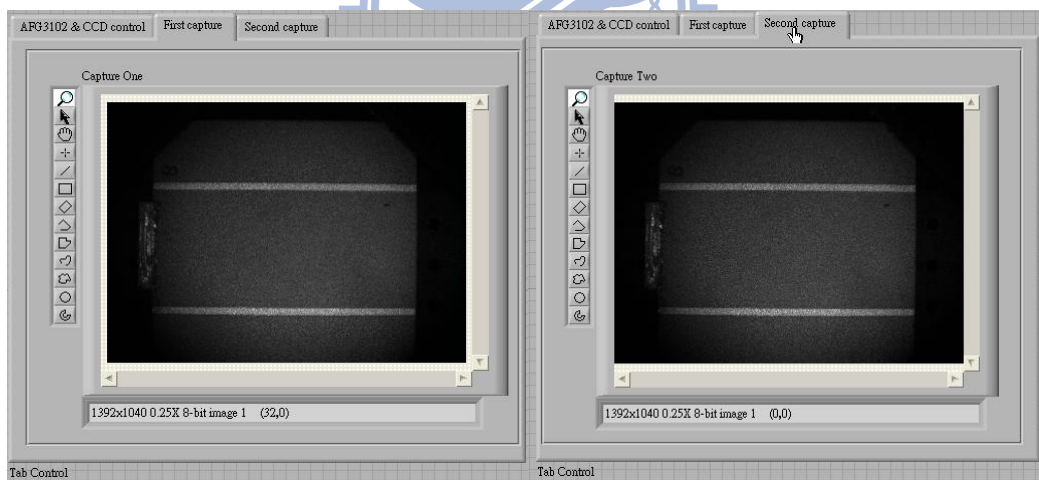


圖 4.21 電子光斑干涉術量測面內振動的光路架設照片





(a)



(b)

圖 4.22 LabVIEW 圖控程式介面

(a)實驗參數面板、(b)影像擷取面板

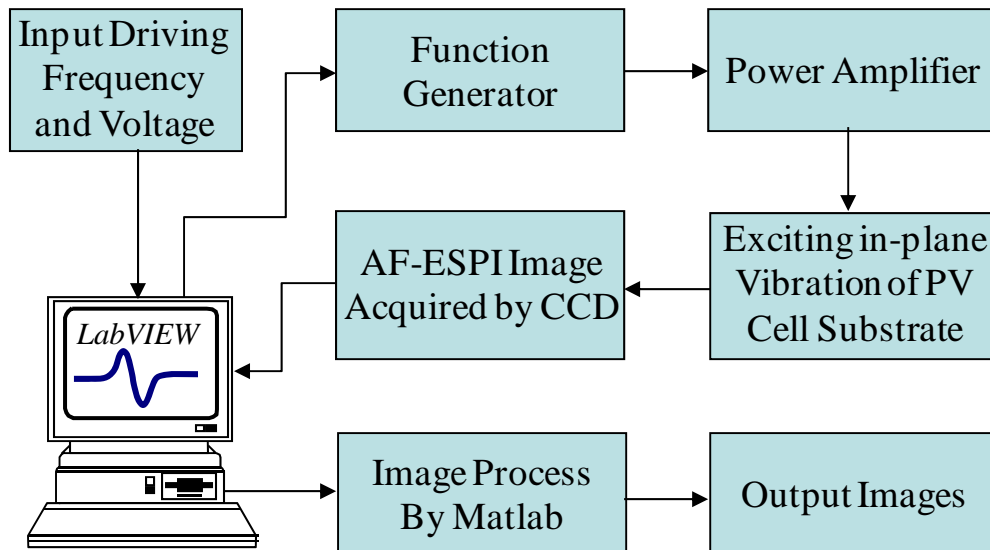
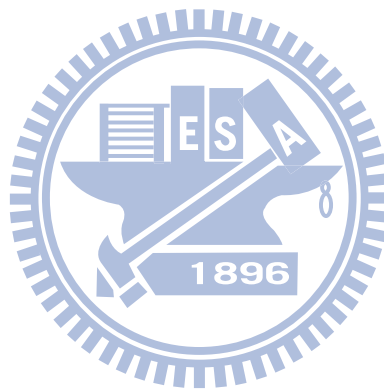
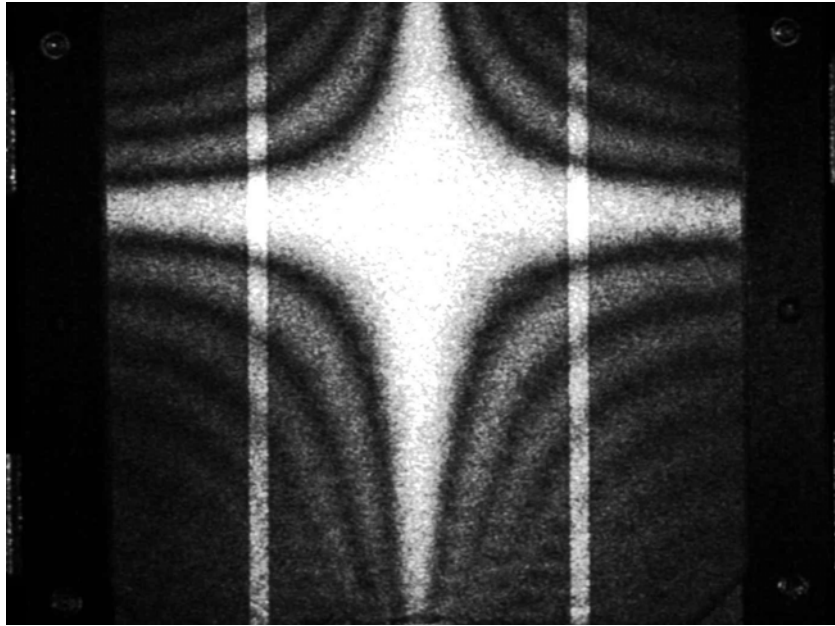
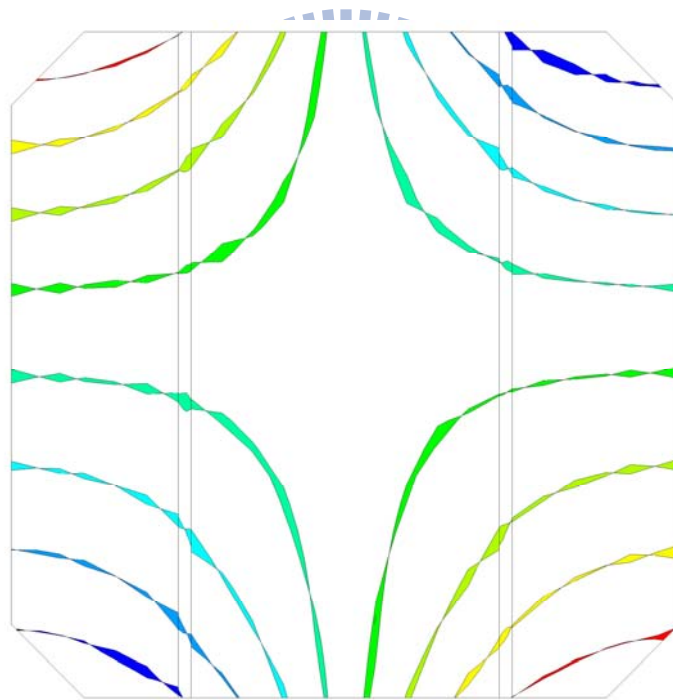


