

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

微機械濾波器之研發

The Development of Micro Mechanical Filters

計畫編號：NSC 89-2218-E002-015

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：周元昉 國立台灣大學機械工程學系

計畫參與人員：吳亮潔 劉達 莊銘璋 國立台灣大學機械工程學系

1. 中文摘要

本計畫所開發之微機械濾波器是結合單晶矽的塊體微細加工和 Sol-gel 方式製作 PZT 薄膜兩種技術所製作而成。微機械濾波器的結構是由利用 KOH 非等向性蝕刻出單一質量塊和 $15\mu\text{m}$ 厚的薄板，而壓電換能器為厚 $0.6\mu\text{m}$ 的 PZT 薄膜塗佈於矽薄板上形成之。此濾波器以平板懸掛之單質量塊的第二、三個固有頻率 $13.485\sim 14.168\text{kHz}$ 作為工作頻率範圍。壓電薄膜換能器的塗佈範圍係由第二、三個固有振形對應的電位移場找出輸入和輸出信號電極之最佳形狀決定之。本計畫所完成之微機械濾波器不需複雜之製程、且預期有極佳的溫度特性、高可靠度和高穩定性。

關鍵詞：機械濾波器、微加工、壓電換能器

Abstract

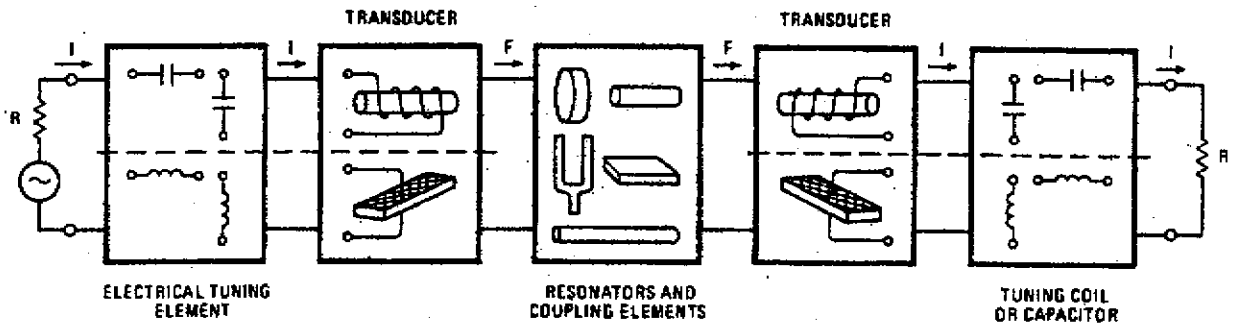
A micro-mechanical filter is developed in this project. It is an electromechanical bandpass filter manufactured with bulk micromachining technology of silicon and Sol-gel fabricated PZT thin film. First, a single mass and $15\mu\text{m}$ thin plate as the filter structure are fabricated by KOH anisotropic etching of silicon. And a $0.6\mu\text{m}$ PZT thin film consists of is used as transducer elements. The working bandwidth is selected to be $13.485\sim 14.168\text{kHz}$ that is in the range between the second and the third natural frequencies. The finite element analysis results determine the optimal shapes and locations of input and output signals electrodes. This filter is easy to fabricate and an excellent temperature stability and high reliability can be anticipated.

