

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

高頻通信用射頻濾波器的研發(2/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-002-017-

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：周元昉

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 6 月 8 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中進度報告

高頻通信用射頻濾波器的研發(II)

RF Filter for High Frequency Communication (II)

計畫編號：NSC 92-2212-E-002-017

執行期限：92年8月1日至93年7月31日

主持人：周元昉 國立台灣大學機械工程學系

1. 中文摘要

本計畫擬開發適用於 ISM2.4 頻帶的高頻的帶通濾波器，為使開發的濾波器能具有與 RFIC 整合的潛力，所以選用薄膜型式的塊體波濾波器(BAW filter)。為決定電極間隔必須先求得壓電平板內波傳的頻譜。在第一期計畫中已發展出求取在不同邊界條件下壓電平板波傳頻譜及相對應的模態的方法，此法適用於所有 Limiting group 具 ∞mm 對稱性與 Point group 具 $6mm$ 對稱性的壓電平板。此外並採用射頻濺鍍成長出氮化鋁(AIN)壓電薄膜，由 X-ray 繞射的結果發現所製備之 AIN 壓電薄膜具 C 軸結構，因此可滿足製作塊體波濾波器的需求。

在以壓電薄膜製作濾波器時，電極的厚度約較壓電薄膜厚度小一個數量級，因此效應應加以考慮。電極所產生的效應以兩種模式考慮，對於很薄的電極只需以慣性力效應近似；而相對較後的電極，則必須完整考慮電極之慣性與彈性效應。利用求得的頻散曲線與相對應的波動場形，即可設計出符合規格的濾波器。

在製作濾波器方面，本期計畫已完成濾波器的設計，並將利用氮化鋁(AIN)壓電薄膜試製原型。

關鍵詞：濾波器，塊體波，頻譜，壓電，薄膜

英文摘要

This project will develop an RF filter for communication in ISM 2.4 band. The BAW

type filter is aimed because it has the capacity to integrate with RFIC. The piezoelectric plate spectrum that is required for determining the electrode spacing is found. For the propagation of harmonic waves, spectra and mode shapes for different boundary conditions are found in the first phase of this project. The solutions obtained are good for piezoelectric plates of ∞mm symmetry in the limiting group and $6mm$ symmetry in the point group. The AIN film made by RF sputtering technique is adopted in this project. Inspected with X-ray diffraction method, the film is found to possess C-axis structure that satisfies the requirement for BAW filter fabrication.

For filters made of piezoelectric films, the thickness of electrodes is one order of magnitude smaller than that of piezoelectric films. Therefore, the mechanical effects of electrode films cannot be neglected. Two models were employed to take care of the electrode effects. For very thin electrodes, only inertia property has to be included in the analysis. However, the complete mechanical properties must be modeled for relative thick electrodes. Making use of the obtained dispersion curves and corresponding field shapes, a filter can be designed to satisfy the specifications.

A filter design is completed in this phase. The prototype will be fabricated with AIN film before the completion of this phase.

Keyword: Filter, Bulk acoustic wave, Spectrum, Piezoelectric, Film

2. 前言

在以壓電薄膜製作濾波器時，電極的厚度約較壓電薄膜厚度小一個數量級，因此電極將對波傳造成不可忽略之影響，本期計畫中以兩種方法探討電極效應，一為將其效應以慣性力近似，另一法則完整考慮電極彈性力作用，類似彈性波在層狀介質平板之波傳行為，經常使用於非破壞性檢測上。以下將相關之文獻作概略性的回顧。

在 1888-1889 年間，L. Rayleigh^[1] 和 H. Lamb 首先提出對於均質等向性板材之波傳問題，以純量場(Scalar potential)與向量場(Vector potential)獲得位移場中之正解，進而分析等向性板材的波傳問題。但是以純量勢能與向量勢能的數學方法很難應用於非等向性材料中的波傳問題。

1952 年，R. D. Mindlin^[2] 提出利用 Cauchy 級數展開法對位移場與電位場展開得到其近似解，藉以分析無限長度以及有限長度板材的厚度彎曲振動、厚度剪切振動與扭轉振動模態。

