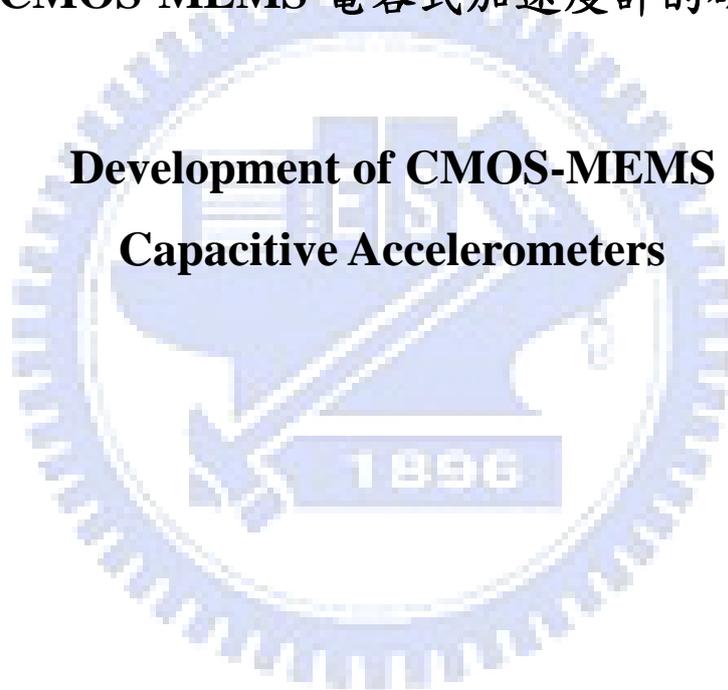


國立交通大學

機械工程研究所

碩士論文

CMOS-MEMS 電容式加速度計的研發



研究生：李岳剛

指導教授：徐文祥

中華民國 九十七年 六月

CMOS-MEMS 電容式加速度計的研發

Development of CMOS MEMS Capacitive Accelerometers

研究生：李岳剛

Student : Yueh-Kang Lee

指導教授：徐文祥

Advisor : Wensyang Hsu



中華民國九十七年六月

CMOS-MEMS 電容式加速度計的研發

研究生：李岳剛

指導教授：徐文祥

國立交通大學機械工程學系 碩士班

摘 要

本論文研究重點在於以兩種開發中的 CMOS 製程，建立起 CMOS-MEMS 電容式加速規相關的設計分析、製作與量測技術；一種製程以 Poly-Silicon 作為感測結構材料以降低殘留應力，增加感測電容值以提升加速規靈敏度；另一種製程以金屬鎢 Tungsten 作為感測結構材料，期望利用其高密度的特性以減少所佔用的晶片面積，進而提升加速規的靈敏度；此兩種製程以整合微感測結構與電路、達成批次生產為目標。

結構設計上採用間隙型差動對作電容感測以減少非感測軸的耦合，並以有限元素分析軟體 ANSYS[®] 執行懸吊系統、致動器與殘留應力的模擬；性能的最佳化以限定晶片面積內，可達到最高靈敏度為原則，由感測懸臂翹曲量來取得最佳化的尺寸，使得此設計的單雙軸靈敏度分別達到 1.96 fF/G 與 2.01 fF/G 的目標；製程上 Poly-MEMS 利用退火製程成功地調整 Poly-Silicon 的殘留應力，期望改善感測懸臂的翹曲程度以增加感測電容，Metal-MEMS 製程則因材料 Tungsten 本身薄膜應力過大與蝕刻液攻擊黏著層的關係尚無法成功實現。

量測技術上以壓電致動器、國家儀器 Scope NI5122 配合程控軟體 LabView 建立起加速規量測平台，並以加速規 ADXL330 驗證量測平台，量測得到 ADXL330 的靈敏度 220mV/G、雜訊強度 176.7($\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$)、量測範圍 $\pm 2.35 \text{ G}$ ；靈敏度與量測範圍的量測值皆在實際產品標示誤差的 18%的範圍內，雜訊強度則有 37%的誤差。

Development of CMOS-MEMS Capacitive Accelerometers

Student : Yueh-Kang Lee

Advisor : Wensyang Hsu

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

The study build up the technique of design, fabrication, and the measurement for CMOS-MEMS capacitive accelerometers by demonstrating two on-going CMOS process. In the first process, poly-silicon acts as the material of MEMS structure to reduce the residual stress and to increase the sensing capacitance. Sensitivity of accelerometers is raised up due to the better overlap areas. In the other process, Tungsten is used to be the material of structure. Because of the high density of Tungsten($\sim 19200 \text{ kg/m}^3$), it is expected that the higher sensitivity is obtained in the same die area. The goal of the both two process is to integrate circuit and MEMS structure and to implement batch fabrication.

Differential-pair sensing of gap-closing type is used in this design to reduce coupling effect. The way to decide the size of sensing fingers is to optimize the sensitivity of accelerometers in the constrained die area and to consider the deflection of sensing fingers. Sensitivity 1.96 fF/G and 2.01 fF/G is required in single axis and two axis respectively. In the process, Poly-MEMS can adjust the residual stress through the annealing of poly-silicon structure to alter the deflection of sensing fingers. Metal-MEMS is still not implemented due to the high thin-film stress and the diminish of adhesion layer in releasing progress.

In the measurement setup, high resolution scope NI5122, piezoelectric actuator, and the programmable software Lab-View are combined to complete the accelerometers measuring setup. To prove the availability of the setup, 3axis accelerometers ADXL330 is on the test, and provides Sensitivity 220 (mV/G), Noise Floor 176.7 ($\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$), and Dynamic Range $\pm 2.35 \text{ G}$. Sensitivity and the Dynamic Range are within deviation 18% compared to the datasheet of ADXL330.

誌 謝

兩年的研究生涯一轉眼就過去了，這兩年學得許多寶貴的專業知識，算是最珍貴的一段求學生涯，超級超級感謝教授老徐的大力指導，宅心仁厚地讓我很早很早就奇蹟式的畢業口試，也感謝實驗室的學長，鍾博、楊老大、小白、花生博、高手、罔夫、GG控、Gay仁宏、pot的指導與關心，還有實驗室同仁學弟，取低、Smile、胖虎、罔熊、鐵乳、罔頭、小畢陪我玩樂，讓自己在追求學術研究的途上感到趣味十足，對研究仍充滿熱忱與動力；感謝家人一直支持我，尤其爸媽老是怕我做研究熬夜弄壞了身子，不厭其煩的塞補品給我吃；兩年的研究生活，著實讓自己思考靈活了許多，看人、事、物也可以從較多的角度去解讀，較懂得去尊重他人的想法，不論是知識或智慧的累積都算是這輩子獲得最多的一段光陰，感謝多年來交大的陪伴，在如此豐富的資源與良好的學術環境下，讓我更懂得謙虛的向前行；最後，還要感謝我偉大的老婆，能夠忍受我將這麼多的心思投入在研究方面，忍受我自私的做自己想做的事情，永遠在背後默默的支持我。說真的，當學生永遠都是最幸福的。

岳剛 予 風城交大

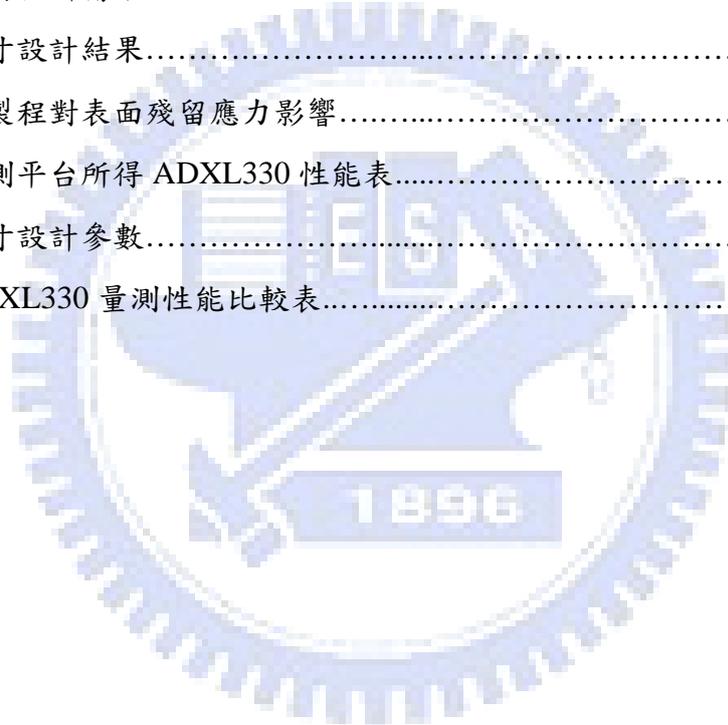
目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VI
圖目錄.....	VII
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.2.1 加速度計操作方式.....	3
1.2.2 感測原理.....	4
1.2.3 MEMS v.s CMOS MEMS.....	6
1.3 研究目標.....	13
第二章 CMOS MEMS 電容式加速度計	14
2.1 電容式差動對.....	14
2.1.1 CMOS-MEMS 的差動對.....	15
2.1.2 多軸耦合的消除.....	16
2.2 概念設計.....	17
2.2.1 單軸加速度計.....	17
2.2.2 雙軸加速度計.....	17
2.3 設計流程.....	18
2.4 結構設計.....	18
2.4.1 感測質量塊.....	19
2.4.2 懸吊系統.....	19
2.4.3 感測懸臂尺寸的決定.....	29

2.4.4 差動對數目.....	30
2.4.5 停止器與致動器.....	31
2.5 系統阻尼.....	34
2.6 感測電路.....	36
第三章 製程與封裝.....	37
3.1 封裝.....	37
3.2 製程.....	38
3.2.1 Poly MEMS.....	38
3.2.2 Metal MEMS.....	41
3.3 殘留應力.....	43
第四章 設計與製程結果.....	46
4.1 設計結果.....	46
4.2 製程結果.....	52
4.2.1 Poly MEMS	52
4.2.2 Metal MEMS.....	56
4.3 加速規量測平台校正結果.....	58
第五章 結論.....	65
5.1 總結.....	65
5.2 未來工作.....	67
5.2.1 Poly MEMS	67
5.2.2 Metal MEMS.....	67
參考文獻.....	68

表目錄

表 1-1 ADI-ADXL 加速度計性能價格表.....	2
表 1-2 感測原理比較表.....	6
表 2-1 懸吊系統比較.....	20
表 2-2 單軸懸吊系統模態分析.....	23
表 2-3 雙軸懸吊系統模態分析.....	26
表 2-4 加速規在各領域頻寬.....	27
表 2-5 轉速與停止器變形關係.....	32
表 2-6 致動器所需數目.....	33
表 4-1 尺寸設計結果.....	51
表 4-2 後製程對表面殘留應力影響.....	56
表 4-3 量測平台所得 ADXL330 性能表.....	64
表 5-1 尺寸設計參數.....	65
表 5-2 ADXL330 量測性能比較表.....	66



圖目錄

圖 1-1	MEMS 慣性感測器市場 [1].....	1
圖 1-2	慣性感測器專利分佈.....	2
圖 1-3	加速度計操作原理.....	3
圖 1-4	加速度計感測流程.....	4
圖 1-5	電阻式加速度計[5].....	5
圖 1-6	熱汽泡式加速度計[6].....	6
圖 1-7	電容式加速度計 ADXL50[7].....	7
圖 1-8	(a)體型微加工加速度計 (b)面型微加工加速度計.....	7
圖 1-9	ADI 加速度計 ADXL50.....	8
圖 1-10	ADI, iMEMS 簡圖[3][4].....	8
圖 1-11	(a)SOI-MEMS Inertial Instrument (b) SOI-MEMS Inertial Array [11].....	9
圖 1-12	UV-LIGA CMOS-MEMS[12].....	9
圖 1-13	金屬電鍍 CMOS-MEMS[13].....	9
圖 1-14	(a)背向蝕刻與 DRIE CMOS-MEMS (b)Z 軸 CMOS-MEMS 加速度計...10	
圖 1-15	(a) CMOS-MEMS 單軸加速度計(b)特殊設計補償電容覆蓋面積[16]....11	
圖 1-16	(a)ADI 加速度計 ADXL203[17] (b)ADI 加速度計 ADXL330[2].....	12
圖 2-1	(a)上下型差動對 (b)左右型差動對.....	14
圖 2-2	CMOS-MEMS 左右型差動對無法正確判讀加速度值.....	15
圖 2-3	Gap Closing 差動對感測示意圖.....	16
圖 2-4	差動對消除耦合.....	16
圖 2-5	單軸概念設計.....	17
圖 2-6	雙軸概念設計.....	18
圖 2-7	設計流程.....	18
圖 2-8	(a) ADXL150[4] (b)ADXL330[2].....	19
圖 2-9	懸吊系統 (a)懸臂型 (b) 懸臂型 (c)蜿蜒型.....	20
圖 2-10	(a)方形彈簧示意圖 (b)方型彈簧等效懸臂.....	21
圖 2-11	蜿蜒式彈簧.....	21
圖 2-12	雙軸懸吊系統(a)位移分析 (b)模態分析.....	22

圖 2-13	(a)懸吊寬度與 K_x 關係 (b)懸吊寬度與 K_y 關係.....	22
圖 2-14	(a)單軸懸吊系統 (b)雙軸懸吊系統.....	24
圖 2-15	懸臂長度與雙軸彈簧常數關係圖.....	25
圖 2-16	ANSYS 模態分析 (a) Y 軸 (b) X 軸.....	26
圖 2-17	Poly-MEMS 單軸頻率響應.....	28
圖 2-18	Poly-MEMS 雙軸頻率響應(a) X 方向 (b)Y 方向.....	28
圖 2-19	感測懸臂尺寸.....	29
圖 2-20	翹曲量影響感測懸臂覆蓋面積.....	29
圖 2-21	差動對數目與感測懸臂面積關係.....	30
圖 2-22	停止器構造.....	31
圖 2-23	晶片受向心加速度及 Stopper 受力示意圖.....	31
圖 2-24	SEM Stopper 側視圖.....	32
圖 2-25	致動器.....	32
圖 2-26	ANSYS 靜電致動結果.....	33
圖 2-27	空氣阻尼.....	34
圖 2-28	空氣層特徵厚度與工作頻率關係圖[19].....	35
圖 2-29	空氣壓力與品質因子關係圖[19].....	35
圖 2-30	感測電路.....	36
圖 3-1	日月光封裝製程.....	37
圖 3-2	封裝預留空間.....	38
圖 3-3	Poly MEMS 製程流程圖.....	39
圖 3-4	Metal MEMS 製程流程圖.....	43
圖 3-5	感測懸臂的應力梯度[4].....	43
圖 3-6	Test Finger 翹曲量測.....	44
圖 3-7	殘留應力模擬邊界條件的選擇.....	45
圖 3-8	ANSYS 等效殘留應力模擬.....	45
圖 4-1	懸臂長度與翹曲量關係.....	46
圖 4-2	懸臂長度與翹曲量關係.....	47
圖 4-3	懸臂長度與電容板覆蓋面積關係.....	47
圖 4-4	N 與 L_{die} 關係.....	48

圖 4-5	各尺寸對靈敏度之關係.....	48
圖 4-6	感測懸臂的側向沾黏現象.....	48
圖 4-7	彈簧大於 0.8 N/m 的尺寸.....	49
圖 4-8	最佳化尺寸的篩選.....	49
圖 4-9	差動對數目與靈敏度關係.....	50
圖 4-10	懸臂長度與翹曲量關係.....	52
圖 4-11	懸臂長度與翹曲量關係.....	53
圖 4-12	結構層未退火前的殘留應力分布區域.....	53
圖 4-13	750°C 30sec 退火後的懸臂翹曲量.....	54
圖 4-14	750°C 30sec 退火後的殘留應力分布區域.....	54
圖 4-15	感測懸臂部分沾黏.....	55
圖 4-16	質量塊翹曲情形.....	55
圖 4-17	Metal MEMS 黏著層受蝕刻液攻擊.....	56
圖 4-18	Metal MEMS 蝕刻結果.....	57
圖 4-19	黏著層保護示意圖.....	57
圖 4-20	加速規量測平台.....	58
圖 4-21	感測電路與調變訊號.....	59
圖 4-22	加速規靈敏度的量測.....	60
圖 4-23	ADXL330 於 100Hz 1G 時感測訊號.....	60
圖 4-24	(a)ADXL330 零敏度線性區域 (b) 線性迴歸線.....	61
圖 4-25	頻譜儀上的雜訊.....	61
圖 4-26	ADXL330 耦合度量測.....	62
圖 4-27	ADXL330 的非線性度.....	62
圖 4-26	ADXL330 的動態範圍.....	63

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

微機電系統(MEMS)近年來受到重要注目，因其輕薄短小的特性使元件的表現具備穩定的性能；此系統主要涵括了沉積、微影、蝕刻等三大部份以製作出各種奈微米尺寸的可動式機械元件，元件也隨著尺寸的縮小而帶動製作成本的下降，讓微機電產品更具有市場發展的能力；新型 3C 產品如 iPhone、數位相框，因強調與人互動的特色，使得電子產品不單單只是電子訊號的傳送，更需要微機電系統的加入以轉換現實世界中的物理量(光、加速度、聲音、力量等)至電子元件內，故在現今注重人機互動的社會中，微機電產品具有絕佳的發展優勢。

微機電系統中，又以慣性感測器如加速規、陀螺儀為最早投入市場研發的產品，應用上從早期的汽車安全氣囊、全球衛星定位系統(GPS)到近幾年迅速竄紅的消費性電子如任天堂的遊戲機(Wii)，其透過不同以往電玩類型的虛擬玩法，對市場產生莫大的衝擊；藉由這些隨處可見的例子，可發現慣性感測器的市場仍不斷地成長，且已從早期的軍事國防發展至一般民眾皆可觸及的消費性電子市場。從 WTC(Wicht Technologies Consulting)2004 至 2009 年 MEMS 慣性感測器的市場評估報告[1]中可發現，慣性感測器在市場上總值超過 13 億美元如(圖 1-1)，且加速度計在消費性電子這一環有達 33%的年複合成長率(CAGR)，而廣大的慣性感測器市場也成了此次研究的主要動機。

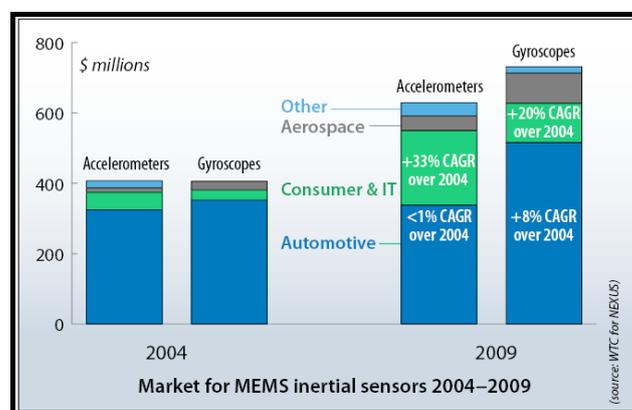


圖 1-1 2004 - 2009 MEMS 慣性感測器市場[1]

慣性感測器是發展許久的產品，其累積技術相當成熟，故為了投入市場競爭，先了解市場上的情況是必要的；本實驗室針對慣性感測器這一領域，在美國專利局作了搜尋，在大約 258 篇的相關專利中，美國 Analog Device Inc. 這家公司佔了最多的專利篇數(約 38%)(圖 1-2)，且其發展的慣性感測晶片在市場中也具有相當低的價格，能將各型的加速度計與陀螺儀單價壓至 10 元美金以下，並維持相當好的性能，如加速度計 ADXL103、323 系列皆有超過 1kHz 的工作頻寬、與 300mV/G 以上的靈敏度如表 1-1[2]，而能讓 ADI 成功地在慣性感測器市場上佔有一席之地的關鍵，莫過於其降低了慣性感測器的製作成本，成功的整合慣性感測器中最難整合的電路與感測結構部份。

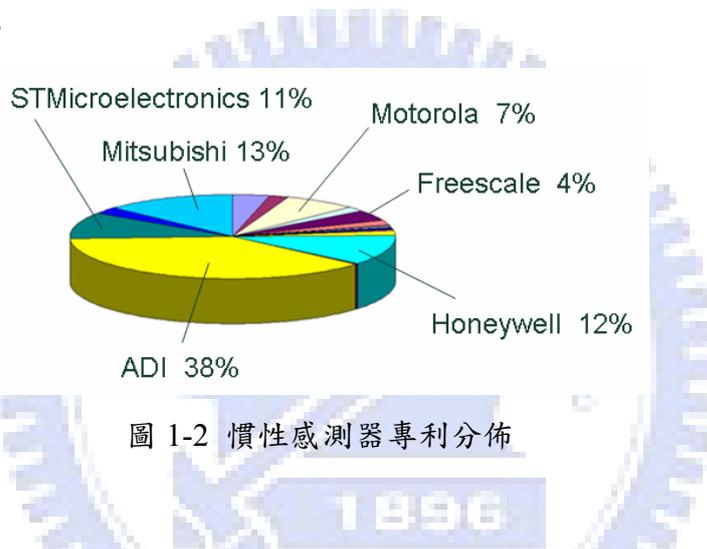


圖 1-2 慣性感測器專利分佈

表 1-1 ADI, ADXL 系列加速度計性能與價格[2]

Type	# of Axes	Range	Sensitivity	Band Width (kHz)	Price
ADXL103	1	±1.7g	1000 mV/g	2.5	\$7.75 USD
ADXL323	2	±3g	300 mV/g	1.6	\$3.50 USD
ADXL330	3	±3g	300 mV/g	1.6(XY) 0.55(Z)	\$5.45 USD

如前段文所述，ADI 成功地佔據慣性感測器大部分市場，乃在於其公司能開發自我的製程以整合 MEMS 結構體與 CMOS 感測電路；在 1994 年以前，大部份的加速度計皆著重於性能的提升，藉由設計或製程上的改良來提升感測器製作的良率，當時的觀念仍停留在微機電製程與電路製程分開進行且各自改進，待製作好元件後，再將感測電路與微機電結構做結合，而往往也正因為結合的製程變異較大，感

測器的性能一直無法增進，成本也無法有效地降低；ADI 在 1994 年提出了整合性製程 iMEMS(integrated MEMS)[3][4]的觀念，藉由電路製程與 MEMS 製程的交互進行，成功地降低感測器的製作成本，也將原本兩個不同領域的製程(CMOS 和 MEMS)合併在一起，此整合性的觀念衝擊了市場，也為感測器的製作帶來革命性的改變，更成為近年來慣性感測器努力發展的方向。

1.2 文獻回顧

1.2.1 加速度計操作原理

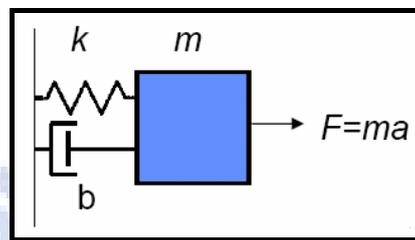


圖 1-3 加速度計操作原理

如上圖所示為一帶有阻尼的質塊運動系統，當此質量塊受到一外在加速度時，其運動式與質量、彈簧、阻尼有關，可表示如下；其中 m 為質量塊的質量(kg)， b 為系統等效阻尼($N/(ms^{-1})$)， k 為懸吊系統的彈簧常數(N/m)。

