行政院國家科學委員會專題研究計畫　期中精簡報告

層狀表面聲波濾波器之分析與製作(2/3)

計畫類別：個別型計畫
計畫編號：NSC91-2212-E-002-064-
執行期間：91 年 08 月 01 日至 92 年 07 月 31 日
執行單位：國立臺灣大學應用力學研究所

計畫主持人：吳政忠
共同主持人：張培仁
計畫參與人員：陳永裕

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中　華　民　國 92 年 5 月 12 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中報告

層狀表面聲波濾波器之分析與製造(Ⅱ)

The Analysis and Fabrication of Layered Surface-Acoustic-wave Filter (Ⅱ)

計畫編號：NSC 90-2212-E-002-156
執行期間：91年8月1日至92年7月31日
主持人：吳政忠　　台灣大學應用力學研究所

一、中文摘要

表面聲波元件(Surface Acoustic Wave Device)具有高性能、尺寸小、低成本，且與 IC 製程技術相容等優點，使其在電子工業與通訊系統上佔有很重要的地位。隨著行動通訊的日新月異及對於高資料傳輸速度的要求，傳統結構的表面聲波元件因受限於電極線寬與基底材料，已不敷使用，而層狀表面聲波元件能利用不同結構的搭配來提供多重的優點，以應付日益嚴苛的要求，因此本計畫擬以三年時間研製先進層狀表面聲波振盪器並建立相關的量測技術。計劃第二年以壓電層狀晶體波傳理論為基礎，配合格林函數及有效介電常數探討覆膜對表面波傳速度之影響與相對之頻散效應，並分析與設計層狀表面聲波振盪器之頻率響應，實驗方面則進行薄膜引致之表面聲波頻散實驗探討與彈性性質反算、測定。

關鍵詞：層狀表面聲波震盪器、有效介電常數、層狀壓電晶體波傳理論

Abstract

With the development of communication technology, there has been a growing interest in the study of SAW filters based on layered structures. By including a high velocity layer between a piezoelectric layer and a substrate, the surface wave velocity can be increased significantly. This results in an increase of the SAW frequency without decreasing the electrode spacing into the sub-micron region. This three-year project is to study the analysis and fabrication of layered SAW filters by both the theoretical and experimental approaches. At the primary stage of the second year, the formulation based on the matrix method for calculating the dispersion relations of a general piezoelectric layered medium was developed. A general-purpose computer program was written for the subsequent analyses. In addition, the effective permittivity and the phase velocity dispersion of a ZnO/diamond layered half space were calculated. The variations of the phase velocity and the electromechanical coupling coefficient with propagation direction were discussed. These calculated results provide useful guidelines for the design of a layered SAW device.

Keywords: layered SAW filter, effective permittivity, matrix method

二、計畫緣由與目的

1965年White和Voltmer [1] 將交指叉轉能器(interdigital transducer, IDT)鍍在壓電基板表面，利用壓電特性將電磁波的輸入訊號轉換成機械能，藉此激發表面波，經壓電基板傳遞至輸出端的交指叉轉能器，再將機械能轉換成電磁波訊號，以過濾不必要的訊號，提昇收訊品質，至此才使得表面聲波元件成為不可或缺的電子元件。由於表面聲波元件具有體積小、耗損低、過濾效果佳及可大量製造的特性，因此現在亦被廣泛應用在各種行動通訊系統及全球衛星定位系統上。

隨著行動通訊的日新月異及對於高資料傳輸速度的要求，高頻段的數位通訊系統日益凸顯其重要性，因此如何提昇表面聲波濾波器的性能，成為目前極為重要的問題。過去幾年，由於鋁合金電極製程的改善，使得表面聲波元件足以應付1.5GHz 通訊系統之要求。但隨科技的進步，對通訊系統的要求日益嚴苛，傳統結構的表面聲波元件因受限於電極線寬與基底材料，已不敷使用，而層狀表面聲波元件能利用不同結構的搭配來提供多重的優點，因此層狀結構之表面聲波元件蘊育而生。

本計畫旨在研製先進層狀表面聲波振盪器並建立相關的量測技術，故第二年初期以壓電層狀晶體波傳理論為基礎，配合有效介電常數(effective permittivity)探討覆膜對表面波傳速度之影響與相對之頻散效應，並分析層狀表面聲波震盪器之波傳設計方向，以作為日後研製層狀表面聲波振盪器之依據。