1963 年，H. F. Tiersten^{[3][4]} 討論在無限長壓電板材的厚度振動與波傳問題。考慮壓電板材之邊界條件為上下兩表面的曳引力為零，且有電位差存在，在截止頻率時，得到鐵電陶瓷與 Y 切石英的厚度振動位移場與電位場的形式。同年並探討無限長壓電板材中的波傳問題，考慮邊界條件為上下兩表面的曳引力為零，且有無限長的電極存在，上下兩表面為等電位。文中假設在厚度方向變化的位移場與電位場之函數形式，代入壓電板的統御方程式形成一特徵值問題，再利用所求得的特徵值與特徵向量做線性組合以滿足邊界條件。雖然其所假設的解可以滿足壓電的統御方程式，但是其所假設的位移場與電位場並不一定完整包含這波傳問題所有解的形式。

1965 年，R. D. Mindlin^[5] 分析單斜晶系無限大平板之 SH 波波傳現象，文中並探討鋪覆電極之效應，將電極效應以慣性力近似之，並導出其頻散關係，以及單斜晶系無限大平板截止頻率之比較。

1964 年，J. P. Jones^[6] 推導出兩層等向性材料層板中之頻散關係，並討論其物理現象。將兩層介質中之位移場分別以純量場與向量場表示其正解，得到不同厚度比下之波

傳頻譜圖，並得到當波數很大時，其波傳現象將會趨近兩個介質之 Rayleigh 波，並加上一個可能會存在之 Stoneley 波。

由於層狀結構中波傳之頻散關係複雜，Adnan H. Nayfeh 和 G. A. Gurtman^[7] 在 1974 年對層狀結構之波導提出 Continuum mixture 之近似方法，在波傳波長遠大於波導之厚度時，將位移及應力以在該層板中之平均值近似，獲得在該近似方法下之波傳頻譜圖。

1975 年，N. C. Cheng 與 C. T. Sun^[8] 探討兩層壓電材料的板材其波傳運動的問題，由壓電之本構方程式及統御方程式出發，並考慮其電性邊界條件，透過假設在壓電板中厚度方向之電位場與位移場函數分佈形式，獲得其電位場與位移場之正解，進而探討兩層壓電平板之頻散關係；若鋪覆層數較多，其波傳之頻散關係形式過於複雜，提出以冪級數展開位移場與電位場之近似解，並詳細繪出在不同厚度比例下 CdS / ZnO 之頻譜圖；文中並探討 CdS / PZT-4 在不考慮壓電效應與考慮壓電效應下，兩者頻譜圖之差別。

1977 年，F. Boersma 與 E. C. van Ballegooyen^[9] 針對 Y 切石英平板上下鋪覆不同厚度或不同材料之電極，利用由 H. F. Tiersten 推導所得之厚度振動時之位移場與電位場的近似解形式，獲得在考慮電極彈性效應下之截止頻率。

1978 年，P. C. Y. Lee 與 Nagyong Chang^[10] 針對三層板(sandwich)，其材料均為等向性材料，探討平面應變與反平面應變下之波傳現象；並討論上下層板之密度、厚度及彈性係數與中央平板之比例，這些參數對三層板之頻散現象的影響。

1987 年，P. C. Y. Lee、S. Syngellakis 與 J. P. Hou^[11] 將壓電平板在厚度方向之位移場與電位場分佈形式，以三角函數之無窮級數展開，探討 45° Y 切 Lithium Tantalate 平板無電極狀態下，獲得以一項到四項級數展開位移場及電位場之近似解，比較以不同項數近似下頻散曲線與真實頻散曲線之差異，從中歸納得到以較多項之級數近似能得到較佳的結果。文中並探討 AT 切石英平板鋪覆電極，若電極很薄其內部形變可以忽略下，探討電極慣性力及外加電壓下，該效應將對石英平板波傳現象之影響。

1988年，S. K. Datta、A. H. Shah、R. L. Bratton 與 T. Chakraborty^[12] 探討多層非等向性平板之波傳行為，使用 Stiffness 方法將各層介質中位移場以內差多項式函數得到近似解，並將其應用到等向性材料與橫向等向性 (transversely isotropic) 之兩層介質中，獲得在該狀況下其頻散關係。