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + kx = m \cdot a_{external} \quad (式 1-1)$$

透過 Laplace Transform 將此運動式表示成；

$$\frac{X(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + s \cdot \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (式 1-2)$$

其中系統共振頻率 $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ，Quality Factor，與系統阻尼質量塊、共振頻率有關，

當系統工作頻率遠小於共振頻率時可推得質量塊位移量 $x \approx \frac{a}{\omega_0}$ ，由此式可看出系

統受到加速度時，與其造成的位移成正比的關係，藉由此位移變化造成的電容、電阻或溫度的改變，經由電性的輸出來判斷外在環境給予加速度的大小，其感測流程如(圖 1-4)所示，此加速度透過質量塊轉換成慣性力($F=ma$)，再經由懸吊系統

轉換成位移變化($x=F/k$)，此位移變化帶動其餘參數的改變，最後藉由電路將此改變量讀出，完成加速度計的感測。

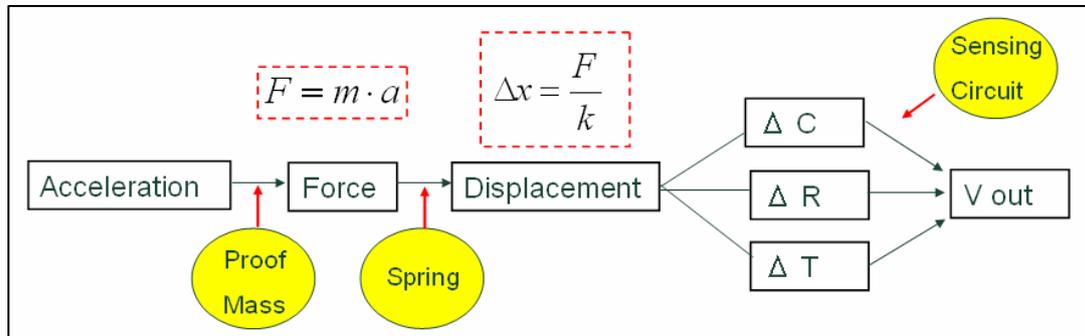


圖 1-4 加速度計感測流程

1.2.2 加速度感測方式

現今市面上加速度計所使用的感測方法主要分為壓阻式、熱汽泡式及電容式三種，分別將不同的物理量轉換成可讀出的電子訊號，各感測原理簡述如下；

(i) 壓阻式：

如圖 1-5 為壓阻式加速度計[5]，當系統受到外在加速度時，透過懸吊系統(此範例為一懸臂)質量塊因慣性力產生位移，造成彈簧上的應變，此懸吊系統造成的應力，導致電阻產生 ΔR 的變化，而透過惠斯同電橋等簡易感測電路，可將電阻的變化讀出相對應的電壓值，此感測方式最大優點在於不需過於複雜的結構及電路便可同時量測三軸的加速度。

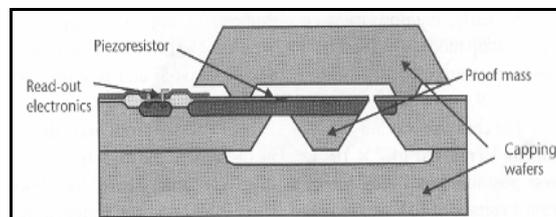


圖 1-5 壓阻式加速度計[5]

(ii) 熱汽泡式

熱汽泡式加速度計是近年來很新的概念，如(圖六)為清華大學 Bruce 在 2006

年提出的熱氣泡式加速度計[6]，其利用加熱流體，產生一氣泡當作虛擬質量塊，當系統收到平面上的加速度時，氣泡產生傾斜倒向兩旁的加熱器(heater)，造成熱傳環境的改變，使流體在不同的區塊有相對的溫度差，藉由讀取溫度的改變可得到相對應的加速度值，其感測優點在於無質量塊的存在，不需額外的後製程來釋放機械可動結構，但其需加熱的特性造成需要較大的操作電流，與一般的電路不相容，且氣泡的頻率響應極差，只能達到數十赫茲，對溫度敏感；而這些限制，也讓此感測原理目前較難成功的打入市場。

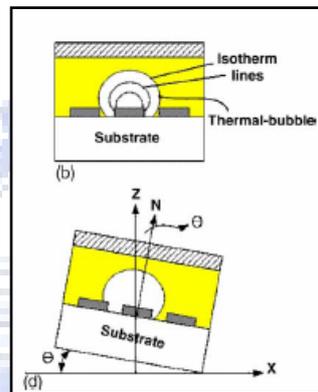


圖 1-6 熱氣泡式加速度計[6]

(iii) 電容式

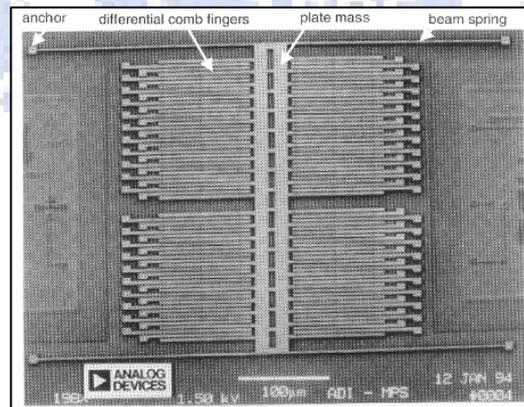


圖 1-7 電容式加速度計 ADXL 50 [7]

如圖 1-7 所示為 ADI 在 1994 年發展的電容式加速度計 ADXL 50，當系統受到加速度時，中間的感測質量塊會因慣性力($F = m \cdot a$)，透過懸臂彈簧帶動兩旁梳狀結構的移動，使平行電容板的間距產生變化，利用不同的電容值來得到相對應的量測訊號(電壓值)，藉以判讀加速度的大小。電容式加速度計是目前市面上最常見

的感測方法，此感測方式較不受外在環境因素影響、且具有高頻寬的優點，但由於電容變化量極小，往往需較複雜的感測電路來做去除雜訊、同步解調的工作。設計與製作的複雜度也較其餘兩種感測方式來得高。

綜合上面所述三種感測方式，謹以表 1-2 來作簡單比較。

表 1-2 加速度計感測原理比較表

	壓阻式	熱氣泡式	電容式
靈敏度	~ 200 mV/G	0.9 °C /G	~1000 mV/G
工作頻寬	高 ~ 1 kHz	低 < 30 Hz	高 ~ 3 kHz
受環境影響	低(惠斯同電橋)	高(對溫度敏感)	低(差動對感測)
CMOS 相容性	高(結構、電路簡單)	低	高(結構、電路複雜)
解析度	~ 100 mg/√Hz	~ 1 mg/√Hz	~ 0.2 mg/√Hz
市佔率	15 %	~1 %	85 %

從上表可看出壓阻式與電容式相較於熱氣泡式的優勢，且此次研究基於低成本的考量，考慮以 CMOS 相容性高的感測方式為主，而壓阻式與電容式都可以有不錯的工作頻寬與靈敏度，但電容式有一較大的優點在於其不像壓阻式有感測電阻的存在，大幅降低了雜訊的程度，具有更好的解析度，故綜合上述的優點，此次研究以電容式加速度計為發展主軸。

1.2.3 MEMS v.s CMOS MEMS

(i) MEMS 電容式加速度計

MEMS 技術為最早製作電容式加速度計的方式，其透過體型微加工(Bulk Micromaching)或面型微加工(Surface Micromaching)兩種方式製作感測結構再配合外加的電路完成製作，分別以下面兩例為代表；1990 年 Rudolf 提出的單軸差動對電容加速度計[8]，由於追求較高的靈敏度(2fF/G)，其使用體型微加工的方式蝕刻

矽以製作出較大的感測質量塊如圖 1-8(a)，並使用 Pyrex Glass 此種與矽之熱膨脹係數較為接近的材質做為上下電極，利用陽極接合後完成上下平行電極板的製作；體型微加工配合陽極接合有成本過高的缺點，有鑒於此，Crist 在 1995 年嘗試使用面型微加工的方式製作出雙軸的電容式加速度計[9]，由於電容感測面積較小，且雙軸懸吊系統設計不易，靈敏度($\sim 1\text{fF/G}$)無法提升至體型微加工的等級；因此，成本與性能的相互矛盾，讓 MEMS 技術所製作的電容加速度計遇到了瓶頸，且最大關鍵在於外加電路至微機電結構需另外的接線，其伴隨著極大的寄生電容，此讓 MEMS 技術提高製作成本的同時，並無法如預期讓性能也有效的提升。

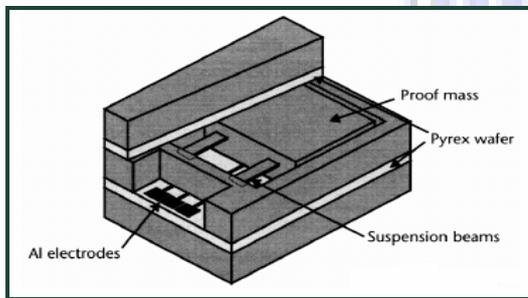
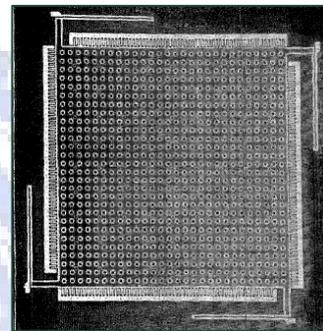


圖 1-8 (a) 體型微加工製作電極板[8]



(b)面型微加工雙軸加速規[9]

(ii) CMOS-MEMS 加速度計

由於電容感測方式搭配電路是必要的，相較於 MEMS 製作的電容加速度計，CMOS-MEMS 可將原本的電路合併在感測結構附近，此舉拉近了電路與結構體的距離而大大地減少寄生電容，成本的優勢也因本來就已量產的 CMOS 電路更加明顯，在量產能力與產品性能可同時提升的情況下，CMOS-MEMS 相對於 MEMS 的優勢是顯而易見的。

如圖 1-10，CMOS-MEMS 最典型的例子莫過於 ADI 在 1994 年發展的單軸加速度計 ADXL50，其提出 iMEMS[3][4]的觀念，在製作 CMOS、Bipolar 等感測電路的同時，亦交互進行了 MEMS 結構體的製作，並在製作完成後，保護住電路部份，蝕刻 MEMS 區域以釋放可動機械結構，黏上第一層開好 MEMS 區域的膠帶，在整片晶片上再黏上第二層膠帶，最後從背後切割晶圓，完成加速度計的製作。

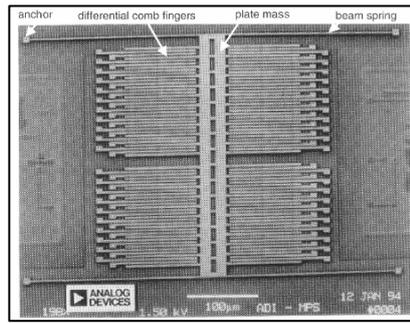


圖 1-9 ADI 電容式加速度計 ADXL50[7]

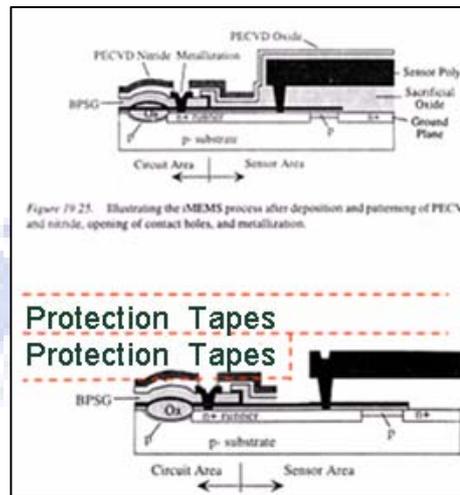


圖 1-10 ADI, iMEMS 製程[3][4]

在此 iMEMS 的觀念提出後，CMOS-MEMS 開始吸引大部分人的目光，但雖然 CMOS-MEMS 所發展出來的電容加速度計已達到低成本的要求，卻也因為結構設計遷就於 CMOS 製程，在各層材料皆很薄(<1um)的情況下，電容感測面積減少，靈敏度也跟著下降，於是電容式加速度計轉為在 CMOS 製程平台去做延伸發展，大致可以將文獻所用製程技術分為下面五類：

- (a) SOI-MEMS
- (b) UV-LIGA
- (c) Metal Electroplating
- (d) Bulk Micromaching
- (e) Standard CMOS Process

以下就此常見的五類 CMOS-MEMS 做簡單介紹；

(a) SOI - MEMS

如圖 1-11 所示為 Brosnihan 在 1997 年提出的 SOI-MEMS 電容感測器[10]，其先利用 SOI(Silicon On Insulator) Wafer 製作好 CMOS 電路，同時製作感測結構，由於 SOI 本身的特色造成結構深達 45um，大大提升了電容的感測面積，也由於其性能表現良好，一直到 2006 年仍有許多發展在 CMOS 平台上的 SOI-MEMS 提出改進的製程，如 Hudson 提出的 SOI-MEMS 慣性感測器[11]，其也在 CMOS 平台上作設計與整合。

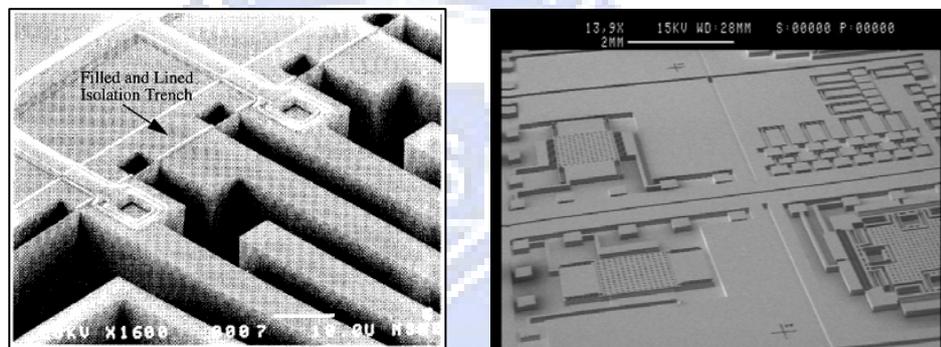


圖 1-11 (a) SOI-MEMS Inertial Instrument[10] (b)SOI-MEMS Inertial Array[11]

(b) UV-LIGA

如同 SOI-MEMS，為了增加 CMOS-MEMS 裡梳狀電容的感測面積，採用高深寬比製程 UV-LIGA 也是可行的方式，且深度可達 100um[12]，其結合 LIGA、犧牲層與標準 CMOS 製程，但其在後製程釋放機械結構時需較特殊的光罩保護電路的部份，且整體而言使用此高深寬比製程是相當昂貴的，靈敏度提升的同時，成本卻也提高了許多倍。

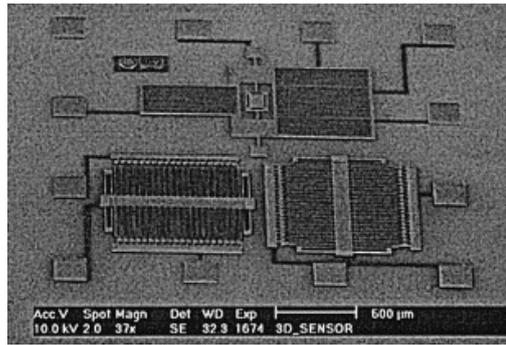


圖 1-12 CMOS 製程結合 UV-LIGA[12]

(c) Metal Electroplating

在 CMOS 電路上利用金屬電鍍也是製作整合式加速度計的方式，如 Michaelis 等人在 2000 年的金屬電鍍加速度計[13]，其在已製作好的電路上，沉積光阻當作犧牲層，再以 Ti/Au 作為電鍍的黏著基底，鍍上金屬(Au)並移除犧牲層完成製作，其製程溫度不高有其與 CMOS 整合的優勢，但遷就於電鍍的線寬(>3μm)，故電鍍的方式仍無法在不佔用晶片面積的情況下製作出較佳的加速度計。

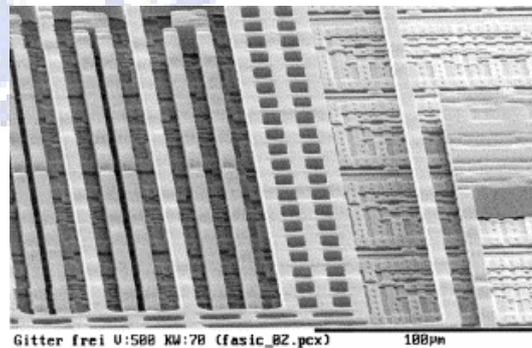


圖 1-13 在 CMOS 電路上電鍍金屬結構[13]

(d) Bulks-DRIE Si

Si 是半導體中最常見的材料，在矽晶片上利用體型微加工的方式做出感測結構也是最直接的思考方式，以美國卡內基大學 Fedder 實驗室所研發的 Si 加速度計為代表[14][15]，其在已製作好的 CMOS 電路上，利用 DRIE 與背向蝕刻方式如圖 1-14(a)，製作出深寬比達 25 的 Silicon 加速度計，且也因 DRIE 及背向蝕刻而拉開感測結構與基底的距離達 30μm，將寄生電容降低至 1.2fF 的等級。

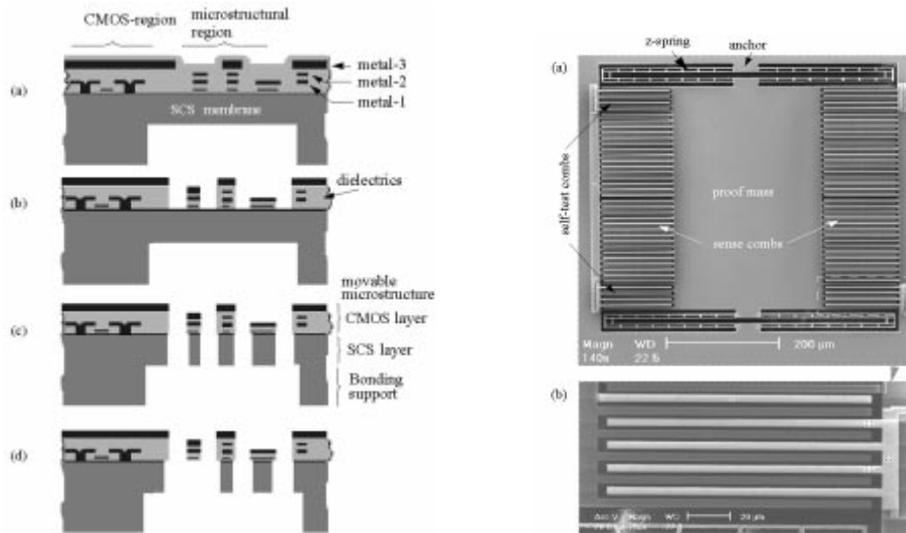


圖 1-14 (a) CMOS 配合背向蝕刻與 DRIE 製程 (b)Z 軸 CMOS-MEMS 加速度計[14]

(e) Standard CMOS-MEMS

前述四種製程方式，都是為了增加電容的感測面積以改善 CMOS-MEMS 加速度計中靈敏度不佳的特性($\sim 0.5\text{fF/G}$)，故在原有的 CMOS 製程後再做另外的發展或特殊後製程，而這些製程改變都成為增加成本的變因，於是 2002 年美國卡內基大學 Fedder 實驗室嘗試使用標準的 CMOS 製程製作單軸的電容式加速度計[16]，此設計只需簡單的兩道後製程(乾蝕刻)以釋放感測結構，若以變動 CMOS 製程多寡來當作判斷標準，Fedder 實驗室此設計可以說是將電容式加速度計的製作成本降至最低，其幾乎不去改變原有的 CMOS 製程，單就設計遷就製程上表現不佳的地方，如圖 1-15(b)所示為 Curl Matching 的概念[16]，透過此固定與感測結構同時懸浮的概念，成功的補償了殘留應力對結構的影響，維持 CMOS-MEMS 中不錯的電容感測面積。

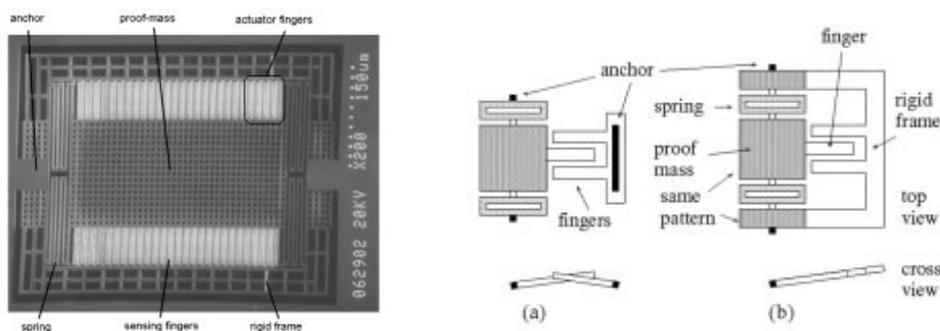


圖 1-15(a) CMOS-MEMS 單軸加速度計 (b) 特殊設計補償電容覆蓋面積

綜觀上述五種 CMOS-MEMS，不難察覺若在強調量產能力的前提下，SOI-MEMS、UV-LIGA 皆因材料與製程本身昂貴而退出了市場競爭的行列，電鍍的方式也因製作線寬而無法縮小其晶片佔用面積，在 CMOS-MEMS 寸土寸金的觀念裡，要在市場上發展產品只能回歸到原始的 CMOS 製程，盡量在設計上去遷就現有的製程，但也因現在標準的 CMOS 製程如 TSMC 2P4M CMOS MEMS，金屬大多採用阻值較低的材料(Al)，其與犧牲層(Oxide)的熱膨脹係數有較大的差異{25 v.s 0.4 ($1/^\circ\text{C}$)}，造成釋放結構後的殘留應力極大，嚴重影響電容式加速度計中各元件的翹曲程度，進而造成電容最重要的感測面積無法有效評估，此瓶頸也讓電容式加速度計的性能無法更進一步的提升。有鑒於此，ADI 於 2004 年直接從製程材料上作改善[16]，採用多晶矽(Polysilicon)取代標準 CMOS 製程中的金屬(Al)，自己開發出一套 Poly MEMS 製程，結構體厚度達 4um；藉著 Poly 本身在結構上良好的表現，且與氧化矽熱膨脹係數接近的特性，減少殘留應力對結構的影響，也將 CMOS-MEMS 的加速度計靈敏度提升至 1 fF/G 以上。

