

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

無線生醫感測網路晶片系統--子計畫五：積體電路相容微波開關與薄膜體聲波濾波器之研究(2/3)
期中進度報告(精簡版)

計畫類別：整合型
計畫編號：NSC 95-2221-E-002-243-
執行期間：95年08月01日至96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：張培仁

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：期中報告不提供公開查詢

中華民國 96年06月07日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

無線生醫感測網路晶片系統一

子計畫五：積體電路相容微機電開關與薄膜體聲波濾波器之
研究(2/3)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 95-2221-E-002-243

執行期間：95 年 08 月 01 日至 96 年 07 月 31 日

計畫主持人：張培仁 教授

共同主持人：

計畫參與人員：陳奕傑、方啟銘、呂奕璋

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

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

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學 應用力學研究所

中 華 民 國 9 6 年 5 月 3 1 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫年度期中報告

無線生醫感測網路晶片系統一

子計畫五：積體電路相容微機電開關與薄膜體聲波濾波器之研究(2/3)

計畫編號：NSC 95-2221-E-002-243

執行期限：95年08月01日至96年07月31日

主持人：張培仁 教授 國立台灣大學應用力學研究所

Email: changpz@mems.iam.ntu.edu.tw

研究人員：陳奕傑、方啟銘、呂奕璋

一、中文摘要

本研究為利用微機電(MEMS)技術，研製與積體電路製程相容之微機電開關(MEMS switch)與薄膜體聲波濾波器(FBA Filter)。主要目的乃期望將靜電式微機電開關與薄膜體聲波濾波器同時整合至單一晶片，以期為系統單晶化(system on a chip, SOC)提供一個切實可行的先期研究方案。微機電開關具低插入損失(insertion loss)、高隔離度(isolation)及低耗能(power consumption)之特性，亦十分切合現今在無線傳輸上之需求，如 T/R(transmit and receive)開關。今年的研究重點放在設計一與 CMOS 製程整合的前題之下達成一低驅動電壓，小面積且製程簡單之微機電開關。薄膜體聲波元件具有聲波元件之優點，其體積小、承受功率高、高 Q 值、低插入損失、頻率選擇性佳等，此外可往高頻發展並與 CMOS 標準製程相容等，為實現射頻單晶片關鍵技術，薄膜體聲波濾波器是由數個薄膜體聲波共振器適當排列組合而成，今年此部份研究重心主要為 2.4GHz 頻段之薄膜體聲波濾波器元件設計與製作。

關鍵詞：微機電開關、薄膜體聲波濾波器、系統單晶化、CMOS 相容、微機電技術

Abstract

This primary goal of this project is to study the design and fabrication of IC-compatible RF MEMS switch and FBAW filter (thin film bulk acoustic wave filter) by MEMS technology. The novel design of low actuation voltage MEMS switch which is manufacturing by CMOS D352P4M is reported. The detailed design, simulation process flow are also reported in this work. FBAR (thin film bulk acoustic wave resonator) device has the advantages of small size, high Q-factor, low insertion loss, and better frequency-sensitivity. Besides, it could work in high frequency and is compatible with CMOS process. 2.4GHz band FBAW filter (film bulk acoustic wave filter) is composed of several serial and parallel FBARs. This year, the major progress is in the design and fabrication of 2.4GHz band-pass FBAW filter.

Keyword: MEMS switch, FBAR, FBAW Filter, SOC, CMOS-compatible, MEMS technology

二、計畫緣由及目的

隨著無線傳輸技術的日益增進，射頻系統單晶片之技術發展是不可抵擋之潮流，將所有通訊元件整合到單一晶片上，除了可以減低不同元件之間的整合問題，也可以達到晶片微型化，相同大小晶片具備更多樣功能以及節省製程成本、增加效能等諸多優點。傳統上電子式射頻元件(RF component)在現今頻率選擇(frequency-selective)上，一些高品質因子濾波元件必須以 off-chip 的方式連結來實現，失去前述種種優勢。從文獻回顧與整理，不難發現運用微機電技術特有之微型化及與半導體製程相容等特性來取代現有的電子式主被動元件，以期達到系統單晶化的目的[1,2]，已成為現今射頻前端系統(RF front-end)的發展主流。

其中在微機電開關方面，自 1971 年微機電懸臂梁式靜電驅動開關問世，多年來許多特殊的製程都曾被使用來製作各式各樣的開關以求達到低驅動電壓的系統要求。然而特殊或複雜製程的使用卻使微機電開關無法與高頻電路整合，而使系統單晶片(SOC; system on a chip)的構想難以實現。本計畫之目的，即寄望以較簡易之製程，在能以 CMOS 製程完成的前提之下，設計並製作出一低電壓驅動之射頻微機電開關元件。而一般懸臂梁或兩端固定梁(fix-fix beam)微機電開關的設計方法總是設法降低其結構之彈簧常數(K 值)，使梁結構變形能在較低電壓下先行達到三分之一初始間隔(initial gap)，使梁結構進入不穩定區，而達到靜電吸附的效果。本研究試圖以特殊的設計，使懸臂梁或是兩端固定梁的穩定裕度(stable margin)縮小，使梁結構提早進入不穩定區，而達到降低驅動電壓而又不佔太大面積且製程簡單的優點。

在高頻濾波器方面，目前無線通訊產品多以表面聲波元件(SAW device)作為射頻前

端(RF front end)濾波器，隨著應用頻率的提高，將面臨黃光製程解析度的瓶頸，無法達到小線寬的要求[3]，使得其應用受到侷限；而陶瓷元件其體積大，且製程難與 CMOS 製程整合，亦無法達到系統單晶片的目標。以薄膜體聲波共振器設計之作為射頻前端濾波器或是與主動電路搭配作為高頻振盪器之用，此時製程上的限制不再是線寬，而是薄膜的厚度，因此可以藉由控制薄膜的厚度，達到更高頻率的應用。以 FBAR 設計的雙工器(duplexer)，體積上僅為陶瓷多工器的 20%[4]左右，其製程具備與 CMOS 製程整合之潛力，在講求低成本、高效能、高頻應用與高整合性等需求下，薄膜體聲波元件比起其他元件更具發展潛力，而在系統單晶片技術發展上，其為不可或缺之關鍵技術。

三、研究方法

3.1 微機電開關

本計畫試圖設計一低電壓致動的射頻微機電微波開關。首先考量一般的梁結構在承受靜電力驅動時，為滿足靜力平衡條件，當結構變形量為 x 時之力平衡方程式可表示如下：

若 V 小於吸附電壓：

$$F_e = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2(g_0 - x)^2}$$

$$F_{beam} = kx$$

所以梁所受總力為：

$$F_{net} = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2(g_0 - x)^2} - kx = \frac{\epsilon_0 AV^2 - 2(g_0 - x)^2 kx}{2(g_0 - x)^2}$$

若存在一 δ ，使得當 V 小於等於吸附電壓時， δ 為梁結構之平衡位置，因此可得

$$@ x = \delta, F_{net}(\delta) = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2(g_0 - \delta)^2} - k\delta = 0$$

$$\Rightarrow \epsilon_0 AV^2 (g_0 - \delta)^{-2} - 2k\delta = 0 \quad (1)$$

圖 1 所示為梁所受靜電力、恢復力及總

力對位移 x 之變化關係示意圖。

由圖1可知，當 V 等於吸附電壓時，可得以下關係：

$$\left. \frac{dF}{dx} \right|_{x=\delta} = 0 \Rightarrow \frac{dF}{dx} = \varepsilon_0 AV^2 (g_0 - x)^{-3} - k$$

$$\left. \frac{dF}{dx} \right|_{x=\delta} = \varepsilon_0 AV^2 (g_0 - \delta)^{-3} - k \quad (2)$$