三、研究方法與成果

(一) 層狀壓電介質波傳理論

在層狀非等向介質之波傳分析方面，Braga [2] 利用 Stroh 非等向材料的六階矩陣理論加上波阻的概念，有效精確地找出層狀非等向性材料表面波的頻散關係。Honein 等人 [3] 則提出八階矩陣理論，將之推展至層狀壓電介質之波傳分析。傳統分析層狀壓電介質之表面波傳行為的方法，為了滿足界面連續及邊界條件，致使行列式的維度隨層數而快速增加，造成數值計算上的困難。本計劃採用之理論架構為 Honein 等人所提出之八階矩陣理論，此方法將運動方程式及組成率結合為一階矩陣微分方程式，在每一層中，矩陣微分方程式的解形成一轉換矩陣，藉此將變數對應至下一層，如此使得矩陣階數與層數無關，進而克服傳統研究方法之缺點。

(二) 有效介電常數

壓電介質與真空介面處之電位勢須滿足連續條件，但電位移的垂直分量則不一定相等，有效介電常數$\pounds_s$即代表此電位移不連續量與電位勢之關係，定義為[4]

$$\pounds_s = \frac{\pounds\big|_{z=H}}{k_x \hat{\varphi}\big|_{z=H}} = \frac{\hat{D}_n\big|_{z=H^+}}{k_x \hat{\varphi}\big|_{z=H}} - \frac{\hat{D}_n\big|_{z=H^-}}{k_x \hat{\varphi}\big|_{z=H}}, \quad k_x > 0$$

(1)

其中$\hat{\pounds}$為表面電荷密度(surface charge density)。從(1)式不難發現，當$\hat{D}_n\big|_{z=H^+}$與$\hat{D}_n\big|_{z=H^-}$不等時，有自由電荷在壓電介質表面累積，代表金屬電極存在，則有效介電常數$\pounds_s$在波速等於金屬化表面(metallized surface)的表面波相速v_m時會出現極點(pole)。當$\hat{D}_n\big|_{z=H^+}=\hat{D}_n\big|_{z=H^-}$，亦即表面電荷密$\hat{\pounds}\big|_{z=H}$為 0 時，代表無電極存在於層狀壓電介質表面，有效介電常數$\pounds_s$在波速等於自由表面(free surface)之表面波相速v_o時會出現零點(zero)。

本計劃利用八階矩陣波動方程式，配合局部波阻與反射張量，推導出層狀壓電晶體的波傳遞迴計算式，以求得壓電介質表面之有效介電常數，據此計算層狀壓電介質之表面波頻散關係。圖 1 為 ZnO/diamond 層狀結構示意圖，當切面法方向(*z*-axis)與晶格座標之 Z 軸平行，且傳播方向(*x*-axis)與晶格座標之 X 軸平行時，有效介電常數隨表面波相速之變化關係如圖二所示，其中選擇波數-氧化鋅層厚度積為 1，且計算所須之材料常數如表一所列 [5]。圖中實線代表有效介電常數之實部，虛線則為有效介電常數之虛部。端視此圖發現有效介電常數之虛部為零，代表沒有機械能滲入材料內部。在相速在 5.9 km/s 附近，有效介電常數出現一極點與零點，此對應於第零表面波模態。另外，相速在 7 km/s 附近時，有效介電常數亦出現一極點與零點，此對應於第一表面波模態。零點代表自由表面邊界下之表面波相速，此為零電荷密度所致; 至於極點則代表金屬化表面之表面波相速，此乃電位勢為零時，電荷密度不為零所致。

(三) 層狀壓電介質表面波數值計算

利用層狀壓電介質波傳理論分析覆膜對表面波傳速度之影響，與相對之頻散效應，對於層狀表面聲波元件的設計是一項重要的工作，因此本計劃便針對之 ZnO/diamond 層狀結構進行表面波頻散效應之計算。圖 2 為自由表面下，在傳播方向與晶格座標之 X 軸平行時之前兩表面波模態相速頻散關係，其中薄實線為第零表面波模態，厚實線為第一表面波模態，虛線則為擬橫向徹體波(quasi-shear bulk wave)。端視此圖不難發現，若利用此層狀結構作為表面聲波元件之基底材料，可將表面波相速提高至約 12 km/s，比平常之表面波速高出四倍之多。換言之，在原有的線寬限制下，可進一步將表面聲波元件之中心頻率提高，延伸其應用頻率的上限。另外，在波數-厚度積在 1.5 附近，第零與第一雷利模態十分接近，但未相交。

(四) 層狀表面聲波震盪器之波傳設計方向探討

ZnO與diamond均為非等項性材料，其波傳性質會隨著不同的切面角度與波傳角度而有所改變，故層狀表面聲波震盪器之波傳方向亦是設計的重點之一。圖4為波數-氧化鋅層厚度積為1時，表面波相速隨波傳角度之變化圖，端視此圖發