假設其基板之厚度遠大於波傳之波長，故將基板等效為一半無限大域之介質；1990年，M. Bouden 與 S. K. Datta^[13] 研究在半無限大域非等向性材料上之等向性層板之波傳行為，提出層板並非對所有頻率都具有波導現象。

1993年，J. Laperre 與 W. Thys^[14] 對雙層等向性介質 (Al / Ploymer) 之平板之波傳現象，提出在兩種介質波傳阻抗相差甚大之情況下，以近似之邊界條件獲得其頻散關係，繪出其頻譜圖及介質中之位移場，並以理論值相互比較；文中並以機械模型解釋各頻散曲線相互耦合之現象。

A. Jonas Niklasson、Subhendu K. Datta 與 Martin L. Dunn^{[15] [16]} 在 2000 年時針對中央平板上下為相同之非等向性材料，中間則為等向性材料之三層板 (Sandwich)，藉由對非等向性材料在厚度方向以泰勒級數展開其位移，並在波長遠大於非等向性材料厚度下將高次項忽略，進而推導出近似之介面條件；利用該近似條件獲得波傳之頻散關係，並且繪出其波傳頻譜圖。同年，推導出三層板上下為相同性質之非等向性材料，中間為非等向性材料之近似頻散關係。

由前述可知截至目前有關壓電平板波傳頻譜圖不是不完整就只是數值的近似解，為了能準確的設計更有效率的高頻壓電濾波器，有必要瞭解壓電平板頻譜的全貌。本研究完整的找出滿足在不同邊界條件的壓電波傳頻譜圖，以供設計高頻壓電濾波器之需。

對於操作在微波頻段的元件而言，所使用的材料通常需具備下列特點：高聲波波速、高機電耦合係數、表面平滑、傳輸損失小、且特性受溫度影響小，而氮化鋁 AlN 薄膜具有很多優異的特性，如化學穩定性高、熱傳導率高、機械强度高、電性絕緣性佳、高能隙，膨脹係數與矽和砷化鎵相近、高聲波波速與高機電耦合係數等^[17]，可應用在體聲波元件^[18]與表面聲波元件^[19]。此外，射頻

濺鍍有低溫沈積、表面平整、價格與複雜度低等優點，是沈積氮化鋁薄膜的優良選擇。

3. 研究方法

3.1 電極慣性對 PZT 平板波傳現象之影響

在壓電平板的表面鍍有電極，若電極厚度很薄，因在高頻時之慣性力效應遠較彈性效應顯著，則可忽略電極之彈性力而將電極所產生的效應以慣性力近似。邊界上電極的慣性力將對 PZT 壓電平板之位移場與電位場所造成之影響，可由修改第一期之求解方法，配合滿足電極的慣性力的邊界條件，成為一個新的特徵值問題，求取特徵值得得散頻曲線，圖 1 為壓電平板兩面均鍍有電極時之散頻曲線，圖 2 為單面有電極的情形。電極效應以慣性力近似的條件下，在電極與壓電層邊界上將出現兩條表面波，其他頻散曲線在相同波數下，其波傳之頻率較不考慮電極效應者略微下降。