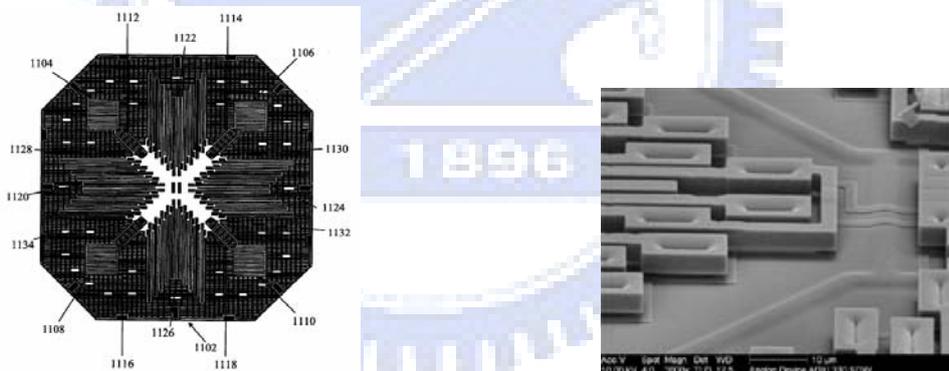


圖 1-16 (a)ADI, ADXL203[17]

(b)ADI, ADXL330[2]

(iii) 技術演進

從前述文獻回顧可看出，為了降低成本，將電路與微機電結構同時整合製作在晶片上，是必然的趨勢，技術演進也從一般的 MEMS 方式發展至 2002 年標準 CMOS-MEMS，到 2006 年 ADI 自我開發的 Poly CMOS-MEMS，改進也從結構設計回歸到製程的提昇，畢竟以微機電設計去遷就 CMOS 製程所能提升的幅度有

限，故製程開發便扮演了十分關鍵的角色，其穩定性及複雜度會影響到產品的開發成本與良率，故規劃製程成為之後非常重要的課題。

1.3 研究目標

此次研究目標在於以兩種不同以往的 CMOS 製程，建立起 CMOS-MEMS 電容式加速規的設計分析、製作與量測技術，期望藉由此兩種製程，維持低成本的量產能力進而提升加速規的性能。傳統的 CMOS 製程，採用鋁(Al)當作導線層，由於其 CTE 值(熱膨脹係數)與氧化矽的差距，造成在製作 MEMS 結構體時不能達到我們所需要的標準(低殘留應力)，於是此次研究在各種半導體材料中找尋適合做結構體的材料如多晶矽(Polysilicon)、鎢(Tungsten)等；其中又以多晶矽的表現最好，鎢則具有高密度、低熱膨脹係數($4.5\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)的特色，在電容式加速度計中具有可發展的潛能，於是分別以多晶矽和鎢作為結構體材料，期望此兩種製程能改善 CMOS 加速規的性能，並以整合微感測結構與電路、達成批次生產為目標。並在設計上以三軸加速度計 ADI, ADXL330 作為規格要求的標準，其靈敏度 0.7 fF/G ，頻寬 1.6 kHz ，量測範圍 $\pm 3\text{ G}$ 。

第二章 CMOS MEMS 電容式加速度計

2.1 電容式差動對

電容式差動對為最常見的感測方法，由 Rudolf 在 1990 年提出[8]，其可以消除共模的訊號(Common Mode)，減少外界環境如溫度、製程變異的影響，也可提升訊號兩倍，大致可以分為兩種，上下型與左右型如圖 2-1(a)(b)。

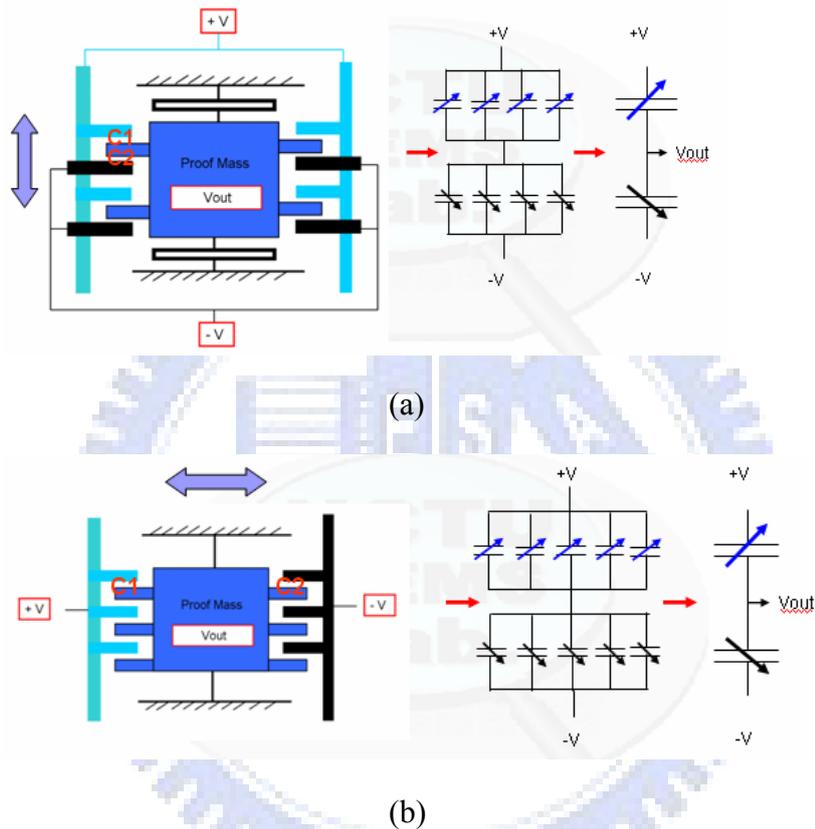


圖 2-1 (a) 上下型差動對(Gap Closing) (b)左右型差動對(Area Overlapping)

結構移動的距離與電容的變化的關係式可以表示成

$$\text{上下型 } \Delta C = 2\varepsilon \cdot \frac{A \cdot \Delta x}{d^2 - \Delta d^2} \approx 2\varepsilon \frac{A \cdot \Delta x}{d^2} \quad (\text{當 } \Delta x \ll d) \quad (\text{式 2-1})$$

$$\text{左右型 } \Delta C = -\frac{2\varepsilon \cdot t}{d} \Delta x \quad (\text{式 2-2})$$

左右型相較於上下型有完全線性的優勢、且同樣的 Finger 配置數目，左右型具有較多的等效感測對(如圖 2-1)。

2.1.1 CMOS-MEMS 的差動對

如前節所述，儘管左右型的配置效率較高，但在 CMOS-MEMS 中仍多採用上下型 (Gap Closing) 差動對，主因為 CMOS 製程受限於各層材料的不同，且熱膨脹係數差異過大，元件翹曲無法使感測面積與加速度有相關且正確的趨勢，無法從感測電容上作判讀，如圖 2-2。

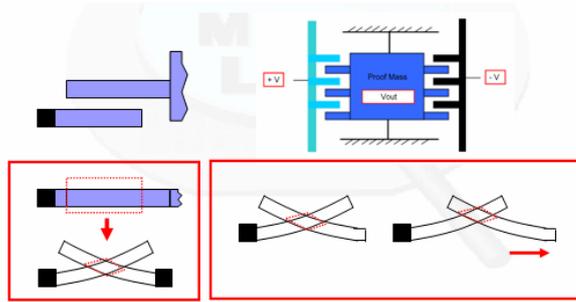


圖 2-2 左右型差動對無法正確判讀加速度值

在選用上下型差動對後，其推導公式如下；假設忽略掉微弱的邊緣效應 (fringing effect)，即電荷會在邊緣部份不均勻的分布現象，電容可表示成 $C = \epsilon_r \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$ ，假設

質量塊受一加速度時，產生一微小位移量 Δx ， C_1 與 C_2 為下圖中兩個相鄰電容，則此微小位移量的變化將造成 $C_1 = \epsilon_r \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d + \Delta x}$ ， $C_2 = \epsilon_r \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d - \Delta x}$ ，則量測到的電容

$$\Delta C = C_1 - C_2 = 2\epsilon_r \epsilon_0 \cdot \frac{A \cdot \Delta x}{d^2 - \Delta x^2} \Rightarrow \Delta C \cdot d^2 - 2\epsilon_r \epsilon_0 A \cdot \Delta x - \Delta C \cdot \Delta x^2 = 0 \quad (\text{式 2-3})$$

把較小的 $\Delta C \cdot \Delta x^2$ 省略掉，可以得到

$$\Delta x \approx -\frac{d^2}{2\epsilon_r \epsilon_0} \Delta C \quad (\text{式 2-4})$$

故所量測到的加速度 a ：

$$a = \frac{F}{m} = \frac{k_s \cdot \Delta x}{m} = -\frac{k_s \cdot d^2}{2m\epsilon_r \epsilon_0} \Delta C \quad (\text{式 2-5})$$

此式可看出加速度與電容變化的線性關係，藉由感測電路量測電容變化，來得到加速度的值。

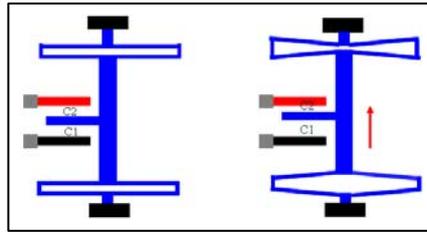


圖 2-3 Gap Closing 差動對電容感測示意圖

2.1.2 多軸耦合的消除

對於單軸加速規而言，由於只考慮感測軸的靈敏度，故懸吊系統在感測軸和非感測軸的剛性差異很大，可減少他軸的耦合；但製作多軸(雙軸以上)加速規時，在盡量減少結構佔用面積的前提下，多軸使用同一個感測質量塊是必然的趨勢，而為了維持各軸的良好靈敏度，懸吊系統在各軸維持相同的剛性，耦合相對於單軸嚴重許多，如何減少非感測軸的耦合來提升感測的準確性，便是差動對的負責工作，減少耦合的機制如下。

$$\text{如式 2-5 所述, } a = \frac{F}{m} = \frac{k_s \cdot \Delta x}{m} = -\frac{k_s \cdot d^2}{2m\epsilon_r \epsilon_0} (C1 - C2), \text{ 此感測到的加速度與差}$$

動對兩平行電容板的電容差成正比，當感測加速度在非感測軸(z or y)上造成些微移動時(如圖 2-4)，C1 變成 $C0 + \Delta C$ ，C2 亦變成 $C0 + \Delta C$ ，故 $C1 - C2$ 為持定值，感測到的加速度不會受到他軸造成的移動而有所增減(視為 common mode 而消去)，故使用差動對有其減少耦合的重要性。

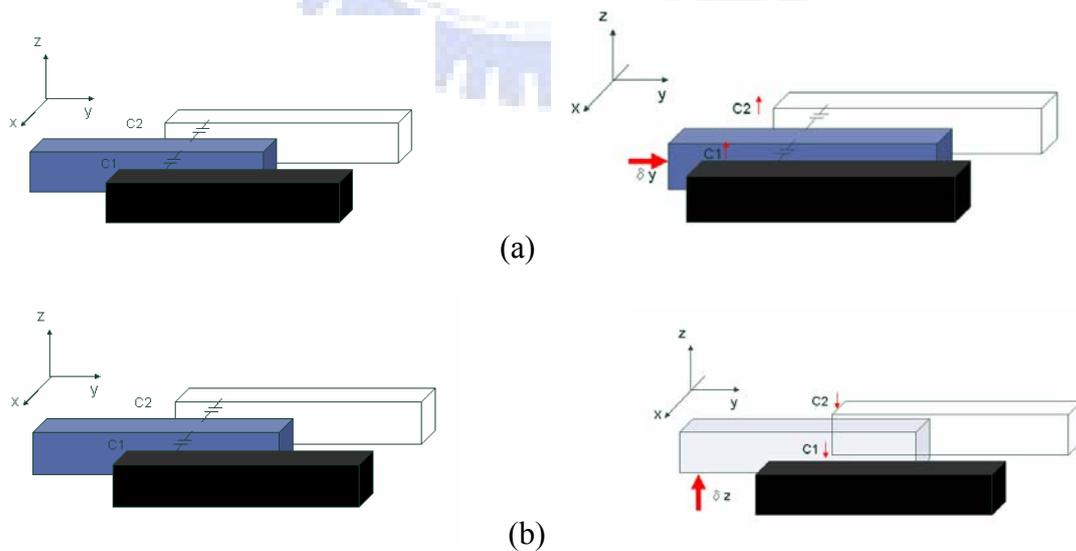


圖 2-4 (a) y 對 x(感測軸)耦合 (b) z 對 x(感測軸)耦合

2.2 概念設計

此次研究目標為單、雙軸的電容加速度計，並以 ADI 的 ADXL330 三軸加速度計的靈敏度(0.7fF/G)、頻寬(1.6kHz)、解析度(280 μ g/ \sqrt Hz)作為設計規格。

2.2.1 單軸加速度計

CMOS-MEMS 由於受限於半導體的材料，使得 MEMS 結構完成後有很大的殘留應力，此應力造成懸吊系統的非線性，也減少了電容的感測面積，故設計上從內部往外延伸如圖 2-5，如 Fedder 實驗室 2002 年提出的概念，以避免電容感測面積的減少，並增加 Stopper 防止短路，以及 Actuator 作為校正與測試之用，MEMS 佔有面積以單軸加速度計 ADXL50 為標準，在 550 x 500 μ m 內去作設計。

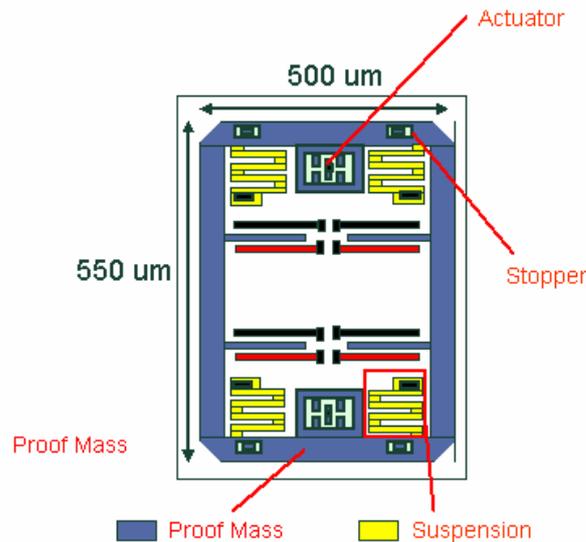


圖 2-5 單軸電容式加速度計概念圖

2.2.2 雙軸加速度計

如同單軸的設計，由內往外延伸，小黑色方型為固定點(Anchor)，將感測 Finger 放置四個角落，雙軸使用同一塊的感測質量塊，並帶有 Stopper 與 Actuator，且為了雙軸達到同樣的靈敏度與頻寬，採用蜿蜒式彈簧與懸臂串聯的方式，如圖 2-6，晶片面積以 ADXL330 為標準，在 700 x 700 μ m 內去作設計。

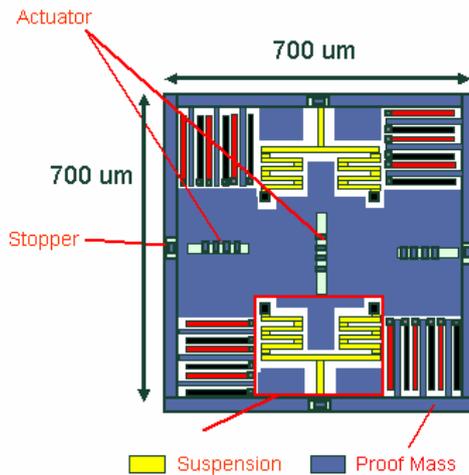


圖 2-6 雙軸電容式加速度計概念圖

2.3 設計流程

結構設計上大概有四個主體的尺寸要決定，質量塊、懸吊系統、感測懸臂及致動器，如圖 2-7 流程所示，先決定質量塊的大小；依照設計概念擺好質量塊，依規格要求的頻寬($\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$)去設計彈簧，以得到想要的彈簧常數 K 值，並以有限元素分析軟體 ANSYS[18]作模擬；接著決定感測懸臂的尺寸，設計原則為“在最小的佔用面積裡獲得最高靈敏度”，再針對此懸臂尺寸受殘留應力的影響去做調整，讓其感測出來的電容要能達到規格要求的靈敏度(0.7fF/G)，若無法達成，再回去調整懸吊系統的 K 值；最後即致動器大小的決定，以能推動 10G 加速度所需距離為目標，最後完成光罩的繪製。

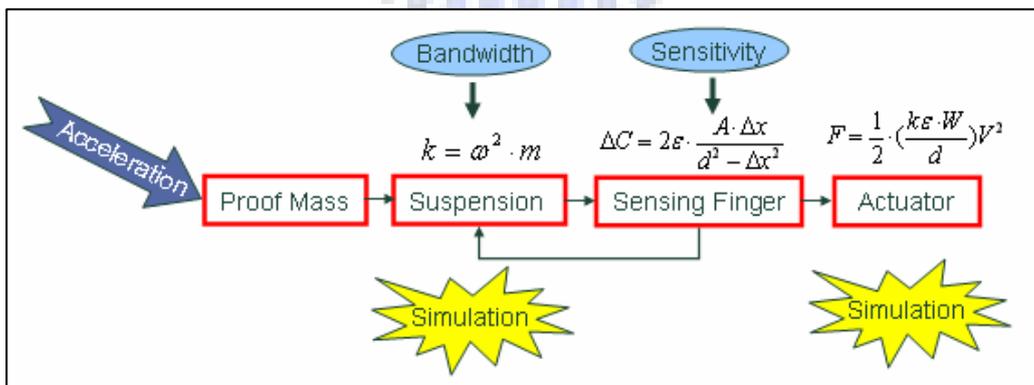


圖 2-7 設計流程圖

2.4 結構設計

如前節所述，結構設計分四個主體，感測質量塊、懸吊系統、感測懸臂與致

動器，其說明如下；

2.4.1 感測質量塊

單軸的感測質量塊，以 ADXL150 單軸加速度計 0.22 μg [9]的質量塊為參考如圖 2-8(a)，為求較大的靈敏度，單軸放上約 0.5 μg 的質量塊，雙軸則以 ADXL203 的 2.8 μg [10]為參考如圖 2-8(b)，計劃放上 3 μg 的感測質量塊，來做後續的設計。

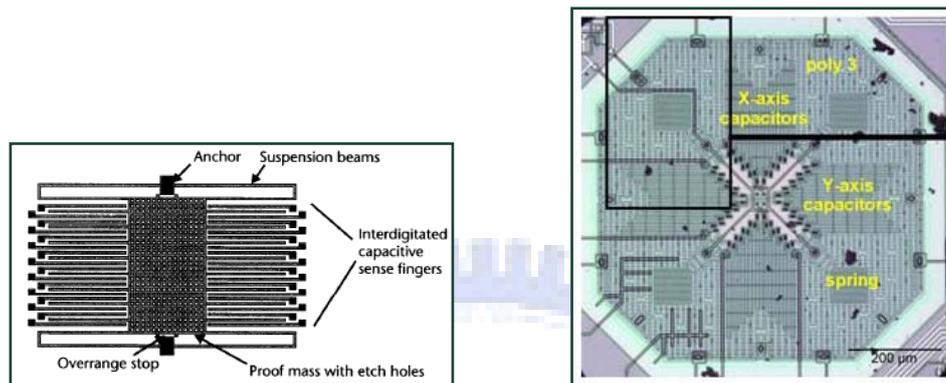


圖 2-8 (a) ADXL150 [9] (b) ADXL203 [2]

2.4.2 懸吊系統

懸吊系統的設計決定了加速規結構的剛性(彈簧常數 K 值)，由前述的感測質量塊與頻寬要求，我們可由式子 2-6 決定懸吊系統所需要的 K 值；

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{式子 2-6})$$

頻寬要求 1.6kHz，取 5 倍的頻寬當做結構所需共振頻率，單軸質量塊 0.5 μg ，雙軸質量塊 3 μg ；故單軸懸吊系統 K 值須大於 1.26 (N/m)，雙軸 K 值須大於 7.58 (N/m)，以這兩者作為最後產品懸吊系統剛性的要求；但由於研究目標為開發兩種製程，且此兩種製程皆未實現過，故希望第一批的設計能將產品的靈敏度推高至極限，待成功實現製程，製作出 CMOS-MEMS 加速規後，之後的設計再降靈敏度來求頻寬，故此研究中第一批試片的設計以降低懸吊系統的剛性為目標，在現有的製程線寬與尺寸限制下，將懸吊系統設計至可撓性最高，以 ADXL330 為例[10]，其彈簧常數約為 2.1(N/m)，設計上須要一個彈簧常數小於 2.1 (N/m)的懸吊系統。

懸吊系統依類型可分為懸臂型、方型、蜿蜒型三種如圖 2-8，由於 CMOS-MEMS

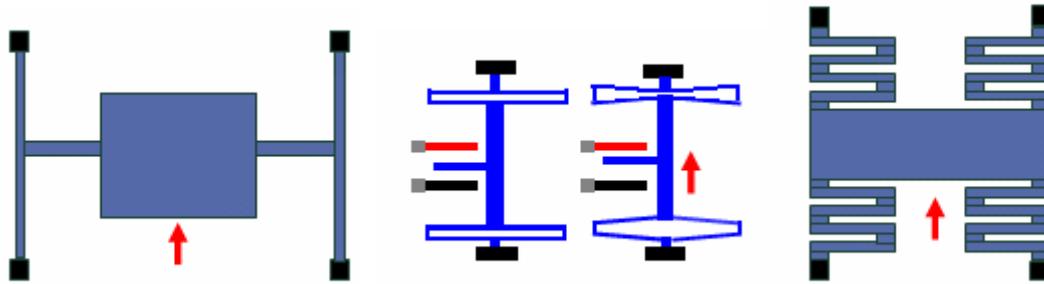


圖 2-9 (a) 懸臂型

(b) 方型

(c) 蜿蜒型

寸土寸金，懸吊系統的設計以[佔較少晶片面積達到較低的彈簧常數]為原則，三個種類各有以下優缺點；在同樣的 K 值下，方型與蜿蜒型佔用較少的晶片面積，且蜿蜒型四個固定點分散較不易使結構產生旋轉的運動，故最後採用蜿蜒型來達到有效利用面積的目的。

	懸臂型	方型	蜿蜒型
彈簧常數 K (N/m)	$\frac{E \cdot t \cdot w^3}{4L^3}$	$\frac{\pi^4 EWH^3}{6 \cdot 16L^3}$	$\frac{\pi^4 EWH^3}{6 \cdot 16L^3}$
優點	設計調整簡單	同樣 K 值佔用較少面積	同樣 K 值佔用較少面積 較容易配置
缺點	晶片面積利用不佳	旋轉共振頻率較低 易與直線運動耦合	較方形需兩倍 Anchor 點 增加雜訊來源

表 2-1 懸吊系統比較

(i) 單軸懸吊系統

此次研究在單軸上採用四個並聯的蜿蜒式彈簧(Serpentine)，以下列符號表示；

K_{1x} ，單軸加速度計在 x 方向的彈簧常數；

K_{1y} ，單軸加速度計在 y 方向(感測軸)的彈簧常數；

如前述圖 2-5 的單軸設計概念，在感測軸(Y 軸)，其單一個彈簧在 y 方向的彈簧常數 K_{1y} 可由方型彈簧如圖 2-10 獲得，下式表示方型彈簧常數；

$$k = \frac{\pi^4 EWH^3}{6 \cdot [(2L_1)^3 + (2L_2)^3]} \quad \text{(式 2-7)[4]}$$

