

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

## 溫度對壓電層狀介質之表面聲波元件特性之影響(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-002-074-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：馬劍清

計畫參與人員：黃采如，黃育熙

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 5 月 21 日

# 科學委員會專題研究計畫成果報告

## 溫度對壓電層狀介質之表面聲波元件特性之影響(I) The Temperature Dependence on the Characteristics of Surface Acoustic Waves for Piezoelectric Multi-layered Structures

計畫編號：92-2212-E-002-074

執行期限：92年8月1日至93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：黃采如、黃育熙

### 一、中文摘要

本計畫將探討國內工業關鍵零組件表面聲波元件之特性。表面聲波元件由於具有體積小、重量輕、高性能、與 IC 製程相容及可模組化等優點，使其在電子工業及通訊產業應用廣泛，如欲提升競爭優勢，勢必提升相關的理論分析、製程研究及設計能力。本研究計畫將整合且有系統地包含理論建立、數值計算、元件製作及實驗量測。以八階波傳理論配合有效介電常數的計算，探討層狀壓電結構的波傳特性及機電耦合係數，模擬分析交指叉狀轉能器的頻率響應，並進而利用溫度延遲係數的計算，探討溫度效應對中心頻率及頻寬飄移的影響。實驗量測方面，實際以微機電製程製作表面聲波元件，完成頻率響應及溫度延遲係數的量測，並將實驗結果與理論分析比較驗證。此外，並將分析非層狀幾何結構表面聲波元件之波傳特性及製作可行性。

### 二、英文摘要

In this project, the characteristic of the layered SAW device will be investigated by applying the effective surface permittivity method. The advantage of modeling the SAW device with effective surface permittivity method is that frequency bandwidth, the center frequency shift and insertion loss can be evaluated. The layered dispersive SAW devices will be fabricated with MEMS process. By analyzing and computing the temperature coefficient of delay, the temperature stability of the SAW devices can be determined which will be a very useful information for practical

application. The results of frequency response of the IDTs predicted by the theoretical calculation and measured by the network analyzer will be compared and discussed. In addition, the fabrication feasibility and wave propagation of special piezoelectric structure SAW devices will be probed.

### 三、緣由與目的

1990年代開始了電信自由化的發展趨勢，使得無線通訊產業在短期間邁入商業化的用途。而由於行動通訊必須滿足高資料傳輸速度的要求，使得高頻段的數位通訊系統日顯重要，因此表面聲波 (surface acoustic wave, SAW) 元件以其在高頻段具備低損耗的極佳效能，大量取代了傳統的 RLC 電子元件。表面聲波元件的應用範圍極為廣泛，主要包括共振器、濾波器、感測器、延遲線、震盪器、編碼等，領域囊括了日常生活各個部分。整體而言，表面聲波元件主要特點如下：

- (1) 元件體積小，重量輕且可模組化
- (2) 元件屬被動元件，功率消耗少
- (3) 元件可操作的頻率範圍廣
- (4) 設計彈性高，不同的交指叉轉能器設計即可得到不同的頻率響應特性
- (5) 元件的製程與積體電路製程相似，故可大量製造減低製作成本

目前國內對表面聲波元件的製作發展僅限於少數大學及研究單位，在全球表面聲波濾波器的市場佔有率仍不到 3%，主要原因在於關鍵的設計及製造技術均掌控在美、日等國手上，在技術不足及相關人才

缺乏的情況下，如欲提昇國內通訊及資訊產業在此方面的競爭優勢，勢必由研發方面著手，加強理論分析、製程研究及設計能力，才能對國內相關產業的提升有所助益。

在表面聲波元件的研究方面，在設計上主要需滿足高頻、低損耗的要求。在高頻的設計方面，可以利用鑽石薄膜等層狀高波速介質或是縮小交指叉轉能器的線寬，以達到工作頻率提高的目的。低損耗的設計部分，則是傾向於利用權重化交指叉轉能器的設計及反射電極柵來減少插入損失，目前則有一部份的學者研究使用不同基材的特殊幾何結構(如:球體、圓柱狀 等)以減少插入損耗。

