

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

石英壓電板的振動特性分析及實驗 The Analysis and Experimental Measurement on the Vibration Characteristics of Piezoelectric Quartz Plates

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫
計畫編號：91-2212-E-002-043
執行期間：91年08月01日至92年07月31日

計畫主持人：馬劍清 教授
共同主持人：

本成果報告包括以下應繳交之附件：
赴國外出差或研習心得報告一份
赴大陸地區出差或研習心得報告一份
出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立台灣大學機械工程學系

中 華 民 國 九 十 二 年 八 月 三 十 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

石英壓電板的振動特性分析及實驗

The Analysis and Experimental Measurement on the Vibration Characteristics of Piezoelectric Quartz Plates

計畫編號：91-2212-E-002-043

執行期限：91年8月1日至92年7月31日

主持人：馬劍清 國立台灣大學機械工程學系

計畫參與人員：黃育熙、黃采如

一、中文摘要

本計畫將探討應用性頗廣的壓電石英材料的振動問題，國內近十年來也投入大量的研究人力及經費作相關的研發工作，而大部分的研究皆僅在於純理論及數值計算，本研究計畫將整合且有系統地包含理論建立，數值計算以及實驗量測，針對壓電石英材料板在低頻、中頻及高頻不同條件下作完整的探究，以便理論、數值及實驗能互相驗證。實驗主要以電子斑點干涉術及雷射都卜勒干涉術兩種光學實驗方法針對壓電石英材料板作全域性的面外及面內振動模態以及共振頻率量測，並配合阻抗分析的結果作深入之探討，除此之外亦將應用有限元素數值計算作相關問題的理論研究並與實驗結果作比較。

二、英文摘要

The experimental measurement of resonant frequencies for the piezoelectric plate is generally performed by the impedance analysis. In this project we employ two optical interferometry methods called the amplitude-fluctuation electronic speckle pattern interferometry (AF-ESPI) and the laser Doppler vibrometer (LDV) to investigate the vibration characteristics of piezoelectric plates made of quartz. As compared with the film recording and optical reconstruction procedures used for holographic interferometry, the full-field interferometric fringes of AF-ESPI are produced instantly by a video recording system. Based on the fact that clear fringe patterns measured by the AF-ESPI method will be shown only at resonant frequencies, both the resonant frequencies and

corresponding full-field mode shapes are obtained experimentally at the same time. The LDV system has the advantage of non-contact, high resolution, and broad dynamic range is applied to measure the frequency response of piezoelectric plates. The out-of-plane and in-plane vibration modes ranging from low to high frequencies of piezoelectric plates will be discussed in this project. The numerical finite element calculations are also performed, and the results will be compared with the experimental measurements.

三、緣由與目的

從材料科學的歷史演進可概分為結構材料演進到功能材料，再進化到智慧型材料，智慧型材料需同時具有感測器與致動器的功能，也是目前各國全力研究發展的材料，而壓電材料就是具有這些功能也是最具發展及應用潛力的智慧型材料之一。近年來壓電材料已被廣泛地應用於精密工業及檢測設備中，例如光學掃描器，磁碟機的尋軌微調機構，濾波器，延遲線，超音波馬達及超音波檢測探頭等，由於壓電材料可不需經由機構或電路，即可直接作電能與機械能之間的轉換，因此對於壓電材料動態特性之研究將有助於其在精密工業及微機電系統中之發展。具有壓電效應的材料有多種；如石英(Quartz)就是一種良好的壓電材料，而在各種壓電材料裡以壓電陶瓷的用途最為廣泛，主要是因為它可製成任何形狀，且隨著組成的不同有不同的特性以適合不同的應用。壓電材料的種類有單晶類(如石英)，薄膜類(如氧化鋅)，聚合物(如PVDF)，陶瓷類(如鋇鈦酸鉛，PZT)等。由於許多特性好的壓電材料本身即為強介電材料，再加上其它可