上式 E 為楊氏係數， W 為彈簧臂的寬度， H 為材料沉基厚度， L_1 、 L_2 分別為圖 2-10 所示長度；

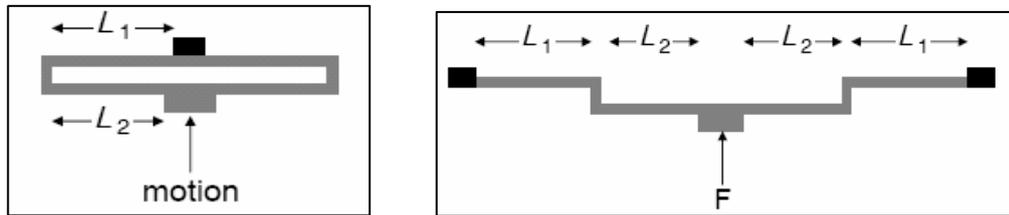


圖 2-10 (a) 方型彈簧示意圖

(b) 方型彈簧等效懸臂

假設將單一方型彈簧的彈簧常數設為 K_0 ，則此彈簧可視為兩個並聯的蜿蜒式彈簧，則單一蜿蜒彈簧常數可表示為 $K_0/2$ 如圖 2-11，在盡量不串聯過多彈簧的情況下(佔晶片面積)，四個 4 折式的彈簧、長(L_1 、 L_2) $100\mu\text{m}$ 、寬(W) $1.5\mu\text{m}$ 、厚度(H) $4\mu\text{m}$ 帶入上式 2-7，可達成單軸懸吊系統在感測軸(Y 方向)有 $K_{ly} = K_0/2 = 1.08 \text{ N/m}$ 的彈簧常數。其後並以 ANSYS 有線元素分析軟體做驗證。分別以**模態分析**與**位移分析**獲得兩個彈簧常數 $K_{\text{simulation}}$ 值如圖 2-12 與 2-13，模態分析得到在感測軸的共振頻率，配合已有的質量塊大小與 0.3714 的懸吊系統質量當作系統等效質量[18]，可得到彈簧常數 $k_0 = \omega^2 \cdot m$ ；位移分析則是由力與位移的比值來獲得 $k = \frac{F}{x}$ ，兩不同的模擬驗證方法分別可得到 1.19 與 1.18 (N/m)，和理論值 1.08 有約 14% 的誤差。

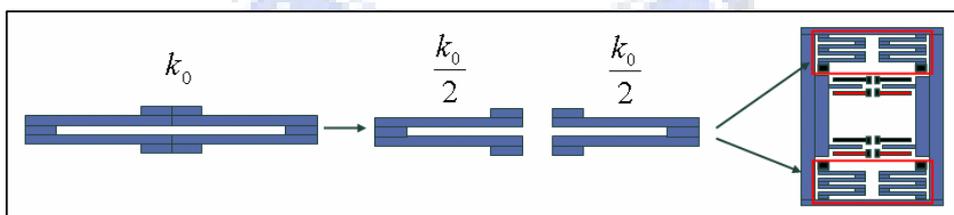


圖 2-11 蜿蜒式彈簧

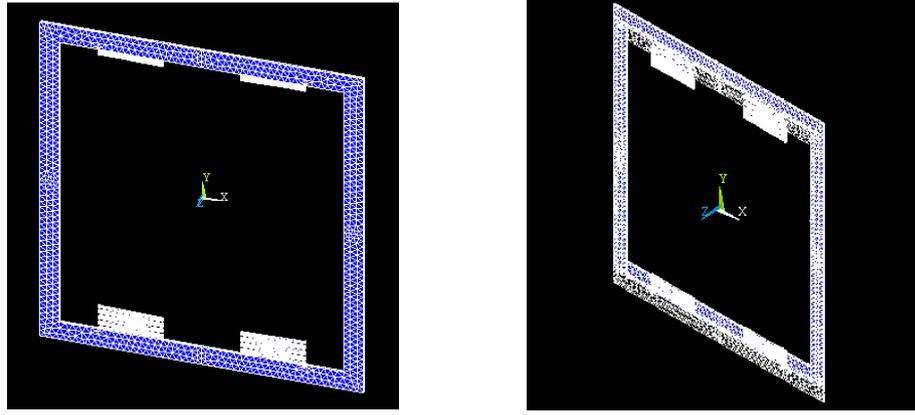
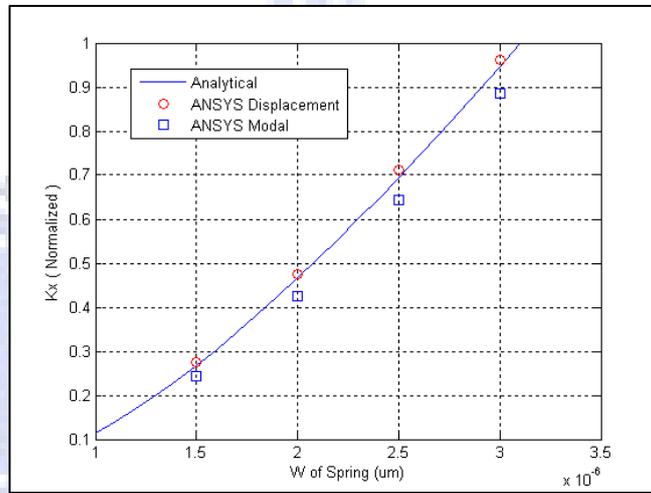


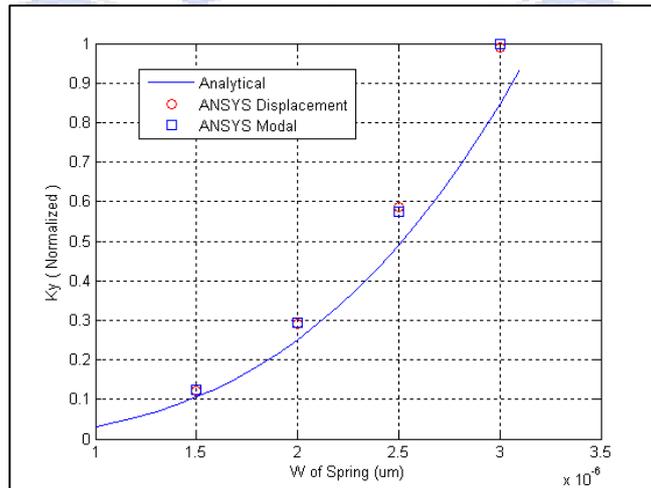
圖 2-12 (a)位移分析模擬得 $K_{1y}=1.18 \text{ N/m}$ (b)模態分析得 $K_{1y}=1.19 \text{ N/m}$

$K_{1x}=19 \text{ N/m}$

$K_{1y}=16.8 \text{ N/m}$



(a)



(b)

圖 2-13 (a) 懸吊寬度與 K_x 關係圖 (b) 懸吊寬度與 K_y 關係圖

以下列出單軸懸吊系統 30kHz 內的前六模態；

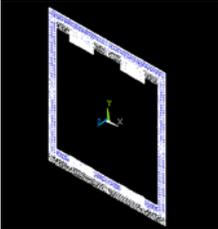
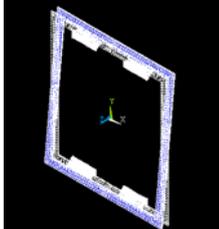
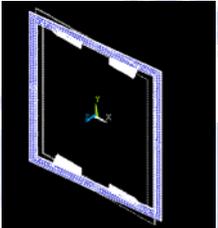
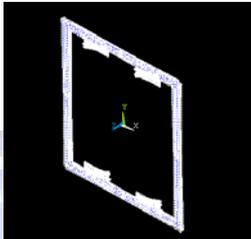
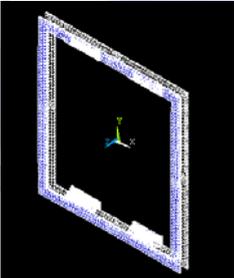
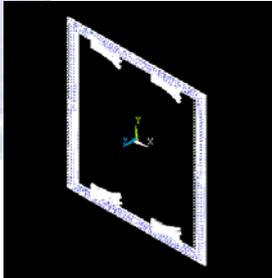
Modal Type	共振頻率 (Hz)	運動方向	Modal Type	共振頻率 (Hz)	運動方向
Modal 1	7279.4	延 Y 軸移動 	Modal 4	17458	延 X 軸轉動 
Modal 2	9438.0	延 Y 軸轉動 	Modal 5	22781.0	延 Z 軸轉動 
Modal 3	15449.0	延 Z 軸移動 	Modal 6	27366.0	延 X 軸移動 

表 2-2 單軸懸吊系統模態分析

由上表可發現，X 軸的共振頻率(27366Hz)與 Y 軸(感測軸)的共振頻率(7279.4)相差甚遠，可減少非感測軸對感測軸的耦合。

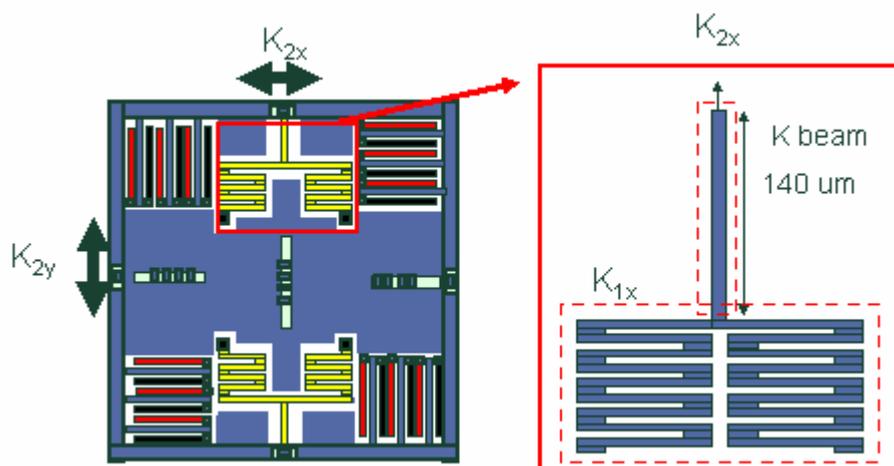
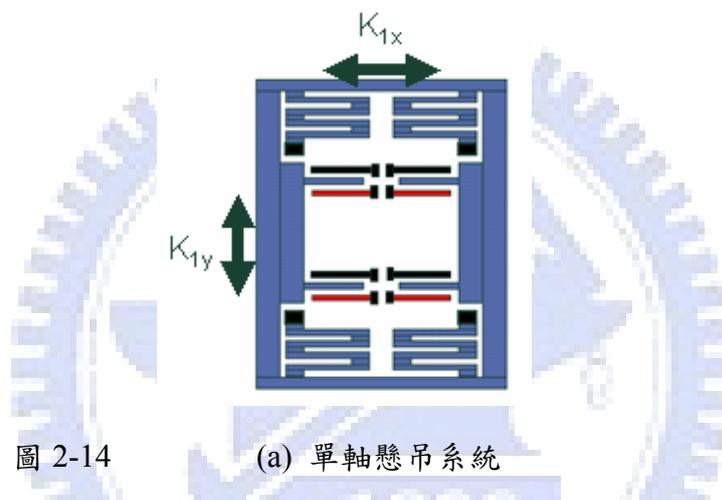
(ii) 雙軸懸吊系統

雙軸各軸彈簧常數分別以下列符號代表；

K_{2x} ，雙軸加速度計在 x 方向的彈簧常數；

K_{2y} ，雙軸加速度計在 y 方向的彈簧常數；

若直接將單軸的懸吊系統擺至雙軸有一很大的缺點，即單軸的懸吊系統在 x 軸方向的彈簧常數 K_{1x} 很大($\sim 18 \text{ N/m}$)，其目的是為了 y 軸運動不要受到 x 軸的耦合，但在雙軸系統裡卻是相反的，期望兩方向(X,Y)都是相當軟的彈簧常數以使得外界加速度解耦時在兩個方向($X\&Y$)有同樣的位移，一再的串聯並不是一個好的設計方式，故採用新型的彈簧設計讓雙軸在 x,y 兩方向都可以維持 1 N/m 左右的彈簧常數，如圖 2-12(b)將單軸的兩個蜿蜒式彈簧先並聯，再串聯一長條懸臂，此懸臂在 Y 軸運動時視為剛體，則雙軸 y 方向彈簧常數 K_{2y} 和單軸 y 方向彈簧常數 K_{1y} 一樣，在 X 方向則等效為 K_{1x} 和此根懸臂串聯(彈簧常數為 K_{beam})。



一個四折式蜿蜒彈簧與懸臂串聯視為雙軸在 x 方向的彈簧常數 K_{2x} ，可由下式的串聯彈簧算出；

$$\frac{1}{(K_{2x}/2)} = \left[\frac{1}{(K_{1x}/2)} + \frac{1}{K_{beam}} \right] \quad (\text{式 2-8})$$

由於雙軸在兩方向希望達到同樣的彈簧常數，配合單軸已有的彈簧常數，可從上式($K_{2y}=1.05$ ， $K_{1x}=18.9$ N/m)推出所須的懸臂彈簧常數 K_{beam} 為 0.56 N/m，配合製程已決定的厚度(4 μ m)，以懸臂的等效彈簧常數如式 2-9，可推出 $L=130\mu$ m， $w=2\mu$ m 時，可達到 0.56 N/m 的值。

$$K_{beam} = \frac{Etw^3}{4L^3} \quad (\text{式 2-9})$$

上式中，E 為楊氏係數，t 為結構厚度，w 懸臂寬度，L 懸臂長度。隨著懸臂長度的增長， K_{2y} 會逼近 K_{2x} ，如圖 2-15 所示，推論值的懸臂長度 133 μ m 與模擬結果有段差距，有限元素分析則是在 $w=2\mu$ m， $L=140\mu$ m 時兩個 x,y 方向可以得到相近的彈簧常數 1.1 N/m，如圖 2-16，此次研究先參考模擬出來的尺寸來繪製光罩，原因在於理論的推導為了簡化計算，省略了懸臂與蜿蜒彈簧中間的那根連接桿，推測此應為造成模擬(140 μ m)與理論(133 μ m)誤差的原因。

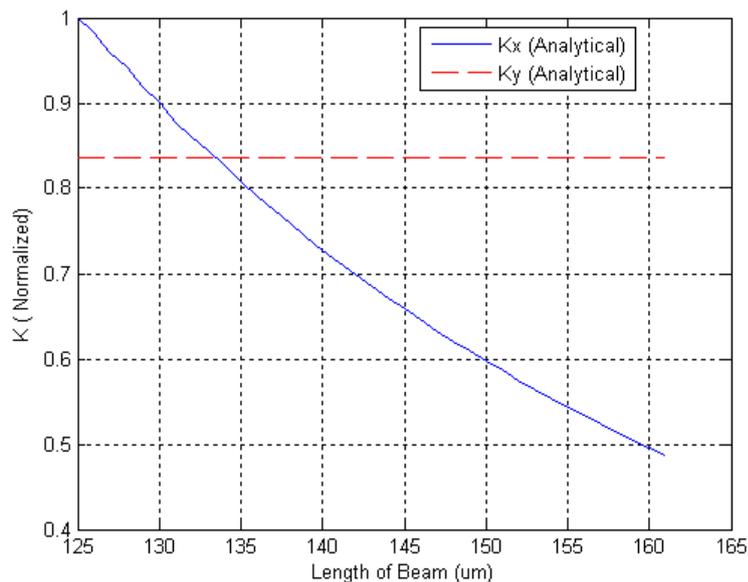


圖 2-15 串聯的懸臂長度與雙軸彈簧常數關係圖。



圖 2-16 (a) (b)

ANSYS 模態分析，雙軸系統在兩個感測軸都維持相近的共振頻率

(a) 雙軸系統 Y 方向共振頻率 $\omega=2855.5\text{Hz}$ (b) X 方向共振頻率 $\omega=2942.2\text{Hz}$

以下列出雙軸懸吊系統 10kHz 內的前六模態；

Modal Type	共振頻率 (Hz)	運動方向	Modal Type	共振頻率 (Hz)	運動方向
Modal 1	920.56	延 X 軸轉動	Modal 4	2855.5	延 Y 軸移動
Modal 2	1502.4	延 Z 軸轉動	Modal 5	2942.2	延 X 軸移動
Modal 3	2236.7	延 Y 軸轉動	Modal 6	3655.5	延 Z 軸移動

表 2-3 雙軸模態分析

由以上設計可得到單雙軸懸吊系統在各方向的 K 值；

(a) 單軸懸吊系統: X 方向(非感測軸)彈簧常數 $K_{1x}=17\text{N/m}$ ；

Y 方向(感測軸)彈簧常數 $K_{1y}=1.18\text{N/m}$ ；

(b) 雙軸懸吊系統: X 方向(感測軸)彈簧常數 $K_{2x}=1.16\text{ N/m}$ ；

Y 方向(感測軸)彈簧常數 $K_{2y}=1.09\text{ N/m}$ ；

(iii) Z 軸塌陷

在設計單雙軸加速度計時，由於一再的將 K_x 、 K_y 降低，卻也同時降低了在 Z 方向的彈簧常數，當結構受到重力或嚴重 Z 軸加速度時會造成結構與其下方的導線短路，故 Z 軸的塌陷希望維持在結構與基底距離($2\mu\text{m}$)的 2% 以內(40nm)，確保在靜態時，因重力的影響不會下陷超過 60nm ，此部份亦由有線元素分析來達成，使用之前模態分析的結果可得單軸 $K_z = 5.35(\text{N/m})$ ，雙軸 $K_z = 2.2 (\text{N/m})$ 。在重力影響下，Z 軸塌陷的情形，單軸系統靜置時(受 1G 重力)約有 1nm 的下降，雙軸系統靜置時(受 1G 重力)約有 20nm 的下降，皆在 40nm 的範圍內。

(iii) 頻率響應

由前面懸吊系統的設計，可以決定結構的頻率響應，此頻寬代表著此產品所可以應用的範圍；由於結構頻寬遠小於電路的頻寬，故可以結構體頻寬當作加速規的頻寬，以下列出各個加速度計在不同領域對頻寬的要求，而本研究所注重的消費性電子大約是在 2 kHz 以內。

Table 8.1 Typical Applications for Micromachined Accelerometers

<i>Application</i>	<i>Bandwidth</i>	<i>Resolution</i>	<i>Dynamic Range</i>
Automotive			
Airbag release	0–0.5 kHz	<500 mG	±100G
Stability and active control systems	0–0.5 kHz	<10 mG	±2G
Active suspension	dc–1 kHz	<10 mG	100G
Inertial navigation	0–100 Hz	<5 μG	±1G
Seismic activity			
Shipping of fragile goods	0–1 kHz	<100 mG	±1 kG
Space microgravity measurements	0–10 Hz	<1 μG	±1 G
Medical applications (patient monitoring)	0–100 Hz	<10 mG	±100G
Vibration monitoring	1–100 kHz	<100 mG	±10 kG
Virtual reality (head-mounted displays and data gloves)	0–100 Hz	<1 mG	±10G
Smart ammunition	10 Hz to 100 kHz	1 G	±100 kG

表 2-4 加速度計在各領域的頻寬[4]

(a) 單軸頻率響應(Poly MEMS)

單軸加速度計在感測軸的頻率響應如圖 2-17 所示，此單軸設計的共振頻率為 7279.4Hz，可用頻寬約為 5000 Hz。

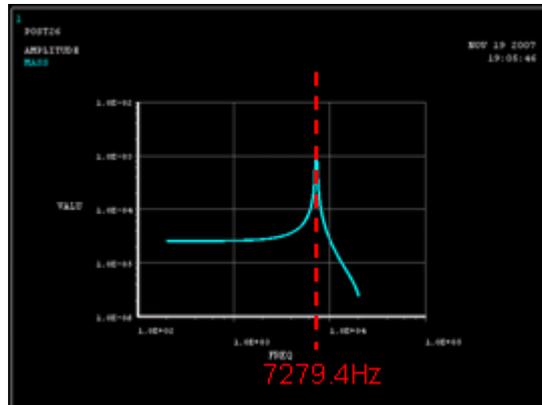


圖 2-17 Poly MEMS 單軸設計頻率響應

(b) 雙軸頻率響應(Poly MEMS)

如圖 2-18 為雙軸加速度計的頻率響應，此雙軸設計的共振頻率為 2855.5(X)、2942.2(Y)Hz，兩個維度維持差不多的可用頻寬 1.5K Hz。

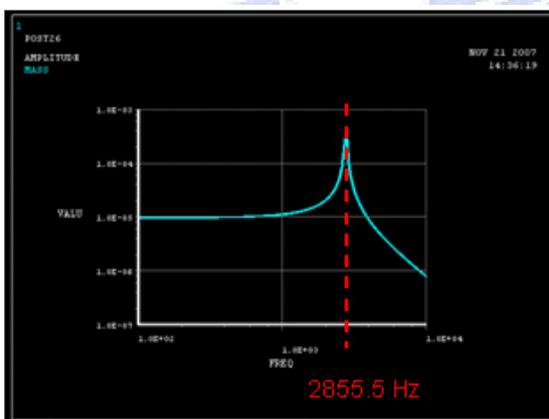
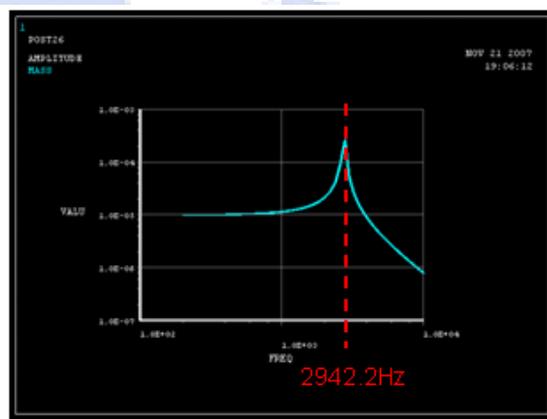


圖 2-18 (a)



(b)

(a) 雙軸頻率響應(X 軸) 共振頻率 2855.5Hz 頻寬 1500Hz

(b) 雙軸頻率響應(Y 軸) 共振頻率 2942.2Hz 頻寬 1500Hz

2.4.3 感測懸臂尺寸的決定

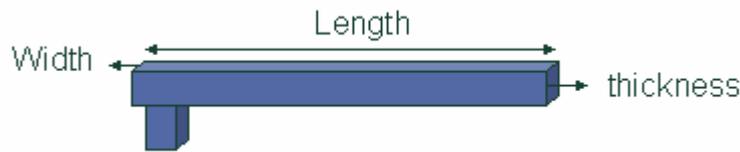


圖 2-19 感測懸臂尺寸

若以 L 、 w 、 t ，分別代表感測懸臂的長、寬、高(圖 2-19)，高為製程上已決定的厚度($4\mu\text{m}$)，於是 L 和 w 的決定會影響感測電容面積與晶片空間的配置，決定最佳尺寸的原則為[在固定的晶片面積內，得到最高的靈敏度(Sensitivity)]；而加速規靈敏度大致上可以由下式表示。

$$Sensitivity = \epsilon_r \epsilon_0 \cdot N \cdot \frac{m \cdot G}{k \cdot d^2} \cdot A_{overlap} \quad \text{式 2-10}$$