本研究計畫主要針對國內工業之關鍵零組件高頻層狀結構表面聲波元件的特性作深入之研究，內容主要分為下列七部分

- (1)層狀表面聲波元件的基本特性及不同材料的波傳行為探討
- (2)溫度變化對元件頻率飄移、插入損失、機電耦合係數的影響
- (3)不同的晶格方向或材料對溫度的敏感度
- (4)探討利用層狀材料降低溫度敏感係數的可能性
- (5)分析特殊幾何結構表面聲波元件之波傳特性
- (6)以微機電製程製作表面聲波元件
- (7)實驗量測驗證理論結果

本研究計畫的內容涵蓋了理論分析、數值計算及實驗量測，相當完整且兼具學術及實用性，對表面聲波元件之特性有深入的探討，成果有助於國內相關工業對表面聲波元件的設計與應用。其相關研究論文件見參考文獻[1]-[16]。本研究計畫為兩年期計畫，今年為第一期計畫，主要著重於表面聲波元件基本特性研究，而第二期計畫(明年度)再加入溫度變化對於表面聲波的影響探討。

### 三、結果與討論

#### (A) 八階矩陣波傳理論分析層狀壓電系統波傳

理論推導過程流程圖如圖 1 所示。引用壓電八階理論作為層狀結構壓電系統之波傳分析基礎，配合局部波阻與反射張量，推導層狀壓電介質之波傳遞迴計算式，以求得試體之全波阻，再代入底層全波阻及多

層板界面邊界條件，推導出頻散關係式並計算有效介電常數  $\epsilon_s$  及機電耦合係數  $K_s^2$

$$\epsilon_s = (\epsilon_0 + \epsilon_p^T) \frac{s - s_o}{s - s_m}$$

$$K_s^2 \cong \frac{v_o^2 - v_m^2}{v_o^2} \cong \frac{2(v_o - v_m)}{v_o} = \frac{2\Delta v}{v_o}$$

$v_o$ 、 $s_o$  為自由表面波波速、波慢

$v_m$ 、 $s_m$  為金屬化表面波波速、波慢

$$\epsilon_p^T = (\epsilon_{11}^T \epsilon_{33}^T - \epsilon_{13}^T)^{1/2}$$

計算結果所得的氧化鋅-矽一層半結構、氧化鋅-鑽石(0.2  $\mu$ m)-矽與氧化鋅-鑽石(0.5  $\mu$ m)-矽之兩層半結構頻散關係如圖 2 所示。分析結果顯示，層狀結構的表面波速較非層狀基板的表面波速高，而利用高波傳速度的材料，如：鑽石、藍寶石等，確可提高波傳速度，但是並無法提高機電耦合係數。所設計的指叉狀電極利用有效介電常數之計算，配合靜電電荷密度以及電荷疊加原理，模擬交指叉轉能器輸入電壓訊號後對壓電基材表面電性邊界的影響，求得未權重化層狀結構交指叉轉能器之頻率響應

$$H_t(\omega) = (\omega W \Gamma_s)^{1/2} \hat{\rho}_e(\beta) \exp(-1/2i\beta L)$$

其中  $\omega$  為頻率， $W$  為交指叉電極長度， $\beta$  為波數(wave number)， $L$  為交指叉電極埠總長， $\hat{\rho}_e$  為靜電電荷密度

$$\hat{\rho}_e(\beta) = \hat{A}_e(\beta) \hat{\rho}_f(\beta)$$

$$\hat{\rho}_f(\beta) = (\epsilon_0 + \epsilon_p^T) \frac{2 \sin \pi s}{P_{-s}(-\cos \Delta)} P_n(\cos \Delta)$$

$$n \leq \frac{\beta p}{2\pi} \leq n+1, \Delta = \frac{\pi a}{p}, s = \frac{\beta p}{2\pi} - n, 0 \leq s \leq 1$$