圖 4.23 自動化電子光斑面內振動實驗流程圖



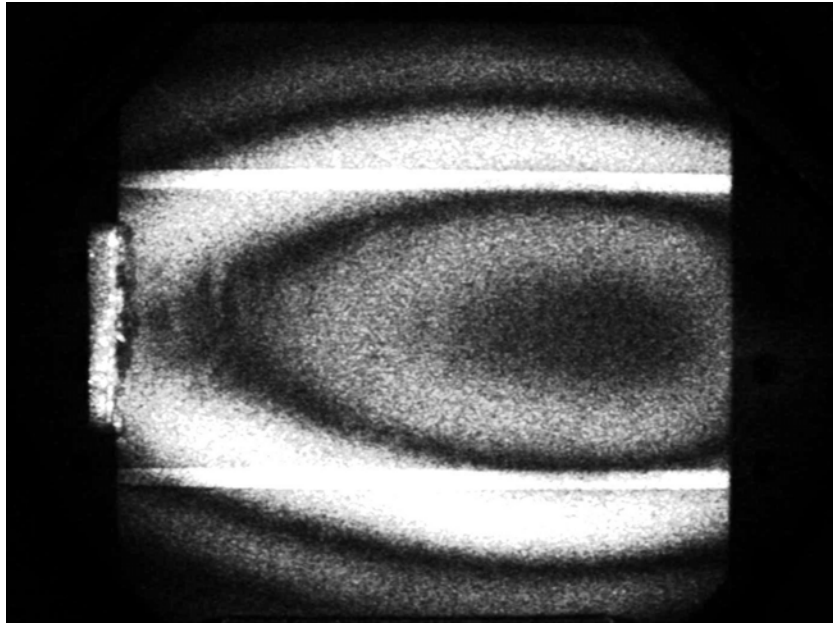


(a)

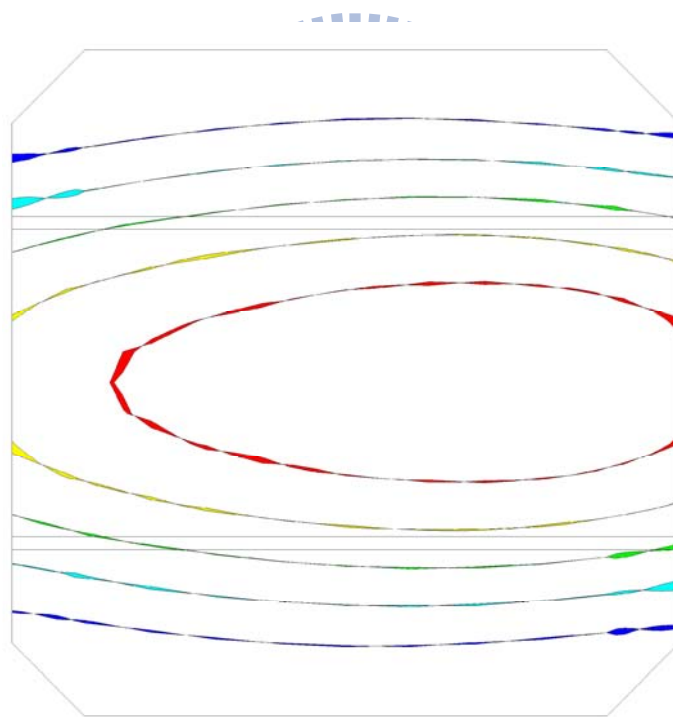


(b)

圖 4.24 完整太陽能電池基板於 19.8kHz 驅動頻率下之 X 方向位移分量  
(a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線