ϵ 為介電係數； N 差動對數目； m 感測質量塊； G 重力加速度

k 懸吊系統彈簧常數； d 感測間距； $A_{overlap}$ 感測懸臂覆蓋面積；

原則上為了得到較大的感測電容， L 希望越大越好， w 希望越小越好(才能在小空間內配置多一點差動對)，但受到製程殘留應力影響，懸臂帶有翹曲量的因素，故需最佳化感測懸臂的覆蓋面積，來得到最佳尺寸(長與寬)，由上式 2-10 可察覺 m 與彈簧常數 k 已由前面章節決定，另外因製程線寬 $1\mu\text{m}$ 作為停止器的間隔，感測間距 d 小於此值會造成短路，故取 $1.5\mu\text{m}$ 作為感測間距 d 的值，故找到最大的 $A_{overlap}$ 即可得到最佳的靈敏度； $A_{overlap}$ 理想情況下可由下式表示；

$$A_{ideal} = L \cdot t \quad \text{式 2-11}$$

但受到製程殘留應力影響，造成感測懸臂會有翹曲量如圖 2-20 ；

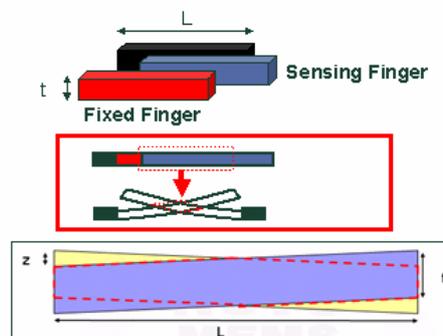


圖 2-20 翹曲量影響感測懸臂覆蓋面積

此翹曲量 z 和覆蓋面積有一簡單的幾何關係，如下式 2-12 表示；

$$A_{overlap} = L \cdot \left(t - \frac{z}{2}\right) \quad \text{式 2-12}$$

故可由感測懸臂長度 L 和翹曲量 z 的數據來得到最佳的 $A_{overlap}$ 之值。即得到最佳的靈敏度。

2.4.4 差動對數目

如前章節的方法，在得到最佳的覆蓋面積值後，接下來需探討差動對數目對靈敏度的影響；而晶片面積主要可以分為三大主體，即感測質量塊、感測懸臂與懸吊系統，故差動對數目的增加，也會佔去感測質量塊的晶片面積，如下式表示；

$$m = M_{die} - M_{suspension} - M_{finger} = \rho \cdot t \cdot (A_{die} - A_{suspension} - A_{finger}) \quad \text{式 2-12}$$

m 為感測質量塊； ρ 材料密度； t 結構厚度； A_{die} 限定的晶片面積

$A_{suspension}$ 懸吊系統佔的面積； A_{finger} 感測懸臂的面積；

$$A_{finger} = L \cdot [(1 + 3N) \cdot d + 2 \cdot N \cdot w] \quad \text{式 2-13}$$

將式 2-13 代入式 2-10 可得；

$$Sensitivity = \varepsilon_r \varepsilon_0 \cdot N \cdot \frac{\rho \cdot t \cdot (A_{die} - A_{suspension} - L \cdot [(1 + 3N) \cdot d + 2 \cdot N \cdot w]) \cdot G}{k \cdot d^2} \cdot A_{overlap}$$

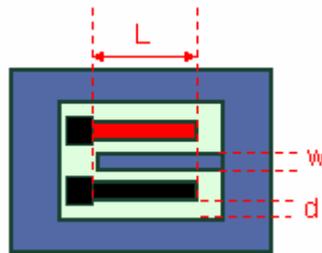


圖 2-21 差動對數目與感測懸臂面積關係

由上式可發覺 N 與 $Sensitivity$ 的關係為二階式子，故可找到一極值 N 使得靈敏度達到最高。

2.4.5 停止器與致動器

(i) 停止器(Stopper)

停止器的作用在於防止平行電容板因為外在過大的加速度與 Pull-in effect 造成相互碰觸而短路，其為一個固定在晶片上的防撞裝置如圖 2-22，防撞的間距以製程的線寬 $1\mu\text{m}$ 為距離。

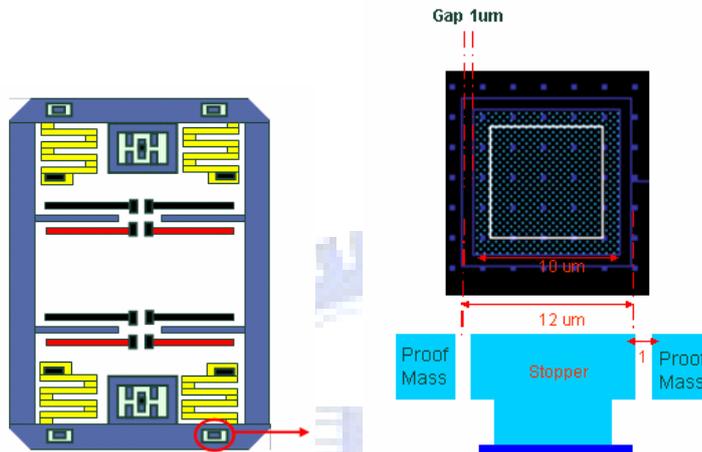


圖 2-22 停止器構造

以 $4\mu\text{m}$ 的結構厚度，此次設計的停止器大概可以承受 400000G 的加速度仍不會達到降伏變形的程度，但此值的前提是停止器與底層的附著性良好，結構本身的強度可耐相當高的 G 值，此處以 Spinner 所產生的向心加速度作驗證，從 200G 的加速度加至 1260G ，並拿回來使用 SEM 觀察停止器的變形情況，由表 2-5 轉速與加速度的關係，以及其受到撞擊後的變形情況，本實驗室設備提供大約最高至 1260G 的向心加速度，至此加速度之前，停止器都未出現變形或脫落的情形，結構仍可正常運作。

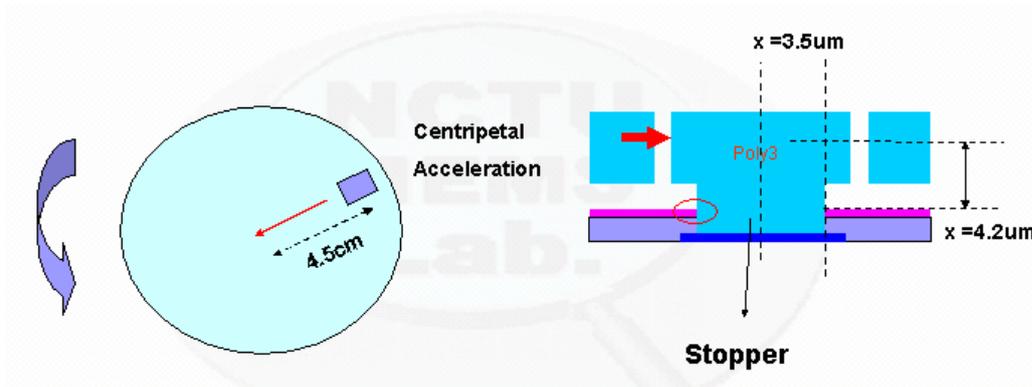
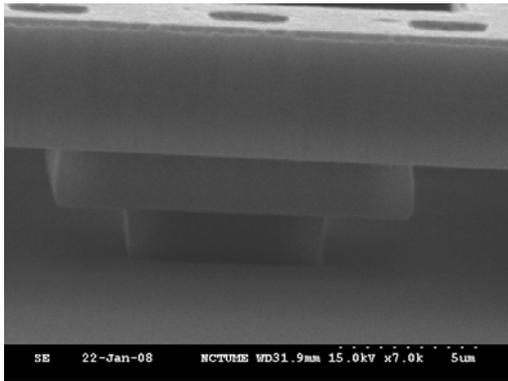


圖 2-23 晶片受向心加速度及 Stopper 受力示意圖



$$acceleration = \omega^2 \cdot R$$

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{(F \cdot x) \cdot y}{I} = \frac{(m \cdot a \cdot x) \cdot y}{I}$$

$$\sigma_{yield} = 1.2GPa \geq \frac{(m \cdot a \cdot x) \cdot y}{I} \Rightarrow a \leq \frac{\sigma_{yield} \cdot I}{m \cdot x \cdot y} \approx 400000g$$

圖 2-24 SEM Stopper 側視圖

	2000 RPM (201 g)	3000RPM (405 g)	4000RPM (803 g)	5000RPM (1260 g)
yielding	ok	ok	ok	ok

表 2-5 轉速與停止器變形關係

(ii)致動器(Actuator)

前面章節決定了感測質量塊、懸吊系統、感測懸臂的長寬、差動對數目，現在則需設計一致動器，以提供加速度計自我測試的能力，設計上採用間隙型與側向型兩種靜電致動，如圖 2-25 所示。期望此靜電力能帶給單雙軸加速規，等同於±5G 所產生的位移。

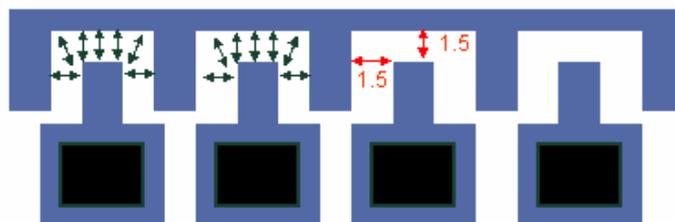


圖 2-25 致動器

兩種靜電致動力分別表示如下：

$$F_x = N \cdot \frac{1}{2} \cdot \epsilon_r \epsilon_0 \frac{t}{gap} V^2 \quad \text{式 2-14}$$

$$F_{gap} = N \cdot \frac{1}{2} \cdot \epsilon_r \epsilon_0 \frac{t \cdot L_{overlap}}{gap^2} V^2 \quad \text{式 2-15}$$

F_x 為側向致動力(沿著平行電容板)， F_{gap} 為正向致動力(沿著間隙靠近方向)，此兩種皆以 $1.5\mu\text{m}$ 當作間隙(gap)以避免短路，則在結構厚度 $t=4\mu\text{m}$ ，電容板覆蓋長度 $L_{overlap}=1.5\mu\text{m}$ (避免佔用晶片面積)，晶片工作電壓 6Volt 時，可得到兩致動力的和為 $N \cdot 1.09 \cdot 10^{-9}$ (Newton)；由前面章節可得到單雙軸質量塊、懸吊 K 值如下，1G 產生的位移為質量塊受到 1G 加速度時與 K 的比值，可推得單雙軸所需的致動器數目。

	感測 質量塊	懸吊 K 值	1G 產生的位移 $\Delta x = mG / K$	等效 5G 位移 所需致動器數目
單軸	0.5 μg	1.1 N/m	4.46 nm	12.5 個
雙軸	3.0 μg	1.1 N/m	26.8 nm	67.5 個

表 2-6 致動器所需數目

並以有限元素軟體 ANSYS 做靜電結構耦合的模擬，其在上述的尺寸條件，工作電壓 6Volts 時，5 個致動器所造成的靜電致動力約為 9.41nN，與理論計算值 10.9 nN 有近似的結果，誤差 13.6%，造成模擬結果較大的原因應為邊緣電荷集中之故，如圖 2-26。

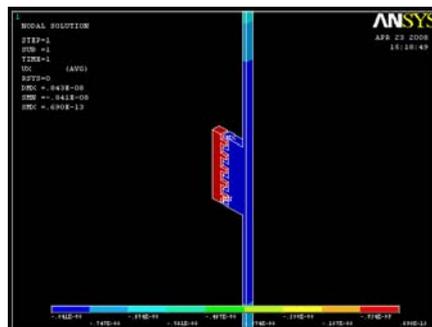


圖 2-26 ANSYS 靜電致動結果

2.5 系統阻尼

由於在微系統中有空氣分子的存在，造成結構體在運動時在各部分受到程度大小不一的阻尼影響，此主要影響加速度計的 Quality Factor，其代表在一工作循環內系統儲存能量與散失能量的比值(無因次)，為一個判斷加速度計的常見指標，如 ADXL50 在封裝完後能達到 120 的 Quality Factor[4]。阻尼可以概分為兩種，正向擠壓阻尼與側向滑動阻尼[19]。

1. 正向擠壓阻尼(Squeeze-Film Damping)

長方形的兩平行板在相互靠近時會產生一個擠壓的阻尼效應，如式 2-16

$$b_{squeeze} = \mu \cdot \frac{w^3 \cdot L}{d^3} \cdot \beta \quad (\text{式 2-16})$$

式中 b 為阻尼(N/ms^{-1})， μ 為空氣動黏度 Viscosity($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)， w 板子寬度， L 長度， d 兩板之間距， β 為一個與長寬有關的係數，隨著長寬的比例不同約從 0.4~1，在此懸臂長寬差很多時， β 約為 0.98。而正向阻尼來源多為感測懸臂之間的靠近。

2. 側向滑動阻尼(Slide-Film Damping)

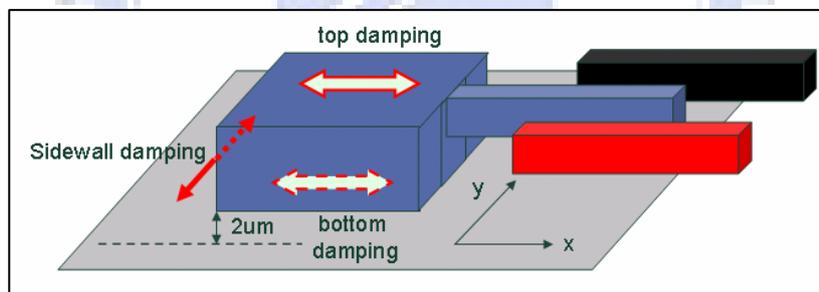


圖 2-27 空氣阻尼

滑動阻尼主要有三個來源，可動結構的上方空氣層、結構側面，以及結構與下方基底之間，在無特殊封裝，一大氣壓的情況下可以由下列三個式子表示；

(i) 結構上方
$$b_{top} = \mu \cdot \frac{A}{\delta} \quad \delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \mu}{\rho \cdot \omega}} \quad (\text{式 2-17})$$

δ 為流體力學中的特徵長度，代表結構上方空氣層的厚度， ρ 為空氣密度 $1.3 \text{ kg}/\text{m}^3$ ， ω 為工作頻率，隨著工作頻率的升高，此特徵值跟著下降如圖 2-28；

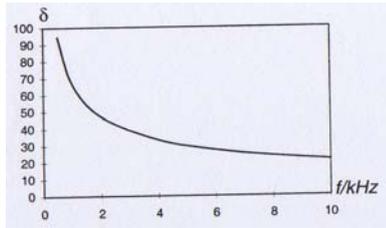


圖 2-28 空氣層特徵厚度與工作頻率關係[19]

由上圖可看出，在加速度計的工作頻率下(<1kHz)， δ 極大(>>結構與基底距離 $2\mu\text{m}$)，故結構上方不會是主要阻尼來源。

(ii) 結構側壁阻尼
$$b_{\text{sidewall}} = \mu \cdot \frac{A}{d_{\text{sidewall}}} \quad (\text{式 2-18})$$

(iii) 結構底部阻尼
$$b_{\text{bottom}} = \mu \cdot \frac{A}{d_{\text{bottom}}} \quad (\text{式 2-19})$$

故整體阻尼(含擠壓與滑動)會影響 Quality Factor 如下式；

$$Q = \frac{m \cdot \omega}{b} \quad (\text{式 2-20})$$

在一大氣壓的情況下，期待系統設計的 Quality Factor 與 ADXL50 的 Q 值 120[4] 相近，此亦可在封裝上藉由降低氣壓來提昇 Q 值如圖 2-29；且實際上的阻尼因蝕刻孔的存在應會比此估計再少一些。

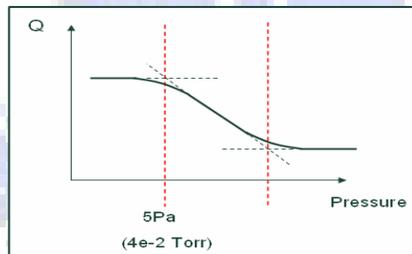


圖 2-29 系統中空氣壓力與品質因子關係圖[19]

2.6 電容感測電路

電容式加速度計由於電容變化最多約在 $10\text{ fF}(10^{-15}\text{ F})$ 左右，相當微小，需要後端電路將訊號放大，並做去除雜訊的工作，以利訊號觀察量測，此次採用同步解調的方式，先輸入兩個同振幅、反相的高頻載波($\sim 2\text{ MHz}$)，將感測訊號送到高頻之處，以有效降低電容的阻抗($Z = \frac{1}{j\omega \cdot C}$)，再透過一個放大器，以及同步解調器還原原本的感測訊號，最後再利用低通濾波器將高頻雜訊去除，得到 DC 輸出訊號如圖 2-30。此研究中著重在結構體的設計，故感測訊號部分乃直接從結構體拉出，透過放大器與頻譜儀來獲得。

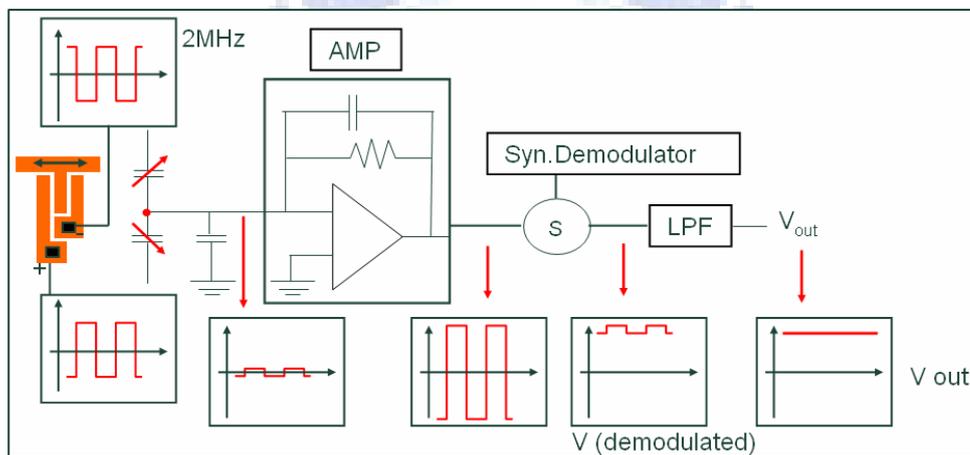


圖 2-30 感測電路流程

第三章 製程

此次研究的開發製程分為Poly-MEMS與Metal-MEMS兩種；Poly-MEMS以Poly-Silicon當做感測器結構體，如前面章節所述，Poly由於熱膨脹係數與SiO₂較為相近，分別為 2.5 與 0.4(1/°C)，故具有低殘留應力的特性，且在後製程上為了降低成本而採用濕蝕刻，HF對Poly與SiO₂選擇比高，結構不易被攻擊，可成功實現低成本、高性能的電容式加速規；Metal-MEMS製程使用Tungsten當做結構體，其本身具有高密度的特性(19200 Kg/m³)，且為少數半導體材料中熱膨脹係數與SiO₂相近的材料，分別為 4 與 0.4 (1/°C)，儘管其剛性較Poly-Silicon高，會增加懸吊系統的K值而降低靈敏度，但由於密度的特性高出許多，期待能以Tungsten製作出高靈敏度的電容式加速規。

3.1 封裝

封裝是微加速度計最難的課題，封裝的壓力大小影響加速度計的性能甚鉅，封裝壓力越低，空氣造成的阻力越小，製程規劃前須事先知道封裝的需求以納入製程的考量，此次封裝採用日月光(ASE)的 Si Cap 與 Glass Frit，其大致流程如下；

- (1)蝕刻 Silicon Cap
- (2)沉積 Glass Frit
- (3)與 MEMS 結構熔接
- (4)晶片切割
- (5)打線

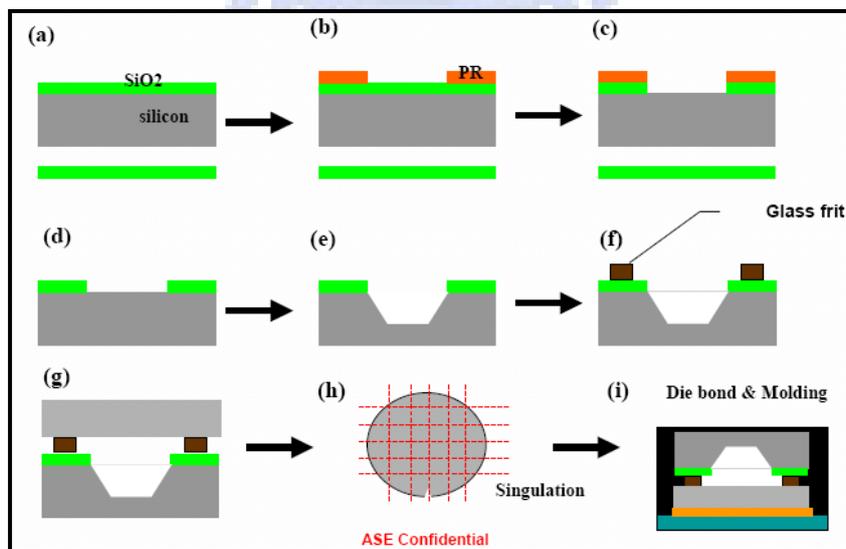


圖 3-1 日月光 Si Cap & Glass frit 封裝流程[20]

使用玻璃膠來作銲接的主要有以下幾項優點；

- (a) 表面粗度要求低
- (b) 與多種不同的表面皆相容
- (c) 封裝溫度中等 (350 ~ 450 °C)
- (d) 密封性高 (對於 MEMS 結構特別重要)

採用此玻璃膠黏合，從電路至結構須預留約 500 μm 的空間，此亦納入後續製程規劃的考量。

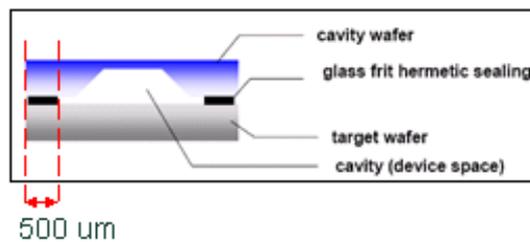


圖 3-2 封裝預留空間

3.2 製程

3.2.1 Poly MEMS

Poly-MEMS 以 Poly 當作 MEMS 結構體的主結構材料，共計有三層 Poly 如圖 3-3，第一層當訊號線，第三層作為結構層，第二層則是幫助結構站在基底上且多此層可以做更多設計上的延伸變化，晶片上分為 CMOS 電路與 MEMS 結構兩個區塊同時進行，兩區域大概相距 500 μm 以方便後端封裝製程的進行，先在 Si 晶圓上實行 STI(shallow trench isolation)，掏空 0.5 μm 並填滿氧化矽以拉大 MEMS 結構與基底的距離，降低寄生電容(a)，長 CMOS 電路所須的 Gate Oxide(b)，沉積並定義出電路所須用的 Poly1，此 Poly1 負責將 MEMS 結構的訊號送至 CMOS 電路裡(c)，定義出第一層 Nitride 供 Poly2 站住的空間(d)，沉積定義 Poly2(e)，沉積氧化層並開 Contact 至 Poly1 和 Poly2，以及一層抗沾黏的突起物(bumps)(f)，沉積 4 μm 厚的 Poly3 作為電容加速度計的結構體、感測懸臂(g)，開 CMOS 電路的 Contact(h)，