Keywords: Mechanical filter, Micro

fabrication, Piezoelectric transducer

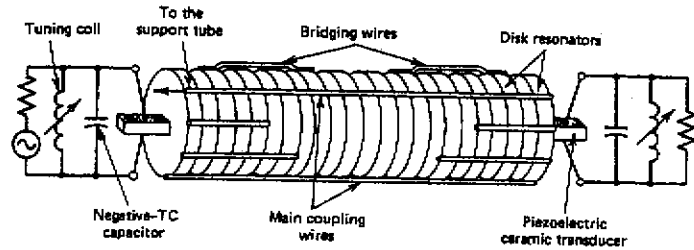
2. 前言

機械濾波器是機電帶通濾波器的一種，在 1970 年代就已經是相當成熟的商品[1]，其功用與一般電路上所使用的帶通濾波器相同，但其構造與一般純粹由電子元件所組成的濾波器卻大大不同，其原理是將輸入信號由電能方式轉換成機械能，經過濾波器的機械響應之後，再由機械能轉換回電能而輸出信號，且輸出信號都是將輸入信號低頻與高頻的部份過濾掉，因此又稱為機電帶通濾波器。一般機械濾波器的結構分成三大部份：換能器 2.共振子 3.耦合元件。圖一為機械濾波器主要元件的示意圖。機械濾波器大部份都是以圓形截面的金屬線來耦合具有各種形狀的共振子。一個機械濾波器至少需要兩個換能器，作為信號的輸入和輸出轉換之用，因壓電材料可直接作電能與機械能的轉換，所以常採用為換能器。共振子是機械濾波器的的主體，一般的形狀有音叉形、圓柱形、圓盤形或是其他形狀，共振子的數目則不一。共振子的材料必須具有較高的 Q 值，以及較低的共振頻率溫度係數。而共振子是連續體，所以有無限多個模態，通常利用共振子幾個特定的低頻模態，如軸向模態、扭轉模態和彎曲模態，而忽略其他模態。耦合元件在機械濾波器是供連接換能器和共振子以及共振子間的連接之用，通常使用比共振子尺寸小很多的圓形截面金屬線，但也有非濾波器主要元件的示意圖。機械濾波器大部份都是以圓形截面的金屬線來耦合具有各種形狀的共振子。一個機械濾波器至少需要兩個

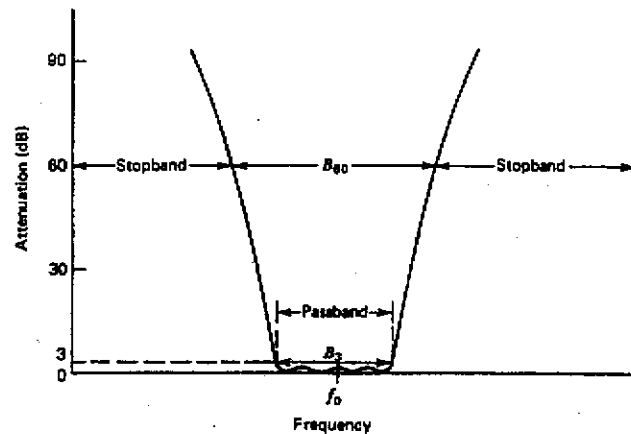


圖一 機械濾波器的主要元件圖

換能器，作為信號的輸入和輸出轉換之用，因壓電材料可直接作電能與機械能的轉換，所以常採用為換能器。共振子是機械濾波器的的主體，一般的形狀有音叉形、圓柱形、圓盤形或是其他形狀，共振子的數目則不一。共振子的材料必須具有較高的 Q 值，以及較低的共振頻率溫度係數。而共振子是連續體，所以有無限多個模態，通常利用共振子幾個特定的低頻模態，如軸向模態、扭等截面的金屬線，以焊接方式焊在共振子和換能器上，焊接點的位置，則依共振子的振動模態而定，一般都是共振子不被利用之模態的節點。耦合金屬線的勁度決定了濾波器的頻寬，因此耦合金屬線的材料選擇是很重要的，此外金屬線是以焊接方式連接換能器和共振子的，因此焊接後的材料特性以不改變為最理想。圖二是一個使用於 HF 無線電之 SSB 圓盤共振子機械濾波器。



圖二 使用於 HF 無線電之 SSB 圓盤共振子機械濾波器

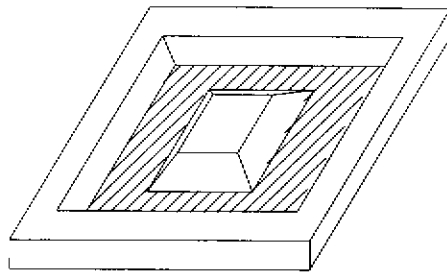


圖三 帶通濾波器信號衰減圖

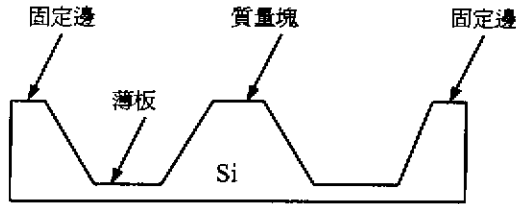
圖三是一帶通濾波器的信號衰減圖。在兩個 3dB 頻率間的區域稱為濾波器的通過帶，頻寬以 B_3 表示，通常也當作機械濾波器的頻寬 B ，在兩個 60dB 頻率之外的區域稱為濾波器的截止帶，在 60dB 頻率之內的頻寬以 B_{60} 表示，在頻寬 B_3 中點的頻率定義為濾波器的中心頻率 f_0 ， B_3 和 B_{60} 的比值稱為濾波器的形狀因子， B_3 和 f_0 的比值稱為濾波器的分數頻寬。

機械濾波器常見的用途有：1. 無線電設備中選擇電波頻帶；2. 電話設備中做聲音頻道濾波、電話發送信號濾波和電話 Pilot-tone 濾波三種用途；3. 航行無線電設備中如 Omega 航行接收器、Loran-C 遠航儀和雙曲線無線電導航等航行設備。4. 控制系統上濾除雜訊的應用。