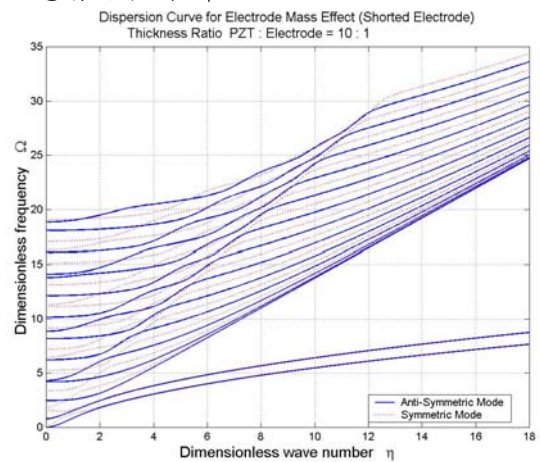


圖 1 考慮電極的慣性效應雙面有電極之散頻曲線

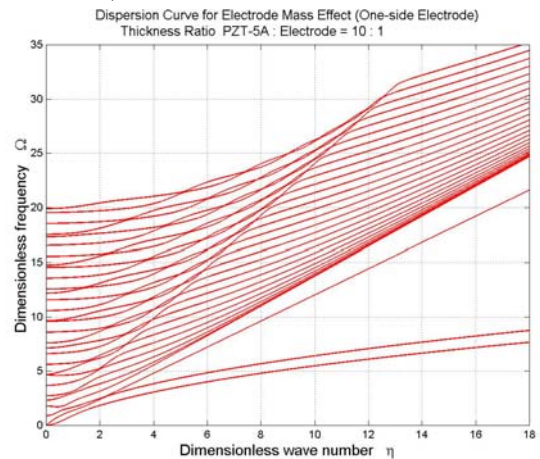


圖 2 考慮電極的慣性效應單面有電極之散頻曲線

3.2 電極機械性質對 PZT 平板波傳之影響

在壓電平板的表面鍍有電極，若電極有相當的厚度，因在高頻時之慣性力效應遠較彈性效應顯著，則不可忽略電極之彈性力而須計入電極所有的機械效應。此時須將電極的波動方程以基本解迭加，在與壓電板的交界上須滿足位移的一致性與曳引力的平衡，這些條件形成一特徵值問題，求取特徵值可得散頻曲線，圖 3 為 PZT 壓電平板兩面均鍍有十分之一板厚的電極時之散頻曲線，圖 4 為單面有電極的情形。考慮電極慣性與彈性力效應下，高波數時第一頻散曲線在壓電層中具有表面波的特徵，在電極中則逐漸形成類似 Rayleigh 波傳遞；其他頻散曲線具有模態轉變現象。在鋪覆電極夠薄及波傳頻率較低時，比較兩種方法可知電極效應以慣性力效應近似是相當合理的。