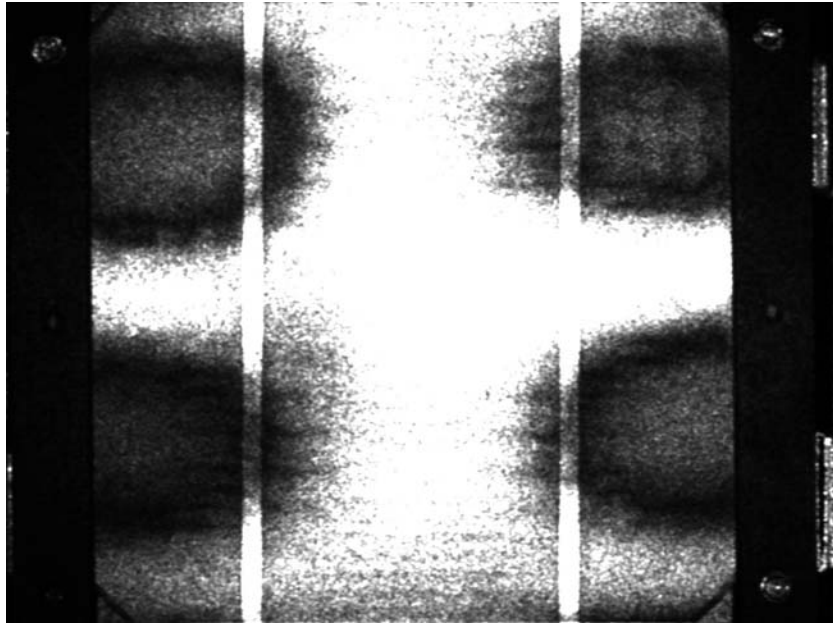


(a)

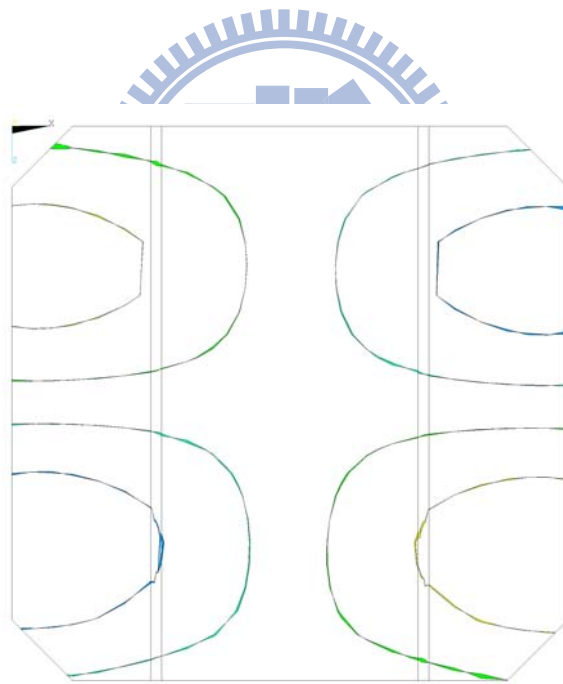


(b)

圖 4.25 完整太陽能電池基板於 19.8kHz 驅動頻率下之 Z 方向位移分量  
(a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線



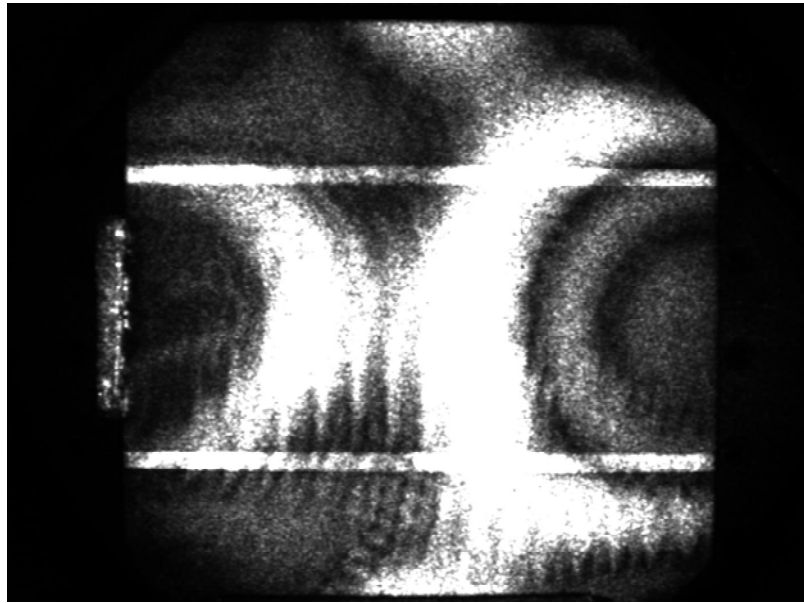
(a)



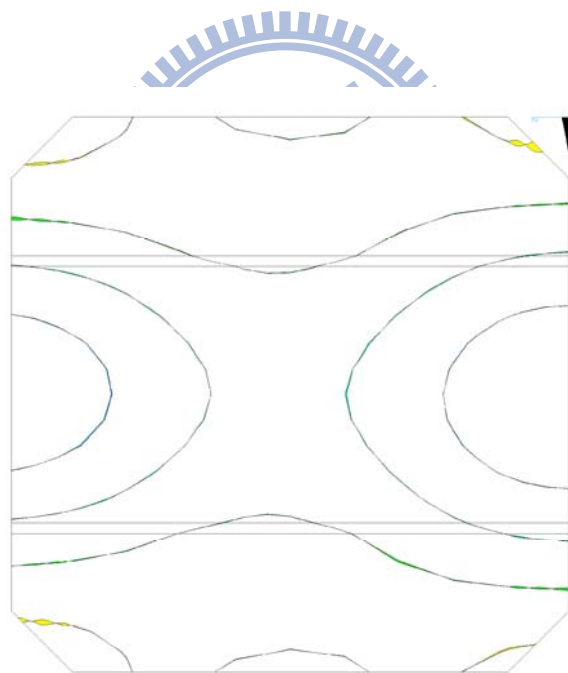
(b)