能的電光效應及光彈效應，壓電材料本身就是最具智慧化潛力的材料，所以壓電材料的特性研究及其相關的應用仍是目前學者的重要研究方向。

石英(Quartz)原是一種天然礦石，其成分主要為二氧化矽結晶礦石，又稱為石英晶體，其壓電效應首次用於電子振盪器電路中，石英晶體振盪器因其所產生的頻率穩定度優於傳統電感器與電容器所製造的 LC 振盪器而受到重視與使用，由於天然的石英晶體產量不符需求且本身雜質含量也影響振盪器頻率的穩定度，因而加速了人造石英晶體製程的研究，目前已可以人工方式製造高純度的石英晶體也已大量取代了天然石英晶體。石英仍是目前公認具最高 Q 值的材料，其共振頻率最窄及對溫度敏感度較低，受溫度影響所造成的頻率飄移較小，故比其它壓電材料所製成的振盪元件來得準確與穩定，所以目前在對頻率準確度要求較高的通訊產品使用石英振盪元件的比率相當高。石英產業在台灣的產值從全球來看並不大，而大部分仍然把持在日本生產廠商手中，但隨著國內通訊及資訊產業蓬勃發展，石英產品的內需市場規模日漸龐大，學術界對於石英元件動態特性的探討與研究應積極投入研究，才能對國內相關產業的提昇有所助益。

本研究計畫主要針對國內工業之關鍵零組件石英晶體的動態特性作深入之研究，其頻率範圍將涵蓋低頻(數百 Hz)，中頻(數萬 Hz)以及高頻(MHz)之各種不同應用，而動態特性主要探討二維壓電板的共振頻率及其相對應的模態，包括面內(In-plane)及面外(Out-of-plane)兩大類不同的振動模式，本計畫將以相同的厚度石英晶體但不同的面積來涵蓋低、中、高不同的頻率範圍，除了理論的研究之外，本計畫的最重要之特色是以三種不同的實驗方法實際量測石英晶體的動態特性，這三種實驗方法即阻抗分析，雷射都卜勒干涉以及電子斑點干涉，這三種不同方法各有其優缺點，其中阻抗分析是一般應用來量測壓電材料振頻的方法，其優點是快速而方便，但其缺點在於僅能獲知自然頻率而模態則無從得知。雷射都卜勒干涉的量測精度可達奈米級但僅可作單點的精確位移量測，而電子斑點干涉術是全域式的光學量測其精度為微米級，有能力直接同時獲得振頻及模態的結果，但

其量測的面積須達平方公分以上，據初步評估低頻及中頻的範圍是電子斑點干涉術的應用範圍，而高頻則只能使用單點式的雷射都卜勒干涉來作量測，本研究計畫的內容不僅只是理論的研究及探討，更包括三種不同的實驗量測方法，故本計畫之內容廣泛而深入且兼具學術及實用性，其相關研究論文件見參考文獻。

三、結果與討論

(A) 試片規格與邊界條件

本文採用的試片為台灣晶技公司(TXC)生產的 AT 切面石英單晶晶體，採自其製作石英振盪器的初期製程中，熔融的石英晶棒拉出後，第一道切割研磨後的淨試片，由於取得試片為淨試片，因此必須鍍上金屬電極以供導電，使得壓電晶體可藉由不同頻率電信號輸入，達到共振之效果。實驗採用的電極批覆方法為蒸鍍法，將試片置於蒸鍍室(chamber)並將靶材安置妥當後，抽真空至 4×10^{-4} torr，慢慢的將靶材加大通過電流，使靶材可均勻的蒸鍍於試片上。