因此可得

$$V_{pull-in} = \sqrt{\frac{8kg_0^3}{27\varepsilon_0 A}}$$

以上分析可得傳統梁受靜電吸附時之吸附電壓及穩定裕度值。

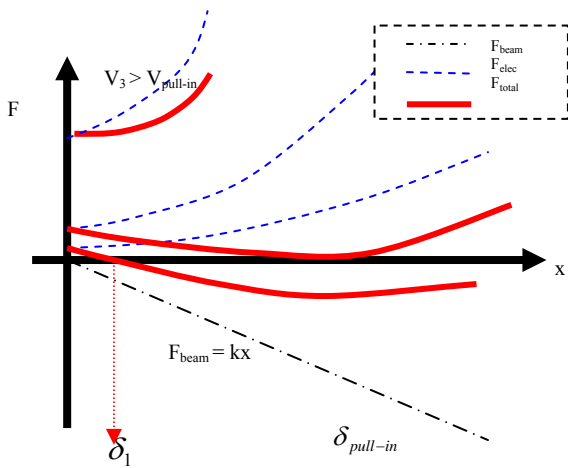


圖 1 梁所受靜電力、恢復力及總力對位移 x 之變化關係示意圖

為嘗試降低吸附電壓，現試考慮一受靜電吸附且尖端受一額外負重之懸臂梁，如圖 2 所示。嘗試分析此例中懸臂梁受力情形，可發現向下之合力有靜電力與此額外負重，如下所示。

$$F = F_e + F_{tip} = \frac{\varepsilon_0 AV^2}{2(g_0 - x)^2} + F_{tip}$$

其中 x 為變形量。

而恢復力仍為 $F_{beam} = kx$

由於向下的總力多了一項額外負重，無論其為常數或是隨著 x 變化，都必然能夠降低吸附電壓，本實驗即以此想法為基礎進行設計。其設計基本架構如圖 3 所示。除懸臂梁

主結構外尚有一個中心的平板可以累積靜電力，平板上的靜電力則透過兩邊的小扭轉梁平移至懸臂梁尖端。

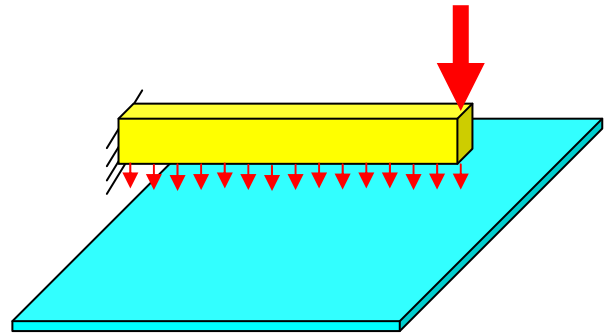


圖 2 受靜電力且尖端受一額外負重之懸臂梁示意圖

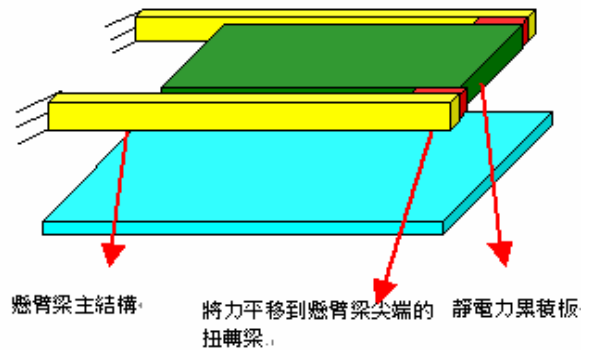


圖 3 懸臂梁設計基本架構圖

本實驗主要從文獻中先嘗試瞭解各種微機電微波開端的研究成果，及其先天限制，再進行新的構想，再進入設計、模擬及 Layout 等工作。在下線拿回晶片後將進行後製程釋放結構，然後進行量測。流程圖如圖 4 所示。

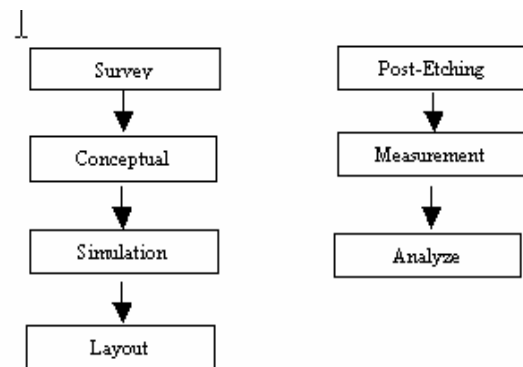


圖 4 設計流程圖

3.2 薄膜體聲波元件

為了達到最後無線生醫感測晶片系統單晶片化，應用於晶片系統前端射頻部分中之

薄膜體聲波濾波器之工作特性需符合系統工作要求，且於系統所設計前端射頻部分之工作頻率為2.4GHz頻段，因此在薄膜體聲波濾波器設計中，參考藍芽(Bluetooth)及802.11x通訊協定，元件設計頻段在2.41GHz ~ 2.48GHz，頻寬約70MHz左右，且隔離度達到40dB之要求，插入損失小於3dB，頻帶(pass-band)外的隔離度要達到需求等，設計出符合前述規範之薄膜體聲波濾波器。

延續去年成果，今年研究重心將對所設計的薄膜體聲波元件進行製作，以完成符合薄膜體聲波濾波器之初步研製，並加以量測其訊號表現是否符合設計要求。

3.2.1 薄膜體聲波共振器模型

薄膜體聲波濾波器是由數個薄膜體聲波共振器所構成，我們從共振器的模型出發設計。薄膜體聲波共振器的結構是由下電極、壓電層和上電極所構成的三明治結構，如圖5所示。

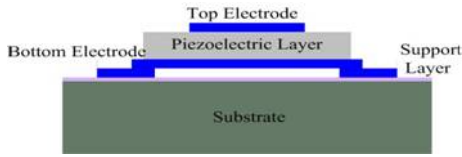


圖5 薄膜體聲波共振器結構

為了解多層膜共振器的波傳特性，利用梅森等效電路模型去建立薄膜體聲波共振器模型，如圖6，藉由網路分析之方法，可將薄膜體聲波共振器特性模擬出來。

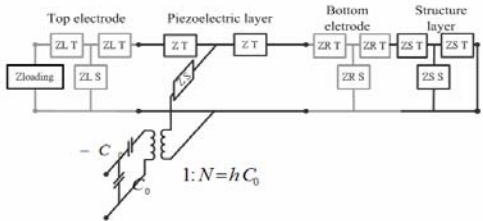


圖6 薄膜體聲波共振器梅森等效電路模型

3.2.2 薄膜體聲波濾波器之設計

薄膜體聲波濾波器係由數個串聯與並聯的FBAR組合而成，傳統上微波濾波器的設計方法有兩種，一種為鏡像參數法，一種為介入損耗函數法。此設計中使用介入損耗法中的Butterworth function來設計濾波器的結構。在FBAR的阻抗特性裡，有無限多個極點與零點，若我們忽略上下電極厚度的影

響，FBAR的阻抗方程式可表示成

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \left(1 - k_t^2 \frac{\tan \frac{d\omega}{2V}}{\frac{d\omega}{2V}} \right) \quad (3)$$

$$k_t^2 = \frac{h_{23}^2 \epsilon_{zz}^S}{C_{33}^D} \quad V = \sqrt{\frac{C_{33}^D}{\rho}} \quad C = \frac{A \epsilon_{zz}^S}{d} \quad (4)$$

其中， k_t 為機電耦合係數， h_{23}^2 為壓電耦合常數， C_{33}^D 為固定電位移下的彈性常數， ϵ_{zz}^S 為固定應變下之介電常數， ρ 為密度， d 為電極平板間的距離。

在設計串聯共振FBAR之共振頻時，其阻抗極小則，

$$Z(\omega_0) = Z_s(\omega_0) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d}{d\omega} Z(\omega_0) = \frac{d}{d\omega} Z_s(\omega_0) = j2L = j \frac{2}{\omega_0^2 C}$$