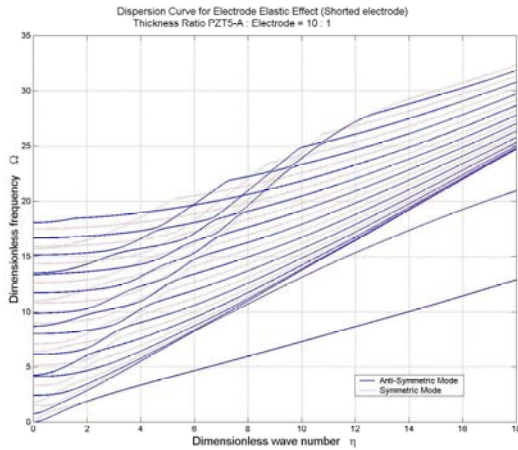


圖 3 考慮電極的機械效應雙面有電極之散頻曲線

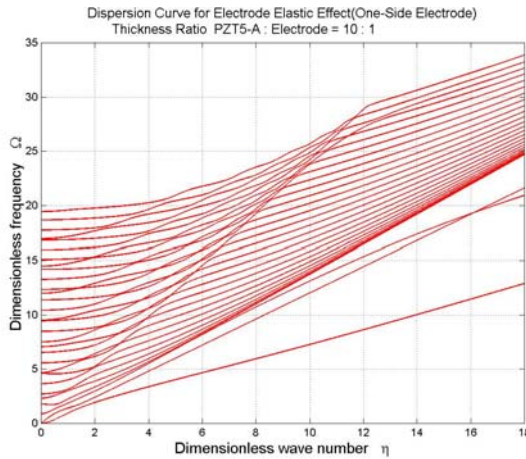


圖 4 考慮電極的機械效應單面有電極之散頻曲線

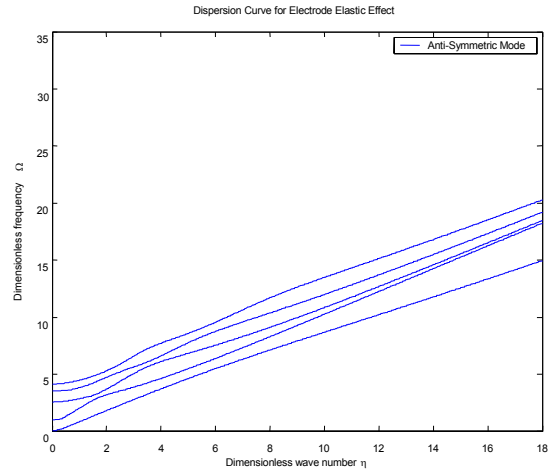


圖 5 AIN 平板雙面鍍鋁電極反對稱模態之散頻曲線

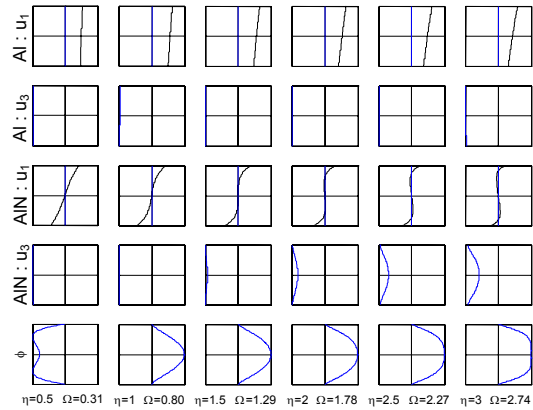


圖 6 AIN 平板雙面鋁電極反對稱模態之場形

3.4 氮化鋁壓電平板雙面鋪覆鋁電極之波速

氮化鋁壓電平板上雙面鋪覆十分之一厚度的鋁電極時，其前五個反對稱模態的散頻曲線示如圖 5，圖 6 為第一模態之場形。在其第一模態對應於無因次波數 $\eta = 0.868$ ，與無因次頻率 $\Omega = 0.6638$ 的相速度為

$$V_{phase} = \frac{\omega}{\xi} = \frac{\Omega \left(\frac{\pi}{2h} \right) \left(\frac{C_{44}}{\rho} \right)^{1/2}}{\left(\frac{\pi}{2h} \right) \eta} = \left(\frac{\Omega}{\eta} \right) \left(\frac{C_{44}}{\rho} \right)^{1/2} = \frac{0.6638}{0.868} \left(\frac{C_{44}}{\rho} \right)^{1/2} \approx 4128.2 (m/s) \quad (1)$$

無因次化頻率

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega} = \frac{\omega}{\left(\frac{\pi}{2h} \right) \left[\left(\frac{C_{44}}{\rho} \right)^{1/2} \right]} = 1.703767831 \times 10^{10} \quad (2)$$

得

$$\omega = 1.703767831 \times 10^{10} \Omega = 1.130961086 \times 10^{10} \quad (3)$$

所以頻率 f 為

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 2711630722 \Omega = 1.7999 GHz \quad (4)$$

由 $\lambda = \frac{v}{f}$ 得 $\lambda = 2.3\mu\text{m}$ ，而在第二模態 $\eta = 0.5$ ，

$\Omega = 1.274$ ，對應的相速度為

$$V_{\text{phase}} = \frac{\omega}{\xi} = \frac{\Omega(\frac{\pi}{2h})(\frac{C_{44}}{\rho})^{1/2}}{(\frac{\pi}{2h})\eta} = (\frac{\Omega}{\eta})(\frac{C_{44}}{\rho})^{1/2} = \frac{1.274}{0.5}(\frac{C_{44}}{\rho})^{1/2} \approx 13818(\text{m/s}) \quad (5)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 2711630722\Omega = 3.45\text{GHz} \quad (6)$$

得 $\lambda = 4\mu\text{m}$ 。由此相速度和相對應的波長即可決定插指電極間距。

3.5 輸入輸出電極阻抗匹配

一般射頻儀器輸出與輸入阻抗皆為 50Ω ，所以在輸入端需要同為 50Ω 以使訊號能完全進入體聲波濾波器，而本濾波器輸入端為共平面波導，可經由已知線寬和電極底下矽基板的厚度和介電係數來計算，在圖 7 中， $2a$ 為中間電極的寬度， $2b$ 為兩側電極間隔距離， h 為基板厚度， Z_0 為輸入阻抗， ϵ_r 為基板介電係數，阻抗可由下式計算

$$Z_0 = \frac{30\pi K(k')}{\sqrt{\epsilon_{re}} K(k)} \quad (7)$$

當中 ϵ_{re} 為

$$\epsilon_{re} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{K(k')K(k_1)}{K(k)K(k_1')} \quad (8)$$