其中  $\hat{A}_e(\beta)$  為陣列因子， $\hat{\rho}_f$  為元素電荷密度， $a$  為電極寬度， $p$  為電極週期， $P_{-s}(-\cos \Delta)$  為雷建德函數(Legendre functions)， $P_n(\cos \Delta)$  為雷建德多項式(Legendre polynomials)。理論計算的頻率響應關係如圖 3 所示，其中所設計指叉狀電極之中心頻率約為 24.378MHz，而由於所設計的元件中心頻率較低，機電耦合係數較小，故其響應值亦較小。

#### (B) 微機電製程製作表面聲波元件

依照理論分析的結果，初步設計無權重化的表面

聲波元件，電極的線寬為  $50\ \mu\text{m}$ ，週期長度  $200\ \mu\text{m}$ ，電極長度  $5\text{mm}$ ，元件的輸出埠與輸出埠各為 5 對指叉狀電極，並在元件兩側製作反射柵欄，所得的各項設計參數列於表 1 與圖 4。利用設計參數繪製光罩，委由交大半導體中心製作光罩，並以微機電製程來製作表面聲波元件，製程部分在國科會北區微機電系統研究中心完成。實驗先利用射頻濺鍍法所需的壓電氧化鋅薄膜，厚度約為  $1\ \mu\text{m}$ ，射頻濺鍍法參數列於表 2。氧化鋅晶體是極佳的壓電材料，具有很高的機電耦合係數，射頻濺鍍法在高真空度下利用高電壓游離氫離子並撞擊鋅靶材，將鋅原子與所通入的氧氣化合成為氧化鋅沉積在矽晶圓上，此鍍膜方式的缺點是所濺鍍出的膜厚並不均勻，鍍膜的速率亦較慢，約  $4100\ \text{\AA}/\text{hr}$ 。沉積壓電薄膜之後，再旋布以 S1813 光阻曝光顯影出電極圖樣，光阻厚度約  $1\ \mu\text{m}$ ，接著以蒸鍍法製作出表面聲波元件的鉻金電極，鉻與金之薄膜厚度各為  $150\text{\AA}$  與  $1500\text{\AA}$ ，最後以舉離法(lift-off)去除光阻完成表面聲波元件之製作，製程步驟流程圖如圖 5 所示。製作之表面聲波元件如圖 6 所示。

### (C) 元件特性量測與討論

利用網路分析儀加上探針台組成之高頻量測系統(量測範圍  $300\text{K}\sim 3\text{GHz}$ )量測表面聲波元件之頻率響應及插入損失，量測系統架構包含 Agilent E5070B 網路分析儀、CCD 顯像系統、高頻探針、探針座以及試片載台，示意圖如圖 7 所示。量測時先由 CCD 顯像系統確認探針與待測試片的接觸，再利用 SOLT(short-open-load-thru)校正法校正探針與訊號線之量測系統電訊誤差後，便可以網路分析儀量測元件特性。以微機電製程所製作的電極週期  $200\ \mu\text{m}$  表面聲波元件利用高頻量測系統所測得之元件頻率響應圖如圖 8 所示，由於所設計的元件頻率較低，層狀結構之機電耦合係數極小，故元件的插入損失相當大，且其結果與理論分析之結果略有出入，推測應是由於理論分析所使用的材料常數與微機電製程所得之薄膜材料係數差異所導致，第二年計畫中需再建立出量測架構，推算正確的材料常數使理論分析與實驗結果更具一致性，並進一步探討溫度變化對於壓電層狀介質表面聲波元件特性之影響。

## 圖表資料

表1. 非權重化交指叉狀電極之設計參數

輸入埠交指叉電極對數	5對
輸出埠交指叉電極對數	5對
交指叉電極週期長度	$200\ \mu\text{m}$
金屬覆蓋比	0.5
交指叉狀電極長度	$5\text{mm}$
輸入埠與輸出埠間 延遲距離 <sub>1</sub>	10
輸入埠與金屬柵欄距離 <sub>2</sub>	3/8
輸出埠與金屬柵欄距離 <sub>3</sub>	3/8

