

# 電容式半導體加速度計技術之整合研究(三)-總計劃

## The Study of Capacitive Semiconductor Micro-Accelerometer

計劃編號: NSC 88-2218-E-002-015

執行期限: 87 年 8 月 1 日至 88 年 10 月 31 日

計劃主持人: 張 培 仁 台大應力所副教授

### 一 中文摘要

(關鍵詞: 電容式加速度計、回授控制、積體電路、表面細微加工)

本計劃利用表面細微加工方法設計製作閉迴路電容式加速度計，整合動態系統分析、感測電路設計與半導體加工技術。我們採閉迴路控制方式設計，計算電場分布情形，估算電容值與靜電力大小，計算流場分布情形，估算出流體與梳狀結構之間的阻尼大小，求出所需之系統參數，配合閉迴路設計分析做系統模擬，後級訊號處理電路為部分參數可外調方式，以配合控制器參數之調整。感測器機構本體採表面細微加工，發展製程技術並建立基礎設備。

### 英文摘要

(Keyword: capacitive accelerometer, feedback control, integrated circuit surface Micromachining)

In this project, we discussed the design and fabrication of our capacitive semiconductor micro-accelerometer fabricated by the surface micromachining technology, including the dynamic system analysis, signal process circuit and fabrication technology. We calculate the electrostatic force between the electrodes and damping effect. Using these important parameters, we can simulate the dynamic system. Our ASIC has the feature that some control parameters are tunable. The sensing element was fabricated in surface micromachining. In addition, we set up

the fabrication facilities.

### 二 計劃緣起與目的

近年來微機電系統之研究蓬勃發展，展現多樣性與創新技術，然而在實際應用上仍以半導體微感測器為主流。本計劃發展電容式閉迴路梳狀加速度計技術，朝向高性能與高精確度為目標，由於涵蓋技術甚廣，包括結構動力、回授控制、電磁分析、檢測電路與半導體加工等，我們嘗試以跨領域合作方式，從基礎的設計到實作加工，完成電容式微加速度計。

### 三 研究成果

此加速度計是由 64 對電容所組成，訊號處理為調變-解調變方式，控制器設計採用比例微分控制，可量測之範圍為 $\pm 50g$ ，其靈敏度為 $20mV/g$ ，頻寬為 $1kHz$ 。結構動力分析決定感測機構尺寸，電磁與熱流分析提供設計參數，提供閉迴路控制器設計，最後實作在感測訊號積體電路上，利用表面細微加工製作感測機構，並整合感測電路完成加速度計製作。

#### 3.1 動態與控制技術研究

本研究主要在探討電容式半導體加速度計之幾何結構，其動態行為與各項性能(圖表 一)。我們依據系統規格訂定出系統回授參數，利用 Floquet Theory 完成對本系統之穩定性理論分析，得到正確的穩定範圍並利用模擬進行驗證(圖表 三)，同時利用 Floquet Theorem 在穩定範圍內選擇一組符合系統要求的比例-微分(PD)控制參數值

( $g_p$ 、 $g_d$ )。另一方面，除了調變解調變之架構外，我們也分別探討了脈衝寬度調變(PWM)及鎖相迴路(PLL)兩種架構，我們以數值模擬的方式分析各種回授控制架構在線性度、抗雜訊能力、靈敏度、頻寬、阻尼比的表現，並比較其優缺點。

### 3.2 電磁及熱流技術分析

為了實現動態系統分析，必須掌握靜電力和阻尼比等參數，以完成回授控制設計。我們計算梳狀結構之電磁力之理論解，簡化為二維對稱模型來分析，利用保角轉換(Conformal Mapping)方法求解具有 fringe 效應的電容結構，透過 Schwarz-Christoffel transformation 找出對應平面，成功計算出矩形電極之電場分布，估算電容值與靜電力大小，另外使用有限元素分析軟體 Maxwell 與 ANSYS，模擬梳狀電容之電場分布情形，並估算感測器之電容值以及電極之間靜電力大小，模擬結果與解析解相當吻合(圖表六)，為了解基材效應造成電場不對稱的影響，我們也採取數值模擬方式來評估基材效應造成結構除側向之外的電磁力。

在熱流技術分析方面，運用解析方法計算流場分布情形(圖表六)(圖表七)，估算流體與梳狀結構之間的阻尼大小，由尺寸性能諸元(圖表一)之計算後，得知品質因子為 435；而阻尼比經換算後之數值為 0.00115，與方中(1997)或 Zhang (1994) 探討之另一側向振動阻尼值數量級相仿(但略小)，均遠比臨界阻尼值 (Critical Damping) 0.707 為小，有賴閉迴路控制來補償。