沉積金屬線(Al)以供打線及傳輸訊號(i)，沉積 Oxide 與保護層 Nitride(j)，先開第一次 Bond-Pad(k)，沉積第二次 Nitride，為了在等下釋放結構體時保護 Bond-Pad(l)，定義 MEMS 結構的區域(m)，HF 蝕刻以釋放機械可動結構(感測懸臂、質量塊)(n)，RIE 攻擊 Nitride 以開 Bond-Pad(o)。

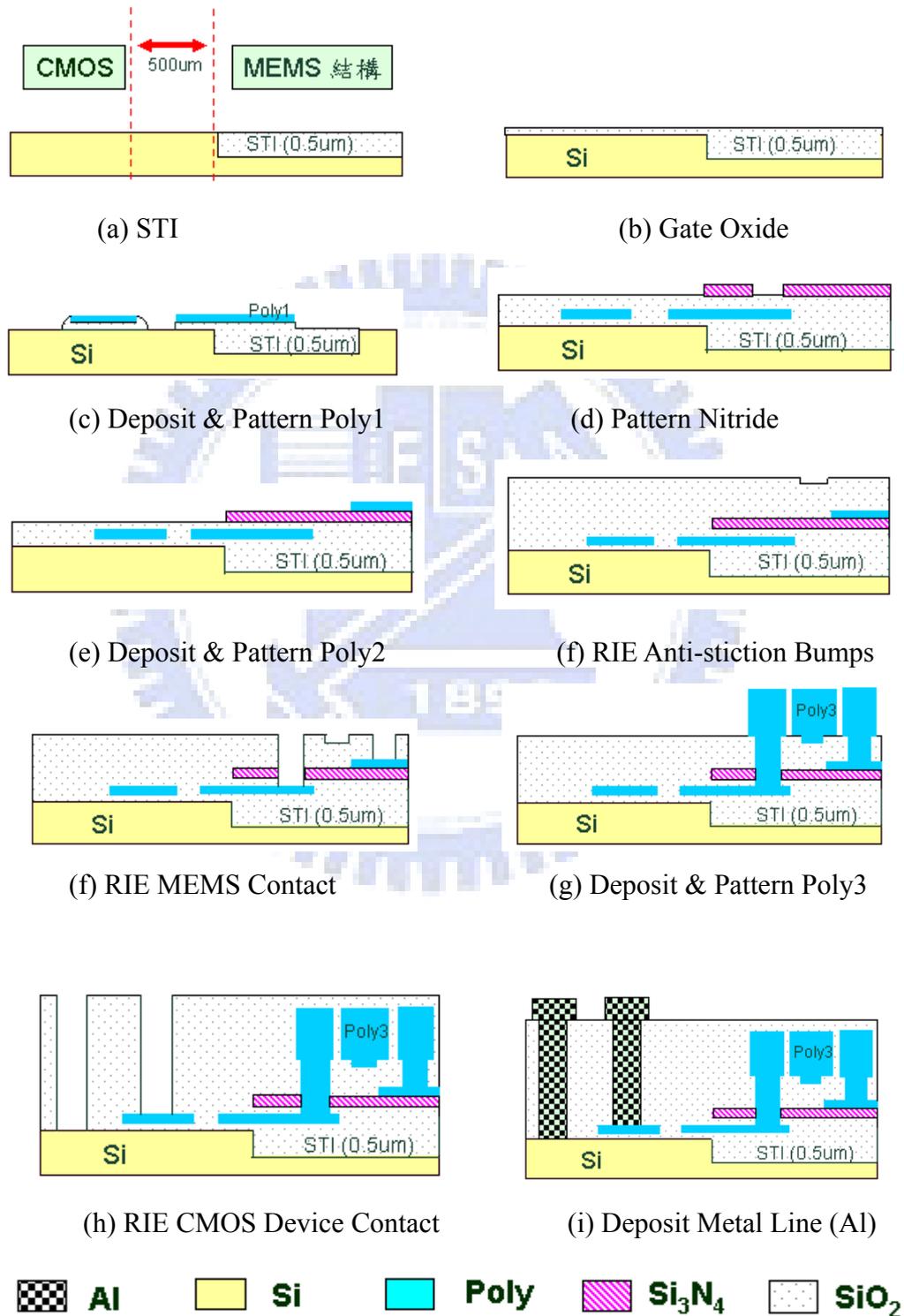
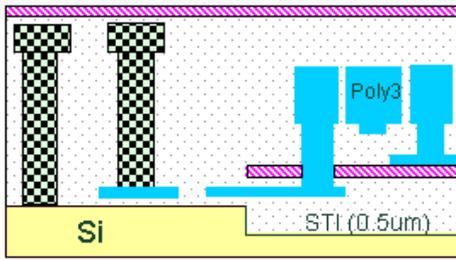
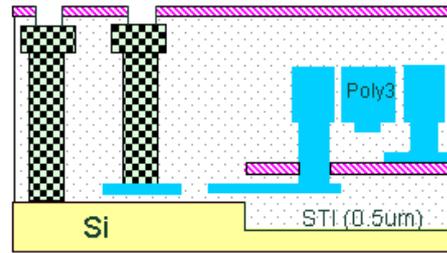


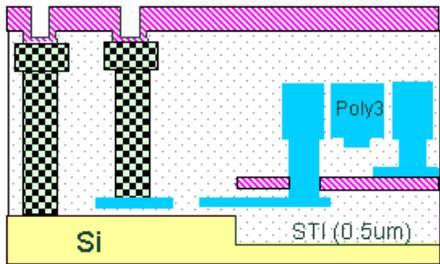
圖 3-3 Poly-MEMS 製程流程圖



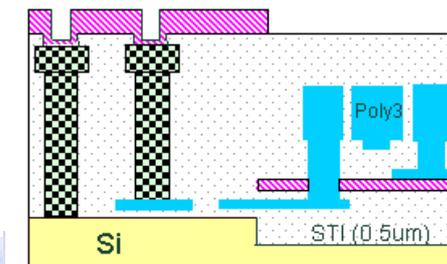
(j) Passivation Nitride



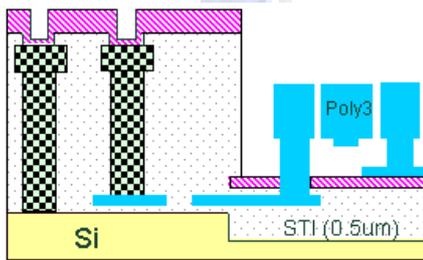
(k) RIE Bond Pad



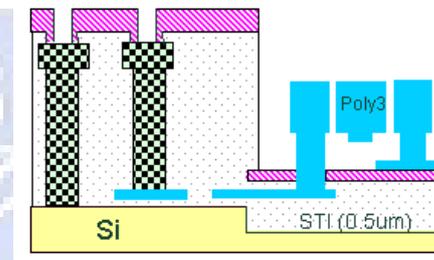
(l) Depo 2nd Nitride



(m) Pattern Nitride(Release Region)



(n) HF Release



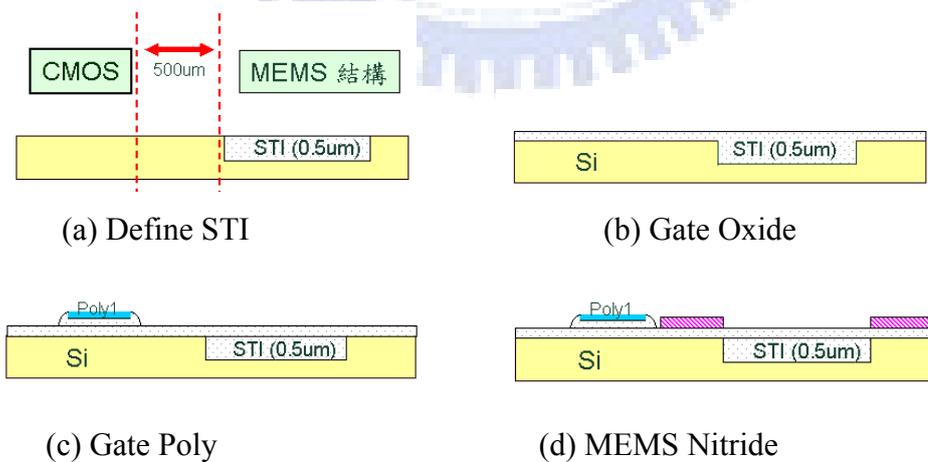
(o) RIE Bond Pad



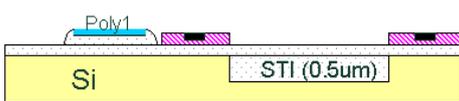
圖 3-3 Poly-MEMS 製程流程圖

3.2.2 Metal-MEMS

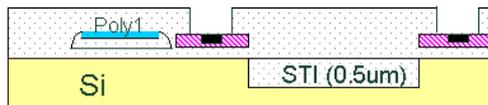
Metal MEMS 以 Tungsten(鎢)作為 MEMS 結構層,但由於期中發展的金屬製程,在固定點處的 Ti/TiN 會外露,而在後製程受到 HF 的攻擊,使得整體結構無法固定,故在此批製程做修正,期望利用 Tungsten 保護住下方的黏著層,其大致流程如下,先做 STI 拉大結構層與基底的距離以降低寄生電容,並減少沾黏現象的發生(a),長 CMOS 電路所須的 Gate Oxide(b),沉積並定義出電路所須用的 Poly1(c),定義出第一層 Nitride 供結構層站住(Anchor)的地方(d),使用 RIE 開 VIA 孔方便後面的 Tungsten 填入,此處與期中報告不同之處在於利用 Tungsten 不會受到 HF 的攻擊,利用 Tungsten 圍住黏著層(Ti/TiN),期望這樣的配置能避免蝕刻液對 Ti/TiN 的攻擊(e),之後沉積 Ti/TiN 當作 Tungsten 的黏著層且降低接觸阻抗,再沉積第一層 Tungsten(Metal1)當做訊號線以及 MEMS 結構固定點(Anchor)(f)(g),沉積氧化矽後先使用 RIE 打開 Metal 之處,再向下蝕刻出 MEMS 結構的 Bumps 與 Contact 使結構的訊號可以連接至 Metal1(h),沉積 Ti/TiN & Tungsten(i),沉積 PETAEOS(j),將 CMOS 區塊的 Contact 打開(k)(l),沉積 Tungsten 和 Ti/TiN 作為 Pad 下方的導線(l),沉積 nitride(m),並把 Bond Pad 打開(n),再沉積較薄的一層 Nitride(o),定義 MEMS 結構的區域(p),並作濕蝕刻釋放 MEMS 結構(q),以 RIE 再將 Bond Pad 打開(r)。



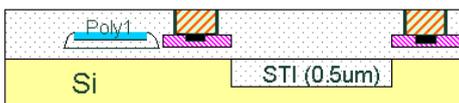
Ti / TiN
 W
 SiO₂
 Al
 Si₃N₄
 Si
 Poly



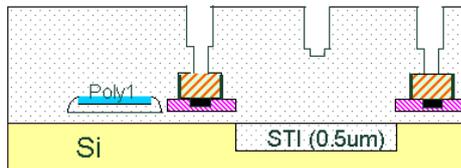
(e) RIE & CVD Ti/TiN



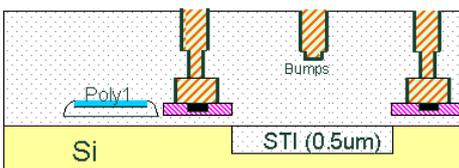
(f) VIA1



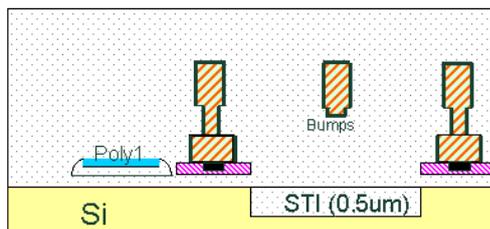
(g) CVD Ti/TiN & Metal1



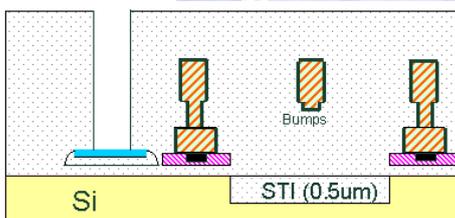
(h) RIE VIA2, Bumps & Contact



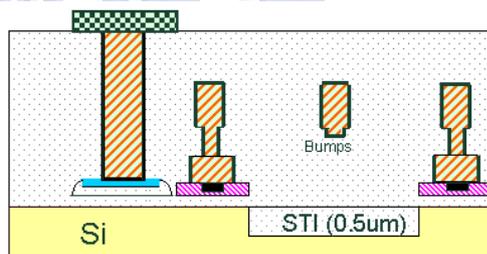
(i) CVD Ti/TiN & Metal2



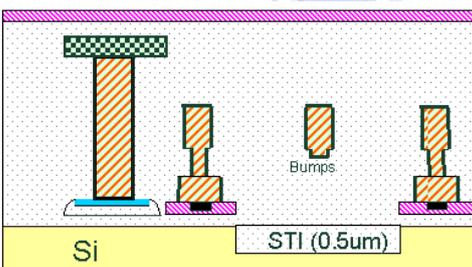
(j) PETEOS



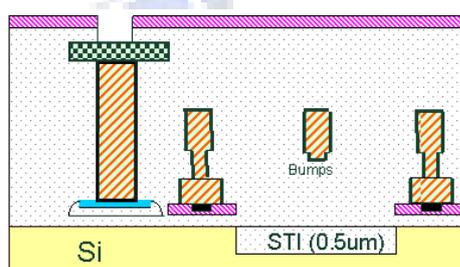
(k) Device Contact



(l) CVDTi/TiN & Tunsten

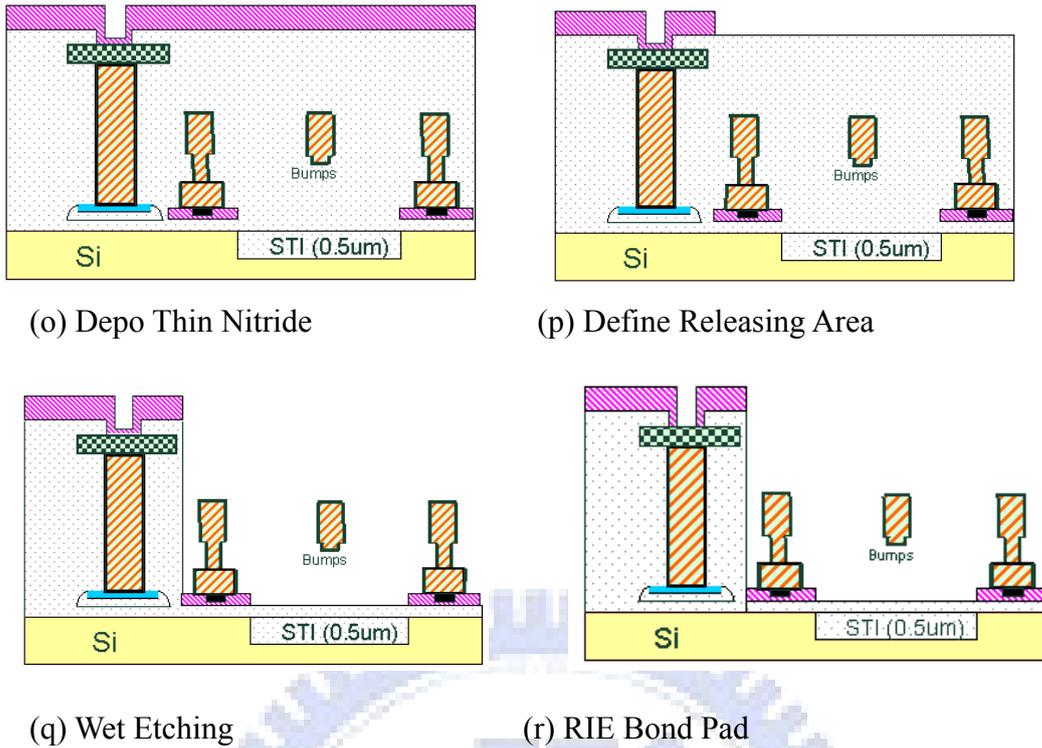


(m) Oxide & Passivation Nitride



(n) Bond Pad Etching





Ti / TiN
 W
 SiO₂
 Al
 Si₃N₄
 Si
 Poly

圖 3-4 Metal-MEMS 製程流程圖

3.3 殘留應力

(i) 感測懸臂

結構在釋放前會受到殘留應力，從懸臂的剖面 Z 軸由下到上有一個應力梯度如圖 3-5，橫軸為應力，縱軸為高度，H 為懸臂剖面中心軸的位置，H/2 為下表面，-H/2 則為上表面，結構剛釋放時，會先往外膨脹伸長(受到壓應力)，然後再產生彎曲。

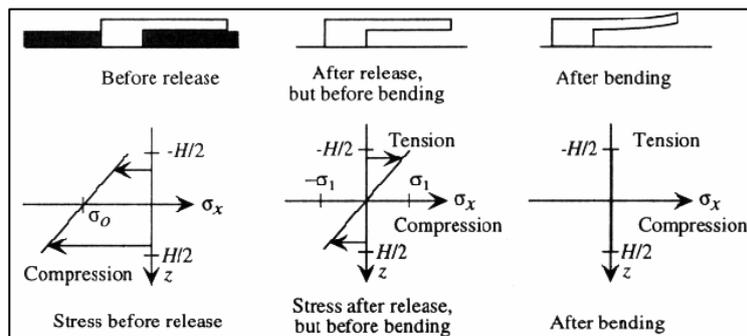


圖 3-5 感測懸臂的應力梯度 [4]

造成此殘留應力 σ 的主因有三個；

$$\sigma_{total} = \sigma_{in} + \sigma_{ex} + \sigma_{thermal}$$

1. σ_{in} 內應力：材料本身晶格缺陷、差排。
2. σ_{ex} 外應力：不同材料層間的黏著性、不同材料層間的晶格常數差異。
3. $\sigma_{thermal}$ 熱應力：不同材料間的熱膨脹係數差異(ex: Poly & Oxide)。

此殘留應力主要影響感測懸臂的翹曲量，亦決定了最重要的電容感測面積，故在此研究中希望在製程上找出可以調整殘留應力的方法，並從翹曲的數據中獲得每批製程不同的殘留應力，說明如下；假設結構的正向應力(Normal Stress)梯度為線性(下表面層至上表面層)，此翹曲量可與懸臂的長度得到曲率半徑(ρ)，由 Senturia 提出的殘留應力關係式(3-1)[4]可看出；

$$\rho = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{1-\nu} \right) \cdot \frac{H}{\sigma_1} \quad (式 3-1)$$

ρ 為翹曲的曲率半徑；E 楊氏係數；H 材料厚度； ν 溥松比； σ_1 表面殘留應力

由上式可發覺在已知製程材料的條件下，可量測結構的曲率半徑 ρ 來推得殘留應力 σ_1 ，而曲率半徑與翹曲量又有如下的關係式；

$$\frac{1}{\rho(x)} = \frac{\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}}{\left[1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 \right]} \approx \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad \text{when } \frac{\partial d}{\partial L} \ll 1 \quad (式 3-2)$$

代入式 3-1 後作積分，可得到翹曲量 z 與殘留應力的關係；

$$z = \frac{2(1-\nu) \cdot \sigma_0}{E \cdot H} \cdot x^2 \quad (式 3-3)$$

由此可之，如下量測翹曲量可推得曲率半徑，進而求得製程的表面殘留應力值。

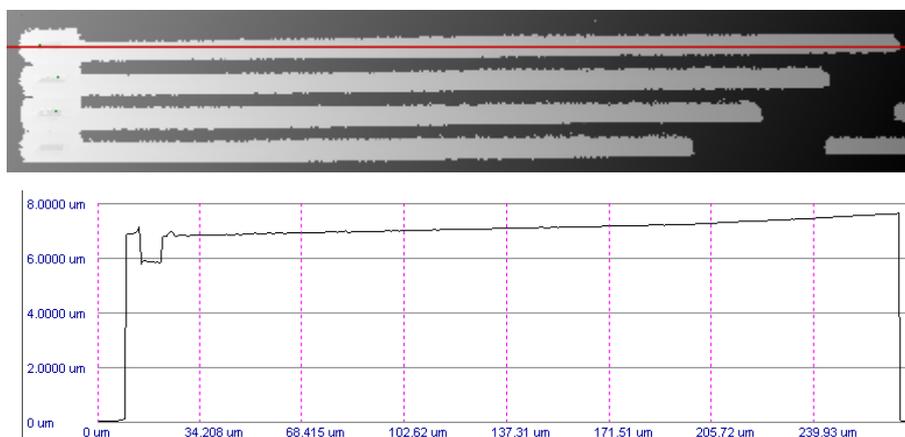


圖 3-6 Test Fingers 翹曲量測

(ii) 感測質量塊

如同 Finger 的翹曲，整體的感測質量塊亦會受到殘留應力的影響使得整片質量塊產生翹曲，尤以邊界與四個角落受影響最大，如下圖 3-7 質量塊邊緣在 SEM 觀察下約翹曲 1.732 μm 的高度，每批製程的翹曲情形不一，故希望在設計尺寸之前能用有限元素模擬的方法得到翹曲的情形，進而知道殘留應力對質量塊的影響。模擬的難處在於殘留應力為未知數，故在此設計一等效模擬的方法，先藉由感測懸臂翹曲量的數據，並在模擬的模型上建立一個 4 μm 的 Poly 結構層，其上面帶有一層 1 μm 的 Oxide，在施予結構體不同溫度時，結構會因為熱膨脹係數的不同而往上翹曲，假設此雙層板效應所造成的正向應力等同製程的殘留應力，則其應該會有相同的翹曲量，故從各種不同的邊界條件下(改變溫度)，照出符合數據的邊界條件，以次邊界條件作為殘留應力的模擬，如圖 3-7。

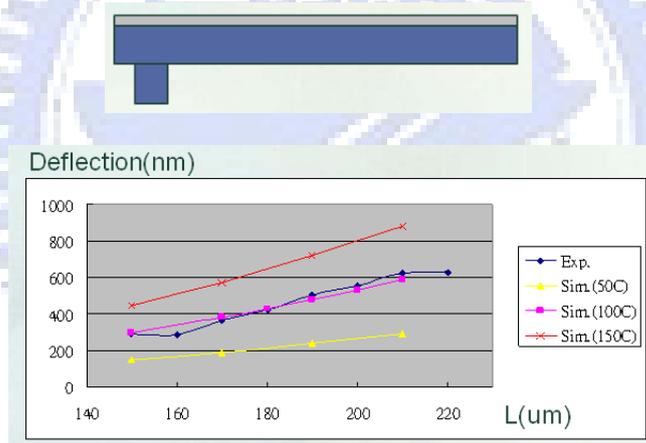


圖 3-7 各邊界條線與數據相符情形

如上圖，100 $^{\circ}\text{C}$ 時，翹曲量的數據最符合實際 data，故以此 100 $^{\circ}\text{C}$ 作為模擬的邊界條件，並模擬出質量塊的最高點翹曲量 1.3705 μm 如圖 3-8。