為了縮小機械濾波器的尺寸，並且最好能與電路整合在單一元件，唯一的方法就是將其製造成為微機電產品。Clark T.-C. Nguyen[2]曾在 1996 年及 1997 年分別發表兩個共振子和三個共振子的微機械濾波器，皆是利用矽晶圓半導體製程之表面微加工技術所製造。這種微機械濾波器使用的基本原理與機械濾波器相同，且其結構依然分成換能器、共振子和耦合線等三大部份，但其組成材料和形狀卻截然不同。本計畫利用塊體微加工程序製作微機械濾波器。此濾波器具有換能元素、耦合元素和機械共振元素三個主要部份，此三部份一體成型。

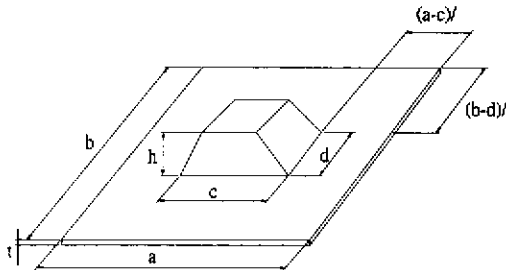


(a)



(b)

圖 2-2 單一質量塊之微機械濾波器示意圖
(a)立體圖(b)側視圖

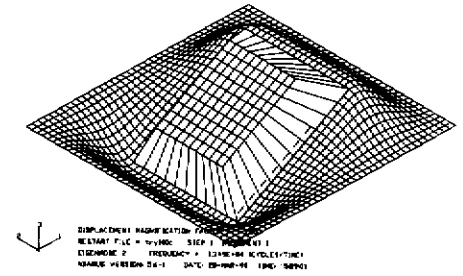


圖五 單一質量塊微機械濾波器之結構尺寸

3. 研究方法

為了具有簡單的結構，所以機械濾波器的基本架構為以塊體微加工蝕刻出質量塊作為共振元素，以薄板作為耦合元素連接質量塊，以壓電陶瓷材料 PZT 薄膜作為換能元素。質量塊的個數、大小和位置以及薄膜的尺寸和壓電材料之電極的位置和形狀等參數決定了系統的特性。由於薄板和質量塊所組成的結構沒有固有頻率和振形的解析解，因此必須使用有限元素法求出近似解，作為設計的依據。整個研發過程可分成以下幾個步驟：

1. 微機械濾波器的設計：利用有限元素法分析、設計質量塊的個數、尺寸、安排位置，以及薄板形狀和厚度。
2. PZT 薄膜電極之設計：以有限元素法所求



圖六 濾波器第二模態之振形

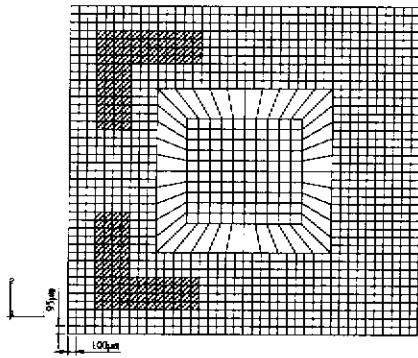
出的模態配合系統頻率響應的特性決定輸入和輸出電極的形狀位置。

3. 微加工程序之設計：微機械濾波器的各個參數都決定之後，必須設計製程與光罩。
4. 實驗與製作：首先找出重要的製程參數，然後進行微機械濾波器的製作。
5. 測試與改進：成品經過測試後，針對各個缺失提出改進的方法，以期達到更完善的境界。

單一質量塊微機械濾波器之結構尺寸示如圖五，經由分析得知薄板的厚度在 $t=15\mu\text{m}$ 時比 $t=10\mu\text{m}$ 有較佳的頻率響應特性，因此選擇尺寸 $a=4000\mu\text{m}$ 、 $b=3800\mu\text{m}$ 、 $c=2000\mu\text{m}$ 、 $d=1900\mu\text{m}$ 、 $h=500\mu\text{m}$ 、 $t=15\mu\text{m}$ 作為微機械濾波器，其第二模態示如圖六。由分析結果可以發現，電極的位置在第二模態和第三模態的電位移分佈是反相，因此在二、三模態的固有頻率附近，其頻率響應圖形可滿足帶通濾波器的頻率響應需求。

此濾波器的製作程序如下：

1. 氧化層的生長：在晶圓的正反面熱生成二氧化矽約 500\AA 。
2. 氮化層的積覆：以 LPCVD 在晶圓的正反面氧化層上沉積一層氮化矽。
3. 蝕去晶圓正面氮化層：利用 RIE 蝕去晶圓正面的氮化矽層。
4. 鈦金屬層的積覆：在晶圓的正面氧化層上沉積一層鈦金屬層，阻隔矽原子擴散到鉑金屬層。
5. 鉑金屬層的積覆：在晶圓的正面鈦金屬層上沉積一層鉑金屬層，做為接地之電極。
6. 電化學停止蝕刻電極圖樣轉移：在鉑金屬層上上光阻，利用第一個光罩曝光，以王水蝕去鉑金屬與鈦金屬。作 p-n 界面