### 3.3 信號處理積體電路技術研究

本研究採用的訊號處理為調變的方式(圖表八)，在這個解調電路中，需要的功能方塊有輸入放大器(Input amplifier)、解調用的乘法器(Multiplier)、輸出放大器(Output amplifier)、非重疊時脈產生器

(Non-overlapping clock generator)及兩個用電容和電阻所構成的濾波器。

輸入訊號透過電容將兩個時脈信號耦合到感測器上，可看成是待測信號與時脈信號相乘。以此相乘後的信號輸入到電路中，觀察輸出是否能將原本的待測信號解調出來並將其放大。發現這個電路確能達到解調及放大的功能。我們對這個輸出信號做頻譜分析，可發現輸出頻率為 1kHz，符合系統要求。圖表九是輸出信號大小對輸入振幅的曲線圖。

### 3.4 製程技術研究

表面微機械所需的沈積薄膜展現多樣性和變化性，使得感測器與積體電路整合成為可行，探討電容式感測器的設計和製造、多晶矽沈積、摻雜和活性離子蝕刻的圖樣，嘗試改進原有製程方法，並加入金屬結構試作。我們用支撐多晶矽橋的磷矽玻璃犧牲層來釋放多晶矽薄膜懸離表面，以超臨界點乾燥法來解決虹吸力的問題，完成的梳狀感測結構如(圖表十)(圖表十一)。此外，嘗試以高分子材料作為犧牲層，以電漿去光阻方式釋放金屬微結構。完成之感測器可與標準製程製作之感測電路相結合。

## 四 結論與展望

本研究利用表面細微加工技術設計製作梳狀電容式加速度計，採用閉迴路設計，使用解析方法精確計算電場分布，成功求出電容值與電極間靜電力，並以數值模擬作驗證，為了解流體對系統之影響，計算流場分布情形以估計阻尼效應，但阻尼比所得之數值為 0.00115，無法大幅調整梳狀加速度計之動態特性，而有賴閉迴路控制電路來改善，使用比例微分控制器設計，並成功找出系統穩定的範圍，

另外，嘗試以 PWM 與 PLL 的架構應用在電容式加速度計，並探討不同架構之優劣。設計所得的各項參數最後應用在晶片的實作上，目前製作完成的訊號處理電路大致說來各部分的功能都能正常運作，但仍有一些地方需要細部調整，有賴進一步要將信號處理電路完全晶片化。以多晶矽製作之梳狀結構已獲致成功，並對製程做進一步調整，製作更多樣不同設計，此外，建立表面細微加工多晶矽製程基本技術與經驗，建立超臨界點乾燥機、電漿去光阻機與化學氣相沉積設備(圖表 十二)。本計劃期望能藉由這個半導體感測器的製作，奠定台灣微機電領域之製程基礎，為我國高科技產業開創一新局面。

## 五 參考文獻

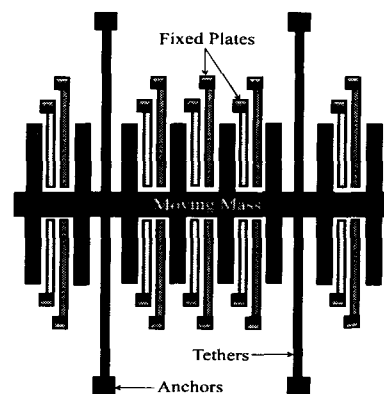
- [1] Wolfgang Kuchnel and Steven Sherman, "A surface micromachined silicon accelerometer with on-chip detection circuitry," *Sensors and Actuators A*, Vol. 45 (1994), pp.7-16
- [2] S Maier-Schneider, A Koprululu, S Ballhausen Holm, E Obermeier, "Elastic properties and microstructure of LPCVD polysilicon films," *Journal of Micromechanical and Microengineering*, 6 (1996), pp.436-446
- [3] G. A. Macdonald, "A review of low cost accelerometer for vehicle dynamics," *Sensors and Actuators A*, Vol. 21-23, pp. 303-307, (1990).
- [4] H. Seidel, H. Riedel, R. Kolbeck, G. Muck, W. Kupke and M. Koniger, "Capacitive silicon accelerometer with Highly symmetrical design," *Sensors and Actuators A*, Vol. 21-23, pp. 312-315, (1990).
- [5] C. L. Chang, P. Z. Chang, "Micro electrode array- A new method for design of electrostatic micro actuators and capacitive micro sensors," *SPIE*, 1997.

[6] Roland Schinzinger, *Conformal mapping: methods and applications*, Elsevier, 1991.