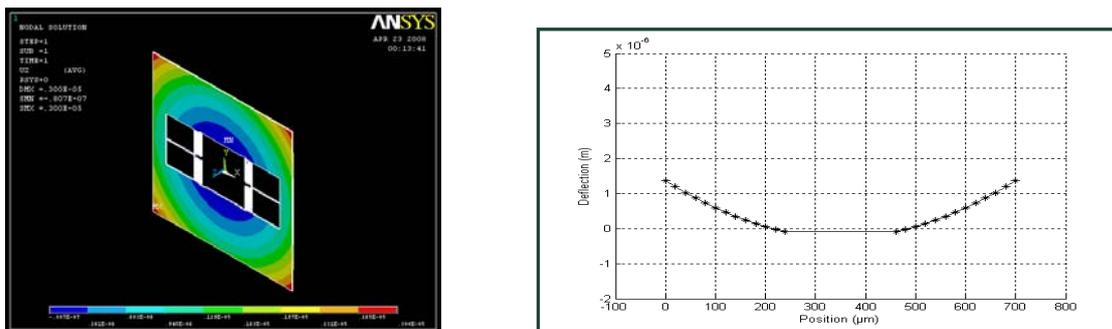


圖 3-8 ANSYS 殘留應力等效模擬—質量塊翹曲

第四章 設計與製程結果

此章節的結果包含三大部份；

(1)尺寸設計結果 (2)製程結果 (3)量測平台校正結果

4.1 尺寸設計結果

此次加速度計的設計有四大主體，分別為質量塊、懸吊系統、感測懸臂、致動器，質量塊與懸吊系統的決定如前面章節所述，感測懸臂尺寸的決定則須翹曲量的數據作最佳化。

(i) 感測懸臂的尺寸

如 3.3 所述，翹曲量可以表示成與臂長位置(x)的關係式，

$$z = \frac{2(1-\nu) \cdot \sigma_0}{E \cdot H} \cdot x^2 \quad \text{式 4-1}$$

由上式可發覺臂長位置 x 與翹曲量 z 為二次式的關係，與寬度 w 則沒有關係，此處以 CIC 白光干涉儀量測懸臂翹曲量加以驗證；實驗數據(圖 4-1，圖 4-2)證明隨著長度的增加，在同樣的材料與殘留應力影響下(同批試片)，翹曲量越高，寬度則如預期的在 1 μm ~ 3.5 μm 的範圍下看不出明顯的趨勢。

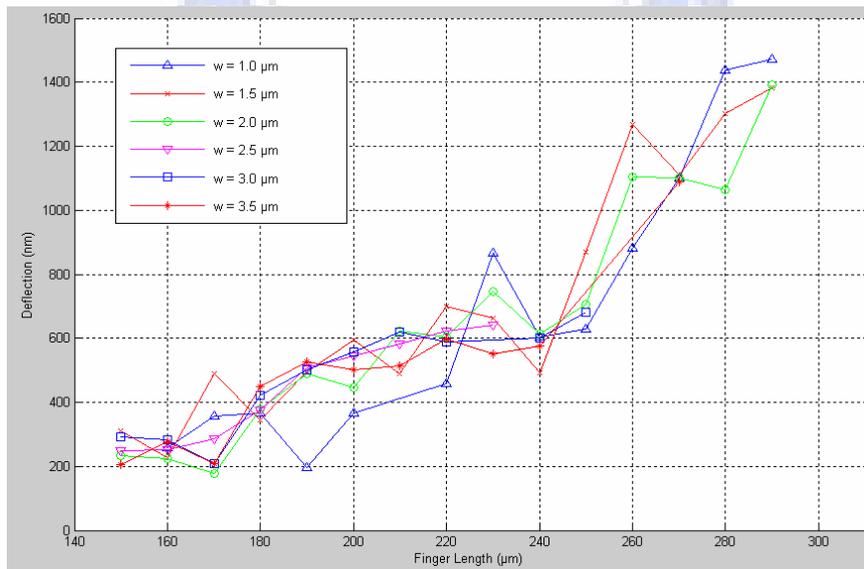


圖 4-1 懸臂長度與翹曲量的關係

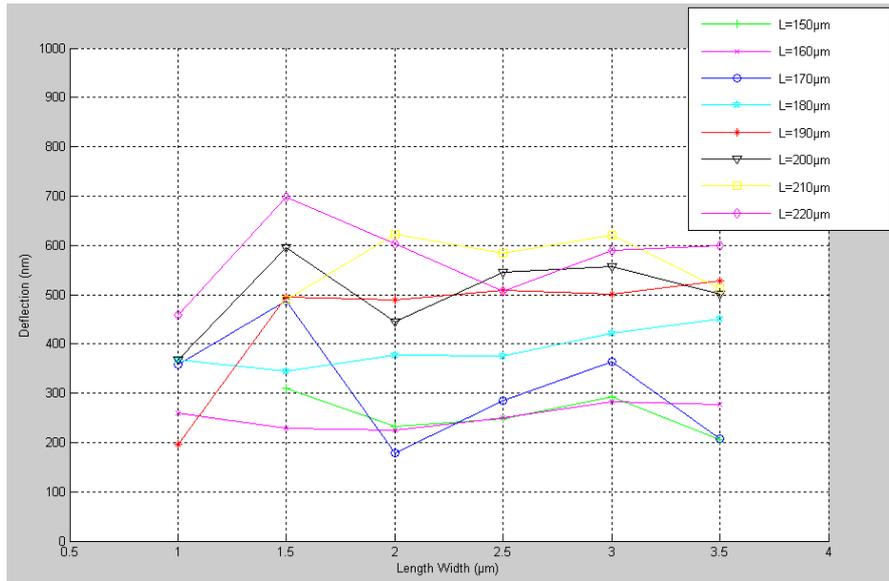


圖 4-2 懸臂寬度與翹曲量的關係

如 2.4.2 所述，覆蓋面積以下式表示，由圖 4-1 的數據可得到尺寸對覆蓋面積的關係，如圖 4-3；

$$A_{overlap} = t \cdot L - 2 \cdot \left[\frac{1}{2} d \cdot \frac{L}{2} \right] = L \left(t - \frac{d}{2} \right) \quad (\text{式 4-2})$$

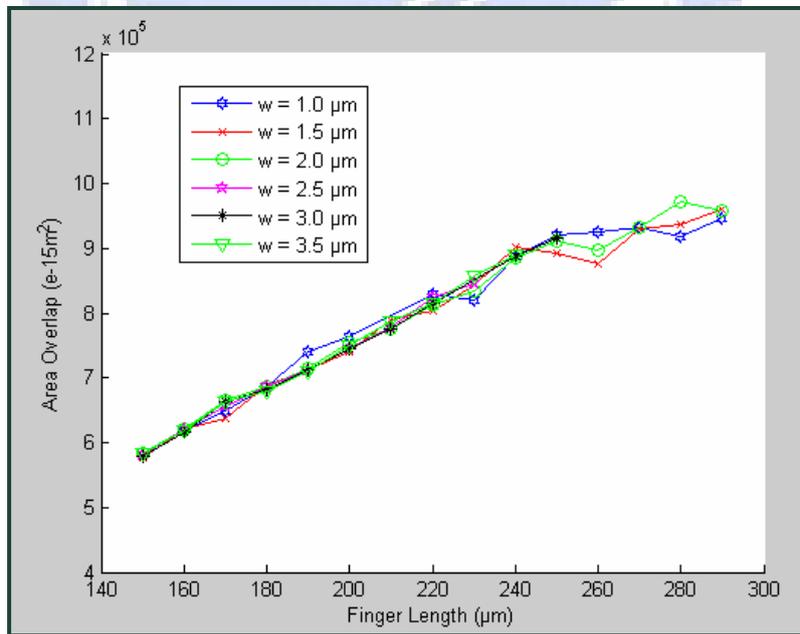


圖 4-3 懸臂長度與電容板覆蓋面積之關係

若將圖 4-3 的數據納入寬度的考量，因為同樣晶片面積下，寬度越窄，可配置越多的差動對數目，如下式子表示；

$$Sensitivity = \varepsilon_r \varepsilon_0 \cdot N \cdot \frac{m \cdot G}{k \cdot d^2} \cdot A_{overlap} \quad \text{式 4-3}$$

$$N = \frac{L_{die}}{4d + 3w} \quad \text{式 4-2}$$

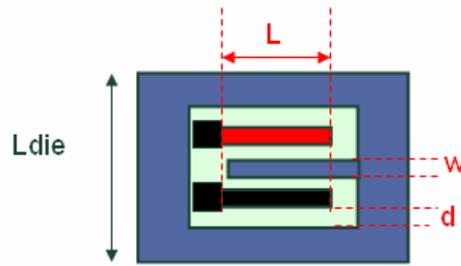


圖 4-4 N 與 Ldie 關係圖

將式 4-2 代入 4-3 可得到下式

$$Sensitivity = \varepsilon \cdot L_{die} \cdot \frac{m \cdot g}{k \cdot d^2} \cdot \left(\frac{A_{overlap}}{4 \cdot d + 3 \cdot w} \right) \quad \text{式 4-4}$$

故在 $L_{die}=550\mu\text{m}$ ， $m=3\mu\text{g}$ ， $k=1.2\text{ N/m}$ ， $d=1.5\mu\text{m}$ 時，圖 4-3 的數據可得到如下的圖表，其表示著各尺寸對靈敏度的關係。

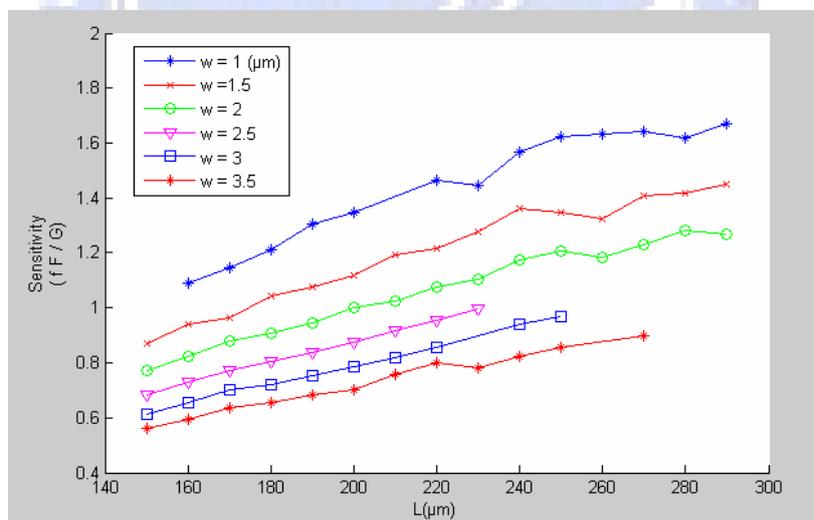


圖 4-5 各尺寸對靈敏度之關係圖

若從上圖判斷，大概可以得到 $L=290\mu\text{m}$ ， $w=1.0\mu\text{m}$ ，這樣的尺寸在同樣的晶片面積下去配置，可得到最高的靈敏度；但若考慮後製程的結果，可發覺實驗中有許多懸臂產生側向沾黏現象如圖 4-6，此沾黏的發生主要由於該尺寸的彈簧常數過小，造成回復力不夠，造成無法克服平板間的靜電力與凡德瓦力而產生沾黏，故在此設一個標準值，用以淘汰 K 值過小的尺寸。



圖 4-6 感測懸臂的側向沾黏現象

此處以實驗中，有產生沾黏現象的尺寸，選取彈簧常數 K 值最大者為淘汰尺寸 K 值最低標準；實驗中 $w=2\mu\text{m}$ ， $L=220\mu\text{m}$ 的 Finger 為所有產生沾黏尺寸中 K 值最大者，故以此 K 值為標準，可換算出最小的 K 須大於 $0.8(\text{N/m})$ ，小於此彈簧常數者，不予接受，則篩選過的尺寸剩下九個，如下圖 4-7 與 4-8 表示；

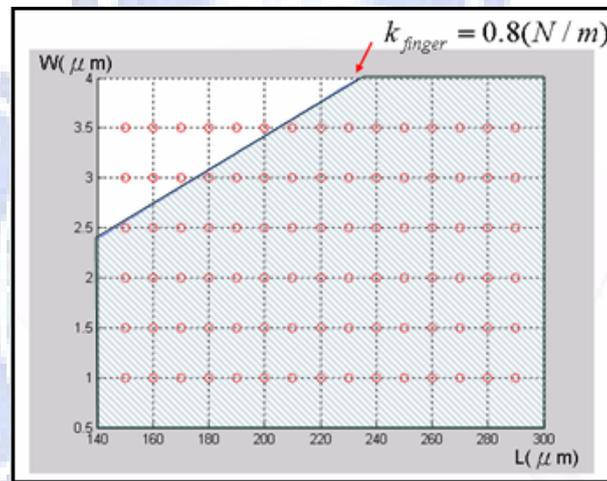


圖 4-7 彈簧常數大於 $0.8 (\text{N/m})$ 的尺寸

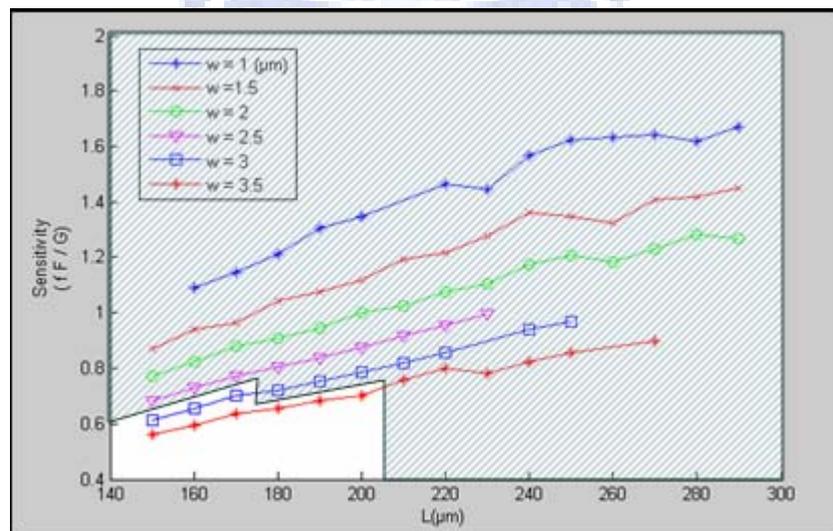


圖 4-8 最佳化尺寸的篩選

則圖 4-8 的九個可用尺寸取最高靈敏度那一組(0.71fF/G)，作為感測懸臂最佳化的尺寸(L = 170 μm，w = 3 μm)，值得注意的是之後的試片若殘留應力有所變動，其最佳尺寸亦會隨著作些微調整。

(ii) 差動對數目

前一小節決定了感測懸臂的最佳尺寸，現在則要以此最佳尺寸所得到的覆蓋面積 $A_{overlap}$ ，探討差動對數目的多寡，對靈敏度的影響；如 2.4.3 可得到差動對數目與靈敏度的關係。則在最佳尺寸的覆蓋面積下，有如圖 4-9 的關係。

$$Sensitivity = \epsilon_r \epsilon_0 \cdot N \cdot \frac{\rho \cdot t \cdot (A_{die} - A_{suspension} - L \cdot [(1 + 3N) \cdot d + 2 \cdot N \cdot w]) \cdot G}{k \cdot d^2} \cdot A_{overlap} \quad (式 4-5)$$

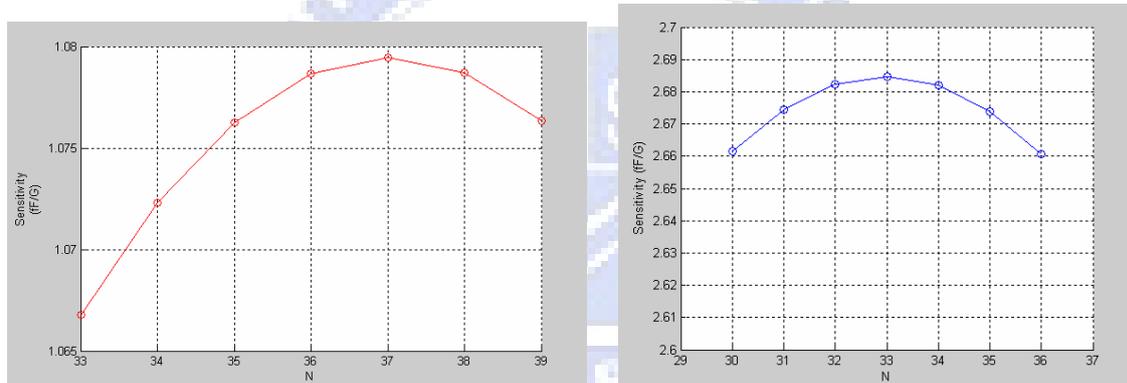


圖 4-9 差動對數目與靈敏度關係

(a) 單軸 37

(b) 雙軸 33

從上兩圖可看出，當晶片長度 $L_{die}=550\mu\text{m}$ (單軸)， $700\mu\text{m}$ (雙軸)，懸吊系統 k 值為 1.2 N/m ，感測間距 d 為 $1.5\mu\text{m}$ ，覆蓋面積 A 為 $w=3\mu\text{m}$ 、 $L=170\mu\text{m}$ 的覆蓋面積($662392.3\mu\text{m}^2$)時，單軸的差動對數目單邊 37 對，雙軸單邊 33 對，可達到最佳的靈敏度，若受限於晶片面積，放不下這麼多的差動對數目，則可取最接近此數值的差動對數目來達成最好的靈敏度(單軸 ≤ 37 ，雙軸 ≤ 33)。

則由前述的設計方法與結果，在限定的面積下去配置各結構，有如下的參數；

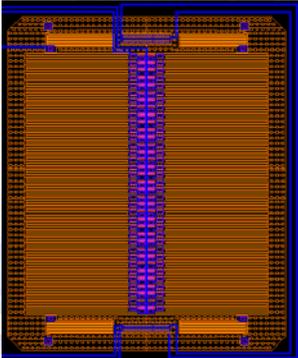
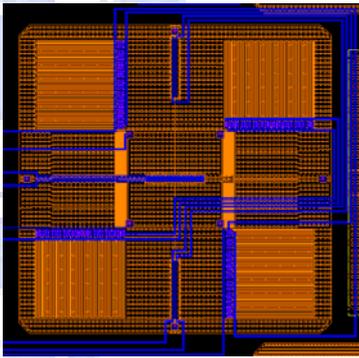
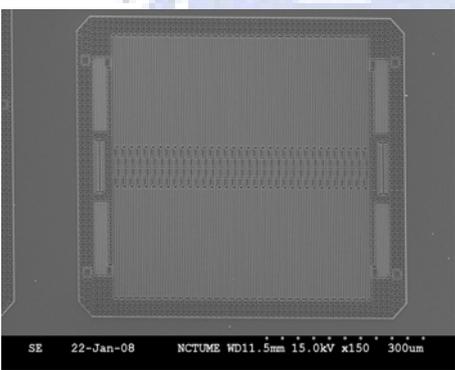
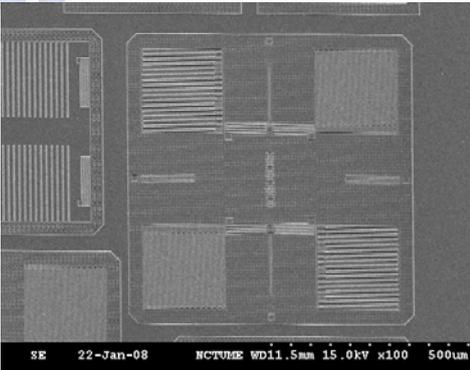
	單軸	雙軸
晶片面積	550 x 500 μm^2	700 x 700 μm^2
感測質量塊	1.2 μg	2.95 μg
懸吊系統 K 值	1.1 N/m	KX: 1.16 N/m KY: 1.09 N/m
感測懸臂	長 170 μm 寬 3 μm	長 170 μm 寬 3 μm
單邊差動對數目	35	16
靈敏度	1.96 fF/G	2.01 fF/G
感測軸共振頻率	7279.4 Hz	X: 2855.5Hz Y: 2942.2Hz
頻寬	800 Hz	800 Hz
Layout		
結構外觀		

表 4-1 尺寸設計結果

4.2 製程結果

此部份包含 Poly MEMS 與 Metal MEMS 兩製程開發的相關結果，以及 Poly-MEMS 調整殘留應力的結果。

4.2.1 Poly MEMS

(i) 退火對殘留應力的影響

如 3.3 所述，量測懸臂的翹曲量可得到與懸臂的長度得到曲率半徑(ρ)，再藉由此曲率半徑去推估製程的殘留應力；

$$\rho = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{1-\nu} \right) \cdot \frac{H}{\sigma_1} \quad (\text{式 4-6})$$

由第一批試片的量測結果如圖 4-10，可將此四組數據分別作懸臂翹曲量的趨勢線如圖 4-11。

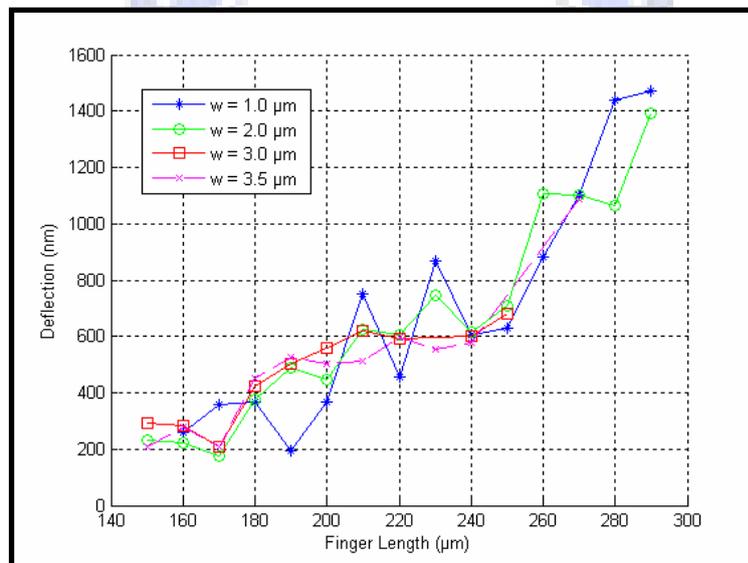
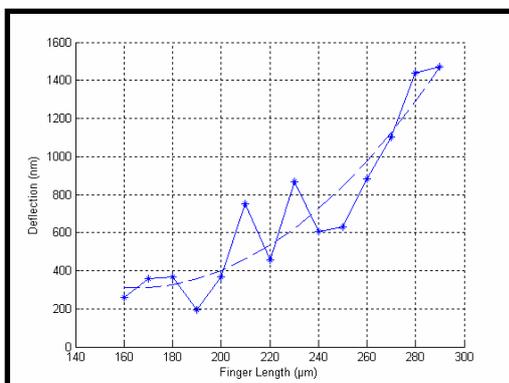
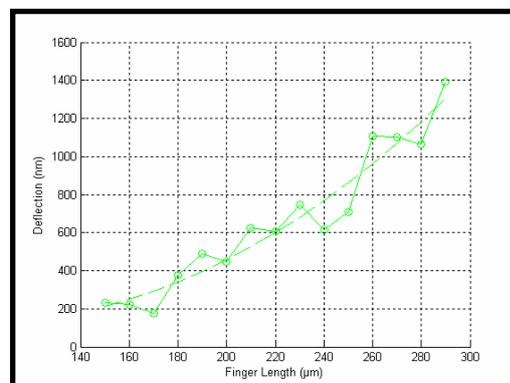