將(5)代入(3)，即可決定串聯共振FBAR的厚度與面積，推導後可由下列公式求出。

$$d = 2x \frac{V}{\omega_0} \quad (6)$$

$$A = \frac{x^2}{k_t^2 + k_t^2 - 1} \omega_0 \epsilon_{zz}^S x V C \quad x \cot x = k_t^2$$

同理，若要求出並聯共振FBAR之共振頻時，其電納極小則

$$Y(\omega_0) = Y_p(\omega_0) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{d}{d\omega} Y(\omega_0) = \frac{d}{d\omega} Y_p(\omega_0) = j2C = \frac{j2}{\omega_0^2 L}$$

將(7)代入(3)，即可決定並聯共振FBAR的厚度與面積，推導後可由下列公式求出。

$$d = \pi \frac{V}{\omega_0} \quad (8)$$

$$A = \frac{8k_t^2}{\pi} \frac{VC}{\omega_0 \epsilon_{zz}^S}$$

利用(6)與(8)式可設計出元件的面積與厚度。

3.2.3 元件材料選定與結構設計

經由上述設計方法，其中下電極材料使用鈦(Ti)與鉑(Pt)，鈦為黏著層，鉑為下電極當作傳輸訊號導線，壓電層材料使用氮化鋁(AlN)，上電極材料使用鉻(Cr)和金(Au)，鉻為黏著層，鉑為上電極作為傳輸訊號導線，吾人初步設計出符合設計需求的設計採三階(third-order)濾波器如圖7所示及五階(fifth-order)濾波器的設計，三階是由兩個相同串聯(series)與一個並聯(parallel)共振器所組合而成之濾波器；而五階是由三個串聯與

兩個並聯組合而成的，所設計之各個組成共振器單元之各層厚度與尺寸大小如下：

串聯共振器部分之各層厚度，下電極中鈦(Ti)厚度為10nm與鉑(Pt)厚度為100nm，成長層氮化矽(Si₃N₄)厚度100nm，壓電層氮化鋁厚度為900nm，上電極鉻(Cr)厚度為10nm與金(Au)厚度為80nm，元件面積大小分別為68 μ m \times 68 μ m、103 μ m \times 103 μ m、123 μ m \times 123 μ m三種尺寸，所設計之共振頻率為2.437GHz，反共振頻率為2.487GHz。

並聯共振器部分之各層厚度，下電極中鈦(Ti)厚度為10nm與鉑(Pt)厚度為100nm，成長層氮化矽(Si₃N₄)厚度100nm，壓電層氮化鋁厚度為900nm，上電極鉻(Cr)厚度為10nm與金(Au)厚度為89.4nm，元件面積大小分別為為218 μ m \times 218 μ m、229 μ m \times 229 μ m，所設計之共振頻率為2.388GHz，反共振頻率為2.437GHz。

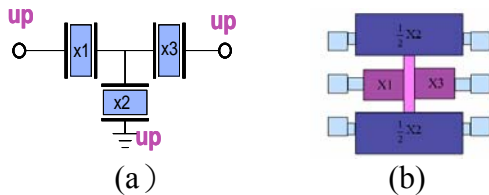


圖 7 (a)Butterworth type 示意圖、(b)2x1 階梯濾波器佈局示意圖。

四、 結論與成果

4.1 微機電開關

本實驗主要使用 ANSYS 多重物理量耦合模擬軟體進行微機電微波開關之特性模擬。本結構利用特殊的折疊設計，使結構能夠達到小面積、低驅動電壓、小穩定裕度的特色。基本設計如圖 8 所示。

圖中左側畫斜線部份為 anchor 固定端，右端主要包含含三部份，兩側為懸臂梁主結構，中間平板為靜電力累積板，兩者以小扭轉梁相接。其致動動作如圖 9 所示。由圖中可發現，當開始施予偏壓時，兩側的懸臂梁會被中間的大平板拉動，而提前進入不穩定區，達到降低吸附電壓的效果。位移對施加