實驗量測的邊界分別為單邊固定及四邊自由的邊界固定條件。為了達到較完美邊界固定情況，我們以上述尺寸的石英試片，經過精密量測尺寸後，將單邊塗佈 AB 膠緊密黏貼在夾具上，形成尺寸分別為 $25.4 \times 25.4 \times 0.16mm$ 與 $8.5 \times 5.8 \times 0.16mm$ 的單邊固定邊界試片。此外，本文亦探討淨試片在三種不同電極設計在自由邊界下的激振情形，並詳細討論之。圖 1 為三種不同尺寸與邊界的試片與新台幣 50 元的大小比較；由左至右分別是尺寸 $25.4 \times 25.4 \times 0.16mm$ 單邊固定、 $8.5 \times 5.8 \times 0.16mm$ 單邊固定與石英試片 $33 \times 25.4 \times 0.16mm$ 自由邊界。另外，在實驗數據與圖形中，AF-ESPI(1)表鍍電極試片，以輸入電訊號激振之量測結果，AF-ESPI(2)表鍍電極試片喇叭輸出聲波激振之對照比較情形，AF-ESPI(3)表未鍍電極之淨試片以喇叭輸出聲波激振的實驗數據。

(B) 數值分析

此部分數值分析係採用有限元素法商用分析軟體 ABAQUS V6.2 進行共振頻率與模態振形分析計算，分別使用壓電耦合(C3D20RE)與平面應力(C3D20R)兩種元素分析，其中 C3D20 表示共 20 節點的一正方體元素，元素代號中的 R 則是表示 Reduce

的內差積分運算，若選取較多的積分點，其網格(mesh)的內差積分方程(interpolation)越高次則越逼近實際的現象，內差積分可在數值計算上節省較多的 CPU 的運算時間，並可避免 K 矩陣的發散，而代號 E 則是壓電元素之考量與否，。兩種元素的計算結果分別以 FEM-1 與 FEM-2 表示之。

(C) 實驗結果與討論

首先使用單邊固定邊界尺寸為較大的 25.4×25.4×0.16mm 石英試片。實驗結果如圖2的振形與表1的振頻所表示，在前九模態中，以電訊號輸入試片激振的結果與聲波激振有鍍上電極及未鍍電極兩種狀態試片，振形幾乎完全一致。且頻率的誤差除前兩個模態以外，其餘皆在5%以內，其與有限元素的分析情形比較亦有相同的結果，實驗與理論比較結果相當準確。此外，在考量壓電元素與平面應力元素的兩種分析結果的比較，可以發現在低頻的範圍，這兩種元素的數值分析幾乎是沒有差別的，差異幾乎都在 0.01%以下。

在表2與圖3中，列出極小規格的單邊固定石英壓電晶體量測結果，由於尺寸僅僅只有 8.5×5.8×0.16mm，實驗量測上相當的不容易，且機電耦合的性質相當微小，因此實驗無法順利的以電訊號激振出光學系統可量得的位移干涉圖形。但從尺寸較大的石英試片的實驗結果得知，由聲波激振得到的量測情形與利用電訊號激振的效果極為相近，因此，此處即採用喇叭輸出聲波造成試片較大的位移以利於實驗的觀察。不過，一般市面上看到的喇叭輸出聲波範圍通常在人耳聽的到的20Hz~20000Hz，因此本項實驗特別尋找由 SCAN-SPEAK 公司生產，型號 D2904/700k的高音喇叭，此喇叭宣稱其輸出功率可達 40000kHz，若由FEM模擬推論，可量測得到前六個模態的共振現象，實際實驗的結果除第四模態無法測得之外，其餘的振形與振頻相較於數值模擬皆有優異的一致性，誤差值皆於2%以內。

對於 33×25.4×0.16mm 自由邊界的石英試片而言，由於試片尺寸較大，預期其電訊號激振可達到較大位移，但實際以全電極量測卻無法順利得到較多完整的振動位移干涉圖形。圖4則顯示了在此自由邊界的條件下，電極設計及三種電訊號給定的設計方法，