表2. 射頻濺鍍法沉積氧化鋅壓電薄膜參數

靶材	鋅
通入氣體	氧氣 50% 氫氣 50%
功率	200W
製程溫度	200

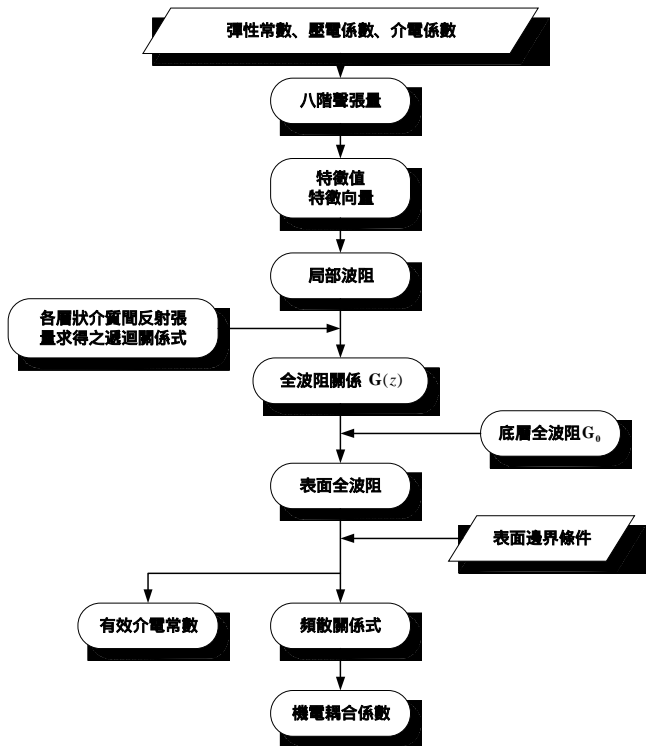


圖 1. 八階壓電晶體波傳理論推導流程圖

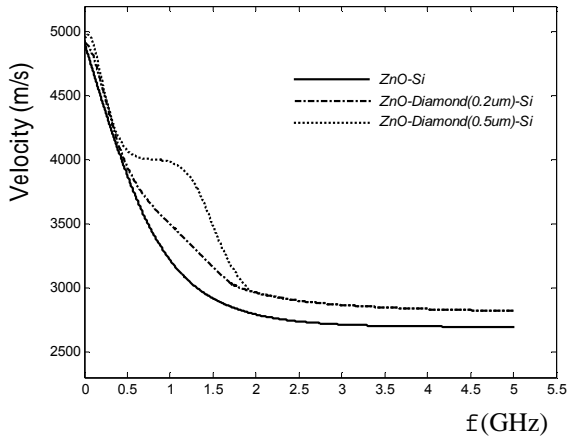


圖 2. 氧化鋅-矽層狀結構與氧化鋅-鑽石(0.2  $\mu$  m)-矽 氧化鋅-鑽石(0.5  $\mu$  m)-矽層狀結構之頻散關係

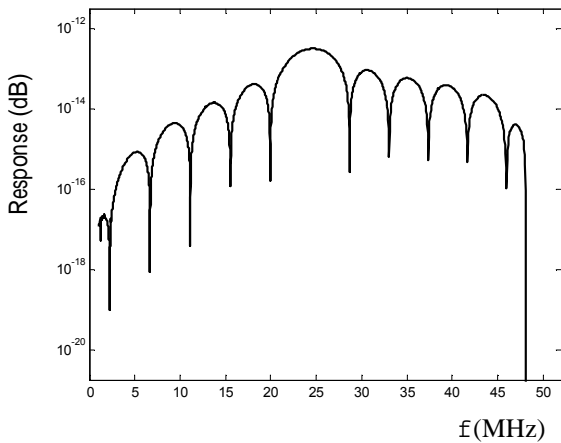


圖 3. 理論計算之電極週期 200  $\mu$  m 表面聲波元件頻率響應關係

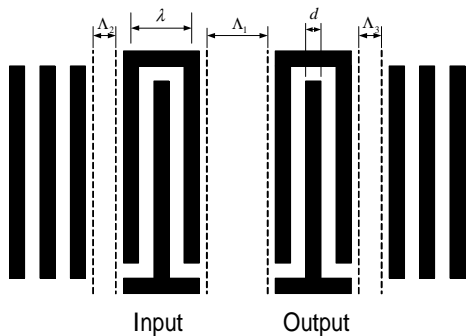


圖 4. 交指叉電極設計參數示意圖

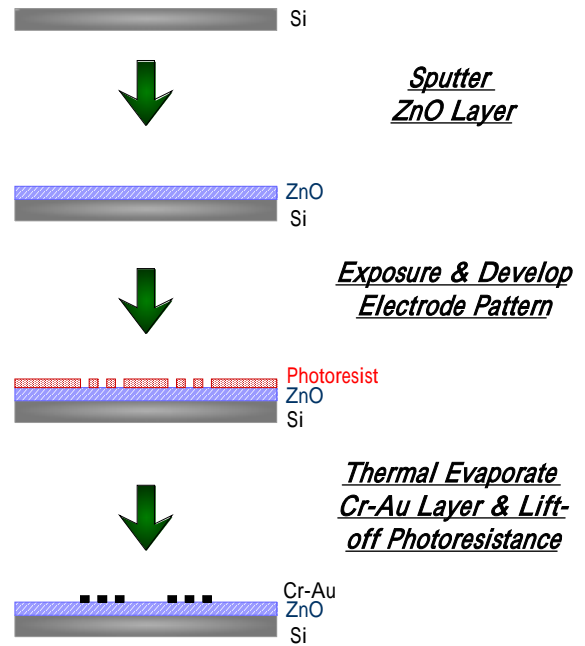


圖 5. 表面聲波元件之微機電製作流程圖

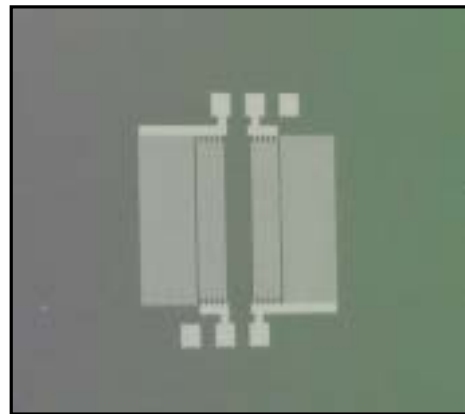


圖 6. 實驗製作之表面聲波元件

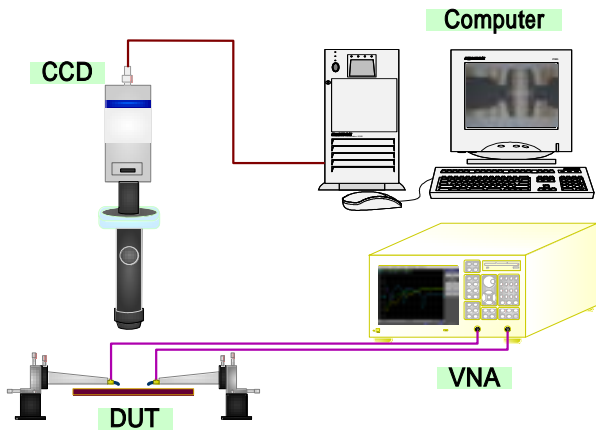


圖 7. 高頻量測系統架構示意圖

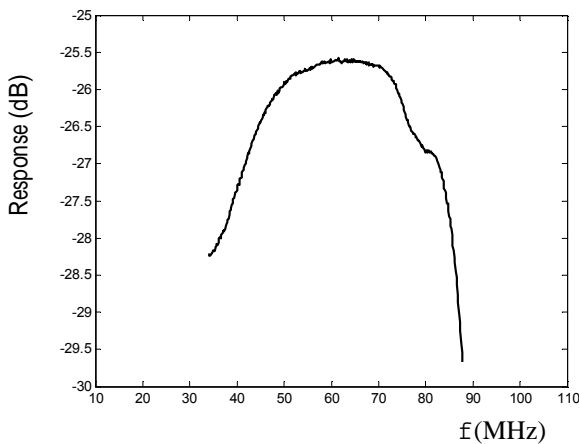


圖 8. 表面聲波元件之實驗量測頻率響應圖

## 結論

本計畫已建立起由八階矩陣波傳理論分析、微機電製程製作表面聲波元件、高頻元件特性量測系統三部分所組成之完整研究架構，對於層狀壓電系統之表面聲波元件特性分析與製作量測均有了初步的結果。在下年度的計畫中期望更進一步探討虛擬表面波 (pseudo wave) 之特性，溫度效應對元件效能之影響，並製作 GHz 等級之高頻表面聲波元件。

## 參考文獻

- [1] Lord Rayleigh, "On wave propagation along the plane surface of an elastic solid," Proc. Lond. Math. Soc., 17, pp.4-11, 1958
- [2] B. Honein, A. M. B. Braga, P. Barbone, "Wave propagation in piezoelectric layered media with some applications," J. Intell. Mater. Syst. And Struct., Vol.2, pp.542-557, 1991