電壓的關係如圖 10 所示。

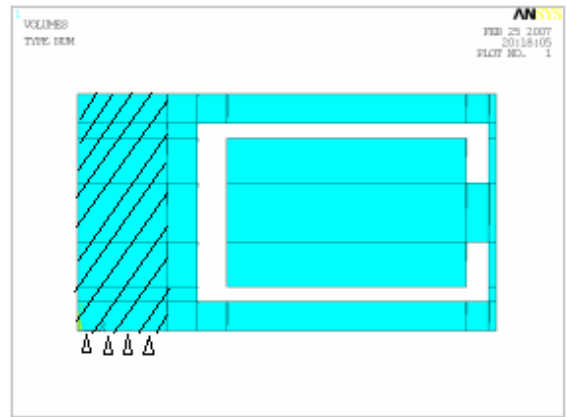


圖 8 懸臂梁基本設計圖

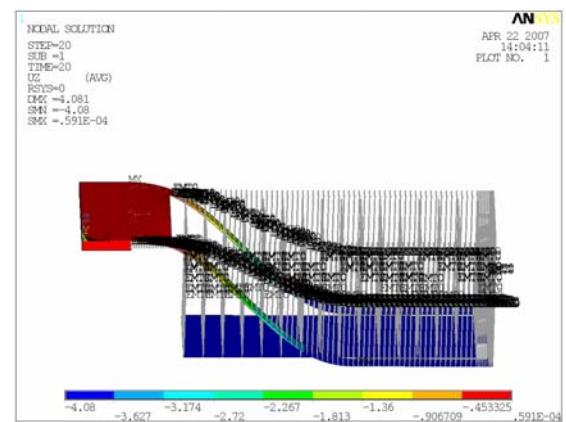


圖 9 懸臂梁微機電微波開關致動動作圖

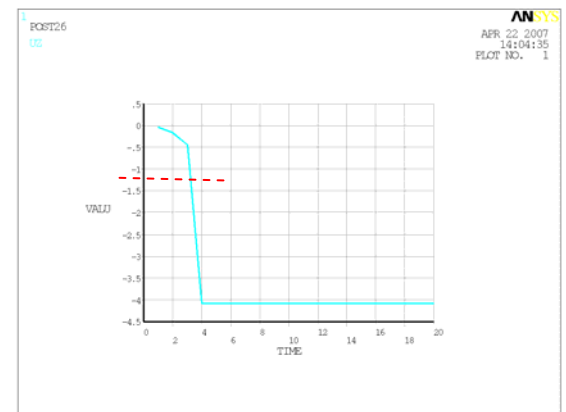


圖 10 位移對施加偏壓關係圖

圖 10 中所標示之紅虛線即為三分之一初始間距的位置，由圖中可看出此開關的尖端在變形量尚未達到該位置，即先行超過穩定裕度進入不穩定區。

以同樣原理，嘗試設計一兩端固定梁，其變形如圖八所示，其中心位置被小扭轉梁強拉下去，而達到”ON”的狀態。其位移對施

加偏壓關係如圖 11 所示。

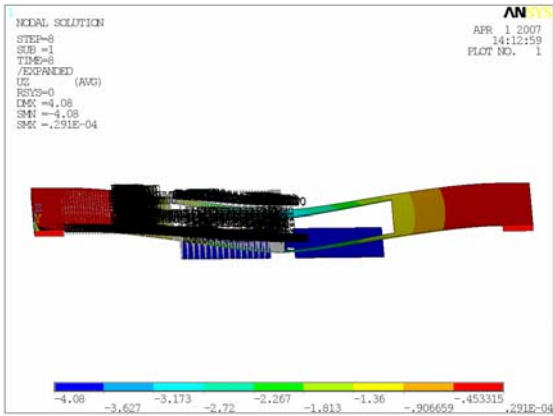


圖 11 兩端固定梁變形圖

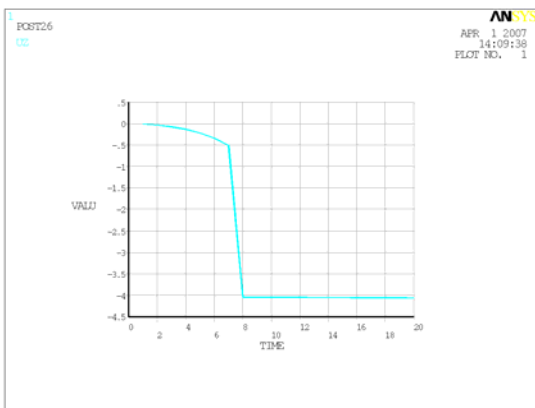


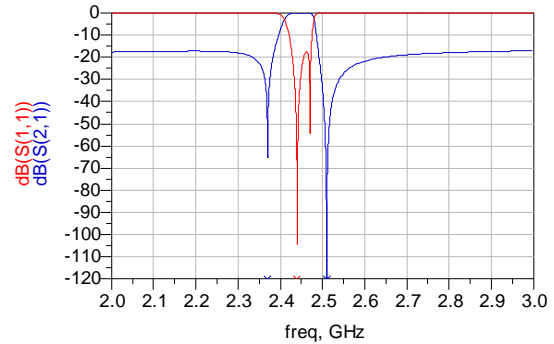
圖 12 兩端固定梁之位移對施加偏壓關係圖

目前本微波開關已完成初始設計、細部尺寸設計、暫態分析。並將嘗試使用 CMOS D352P4M 製程予以完成。未來將使用 HFSS 3 維全波微擬軟體進行微波特性分析。並嘗試進行尺寸設計對驅動電壓之理論分析。另外，本開關由於預期將利用 CMOS 製程予以完成。因此在進行量測之前，必須先進行後製程，即一道溼蝕刻以釋放結構，此後製程之成功與否將直接影響測試結果。此步驟要關注的首要重點在於盡量保持結構的平整，以期達到設計的目標。因此本實驗在釋放結構時將配合使用臨界點乾燥，及其儘量減少乾燥過程中，表面張力、乾燥過程所產生之蒸氣對結構產生衝擊。另外在溼蝕刻的時間控制上先需特別在意，因為需要保留部份二氧化矽層以做為絕緣層之用。

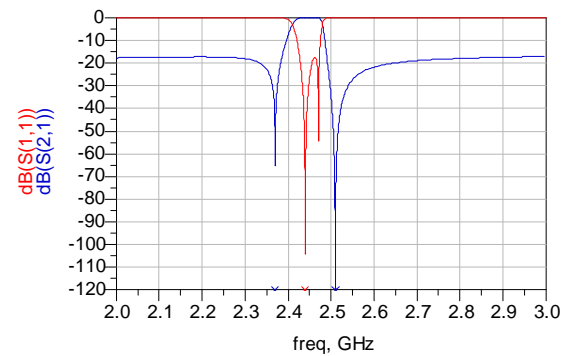
4.2 薄膜體聲波元件

4.2.1 設計模擬結果

使用數值軟體建構模型並代入前述設計參數，可得設計模擬訊號表現，三階濾波器模擬結果如圖 13 (a)、五階濾波器模擬結果如圖 13 (b)。



(a)



(b)

圖 13 訊號模擬 S 參數頻率響應圖

4.2.2 製作流程與分析考量

本次所使用製程設計為面加工製程，結構光罩佈局如圖 14 所示，其製程製作流程之設計如圖 15 所示，其中各步驟所使用方法與考量，其配合濾波器元件各層結構佈局圖說明如下所示：

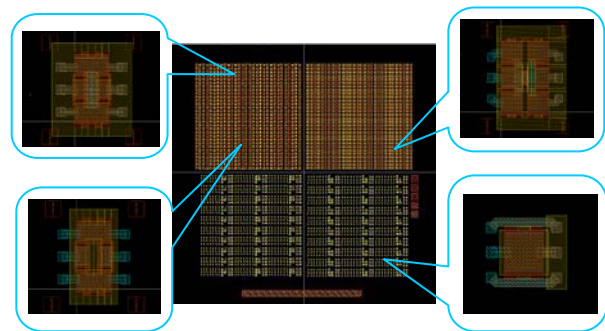


圖 14 光罩佈局設計圖

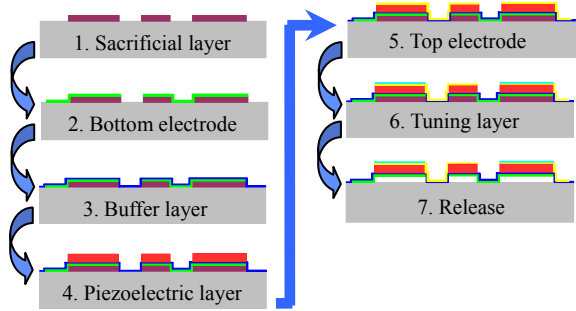


圖 15 製程架構圖

(1). 定義犧牲層：

犧牲層的功能是做為結構的懸浮，最後需將其拿掉，所以在材料的選擇上有幾點必須考慮，例如表面的平整度、蝕刻液的蝕刻選擇比都是重要的考量的因素，犧牲層在最後製程步驟中必須被蝕刻犧牲，其蝕刻液的選用必須不傷及元件之其他材料，在此選用 Al 做犧牲層，厚度 5000A。犧牲層的圖形必須比作動區面積來的大，如圖 16，在定義下電極時可使用濕蝕刻法或 lift-off 都可以，以本設計圖形大小而言，使用濕蝕刻法容易造成過蝕的現象，在此使用 lift-off 製程，以保持圖形的完整性。其犧牲層製程完成拍攝圖如圖 17 所示。

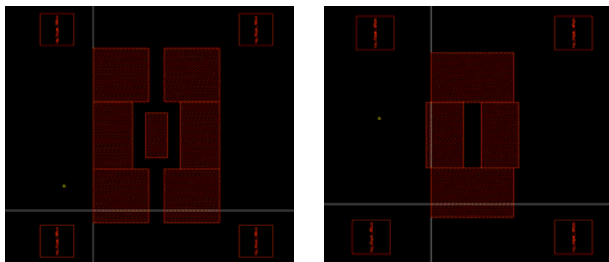


圖 16 犧牲層光罩佈局圖

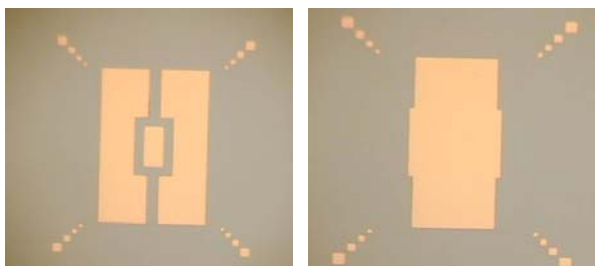


圖 17 犧牲層製程拍攝圖

(2). 定義下電極：

本實驗下電極選用的材料 Ti/Pt，其厚度

各為 100/1000A，其中 Ti 為黏著層，其光罩圖案設計如圖 18。製程方法使用 lift-off 製程，不選用濕蝕刻的原因是 Pt 的蝕刻液為王水，王水為酸性極強的酸，除了 Pt 之外，元件上其他材料如 Au、Al、Cr 等材料都會被其攻擊，故無法使用濕蝕刻法定義下電極。lift-off 製程必須注意長膜的溫度不能太高，否則光阻會被烤乾，一但光阻被烤乾了之後，則很難清除的乾淨，圖形也會跑掉，光阻可忍受的溫度為 120°C，超過此溫度，光阻將很難清除。其下電極製程完成拍攝圖如圖 19 所示。