其中(+)號與(-)號分別代表給予電訊號為反相電位的意義。在圖5與表3中列出第一至第六共振模態實驗與有限元素數值方法的結果，並列出激振所對應的電極形式，在圖中可以發現某些電極型式對特定模態激振效果特別敏感，雖然有些模態用不同電極亦可激振，但某些模態就只有單一電極形式可激振出干涉圖形，其他形式完全無法激振出足以讓干涉系統可量測到的位移量。因此圖5所列的激振圖形與電極形式的對應，皆為最敏感、效果最佳的情況。

由以上三種不同邊界與尺寸的實驗量測另外可知，雖然電訊號與聲波激振的結果幾乎相同，但在實驗的即時觀測中，可觀察出電極激振對於帶有扭轉變形的模態較為敏感；相反的，聲撥激振對於帶有彎曲變形的模態較敏感。而實驗量測到的共振頻雖與理論值亦幾乎可以完全匹配，但在實驗中又可清楚的得知每個模態的頻寬與位移的程度。此光學實驗量測方法的結果，對於實際工程應用的評估，應有極大的助益。

圖表資料

表1. 尺寸 25.4×25.4×0.16mm 單邊固定邊界之石英試片AF-ESPI三種實驗量測方法與數值模擬之結果比較(誤差係指與AF-ESPI鍍電極以電激振形式之比較)

mode	AF-ESPI (1) unit : Hz	AF-ESPI (2) unit : Hz (Error %)	AF-ESPI (3) unit : Hz (Error %)	FEM-1 (Error %)	FEM-2 (Error %)
1	193	203 (5.181)	221 (14.508)	219 (13.472)	219 (13.472)
2	743	744 (0.135)	715 (-3.769)	695 (-6.460)	694 (-6.595)
3	1355	1370 (1.107)	1358 (0.221)	1357 (0.148)	1357 (0.148)
4	1939	1860 (-4.074)	1980 (2.114)	1934 (-0.258)	1933 (-0.309)
5	2493	2502 (0.361)	2402 (-3.650)	2347 (-5.856)	2344 (-5.977)
6	3755	3918 (4.341)	3854 (2.636)	3847 (2.450)	3847 (2.450)
7	4504	4489 (-0.333)	4363 (-3.131)	4257 (-5.484)	4251 (-5.617)
8	4535	4536 (0.022)	4426 (-2.404)	4354 (-3.991)	4352 (-4.035)

9	5150	5153 (0.058)	4998 (-2.951)	4919 (-4.485)	4915 (-4.563)
---	------	-----------------	------------------	------------------	------------------

表2. 尺寸 $8.5 \times 5.8 \times 0.16\text{mm}$ 單邊固定邊界之石英試片 AF-ESPI 實驗量測方法與數值模擬之結果比較(誤差係指與AF-ESPI鍍電極以電激振形式之比較)

MODE	AF-ESPI-2 (Hz)	FEM-1 (Error%)
1	2183	2197 (0.641)
2	8983	9100 (1.302)
3	13570	13661 (0.671)
4	-----	29367 (-----)
5	32020	32119 (0.309)
6	39335	38800 (-1.360)

表3. 尺寸 $33 \times 25.4 \times 0.16\text{mm}$ 自由邊界之石英試片 AF-ESPI 兩種實驗量測方法與數值模擬之結果比較(誤差係指與AF-ESPI鍍電極以電激振形式之比較)

MODE	AF-ESPI (1) (Hz)	AF-ESPI (2) (Error%)	FEM-1 (Error%)
1	802	776 (-3.242)	799 (-0.374)
2	918	962 (4.793)	915 (-0.327)
3	1415	1553 (9.753)	1487 (5.088)
4	2079	2115 (1.732)	2018 (-2.934)
5	2170	2227 (2.627)	2191 (0.968)
6	2545	2474 (-2.790)	2442 (-4.047)

圖 1. 本文三種不同尺寸與邊界之石英試片
左： $25.4 \times 25.4 \times 0.16\text{mm}$ 單邊固定
中： $8.5 \times 5.8 \times 0.16\text{mm}$ 單邊固定