現，在此狀況下相速變化不大，意即此結構在波數-氧化鋅層厚度積為1時，可容許較大的對準角度誤差。

在非等向性材料中，聲波之能量速度方向不一定會與波前垂直，此即所謂波束轉向(beam steering)。聲波元件之基底材料大多為非等向性壓電材料，是故選擇適當之波傳角度，使聲波之能量速度方向能與波前垂直，避免波束轉向效應發生，亦為設計聲波元件重要考量因素之一。圖5為表面波之波慢曲線，圖中發現當波傳角度與[100]夾角為45°的整數倍時，表面波之能量速度方向均與波前垂直，是故若設計聲波元件沿此角度傳遞時，交指叉轉能器的位置不需做調整，即可有效率地量測到兩者之波傳訊號。

機電耦合係數定義為材料電性能量與力學能量之間的轉換比例，其直接影響到聲波元件的插入損失值與3dB頻寬，故為選擇表面聲波元件基底材料之重要考量因素。圖6為機電耦合係數隨波傳角度之變化關係，圖中發現當波傳角度與[100]夾角為45°的奇數倍時，機電耦合係數較大，換言之，可藉由選擇波傳角度來獲得較大的機電耦合係數。

四、計畫進度與未來工作

本計畫第二年初期的研究內容包括以壓電層狀晶體波傳理論為基礎，配合有效介電常數計算表面波相速之頻散效應，並探討覆膜對表面波傳速度之影響，與層狀表面聲波震盪器波傳方向之設計。程式撰寫與相關之模擬分析已依原訂進度順利完成，目前正進行層狀表面聲波濾波器頻率響應之分析，及薄膜引致之表面聲波頻散實驗探討與彈性性質反算、測定。

五、參考文獻

[1] R.-M. White and F.-W. Voltmer, “Direct Piezoelectric Coupling to Surface Elastic Waves,” *Appl. Phys. Lett.*, **vol. 7**, pp.314-316 , 1965.

[2] Braga, M.B. (1990), "Wave propagation in Anisotropic Layered Composites", *Ph. D. dissertation, Stanford Univ.* U.S.A..

[3] Honein, B.; Braga, A.M.B.; Barbone, P.; Herrmann, G. (1991), "Wave Propagation in Piezoelectric Layered Media With Some Applications," *J. Intelligent Material Systems and Structures,* **2(4)**, pp. 542-557.

[4] Morgan, D. P. (1991), *Surface-Wave Devices for Signal Processing,* Elsevier, New York.

[5] Auld, B. A. (1990), *Acoustic Fields and Waves in Solids,* Vol.1, Florida: R.E. Krieger Publishing Company, New York: Wiley.

六、圖表

表 1 材料常數

Diamond (Cubic *m3m*)				
密度 (Kg/cm^3)	彈性常數 (Gpa)			相對介電係數
	C_{11}	C_{44}	C_{12}	$\pounds_{11}^{S}/\pounds_0$
3512	1020	492	250	5.67

ZnO (Hex. 6mm)				
密度 5680 Kg/cm^3				
彈性常數 (Gpa)				
C_{11}	C_{33}	C_{44}	C_{12}	C_{13}
209.7	210.9	42.47	121.1	105.1
壓電係數 (Coul./m^2)			相對介電係數	
e_{x5}	e_{z1}	e_{z3}	$\pounds_{11}^{S}/\pounds_0$	$\pounds_{33}^{S}/\pounds_0$
-0.48	-0.573	1.32	8.55	10.2