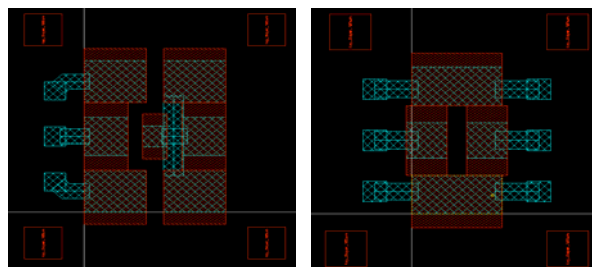


圖 18 下電極光罩佈局圖

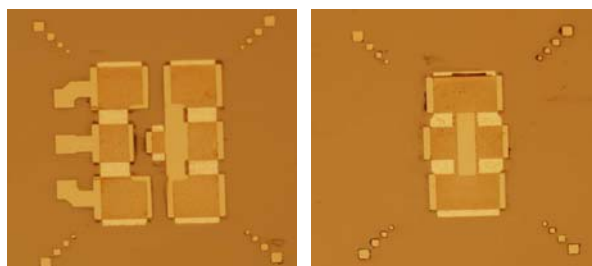


圖 19 下電極製程拍攝圖

(3). 沉積 Buffer layer：

在此沉積一層 Buffer layer(Si₃N₄)，厚度約 1000A，沉積方式為整片 wafer 的沉積，在此製程步驟並不定義其圖形。此層的功能為幫助 AlN 的成長，使 AlN 能沉積出良好的 C 軸取向，且有支撐層的效果，使元件更加堅固。

(4). 沉積壓電層：

在沉積完 Buffer layer 後接著沉積壓電材料，壓電材料選用 AlN，厚度大約 9000A，在此步驟並不急著定義壓電層圖形，AlN 會被鹼性液體攻擊，顯影液就是一種鹼性液

體，若在此步驟定義壓電層圖形，壓電層將會遭受攻擊以至於損失其壓電特性，故將定義壓電層的步驟與定義蝕刻孔製作於同一道光罩。

(5).定義上電極：

上電極的材料選用 Cr/Au，厚度為 100/800A，其中 Cr 為黏著層，設計圖案如圖 20，Au 與 AlN、Al 的蝕刻選擇比良好，在製程上較容易成功。由於 AlN 會被顯影液給破壞，若使用 lift-off 製程則在黃光的步驟時，AlN 將會接觸到顯影液，為了避免 AlN 遭受破壞，在定義上電極使用濕蝕刻法，Au 的蝕刻液為 KI+I₂，純的 Au 蝕刻液蝕刻速率非常的快，速率約為 1000A/sec，本元件的上電極厚度僅有 800A，若使用純的 Au 蝕刻液將無法避免側蝕的現象，故在此使用稀釋的 Au 蝕刻液，KI+I₂:H₂O=1:15，稀釋過後的蝕刻速率約為 15A/sec，可避免側蝕現象。最後再以 Cr-7 蝕刻 Cr，以露出壓電層 AlN。其下電極製程完成拍攝圖如圖 21 所示。

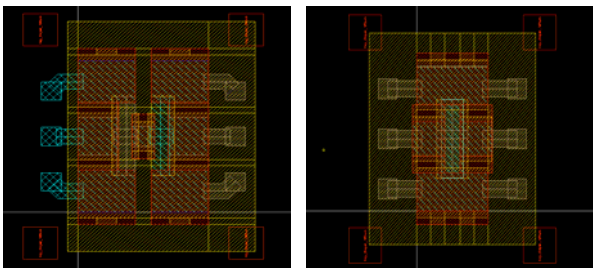


圖 20 上電極層光罩佈局圖

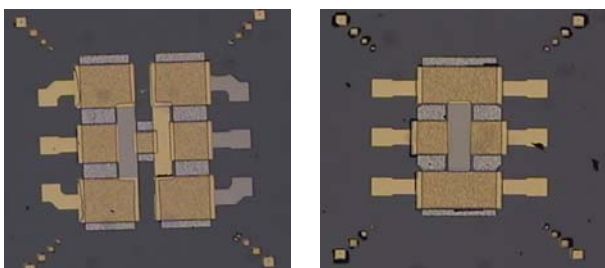


圖 21 上電極製程拍攝圖

(6).定義調頻層：

調頻層的目的是將串聯共振器的共振頻率與並聯共振器的共振頻率給區分開來，其中並聯共振器之共振頻率較串聯低，所以並

聯共振器的厚度較厚，必須在並聯共振器上多長一層調頻層，光罩設計如圖 22。調頻層的材料與上電極相同，厚度僅僅需要 100A，在製程上，濕蝕刻要精準的控制晶片上各處的速率相當困難，且調頻層的厚度相當薄，所以在此使用 lift-off 製程，製程步驟上使用 S1813 光阻旋佈，黃光露出欲增加厚度的區域，再利用 E-beam 鍍 Au，厚度 100A，最後移除光阻完成調頻層的製作。其下電極製程完成拍攝圖如圖 23 所示。

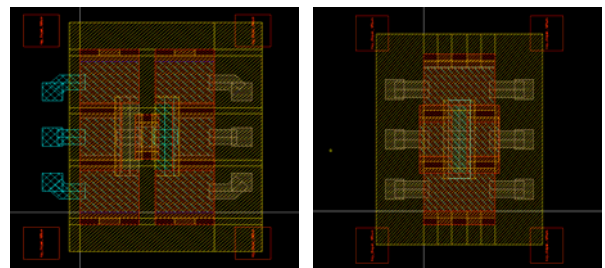


圖 22 調頻光罩佈局圖

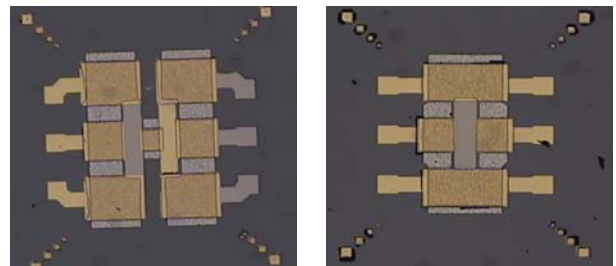


圖 23 調頻層製程拍攝圖

(7).定義蝕刻孔：

定義蝕刻孔的目的在於淘空犧牲層，蝕刻液將經由蝕刻孔流入，將犧牲層給蝕刻乾淨，以達到元件懸浮的目的。本製程設計是將定義 AlN 圖形與定義蝕刻孔為同一道光罩，如圖 24。製程步驟上使用 S1813 光阻旋佈，以濕蝕刻光罩黃光定義露出蝕刻孔的位置，在利用 AlN 的蝕刻液 H₃PO₄:H₂O=6:1 65°C 蝕刻壓電層，在此必須注意的是 C 軸取向的 AlN 正蝕速率遠小於側蝕速率，所以 undercut 的問題將無法避免，我們使用兩段式黃光的方法來解決側蝕的問題，在蝕刻過程中要隨時監控側蝕現象是否已經發生，當開始出現側蝕現象時，將光阻清除，並重新

黃光定義一次，如此一來，新一次定義的光阻將會保護元件的側壁，以避免側蝕的現象一再擴大。壓電層蝕刻完後露出下層的 Si₃N₄，再以 RIE 乾蝕刻法，將 Si₃N₄ 蝕刻露出最底下的犧牲層，以進行淘空。其製程完成如圖 25 所示。