而 k 、 k' 、 k_1 和 k_1' 分別為

$$k = \frac{a}{b} ; k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (9)$$

$$k_1 = \frac{\sinh(\pi a / 2h)}{\sinh(\pi b / 2h)} ; k_1' = \sqrt{1 - k_1^2} \quad (10)$$

而判別式為

$$\frac{K(k)}{K(k')} = \frac{1}{\pi} \ln\left(2 \frac{1 + \sqrt{k}}{1 - \sqrt{k}}\right) \quad 0.5 \leq k^2 \leq 1 \quad (11)$$

$$\frac{K(k)}{K(k')} = \pi \left[\ln\left(2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}}\right) \right]^{-1} \quad 0 \leq k^2 \leq 0.5 \quad (12)$$

利用(7)到(12)式，並且固定 $2b = 300$ 求 Z_0 ，變數為 a ，對矽基板而言 $\epsilon_r = 11.9$ ，當 $2a = 148\mu\text{m}$ 時， $Z_0 = 50\Omega$ ，因此輸出輸入電極尺寸設計為 $2a = 150, 2b = 300$ 。

3.6 濾波器結構尺寸

結合前述的分析可以決定濾波器的尺寸和材料。在幾何外型上此濾波器由一個

$2112\mu\text{m} \times 200\mu\text{m} \times 1.2\mu\text{m}$ 與四個 $100\mu\text{m} \times 200\mu\text{m} \times 1.2\mu\text{m}$ 的支撐樑構成如圖 8 與圖 9 所示。在截面材料方面，從下到上為 Cr/Au、下電極 Al、下層氮化鋁、中間 Al 電極、Cr/Au 保護層、上層氮化鋁、上電極 Al 等各層薄膜所組成，厚度分別為 $0.1\mu\text{m}$ 、 $0.1\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $0.1\mu\text{m}$ 、 $0.1\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $0.1\mu\text{m}$ 。

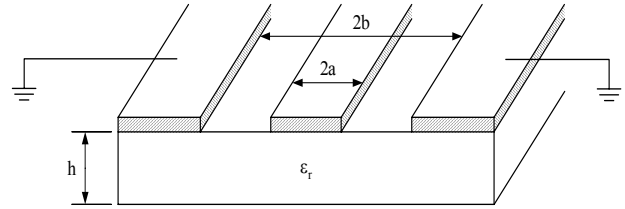


圖 7 共平面波導

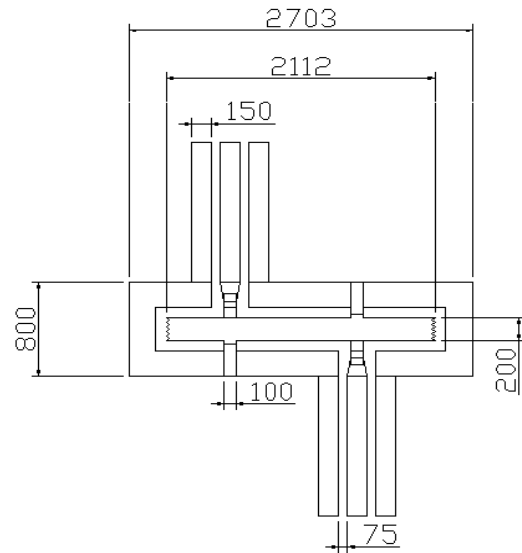


圖 8 濾波器之上視圖

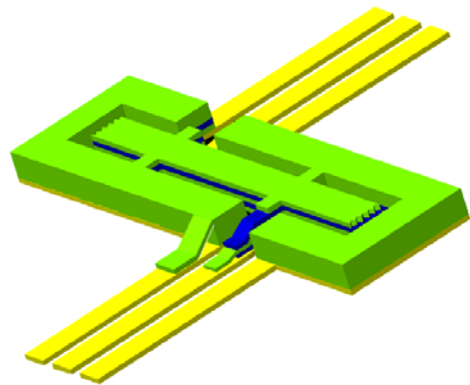


圖 9 濾波器之立體圖

3.7 AlN 薄膜與濾波器製作

本研究是利用 RF 濺鍍機製作氮化鋁薄膜，靶材純度 99.9%，薄膜厚 5000 \AA ，因為只有 C 軸優先取向的結構才具有壓電特性，所以將基板加溫至 360°C ，使氮化鋁壓電材