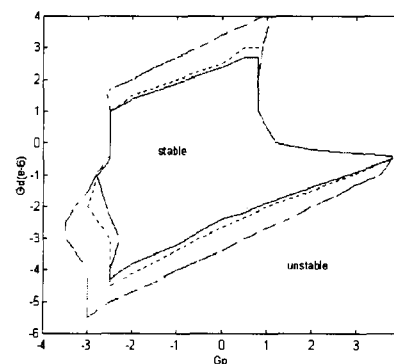
## 六 圖表

|           |                                              |
|-----------|----------------------------------------------|
| 感測機構尺寸    | 600 $\mu\text{m}$ $\times$ 415 $\mu\text{m}$ |
| 多晶矽厚度     | 2 $\mu\text{m}$                              |
| 振動質量      | 0.33 $\mu\text{g}$                           |
| 彈性樑長寬     | 176.5 $\mu\text{m}$ $\times$ 2 $\mu\text{m}$ |
| 勁度        | 5.152 kg/m                                   |
| 自然振頻      | 19.9 kHz                                     |
| 梳狀電極長寬    | 120 $\mu\text{m}$ $\times$ 4 $\mu\text{m}$   |
| 電容對數      | 64 組                                         |
| 電容間隙      | 2 $\mu\text{m}$                              |
| 總電容(FEM)  | 0.157 pF                                     |
| 電容變化(50g) | 3.84 fF                                      |

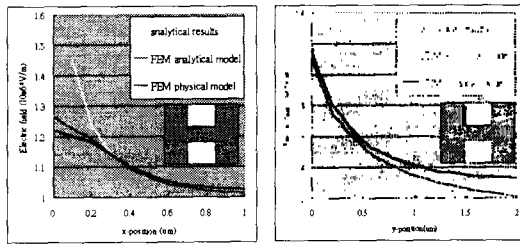
圖表 一 感測機構規格



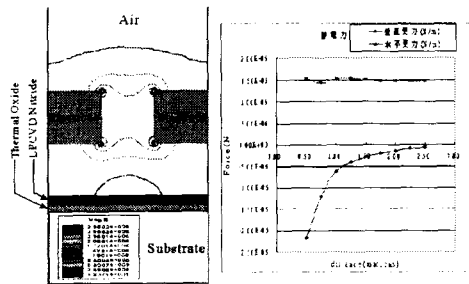
圖表 二 梳狀加速度規示意圖



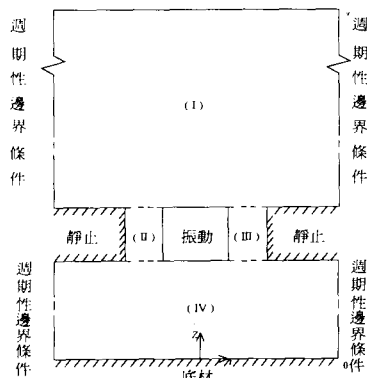
圖表 三 PD 控制器穩定範圍



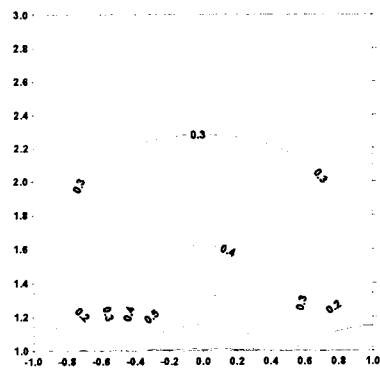
圖表 四 電場解析解與數值模擬比較



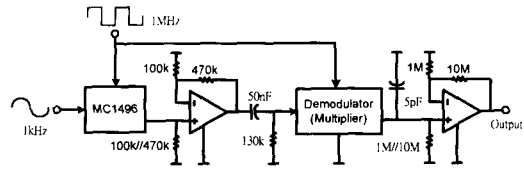
圖表 五 考慮基材效應之靜電力關係



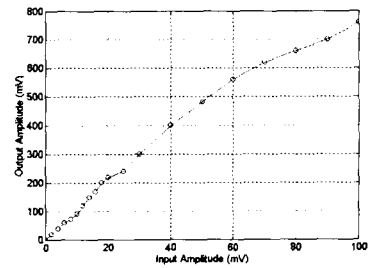
圖表 六 單位梳狀結構流場邊界示意



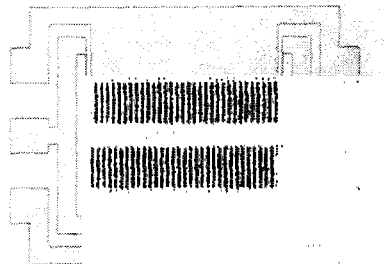
圖表 七 (I) 區  $\bar{V}_0$  在  $1/8$  振動周期瞬間之等速度圖



圖表 八 感測器後級信號處理電路



圖表 九 整個電路輸入與輸出之關係



圖表 十 單一光罩製作之感測機構



圖表 十一 完成感測機構實體



圖表 十二 低壓化學氣相沉積設備