右： $33 \times 25.4 \times 0.16\text{mm}$ 自由邊界



圖 2. 尺寸 $25.4 \times 25.4 \times 0.16\text{mm}$ 單邊固定邊界之石英試片 AF-ESPI 三種實驗量測方法與數值模擬之結果比較

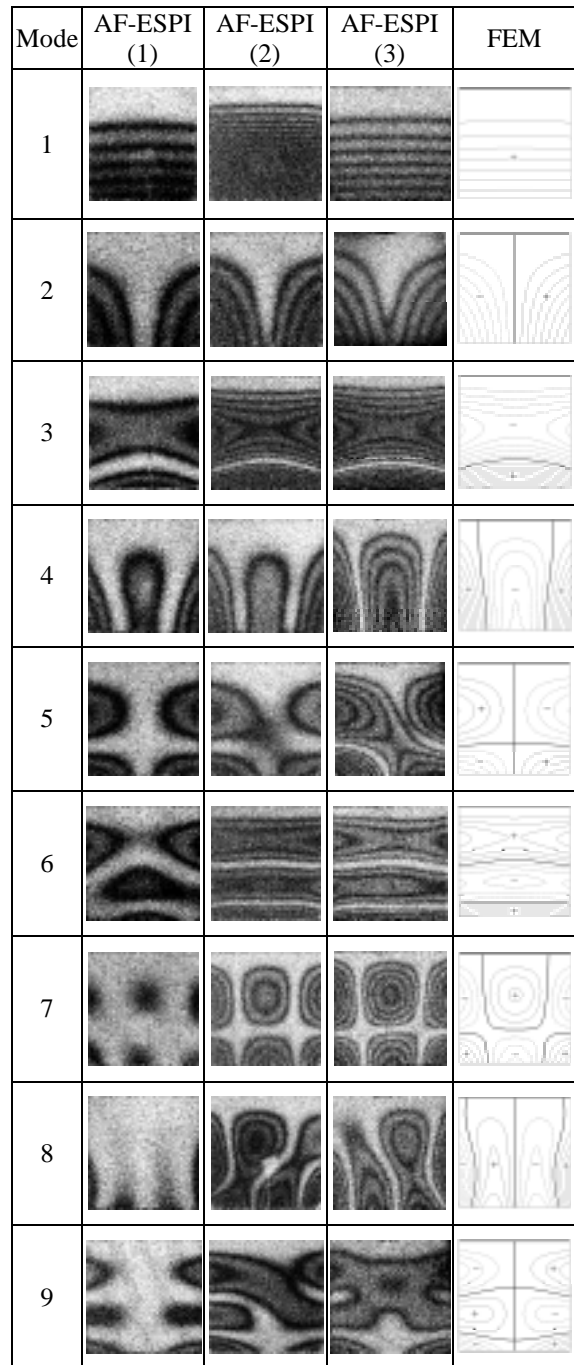


圖 3. 尺寸 $8.5 \times 5.8 \times 0.16 \text{ mm}$ 單邊固定邊界之石英試片 AF-ESPI 實驗量測方法與數值模擬之結果比較

	AF-ESPI-3	FEM
1		
2		
3		
4		
5		
6		

圖 4. 自由邊界的條件下，石英試片之電極分佈設計方法



圖 5. 尺寸 $33 \times 25.4 \times 0.16 \text{ mm}$ 自由邊界之石英試片 AF-ESPI 兩種實驗量測方法與數值模擬之結果比較

Mode	AF-ESPI (1)		AF-ESPI (2)	FEM
	Experimental	Electrode mode		
1				

2				
3				
4				
5				
6				

結論

本文使用 AF-ESPI 對於石英壓電晶體平板試件的振動頻率與振形進行實驗量測，與有限元素數值方法的比較結果，不論在振頻數據或是全域觀測之振形，都有相當優異的一致性。因此，AF-ESPI 實驗技術對於石英面外振動特性的量測，可獲得即時且準確的結果，並可觀察試片受實際實驗條件下的激振程度與頻寬資訊，未來期望可對石英高頻的面內振動進行更進一步的瞭解。