- [3] Victor Y. Zhang, Jean-Etienne Lefebvre, Christian Bruneel, and Tadeusz Gryba, "A unified formalism using effective surface permittivity to study acoustic wave in various anisotropic and piezoelectric multilayers," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., Vol.48, No.5, pp.1449-1461, 2001
- [4] Matthaei G. L., B. P. O'shaughnessy, F. Barman, "Relation for analysis and design of surface-wave resonator," IEEE Trans. Sonics Ultrason., Vol.SU-23, No.2, pp.99-107, 1976
- [5] T.-T. Wu, Y.-Y. Chen, "Exact analysis of dispersive SAW on ZnO/diamond/Si-layered structure," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., Vol.49, No.1, pp.107-110, 2002
- [6] R. F. Milson, N. H. C. Reilly and M. Redwood, "analysis of generation and detection of surface and bulk acoustic wave by interdigital transducer," IEEE Trans. Sonics Ultrason., Vol.SU-24, pp.147-166, 1977
- [7] Ken-ya Hashimoto, Yoshihiro Watanabe, Mutsuhiro Akanane and Masatsune Yamaguchi, "Analysis of acoustic properties of multi-layered structures by means of effective acoustic impedance matrix," Ultrason. Symp., pp.937-942, 1990
- [8] A. H. Fahmy and E. L. Adler, "Propagation of acoustic surface waves in multilayers: a matrix description," Appl. Phys. Lett., Vol.22, pp.495-497, 1973
- [9] B. A. Auld, "Acoustic Fields and Waves in Solids: Vol. I," Wiley-Interscience, 1973
- [10] D. P. Morgan, "Surface Wave Device for Signal Processing," Elsevier, 1985
- [11] Edited by A. A. Oliner, "Acoustic Surface Waves," Springer-Verlag, 1978
- [12] J. H. Visser, M. J. Vellekoop, A. Venema, E. van der Drift, P. J. M. Rek, A. J. Nederlof, and M. S. Nieuwenhuzen, "Surface acoustic wave filters in ZnO-SiO<sub>2</sub>-Si layered structures," Ultrason. Symp., pp.195-200, 1989
- [13] H. F. Tiersten and B. K. Sinha, "A perturbation

analysis of the attenuation and dispersion of surface wave,” J. Appl. Phys., Vol.49, pp.87-95, 1978

- [14] 陳永裕，層狀表面聲波元件之理論、實驗及其應用，博士論文，台大應用力學研究所，2002
- [15] 王聖銘，中頻表面聲波濾波器之設計與量測，碩士論文，台大應用力學研究所，2002
- [16] 周政泰，以耦合模型分析層狀表面聲波濾波器之頻率響應，碩士論文，台大應用力學研究所，2002