圖 4.26 完整太陽能電池基板於 29.85kHz 驅動頻率下之 X 方向位移分量  
(a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線



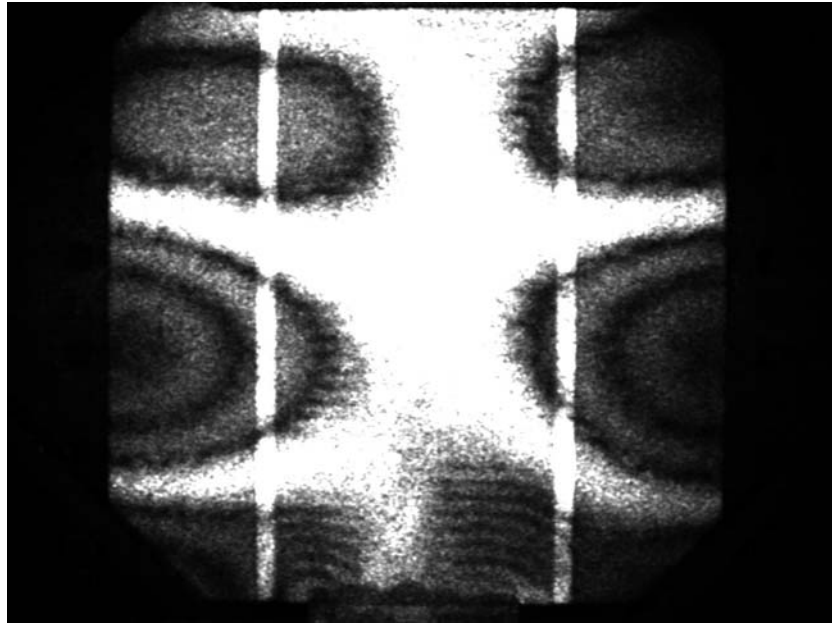


(a)

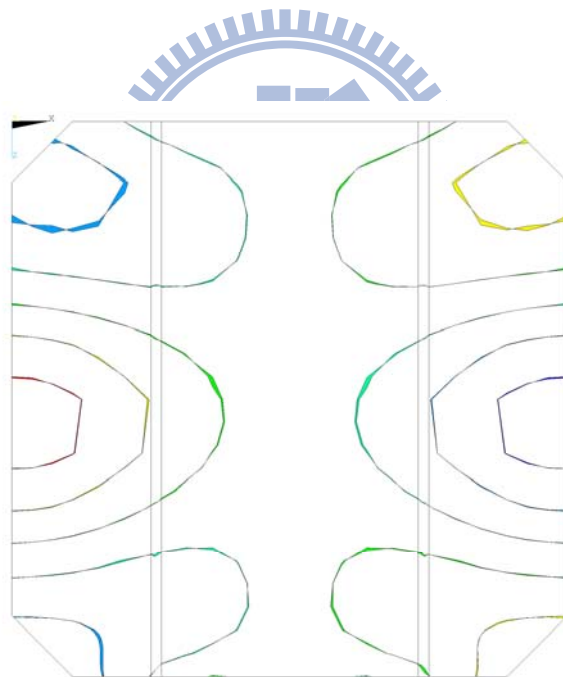


(b)

圖 4.27 完整太陽能電池基板於 29.85kHz 驅動頻率下之 Z 方向位移分量  
(a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線

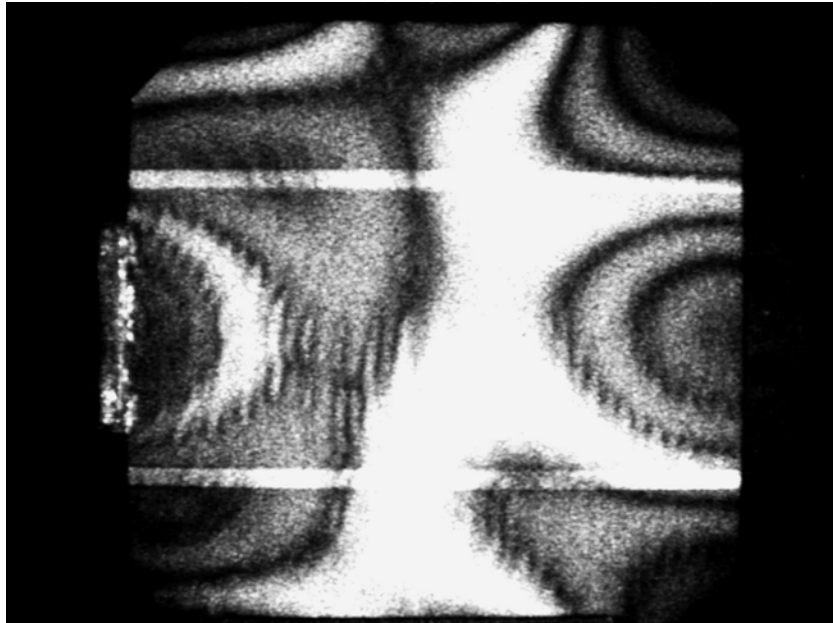


(a)