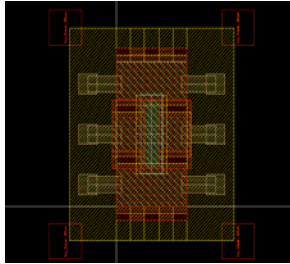


圖 24 壓電層圖形與蝕刻孔光罩佈局圖

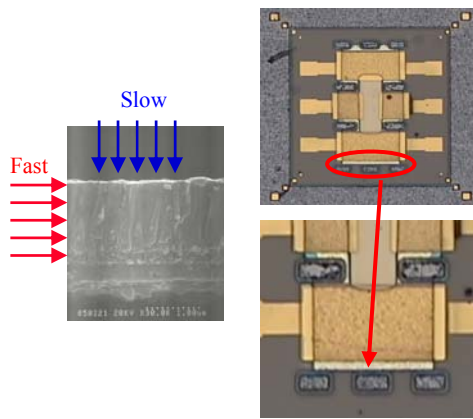


圖 25 壓電層與蝕刻孔製作完成圖

(8). 淘空犧牲層：

本製成的最後一道步驟，就是將犧牲層淘空使結構懸浮，完成如圖 26 所示。製程上使用犧牲層蝕刻液的選擇相當重要，由於犧牲層材料為 Al，而 Al 與 AlN 的特性有些類似，通常會吃 Al 的蝕刻液也都會吃 AlN，所以在蝕刻液的選擇上必須相當小心，在此選用 FeCl₃ 來充當 Al 的蝕刻液，嚴格來說，FeCl₃ 吃 Al 並不是一個好的選擇，但 FeCl₃ 的優點是它不會蝕刻 AlN，所以我們選擇 FeCl₃。蝕刻擋罩的部份使用與定義壓電層時的光罩相同，為了確保犧牲層完成淘空，吾人將試片放入 FeCl₃ 蝕刻液中靜置 12 小時，再以 DI water 將 FeCl₃ 置換乾淨，再放入丙

酮中置換 DI wafer，最後採用臨界點乾燥法，達到元件懸浮的效果。

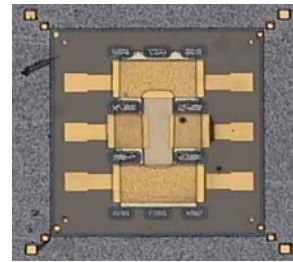


圖 26 淘空犧牲層製程完成圖形

五、 成果自評

5.1 微機電開關

目前根據計畫要求，本微波開關已完成初始設計、細部尺寸設計、暫態分析。目前以 metal4 做為上電極，metal1 做為下電極，由模擬結果，最低可將吸附電壓降低至約 8V。目前計畫嘗試使用 CMOS D352P4M 製程予以完成。光罩佈局已經完成。下線申請已在進行中。

5.2 薄膜體聲波元件

目前已根據計畫需求完成 2.4GHz 頻段薄膜體聲波濾波器之材料與結構尺寸參數設計，包含三階薄膜體聲波濾波器與五階薄膜體聲波濾波器，其模擬結果符合計畫要求，並完成薄膜體聲波濾波器結構之製程設計與佈局光罩，並利用微機電製程開始製作，目前將繼續製作薄膜體聲波濾波器之研製，今年期末將對研製之薄膜體聲波濾波器作初步探討與訊號量測分析。

六、 參考文獻

- [1] C. T. -C Nquyen, L. P. B. Katehi and G. M. REBEIZ, "Micromechanical Devices for Wireless Communication," Proceedings of the IEEE, Vol. 86, No. 8, pp. 1756-1768, August 1998.
- [2] M. Feng, S. C. Shen, D. C. Caruth, and J. J. Huang, "Device Technologies for RF

Front-End Circuits in Next-Generation Wireless Communications,” Proceeding of the IEEE, Vol. 92, No. 2, Feb. 2004

- [3] K. M. Lakin, “Thin Film Resonator Technology,” Proceeding of 2003 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, pp. 765-778, 2003.
- [4] J. Y. Park, H. C. Lee, K. H. Lee, H. M. Lee, Y. J. Ko, J. H. Shin, S. H. Moon, and J. U. Bu, “Micromachined FBAR RF Filters for Advanced Handset Application,” IEEE the 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, pp. 911-914, 2003.
- [5] R. L. Bonvick, P.A. Stupar and J. DeNatale, “A Hybrid Approach to Low-voltage MEMS Switches,” Proc. The 12th International Conference on Solid State Sensors Actuators and Microsystems, pp. 859-862, June 2003.
- [6] Y. Wang, Z. Liz, D.T. McCormick and N.C. Tien, “Low-voltage Lateral-contact Microrelays for RF International Micro Electro Mechanical Systems Conference, pp. 645-648, January 2002
- [7] S. Lucyszyn, “Review of radio frequency microelectromechanica systems technology,” IEE Proceedings Science, Measurement and Technology, vol. 151, pp. 93-103, March 2004. Applications,” Proc. The 15th IEEE
- [8] K.E. Petersen, “Micromechanical Membrane Switch on Silicon,” IBM J. Res. Develop., vol.23, No.4, pp. 376-385, July 1979.
- [9] L.E. Larson, R.H. Hackett, M.A. Melendes and R.F. Lohr, “Micromachined Microwave Actuator (MIMAC) Technology-A New Turning Approach for Microwave Integrated Circuits,” Proc. Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium Digest of Papers, pp. 27-30, June 1991.
- [10] J. J. Yao and M.F. Chang, “A Surface Micromachined Miniature Switch for Telecommunication Application with Signal Frequencies form DC up to 4 GHz”, Proc. The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators and Eurosensors IX, vol. 2, pp. 384-387, June 1995.
- [11] C. Goldsmith, J. Randall, S.Eshelman, T.H. Lin, D. Denniston, S. Chenm and B. Norvell, “Characteristics of Micromachined Switch at Microwave Frequencies,” IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, vol. 2, pp. 1141-1144, June 1996.
- [12] M.A. Grktilat, Y.J Yang, E.S. Hung, V. Rabinovic, G.K. Ananthasuresh, N.F. de Rooij and S. D. Senturia, “Nonlinear Electromechanical Behavior of an Electrostatic Microrelay,” Proc. The International Conference on Solid State Sensors and Actuators, vol. 2, pp. 1141-1144, June 1997.
- [13] C. Goldsmith, T.H. Lin, B. Powers, W.R. Wu and B. Norwell, “Micromechanical Membrane Switches for Microwave Applications,” Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, vol. 1, pp. 91-94, May 1995.
- [14] J J. Yao, “Topical Review RF MEMS from a Device Perspective,” J. Micromech. Microeng, pp. 9-38, October 2000.

出席國際學術會議心得報告

計畫編號	95-2221-E-002-243
計畫名稱	無線生醫感測網路晶片系統-子計畫五：積體電路相容微波開關與薄膜體聲波濾波器之研究(2/3)
出國人員姓名	張培仁
服務機關及職稱	臺灣大學應用力學研究所
會議時間地點	日本神戶
會議名稱	第二十屆微機電系統國際會議
發表論文題目	

參加「第二十屆微機電系統國際會議」一出國心得報告

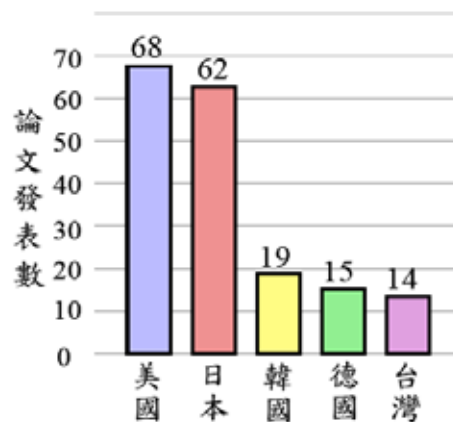
鄭茗元¹、賈婷婷¹、楊耀州¹、施博仁¹、施文彬¹、張培仁²

¹ 國立台灣大學機械工程學系

² 國立台灣大學應用力學研究所

一、前言

由電機與電子工程師學會(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)主辦的第二十屆微機電系統國際會議(20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, IEEE MEMS 2007)，於2007年1月21日至25日在日本神戶舉行。屬於微機電領域中最負盛名的會議，歷年來論文的錄取率均維持在30%左右；今年的會議共收到610篇摘要，經由24位技術委員審核後，共錄取221篇論文，錄取率為36.2%；其中43篇獲選為口頭報告，其餘178篇為海報。今年台灣學者在此研討會共發表14篇論文，較2006年的21篇下降許多，世界排名由2006年的第四名將為第五名，再度被德國超越，今年發表論文數前五名的國家如圖一所示。