料能有 C 軸排列。根據 JCPDS 的資料氮化鋁粉末 2θ 值及對應的晶格平面間距，其中 C 軸排向(002)繞射角度出現在 $2\theta = 36.041^\circ$ 。本實驗採用 X-ray 繞射分析，繞射角從 25 度到 65 度之間每分鐘掃瞄 1.5 度，結果示如圖 10，由圖中觀察到在(002)方向有明顯突出，證明的確有 C 軸排向的氮化鋁薄膜出現。此外由橢圓偏光儀量測折射率約在 1.98~2.1 之間，與一般氮化鋁的折射率為 2.0~2.1 之間幾乎相同，因此可確定此薄膜為氮化鋁。表 1 為氮化鋁特性參數。

製作濾波器之半成品如圖 11 所示。

表 1 氮化鋁特性參數

分子量	40.998
密度	3260 kg/m^3
結晶構造	Hexagonal (wurtzite)
晶格參數	$a_0=3.110\text{\AA}$ $c_0=4.980\text{\AA}$
熔點	3300 K
熱分解溫度	2790 K
比熱 (300K)	$7.2 \text{ Cal/Mol} \cdot \text{K}$
TOE (25-200°C)	4.5×10^{-6}
熱傳導率(300K)	$200 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
縱波波速	10400 m/sec
電阻率(室溫)	$10^{13} \Omega\text{-cm}$
折射率	$n_0=2.1$
能帶寬	6.2 eV
維氏硬度	1050 kg/mm^2
Poisson ratio	0.25
Young's modulus	340 GPa

4. 結論

本研究求得壓電平板考慮電極影響的頻散曲線，並得到上下均披覆電極與單邊披覆電極之完整傳遞模態頻譜圖。此法並可得到其在不同的頻散曲線上之位移場及電位場分布情形。

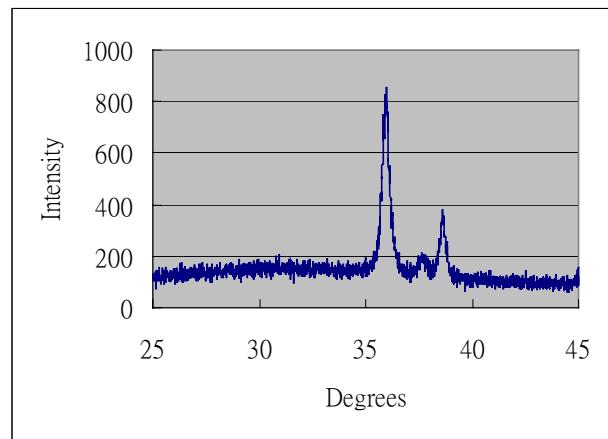


圖 10 Al 膜上沈積 AlN 薄膜之 X-ray 繞射圖

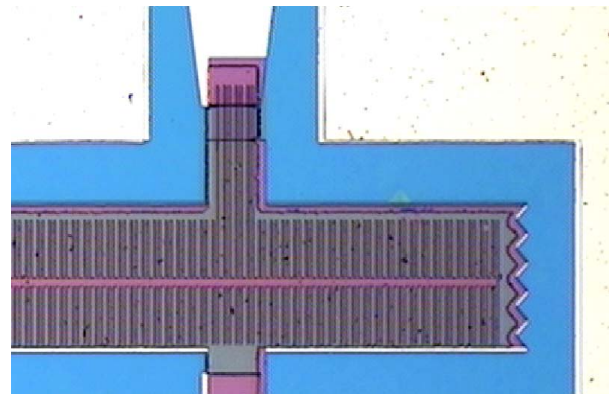


圖 11 濾波器之半成品

由頻散曲線可求得波傳之相速度，由場形圖可選擇適合使用之波數與頻率，綜整這些資料即可設計滿足規格之濾波器。

本期計畫截至目前已完成濾波器之初步設計，獲得主要之架構與幾何尺寸。在材料上並已成功的製作出符合規格之 AlN 薄膜。目前已進行濾波器原型的製作，並將進入實際製作與測試階段。