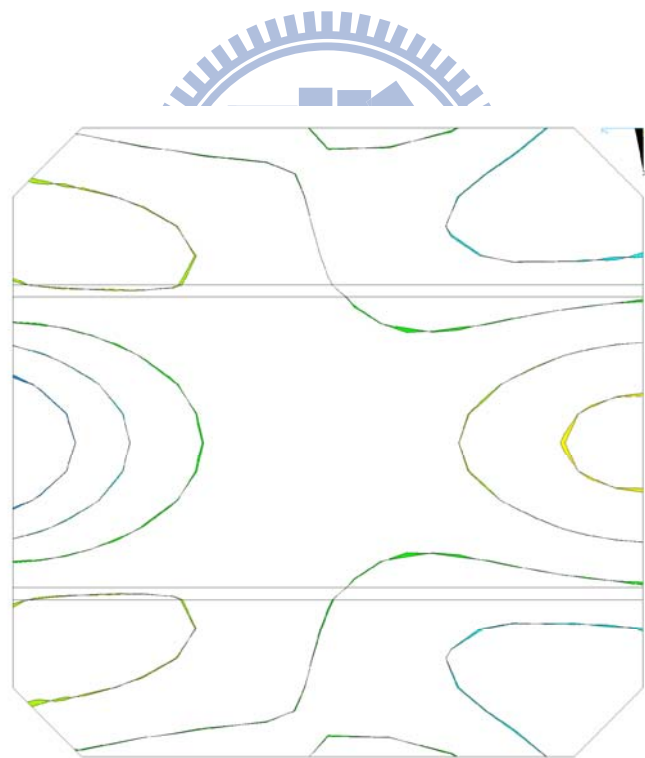


(b)

圖 4.28 完整太陽能電池基板於 38.65kHz 驅動頻率下之 X 方向位移分量  
(a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線



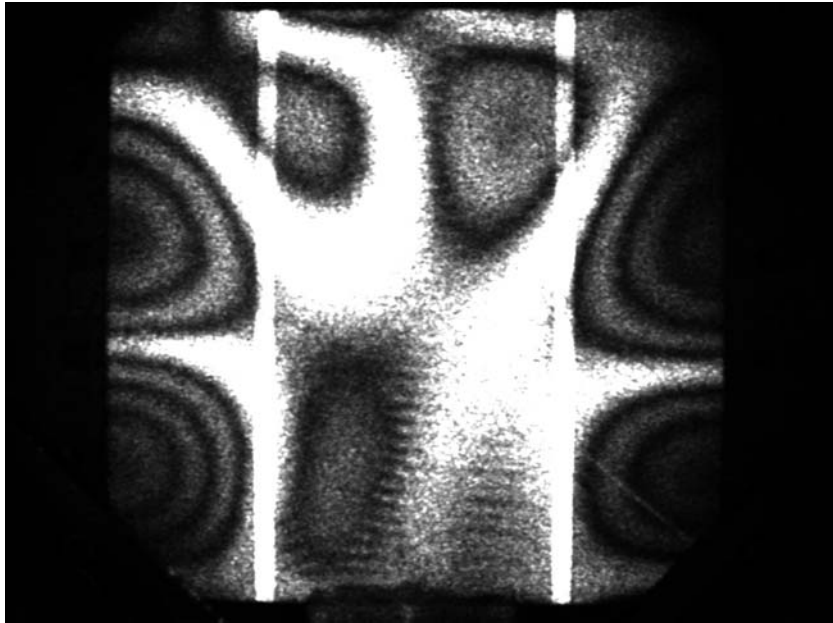
(a)



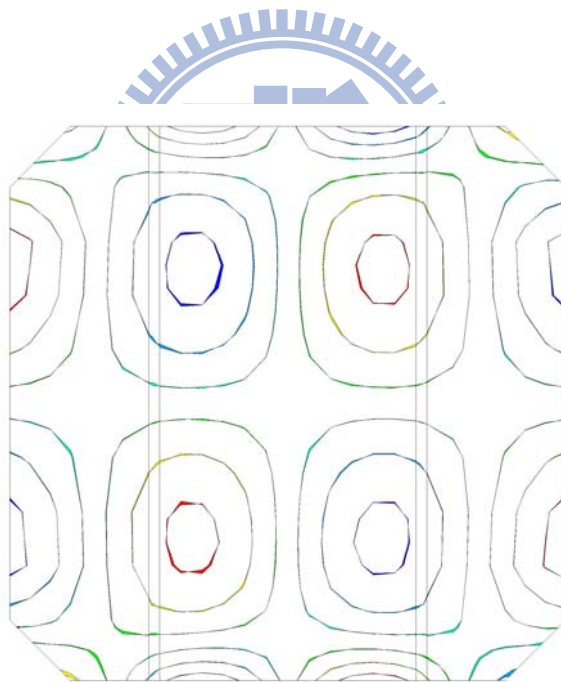
(b)

圖 4.29 完整太陽能電池基板於 38.65kHz 驅動頻率下之 Z 方向位移分量

(a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線

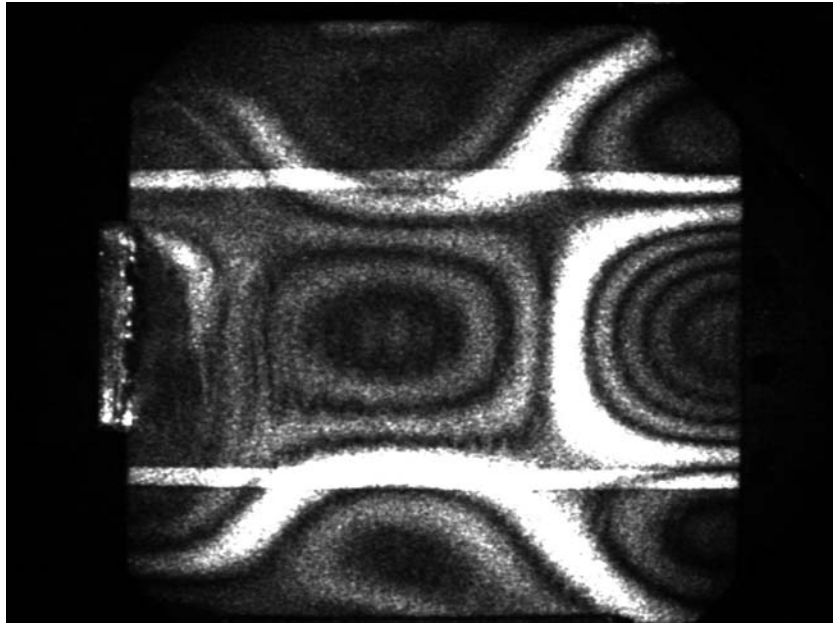


(a)