圖一、IEEE MEMS 2007 論文發表前五名國家。

二、參加會議經過

“International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, (IEEE MEMS)”，在微機電學術研究當中，是最受矚目的會議，本次會議內容涵蓋了生醫微機電技術(Medical MEMS)、細胞與粒子操控技術(Cell & Particle Handling)、物理感測器(Physical Sensor)、製程與封裝技術(Fabrication and Package)、反應器(Reactor)、微機電供電技術(Power MEMS)、奈米工具應用(Nano Tool)、生物與化學感測系統(Bio & Chemical Sensor System)、致動器(Actuators)、微光機電技術(Optical MEMS)、無線傳輸技術(Wireless)、製程技術(Fabrication)等，內容十分廣泛。今年的會議於神戶 Portopia Hotel 舉行，如圖二所示。



圖二、(a)神戶 Portopia 旅館外觀(由左至右：國立台灣大學蔡耀全同學、鄭吉宏同學、操禮齊同學、吳明道同學)；(b)會議地點(賈婷婷同學)。

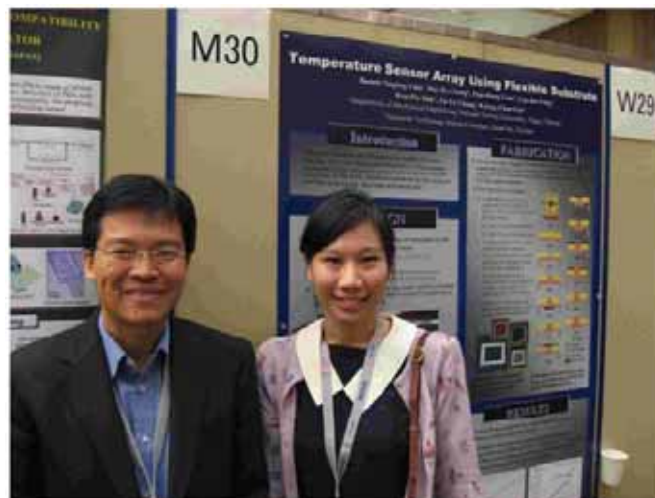
1. 1月21日 註冊歡迎酒會

本日下午四點起在會議地點-Portopia Hotel 會議展示中心開放註冊，於晚上六點舉行歡迎酒會。

2. 1月22日

會議開場由日本東京大學的 **Hiroyuki Fujita** 教授致詞，報告近二十年來微機電研究領域的回顧與商品化過程，討論目前利用微機電技術製造之產品，所需關注的微機電設計概念與製程技術，在未來微機電技術的趨勢，將是利用複印 (printing) 與複製的技術過程來降低成本與相異性質元素的整合以得到的多功能系統。本日發表的論文著重於微機電技術於醫療技術、細胞操控與物理感測器的應用。來自台灣中正大學的馮國華教授首先報告，製造微米尺寸高分子金屬複合材料裝置，應用於需要高精密操控之外科手術，根據實驗結果顯示，此裝置可精密控制 5mN 力量輸出，與 300 μ m 位移。來自美國 Case Western Reserve University, Zurcher 等人發表利用 MEMS 加速度計技術於人類耳朵內中耳區植入微小麥克風裝置，由於 MEMS 加速度計介面擁有低雜訊干擾，所以能清楚偵測與轉換外界聲音訊號至人類中耳內的振動。根據作者描述，因為麥克風有高解析度

($78\mu\text{g}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$ 於 500Hz)，可有效改善聽覺障礙患者的困擾。來自美國南加州大學的 Li 報告在人類眼睛內藥物傳遞裝置，並且為了避免重複開刀來填充藥物，作者利用矽橡膠材質建構一個可重複填充藥物裝置來避免患者的困擾。由測試結果得知，此電化學反應驅動之微幫浦能夠提供廣泛的操縱範圍，施予眼疾患者所需要的藥物流量(pL/min to $\mu\text{L}/\text{min}$)。在細胞與粒子操控應用技術上，日本東京大學的 Junichi Miwa 提出微細胞分類裝置，分類的原理則是利用管道內壁上製作可減緩陽性細胞運動的抗體，然而陰性細胞對此抗體則不受影響，由此特性來過濾出陰性與陽性細胞。日本東京大學的 Manabu Ataka 提出感測器與致動器的整合陣列，將致動器陣列堆疊在感測器陣列之上，當物件置放於致動器陣列時，藉由以光二極體作為感測元件的感測器陣列，以偵測物件靠近的陰影，最後以可程式化邏輯閘陣列(FPGA)將產生影像與圖形傳至電腦，或 CCD 螢幕上。在物理感測器的應用上，由日本 Hitachi 公司中央研究實驗室 Fujimori 等人報告，電容式壓力感測器與 CMOS-LSI 整合與製造，作者所提出之電容式壓力感測器是由傳統式後段(Back-end-of-line, BEOL)製程所製造。此電容式壓力感測器能夠於低溫過程中與傳統材料與設備當中製造，並與 CMOS-IC 成功整合，所以其有效晶片尺寸，可達到 2mm^2 微小範圍。藉由此製程概念，可成功將 MEMS 技術整合於任何 CMOS-LSI 上，增加感測晶片多功能性，與有效降低晶片大小尺寸。筆者所發表的論文“Temperature sensor array using flexible substrate”，安排於本日下午 16:10 至下午 17:50 的時段，以海報形式發表，如圖三所示。



(a)



圖三、筆者攝於海報發表會場。(a)由左至右：楊耀州教授、賈婷婷同學；(b)由左至右：施文彬教授、張鐸儒同學。

3. 1月23日

本日會議開場由德國 BOSCH 公司汽車電子零組件部門，Marek 博士致詞，介紹微機電技術於汽車產業的應用，一開始從 BOSCH 公司所研發的壓力感測器、氣體流量感測器、加速度計，與陀螺儀做介紹。利用微機電技術所研發的汽車零組件產品，根據實驗測試，更能使整個汽車系統，得到高安全、環保、與較高的經濟效益的效果。本日發表的論文著重於製程與封裝技術、反應器、能源科技微機電技術等。首先在製程與封裝技術會議上，由來自美國加州柏克萊大學的 Sang-Hoon Lee 利用類似製造積體電路技術當中鉚線 (wire bonding)，發展出 near-field electrospinning (NFES) 技術，可以將晶片與晶片之間利用 NFES 技術，製作微管道相互連結，並可程式化精準的控制所需尺寸。局部的控制可達 $10\mu\text{m}$ ，因此 NFES 可以產生微米尺寸的高分子圖形，此技術可以應用於微機電生醫晶片與微流體研究領域。來自丹麥科技大學的 Richter 利用壓電係數觀測裝置來觀察微系統封裝時之三維應力分佈，經由量測封裝晶片上特定方向接觸區域之電壓值變化來感應力分佈。在反應器領域的時段上，首先由成功大學李國賓教授團隊，針對在 DNA 放大前處理晶片與 RT-PCR 裝置整合，核糖核酸病毒可成功的混合、收集、過濾在微流道之中，DNA 放大可在相同生醫晶片反應器的腔體內進行，此微系統整合了微幫浦、S 型微流道、生醫反應器、分離器等，發展一個功能更強，更快速偵測病毒生醫晶片。