圖七 電極之形狀與位置

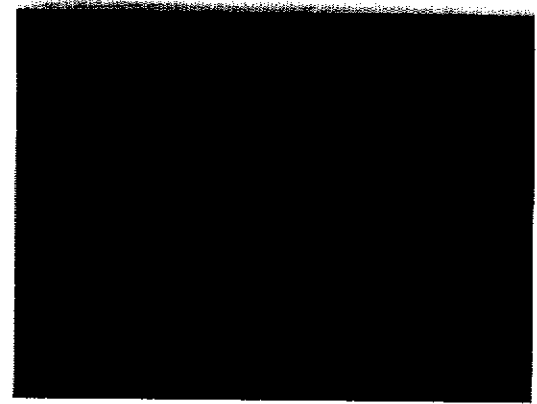
電化學停止蝕刻時接 n-type 矽的電極圖樣轉移。

7. 壓電薄膜 PZT 的積覆：在晶圓正面利用 Sol-gel 方式塗佈一層約 0.2 微米的壓電薄膜。
8. 鉑金屬層與 n-type 矽的開孔圖樣轉移：在 PZT 層上上光阻，利用第二個光罩曝光，顯影，以光阻當遮罩，BOE 當蝕刻液，蝕去 PZT 與二氧化矽，做為鉑金屬層與 n-type 矽層上的開孔圖樣轉移。
9. 鋁金屬層的積覆：在晶圓正面蒸鍍一層 1200Å 的鋁金屬層。
10. 輸入和檢出電極的圖樣轉移：在鋁金屬層上上光阻，利用第三個光罩曝光，顯影，以光阻當遮罩，磷酸當蝕刻液，蝕出輸入檢出電圖樣轉移；以及將晶圓正面的 n-type 矽連接至外層導電，做為 p-n 接面電化學停止蝕刻的電極。
11. 質量塊的圖樣轉移：在晶圓背面的氮化矽層上上光阻，利用第四個光罩曝光，顯影，以光阻當遮罩，利用 RIE 乾蝕刻，蝕去氮化矽和二氧化矽，做為質量塊的轉移。
12. 電化學停止蝕刻：利用 p-n 接面電化學停止蝕刻，從晶圓的背面蝕刻出質量塊。

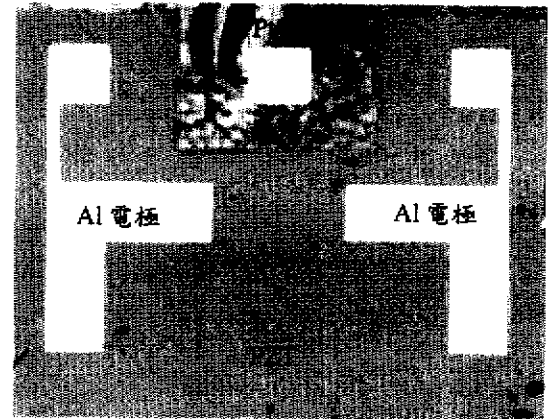
製作完成的濾波器示如圖八與圖九。

4. 結論

本計畫詳細地從事微機械濾波器之設計與製作。分析結果證實單一質量塊之微機械濾波器可滿足所要求的工作頻率。由本計畫所設計出的微加工程序經實際製作證明可行。利用 Sol-gel 方式成功在四吋的矽晶圓上



圖八 濾波器薄板與質量塊



圖九 輸入、輸出以及接地電極

製作出厚度為 0.6μm 的 PZT 薄膜。使用 800μm 方形的角落補償量已經可以蝕刻出形狀相當完美的質量塊，所以此補償量在蝕刻深度約為 500μm 時已極為適用。因鋁導線斷路所以一直沒能量測到所需的信號，是本計畫的一大憾事。為了進一步能夠量測到信號，必須小心進行鋁導線的蝕刻。

本計畫所研發之微機械濾波器除了具備體積小、成本低且可與電路整合等微機電產品的各種優點外，預期對溫度變化不敏感、且具有高可靠度和高穩定性等機械濾波器的優點。因其結構簡單不需要複雜的製程，所以應具有發展的潛力。

參考文獻

1. R.A. Johnson , *Mechanical Filters in Electronics* , John Wiley & Sons, New York , 1983.
2. Kun Wang and Clark T.-C. Nguyen , "High-Order Micromechanical Electronic Filters" , *Proceeding of the 10th Workshop on MEMS* , pp. 25~30 , Nagoya , 1997.