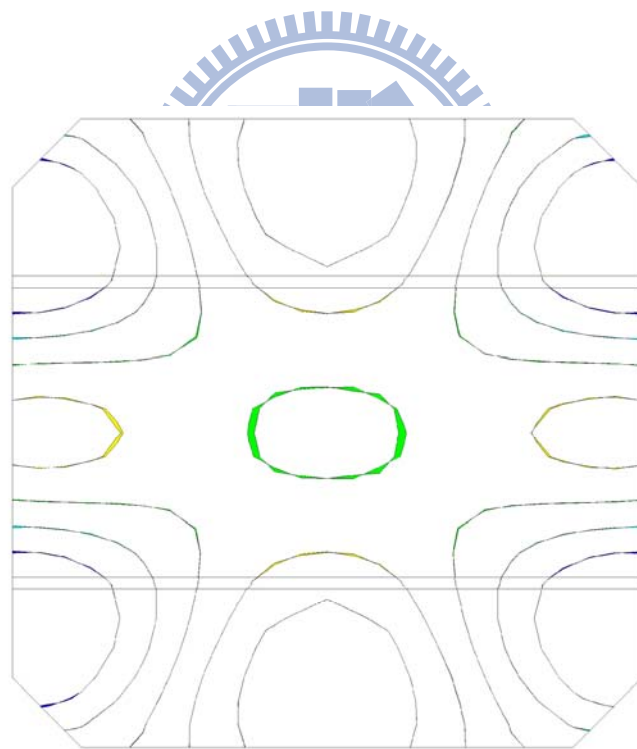


(b)

圖 4.30 完整太陽能電池基板於 48.25kHz 驅動頻率下之 X 方向位移分量  
(a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線

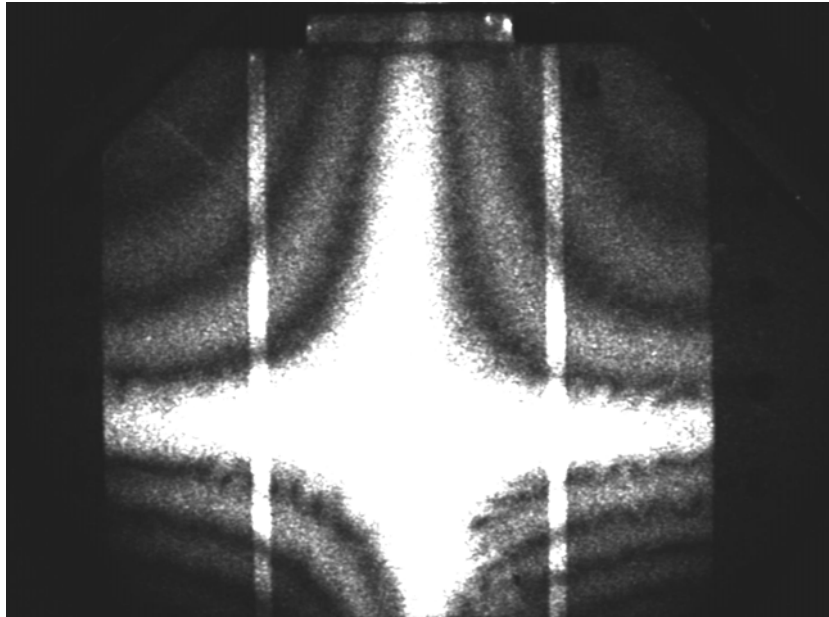


(a)

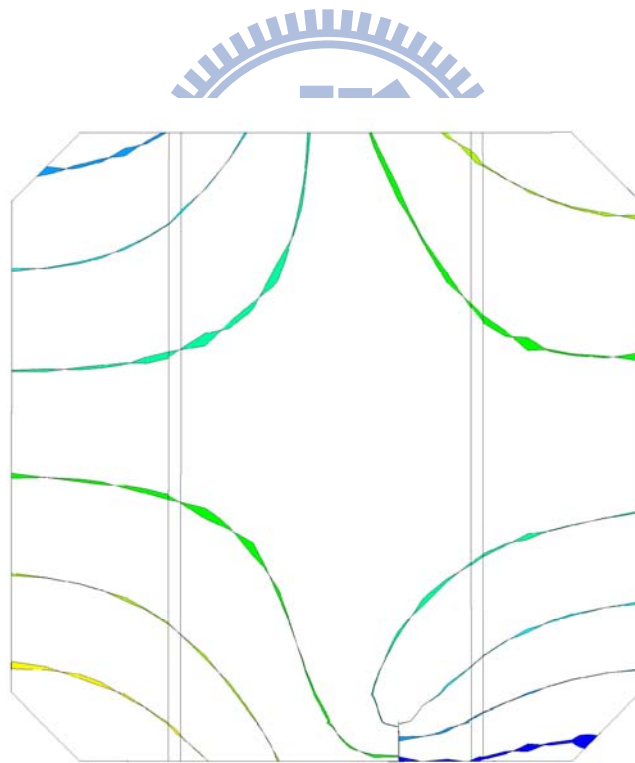


(b)