4. 1月24日

本日會議開場首先由美國加州理工學院的 Michael Roukes 教授演講，其主題為奈米機電系統的潛力與發展。奈米機電系統可謂繼微機電系統以後的下一個微小尺寸範圍，然而對於某些應用，奈米機電系統如此微小的尺寸並非必要。當日的論文發表共有三個主題，分別是奈米工具(Nano Tool)、生化感測系統(Bio & Chemical Sensor System)、以及致動器(Actuator)。在奈米工具(Nano Tool)研討時段中，來自瑞典 Chalmers 大學的 Nafari 等人利用一般的半導體製程製作一用於穿透式電子顯微鏡內的原子力顯微鏡感測器，並經由

量測奈米碳管，建立奈米等級系統之彈性係數的量測基礎。主要的設計困難點在於感測器需要有高解析度，以及電子顯微鏡內電極間的尺寸限制。在生化感測系統(Bio & Chemical Sensor System)研討時段中，來自德國 HSG-IMIT 的 Kunze 等人提出一製作於矽晶片上的薄膜式露點量測系統，包含了加熱器以及量測溫度的溫差電堆(thermopile)。當週遭空氣中的水蒸氣達到露點時，水氣便凝結在薄膜上並改變其比熱。在致動器(Actuator)研討時段中，由 UCLA 的 C.J. Kim 團隊所發表的利用靜電力在 nano turf 表面上驅動液滴。以奈米結構的表層取代平整的電介質同時提供了較強的驅動力與較弱的摩擦力，因此相較於 EWOD (Electrowetting-on-dielectric)僅需較低的驅動電壓。筆者所發表的論文“Design and fabrication of an artificial skin using PI-copper films”，安排於本日下午 15:50 至下午 17:30 的時段，以海報形式發表，如圖四所示。本篇研究主要針對應用於伴侶機器人上的仿人皮膚，其目的在於讓機器人能像人類一般可以感受外界環境的溫度與壓力變化，進而可避免對人類甚至對機器人系統，因為無法判別外在環境是否危險因素存在，而使系統產生毀壞情形。所設計出包含溫度與壓力的感測器陣列，其中整合了兩種異質的訊號於軟性基材之上，製做出可撓曲性的溫度與壓力陣列。其中溫度感測器元件，是採用 MAXXIM 公司的溫度 IC-Max6607，其溫度感測 IC 擁有高度線性的溫度與電壓輸出曲線，而在壓力感測元件的設計，是利用導電材料 carbon-nano fiber, carbon block, graphite powder 等，混入 PDMS 之內，製作成導電橡膠。利用點膠機將導電橡膠點膠於撓性基材上的交趾式感應電極，當感測器受壓力變化時，導電橡膠內的電阻值亦會受到變化，在實驗討論中，針對感測器陣列之壓力與溫度分佈進行驗證。在同一時段，筆者亦有另一篇論文發表，題目為 “Acoustic polarization for optimized implantable power transmission”，如圖五所示。會議的第三天晚上舉行晚宴，主辦單位安排了極具日本文化特色的人形偶劇表演，令眾多國外學者們感到新奇不已，如圖六所示



圖四、筆者攝於海報發表會場(由左至右：施文彬教授、楊耀州教授、鄭茗元同學、操禮齊同學)。



圖五、施博仁博士向國外學者講解研究內容。



(a)



(b)



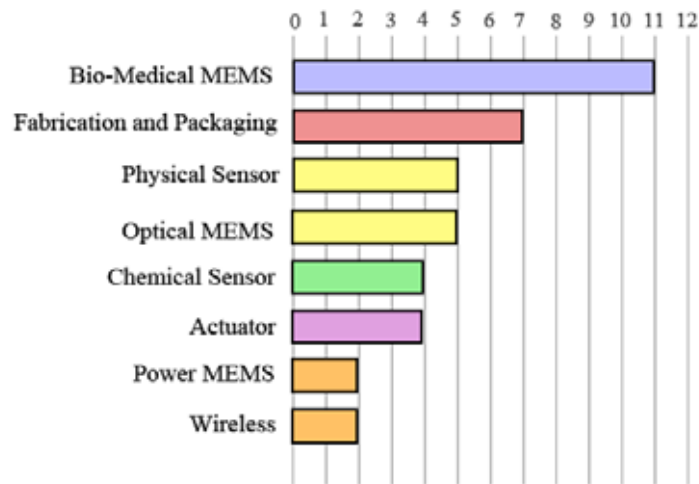
圖六、 (a)(b)晚宴活動；(c)由左至右：楊耀州教授、李國賓教授、馮國華教授、張培仁教授、陳榮順教授、傅建中教授、蔡晴翔同學、林哲信教授。

5. 1月25日

第四天(1月25日)也就是會議的最後一天，共分為三類不同主題的論文。首先是光學微機電系統(Optical MEMS)，A. Jamshidi 等人的論文”Semiconductor Nanowire Manipulation Using Optoelectronic Tweezers”首次藉由 OET (Optoelectronic Tweezers)操控矽材質的單一奈米線，其奈米線的直徑為 100 奈米，長度為 5 微米，移動的速度為每秒 135 微米。接下來的主題是無線傳輸(Wireless)，Brandon Pillans 等人的論文”Schottky Barrier Contact-Based RF MEMS Switch”使得射頻微機電開關(RF MEMS switch)在逆向偏壓下操作，同時也能在正向偏壓時導電。這項研究結合了微機電技術與固態電子兩項領域，創造出獨特的射頻元件。最後的主題是製造技術(Fabrication Technique)，Angela J. Shum 等人的論文”Vacuum microfabrication on live fruit fly”成功地在真空環境的活體上進行微機電製程，使得製程的發展邁向更複雜的微系統。

三、與會心得

雖然 IEEE MEMS 是微機電領域最負盛名的研討會，今年的投稿論文數以及與會人數均較去年減少約 200 人左右，可能是面臨了許多特定微機電領域研討會的競爭，例如： μ -TAS，Power MEMS，IEEE Sensors 等，在新興的奈米機電領域方面，亦與 IEEE NEMS 以及 IEEE Nanotechnology 相互競爭；從去年的 IEEE MEMS 開始，便有越來越多的與會者有”看不到新東西”的想法，主要原因可能是 IEEE MEMS 舉辦至今已 20 年，微機電領域的製程技術趨於成熟，目前論文發表的大宗是以微機電技術應用於新的領域，或者將其他領域的材料引進微機電中，因此會有學者逐漸往其他的研討會尋求新的想法。若論微機電技術在各領域應用的變遷，可由本次研討會口頭報告的分類論文數略窺一二，如圖七所示。其中生醫微機電已成為研討會中論文章量最多的一支，無線微機電技術由於已達成成熟階段，論文數正逐年遞減。



圖七、口頭報告的分類論文數

這次的會議中看到了許多可撓式的微機電研究，其中不乏以 PDMS 與 polyimide 作為基材的微機電元件。Andrew Mercanizi 等人的論文”Demonstration of cortical recording and reduced inflammatory response using polymer neural probes”即為一例，以 polyimide 與電子束蒸鍍的白金構成撓性極佳的探針，polyimide 層厚約 15 微米，其表面上的白金層厚為 200 奈米，並以 50 奈米厚的鈦金屬層做為白金層的黏著層。此元件可以極盡地彎曲且功能不受影響的主要關鍵為其三明治的結構，最上層仍為 polyimide 層以保護白金層在彎曲過程中不致碎裂。此特點是筆者認為未來繼續進行可撓性微機電元件研究時的重點之一。

參於本次大會的研究人員，也有多位來自台灣方面的與會者，因此，透過本次會議的學術交流，不僅可將台灣的科技研究成果展示出來，更將有助於台灣奈微米科技的持續發展。非常感謝國科會的補助，讓此次第二十屆微機電系統國際會議(20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, IEEE MEMS 2007)論文的發表，得以更順利成行，也提供了一個難得的機會，得以觀察在國際上其他優秀的研究學者們的最新研究進展，進而見賢思齊。