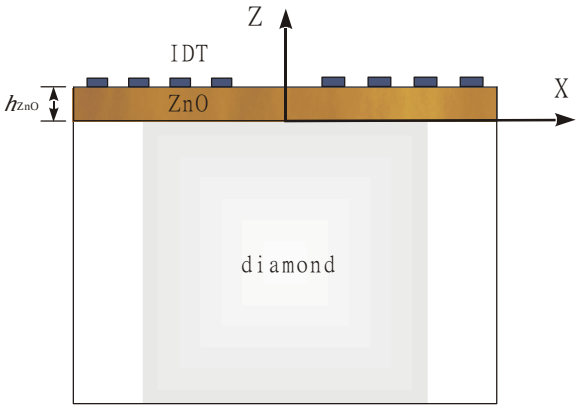

圖 1　ZnO/diamond 層狀結構示意圖

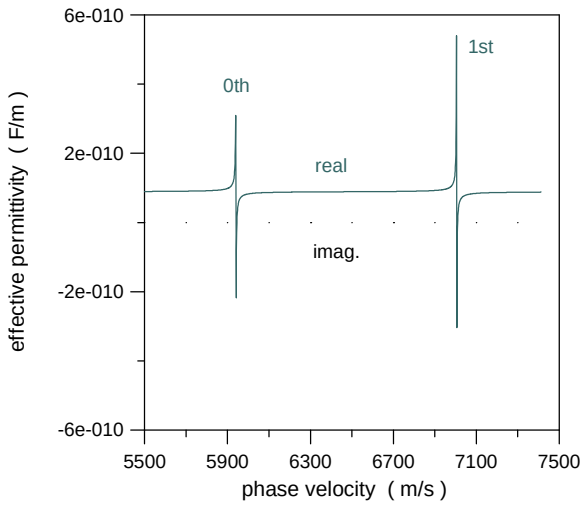

圖 2　有效介電常數隨波速之變化圖

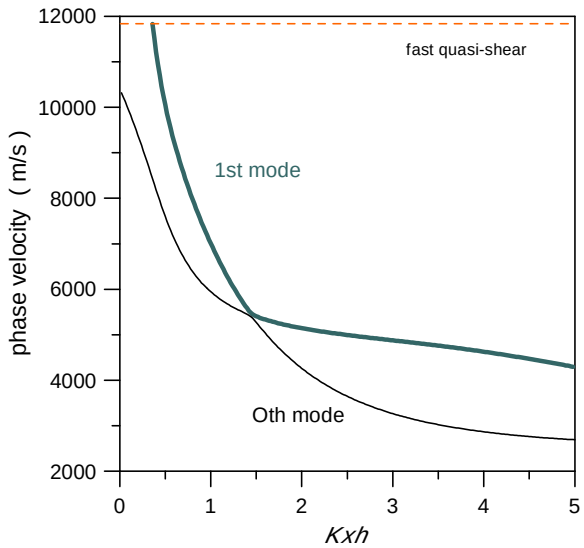

圖 3　ZnO/diamond 層狀結構之頻散關係

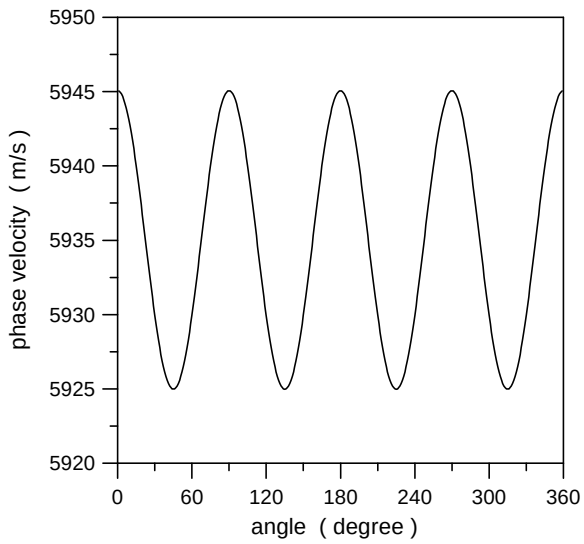

圖 4　波傳角度與相速之關係圖

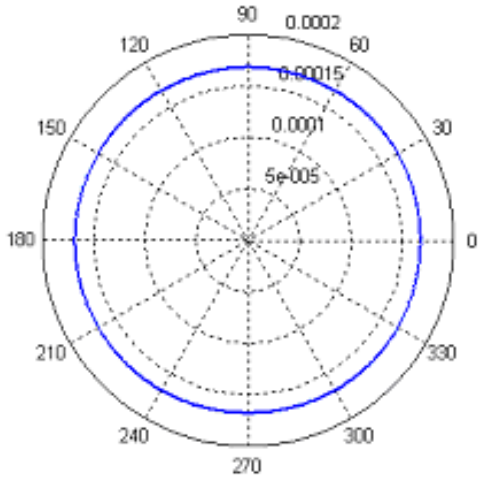

圖 5　波慢曲線圖

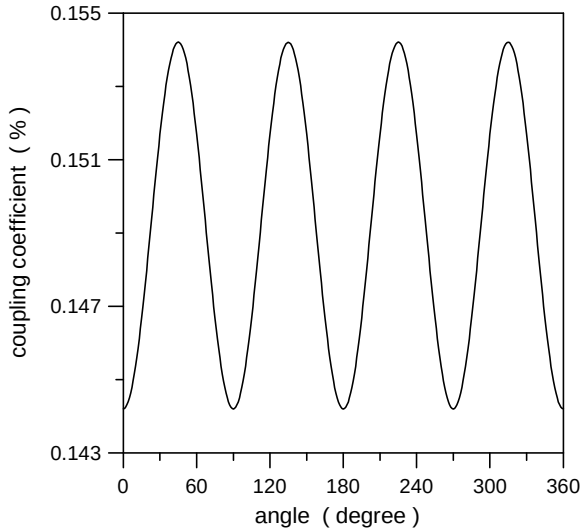

圖 6 波傳角度與機電耦合係數之關係圖