參考文獻

- [1] K. F. Graff, *Wave Motion in Elastic Solids*, Chapter 8, Dover Publication, New York, 1991.
- [2] R. D. Mindlin, "Forced Thickness-Shear and Flexural Vibrations of Piezoelectric Crystal Plates," *Journal of Applied Physics*, Vol. 23, No. 1, pp. 83-88, 1952.
- [3] H. F. Tiersten, "Thickness Vibration of Piezoelectric Plates," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 35, No. 1, pp. 53-58, 1963.

- [4] H. F. Tiersten, "Wave Propagation in an Infinite Piezoelectric Plate," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 35, No. 2, pp. 234-239, 1963.
- [5] R. D. Mindlin, "Thickness-Twist Vibrations of an Infinite, Monoclinic, Crystal Plate," *International Journal of the Solids Structures*, Vol. 1, pp. 141-145, 1965.
- [6] J. P. Jones, "Wave Propagation in a Two-Layered Medium," *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 31, No. 2, pp. 213-222, 1964.
- [7] Adnan H. Nayfeh and G. A. Gurtman, "A Continuum Approach to the Propagation of Shear Wave in Laminated Wave Guides," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 41, No. 1, pp. 106-110, 1974.
- [8] N. C. Cheng and C. T. Sun, "Wave Propagation in Two-layered Piezoelectric Plates," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 57, No. 3, pp. 632-638, 1975.
- [9] F. Boersma and E. C. van Ballegooyen, "Rotated Y-cut Quartz Crystal with Two Different Electrodes Treated as a One-Dimensional Acoustic Composite Resonator," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 62, No. 2, pp. 335-340, 1977.
- [10] P. C. Y. Lee and Nagyoung Chang, "Harmonic Waves in Elastic Sandwich Plates," *Journal of Elasticity*, Vol. 9, No. 1, pp. 51-69, 1979.
- [11] P. C. Y. Lee, S. Syngellakis, and J. P. Hou, "A Two-Dimensional Theory for High-Frequency Vibration of Piezoelectric Crystal Plates with or without Electrodes," *Journal of Applied Physics*, Vol. 61, No. 4, pp. 1249-1262, 1987.
- [12] S. K. Datta, A. H. Shah, R. L. Bratton, and T. Chakraborty, "Wave Propagation in Laminated Composite Plates," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 83, No. 6, pp. 2020-2026, 1988.
- [13] M. Bouden and S. K. Datta, "Rayleigh and Love Waves in Cladded Anisotropic Medium," *Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, No. 2, pp. 398-403, 1990.
- [14] J. Laperre and W. Thys, "Experimental and Theoretical Study of Lamb wave Dispersion in Aluminum / Polymer Bilayers," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 94, No. 1, pp. 268-278, 1993.
- [15] A. Jonas Niklasson, Subhendu K. Datta, and Martin L. Dunn "On Approximating Guided Waves in Plates with Thin Anisotropic Coatings by Means of Effective Boundary Conditions," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 108, No. 3, pp. 924-933, 2000.
- [16] A. Jonas Niklasson, Subhendu K. Datta, and Martin L. Dunn, "On Ultrasonic Guided Waves in a Thin Anisotropic Layer Lying Between Two Isotropic Layer," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 108, No. 5, pp. 2005-2011, 2000.
- [17] Stephen K. O'Leary and Brian E. Foutz, "Monte Carlo Simulation of Electron Transport in Wurtzite Aluminum Nitride," *Solid State Communications*, Vol. 105, No. 10, pp. 621-626.
- [18] H. P. Lobl and M. Klee, "Piezoelectric Material for BAW Resonators and Filter," *IEEE Proceedings of Ultrasonics Symposium, 2001*, pp. 807-811, 2001.
- [19] H. M. Liaw, W. Cronin and F. S. Hickernell, "The SAW Characteristics of Sputtered AlN on Silicon," *IEEE Proceedings of Ultrasonics Symposium, 1993*, Vol. 1, pp. 267-271, 1993.