圖 4.31 完整太陽能電池基板於 48.25kHz 驅動頻率下之 Z 方向位移分量  
(a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬位移等高線

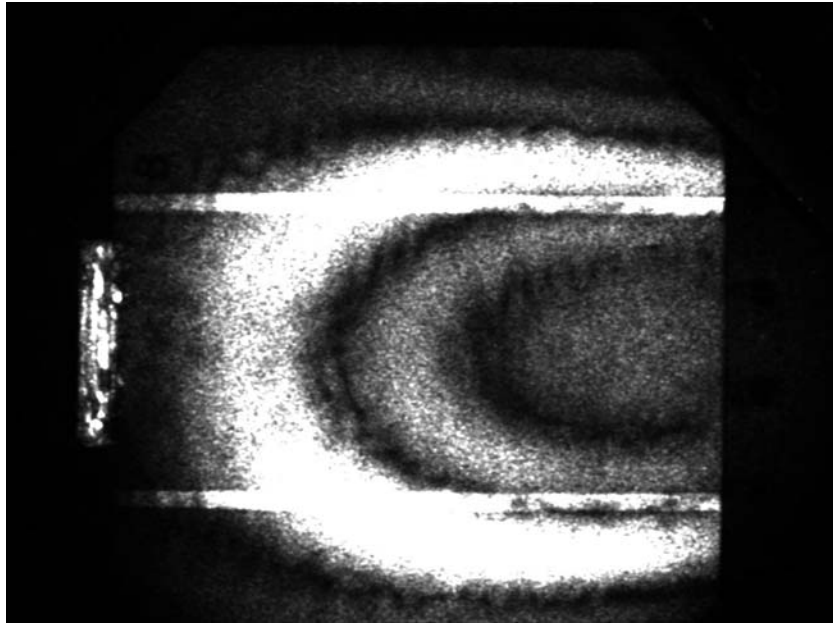


(a)

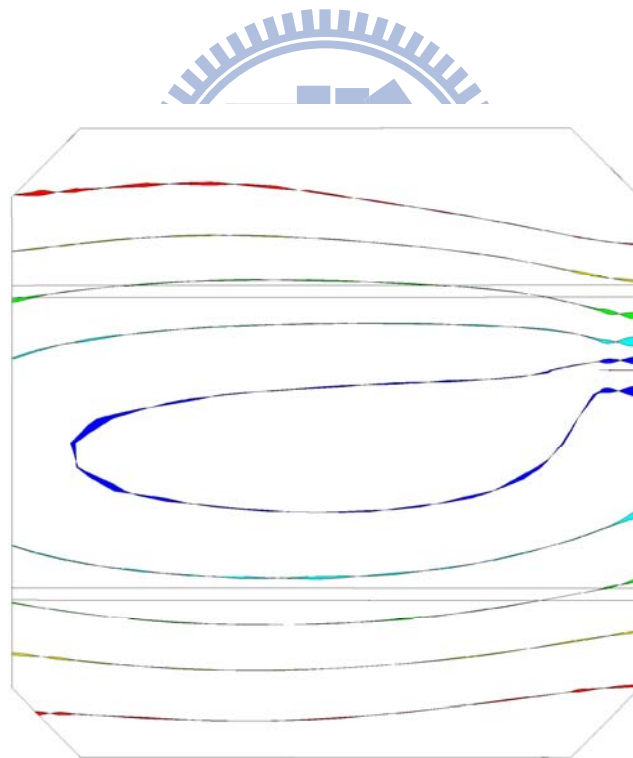


(b)

圖 4.32 含裂縫太陽能電池基板於 19.06kHz 驅動頻率下之 X 方向位移分量  
(a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬之位移等高線

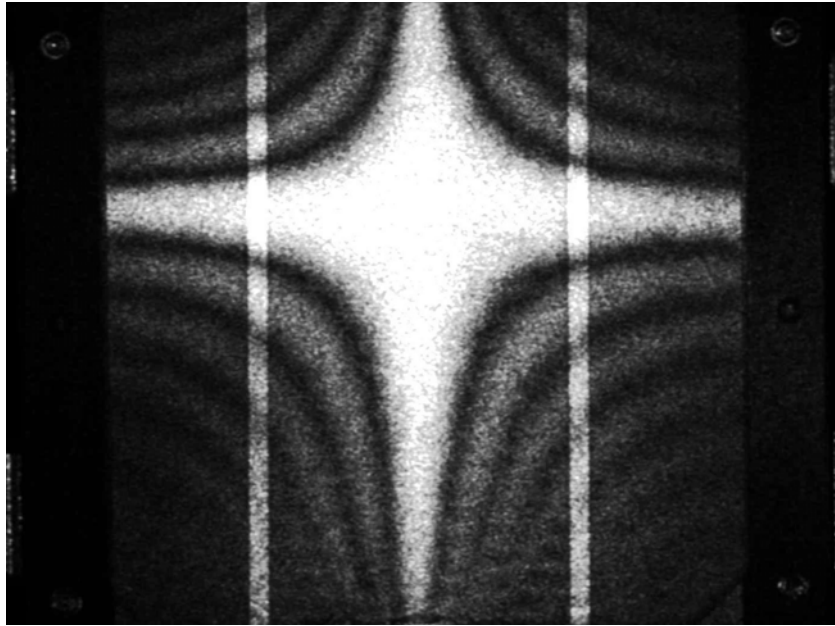


(a)