參考文獻

- [1] Mindlin, R. D., "Anharmonic, Thickness-Twist Overtones of Thickness-Shear and Flexural Vibrations of Rectangular, AT-Cut Quartz Plates," *Journal of the Acoustical Society of America*, 42(6), 1268-1277 (1951).
- [2] Mindlin, R. D., and Deresiewicz,, "Thickness-Shear and Flexural Vibrations of Rectangular Crystal Plates," *Journal of Applied Physics*, 26(12), 1435-1442 (1955).
- [3] Koga, I., "Radio-Frequency Vibrations of Rectangular AT-Cut Quartz Plates," *Journal of Applied Physics*, 34(8), 2357-2365 (1963).
- [4] Mindlin, R. D., and Lee P. C. Y. "Thickness-Shear and Flexural Vibrations of Partially Plated, Crystal

- Plates,” *Journal of Solids Structures*, 2, 125-139 (1966).
- [5] Holland, R., “Contour Extensional Resonant Properties of Rectangular Piezoelectric Plates,” *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, SU-15(2), 97-105 (1968).
- [6] Tiersten, H. F., *Linear Piezoelectric Plate Vibrations*, Plenum, New York (1969).
- [7] Lin, M. W., Abatan, A. O. and Rogers, C. A., “Application of commercial finite element codes for the analysis of induced strain-actuated structures,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 5(6), 869-875 (1994).
- [8] Koyuncu, B., “The Investigation of High Frequency Vibration Modes of PZT-4 Transducers using ESPI Techniques with Reference Beam Modulation,” *Optics and Lasers in Engineering*, 1(1), 37-49 (1980).
- [9] Oswin, J. R., Salter, P. L., Santoyo, F. M. and Tyrer, J. R., “Electronic Speckle Pattern Interferometric Measurement of Flexensional Transducer Vibration Patterns: in Air and Water,” *Journal of Sound and Vibration*, 172(4), 433-448 (1994).
- [10] Huang, C. H. and Ma, C. C., “Vibration Characteristics for piezoelectric Cylinders using Amplitude-Fluctuation Electronic Speckle Pattern Interferometry,” *AIAA Journal*, 36(12), 2262-2268 (1998).
- [11] Ma, C. C. and Huang, C. H., “The Investigation of Three Dimensional Vibration for Rectangular Parallelepipeds by using the AF-ESPI Method,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 48(1), 142-153 (2001).
- [12] Lin H. Y., Huang J. H., and Ma C. C., “Vibration Analysis of Materials by Piezoelectric Optical Methods,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, and Frequencies, and Frequency Control*, 49(8), 1139-1149 (2002).
- [13] Lin H. Y., Huang J. H., and Ma C. C., “Vibration Analysis of Angle-Ply Laminated Composite Plates with an Embedded Piezoceramic Layer,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, and Frequencies, and Frequency Control*, (In Press, 2003).
- [14] Yong Y.K., Stewart J. T., and Detaint J., “Thickness-Shear Mode Shapes and Mass-Frequency Influence Surface of a Circular and Electroded AT-Cut Quartz Resonator,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, and Frequencies, and Frequency Control*, 39(5), 609-617 (1992).
- [15] Detaint J., Schwartzel J., and Joly C., “Energy Trapping Resonators and Interated Filters Using the AT Cut of Quartz Like Materials,” *IEEE Frequency Control Symposium*, 4, 639-647 (1992).
- [16] Ishizaki A., “Three-Dimensional Analysis of Forced Vibrations of Rectangular AT-Cut Quartz Plates,” *IEEE Internal Frequency Control Symposium*, 5, 942-946 (1998).
- [17] Wang, W. C., Hwang, C. H. and Lin, S. Y., “Vibration Measurement by the Time-Averaged Electronic Speckle Pattern Interferometry Methods,” *Applied Optics*, 35(22), 4502-4509 (1996).