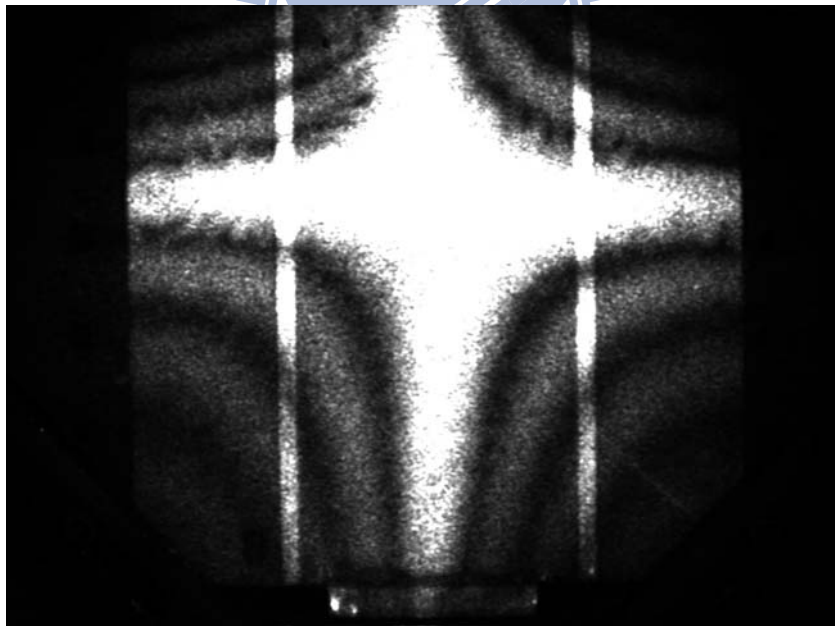


(b)

圖 4.33 含裂縫太陽能電池基板於 19.06kHz 驅動頻率下之 Z 方向位移分量  
(a)AF-ESPI 量測之面內振形光斑條紋、(b)數值模擬之位移等高線



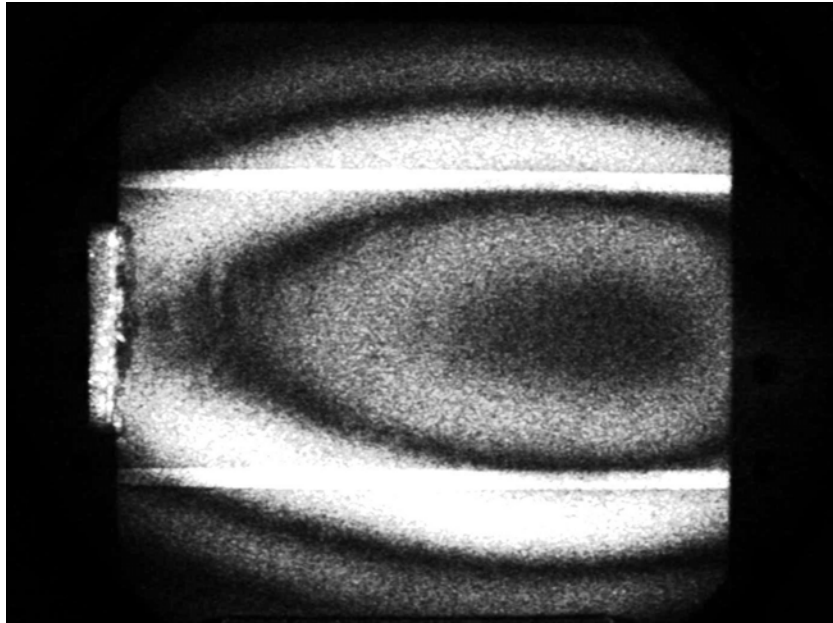
(a)



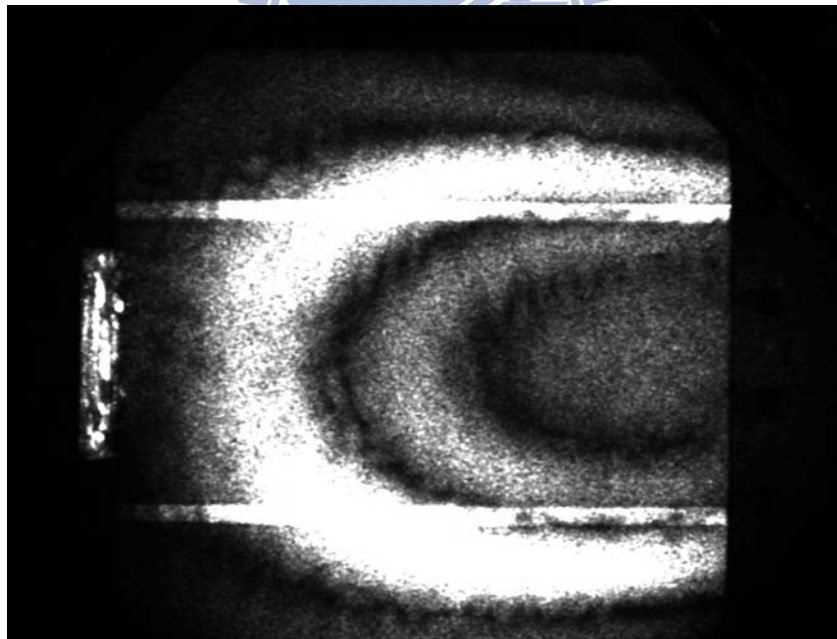
(b)

圖 4.34 AF-ESPI 量測(a)完整、(b)含裂縫  
之太陽能電池基板面內共振模態之 X 方向振形光斑條紋





(a)



(b)

圖 4.35 AF-ESPI 量測(a)完整、(b)含裂縫  
之太陽能電池基板面內共振模態之 Z 方向振形光斑條紋