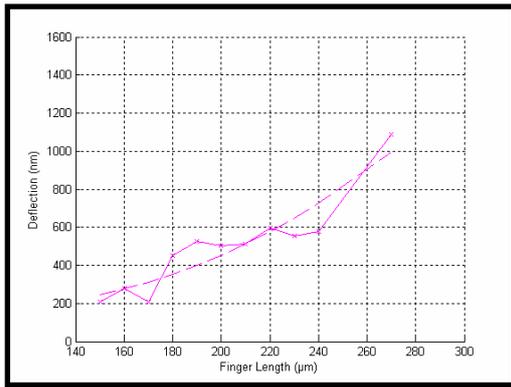
圖 4-10 翹曲量與懸臂長度關係



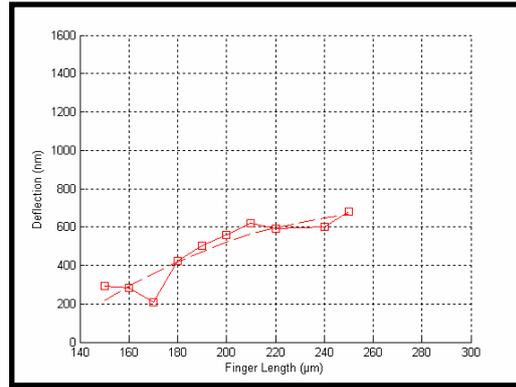
(a) $w = 1 \mu\text{m}$ 的趨勢線



(b) $w = 2 \mu\text{m}$ 的趨勢線



(c) $w = 3 \mu\text{m}$ 的趨勢線



(d) $w = 3.5 \mu\text{m}$ 的趨勢線

圖 4-11 翹曲量與懸臂長度關係

如 3.3 所述，殘留應力與翹曲量關係如下表示；

$$z = \frac{2(1-\nu) \cdot \sigma_0}{E \cdot H} \cdot x^2 \quad \text{式 4-7}$$

故不同的殘留應力，由上式可得到如圖 4-12 的應力區塊，將以上四組趨勢線擺在一起，可發覺此批製程的表面殘留應力介於(+5MPa ~ +15MPa 之間)。

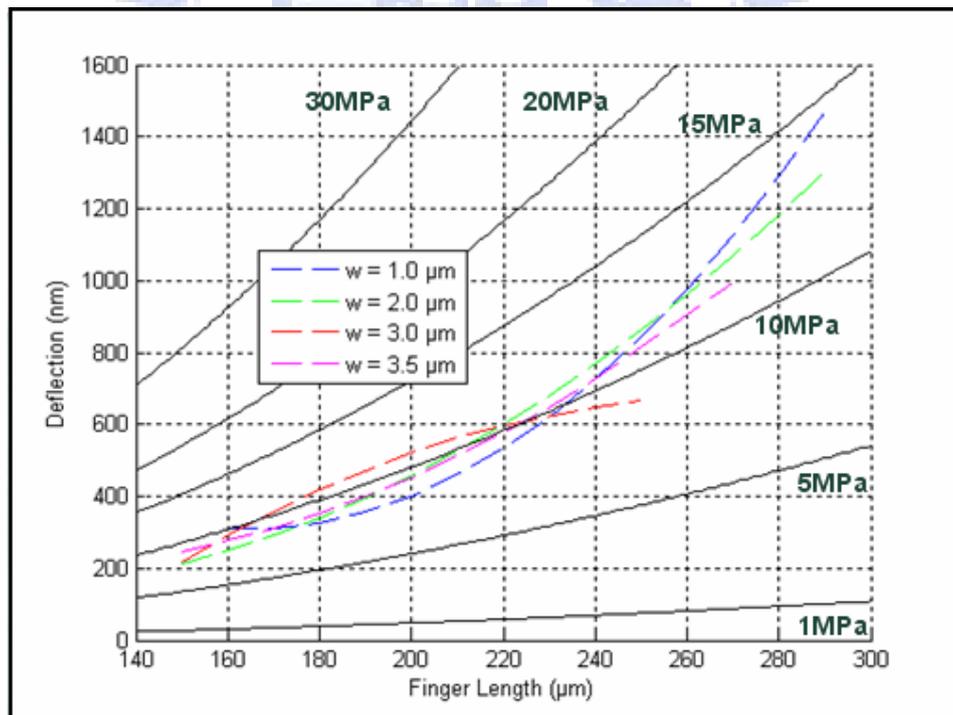


圖 4-12 結構層未退火前的殘留應力分布區域

上圖的殘留應力會造成懸臂的翹曲，約減少 10% 的訊號，故希望可以利用製程上的操作來調整至近乎 0 Mpa 的殘留應力以減少結構和感測懸臂翹曲，故在製程 Pattern 完 Poly3 後，多加了一道 750°C 30sec 的退火製程，高溫的能量讓 Poly

原子重新排列，其量測結果如圖 4-13，懸臂呈現往下彎曲的現象，如前述方法將此四組數據作趨勢線，觀察其殘留應力所位於的區塊如圖 4-14。

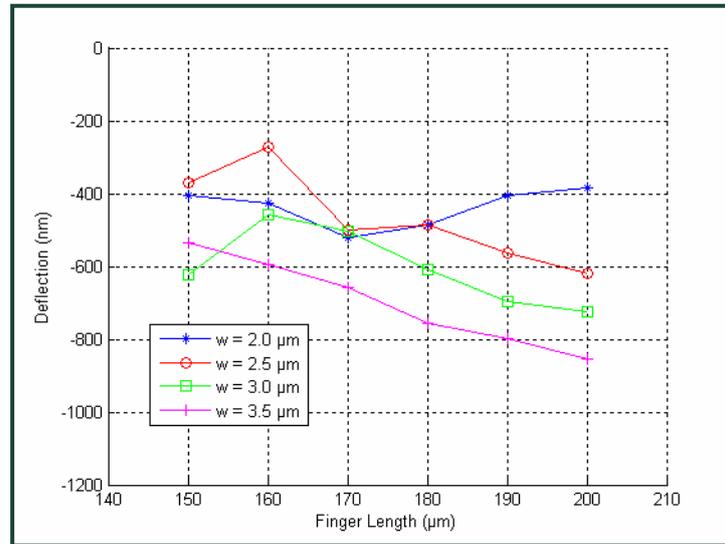


圖 4-13 750°C 30sec 退火後的懸臂翹曲量

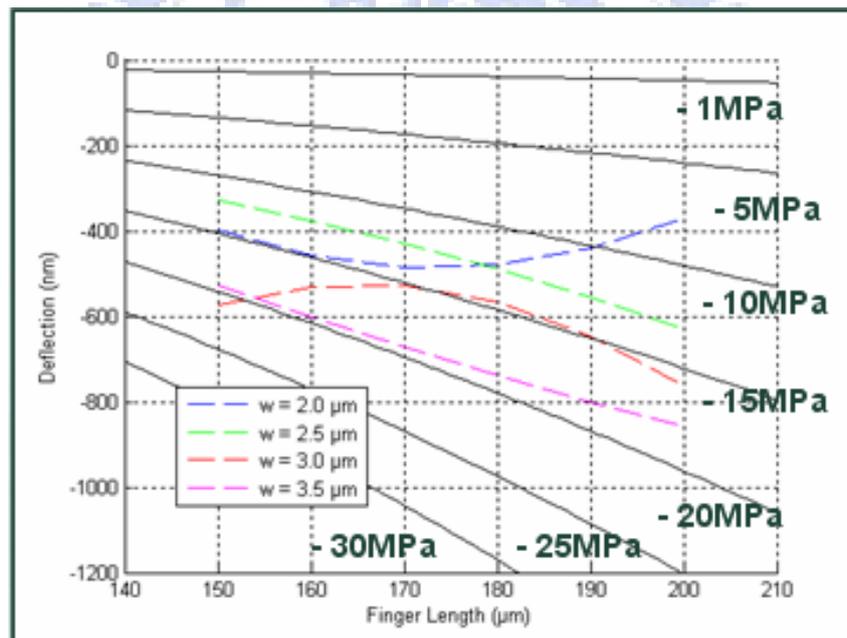


圖 4-14 750°C 30sec 退火後的殘留應力分布區域

由上圖可看出，Poly3 表面殘留應力在退火過後，殘留應力落在約-5 MPa ~ -20 Mpa 的區塊，故退火製程的加入，使得結構從原本的+15MPa(壓應力)變成-20Mpa(張應力)，對結構的應力調整有明顯的改變，期望之後調整退火溫度與時間，可得到更低的殘留應力。

(ii) 沾黏現象

由於後製程使用濕蝕刻，與感測懸臂與基底的沾黏，感測質量塊缺乏 Dimple 而造成感測懸臂連帶被基底吸附住如圖 4-15，可增加 Bumps 的數目或調整感測懸臂 K 值來避免沾黏。

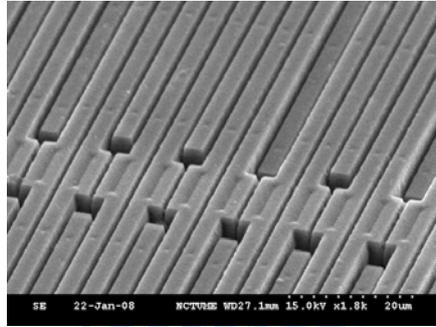


圖 4-15 感測懸臂部分沾黏

(iii) 感測質量塊翹曲

如 3.3 所述，質量塊翹曲如下圖 4-16 質量塊邊緣在 SEM 觀察下約翹曲 1.732um 的高度，與模擬值圖翹曲量 1.3705 um 有 20% 的差距。

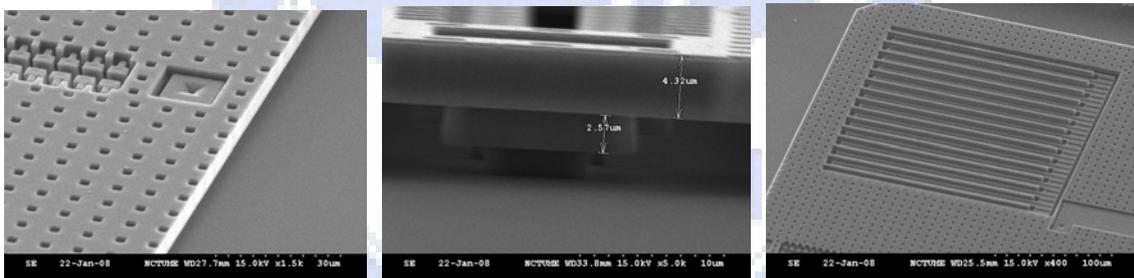


圖 4-16 質量塊的翹曲情形

(iiii) 後製程加熱對 Poly 結構表面殘留應力的影響

後製程交大自行實驗部分採用 HF 來蝕刻 SiO_2 以釋放結構，但由於結構與基底距離相當微小(2um)，蝕刻完的處理成為後製程成功實現的關鍵，沾黏現象才可較易避免，以下為一些實驗參數，驗證後製程的加熱對 Poly 結構造成的影響，但實驗結果顯示，50~120°C 的 IPA 加熱對 Poly3 的結構影響不大，此處的殘留應力值為試片 Finger 翹曲量由前述方法推估。其殘留應力約在 11~20 Mpa 之間，無明顯趨勢，判定後製程的 Heat up 在 120 °C 以內皆無明顯影響。

49% HF	DI Water Rinse	IPA Bath	Heat up	Poly3 Residual stress
10min	30 sec	5min	120°C	12MPa
5min	30sec	5min	120°C	15MPa
3min	30sec	5min	90°C	11Mpa
1:2 5min	30sec	5min	90°C	17MPa
1:2 3min	30sec	5min	70°C	17Mpa
1:2 2min	30sec	5min	50°C	20Mpa

表 4-2 後製程對表面殘留應力影響

4.2.2 Metal MEMS

Metal MEMS 使用高密度的材料 Tungsten，由於其與 Nitride、Oxide 的表面附著性不好，故在製程中皆需要加入 Ti/TiN 來當作 W 的黏著層，TiN 幫助 W 對 Nitride 和 Oxide 的黏合，Ti 則為了降低接觸阻抗；但蝕刻液 HF 會攻擊 Ti，使得結構體的固定點(Anchor)會因為黏著層被攻擊，而脫離基底表面，無法成功製作出 Tungsten 結構的加速規如圖 4-17，蝕刻情形如圖 4-18 所示。

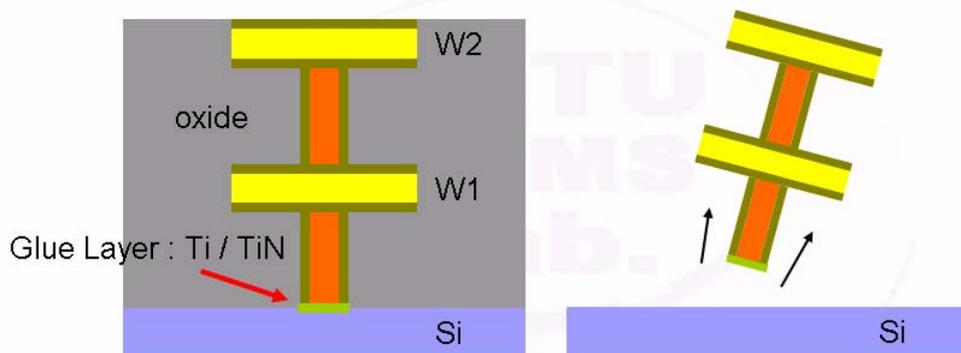
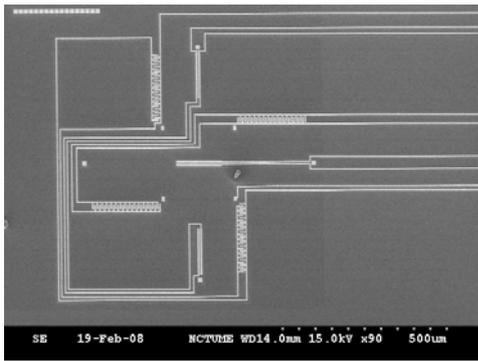
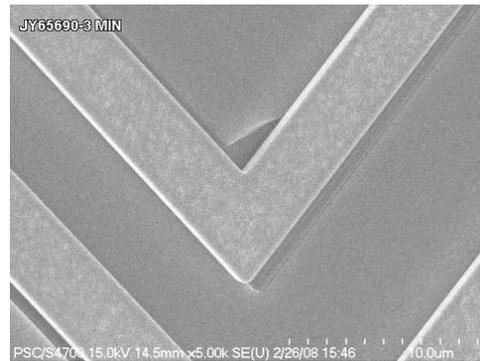


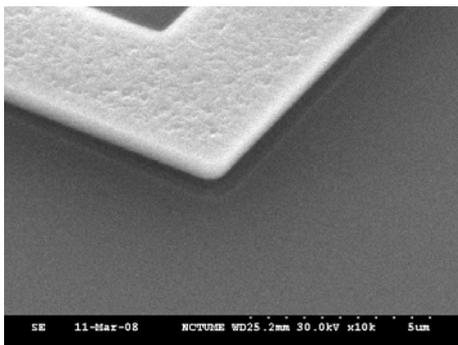
圖 4-17 黏著層 Ti/TiN 受 HF 攻擊示意圖



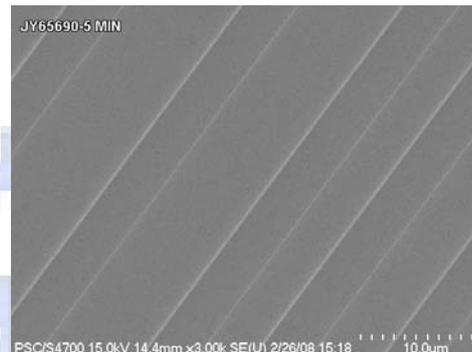
(a) Metal 1(訊號層)蝕刻前



(b) Metal 1 脫離 Nitride 表面



(c) 黏著層被蝕刻而翹曲



(d) Metal 1 完全脫離 Nitride 表面

圖 4-18 Metal-MEMS 蝕刻結果

故 Metal-MEMS 的關鍵點變成了該如何保護黏著層不受 HF 攻擊，故新的製程規劃，採用包覆式的設計，希望利用 W 本身不受蝕刻液 HF 攻擊的特性，來實現保護黏著層的目的。

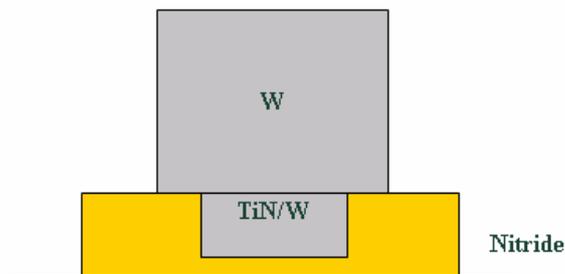


圖 4-19 利用結構 Tungsten 保護黏著層 Ti/TiN

4.3 量測平台校正結果

交大機械微機電實驗室加速度計量測平台，此量測平台主要分為五部份如圖 4-20；

1. 電腦(內含 LabView 程控軟體)
2. 一個 20MHz 的任意波型產生器 NI 5402
3. 一個 14Bit 100MHz 高解析度示波器 NI 5122；
4. 一個 20 倍放大器 A303；
5. 一個可提供 0~20000G 加速度的壓電致動器；

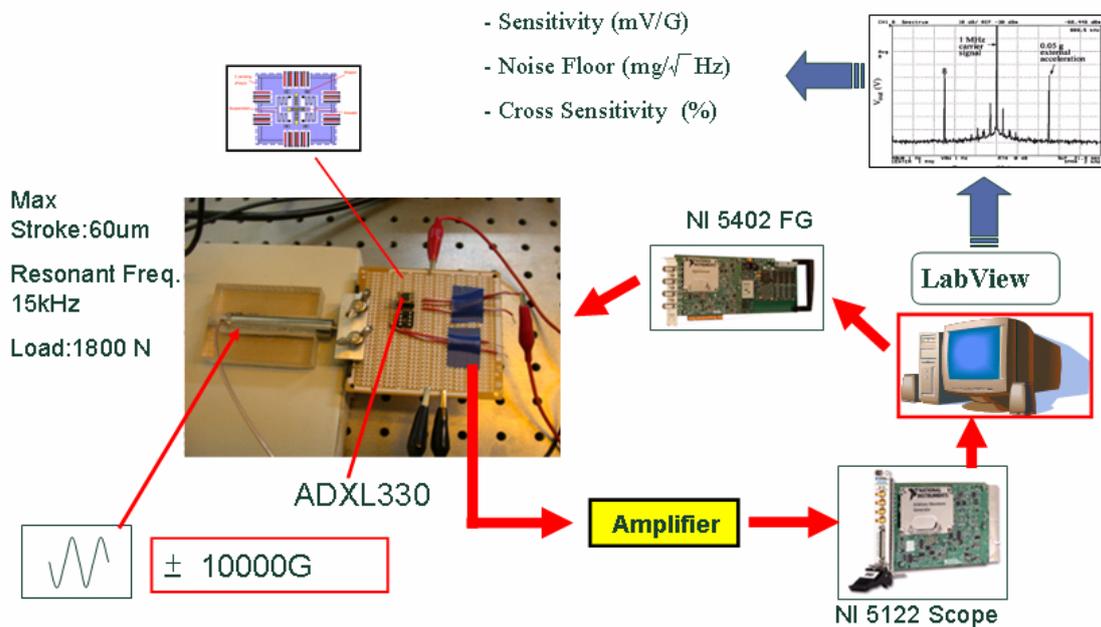


圖 4-20 加速度計量測平台

量測訊號時，先將製作好的加速度計以及參考用的市售加速度計(ADXL330)安置在電路板上，由電腦中程控式軟體 NI LabView 發出指令，讓 NI5402 透過一反相器(Inverter)，將兩個高頻訊號輸入至加速度計中，經由壓電致動器給予加速度至電路板，透過 NI5122 同步觀察加速度計以及市售加速度計的輸出訊號波形，以量測各訊號，此量測平台最大的好處在於可同步觀察訊號波形，且不用再另外購買一昂貴的頻譜儀，透過 LabView 軟體內自己寫好的程式搭配波形產生器 NI 5402 與示波器 NI 5122，即可得到一虛擬頻譜儀，此頻譜儀是在 On-Wafer test 階段時所需要的，在沒有後端的解調電路時藉由頻譜來讀出靈敏度(Sensitivity)、解析度(雜訊)(Resolution)、線性度、耦合度(Cross Sensitivity)。

以下為此量測平台所欲量測的各個加速規性能；

- (1)靈敏度(Sensitivity): 受到一加速度時所能輸出的訊號(mVolts/G)。
- (2)解析度(Resolution): 加速度計某一頻帶下所能感測的最小加速度(mG)。
- (3)雜訊強度(Noise Density): 分子熱運動與電腦所造成的雜訊($\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)。
- (4)耦合度(Cross Sensitivity): 受到單軸加速度時，另一軸的誤差輸出比(%)
- (5)非線性度(Nonlinearity): 隨著加速度增加，訊號增加的線性關係(%)
- (6)動態範圍(Dynamic Range): 加速度計所可量測的範圍($\pm\text{G}$)

以下列出此六項參數量測的大概機制與方法，並量測市售加速度計 ADXL330 的部份性能，加以驗證此平台的可用性。

- (1)靈敏度(Sensitivity): 受到一加速度時所能輸出的訊號(mVolts/G)。

系統受到一加速度時，微機電結構的感測電容如下得到一個已調變過的訊號，此高頻(1MHz)的調變主要是為了降低電容感測的阻抗，在未外加解調、濾波電路的情況下(下圖紅線虛線右邊)，透過一簡單的放大器(圖 4-21)，直接用頻譜儀來做量測，此頻譜儀將感測的訊號做快速傅立葉轉換；如下 $x(t)$ 為感測的訊號，當系統受到一來回震盪的加速度時，會使得感測訊號形成(圖 4-21)的波型，調變的波型即外界給予晶片加速度的頻率(約 200Hz)，再透過頻譜儀的傅立葉分析可在頻譜上三個地方 ω_c 、 $\omega_c + \omega_s$ 、 $\omega_c - \omega_s$ 看到如(圖 4-22)的峰值，由式子 4-8 可知此值與感測訊號差一個係數 π ，故調整外界給予加速度的大小，讀取頻譜儀上的峰值，即可得到加速度計靈敏度。

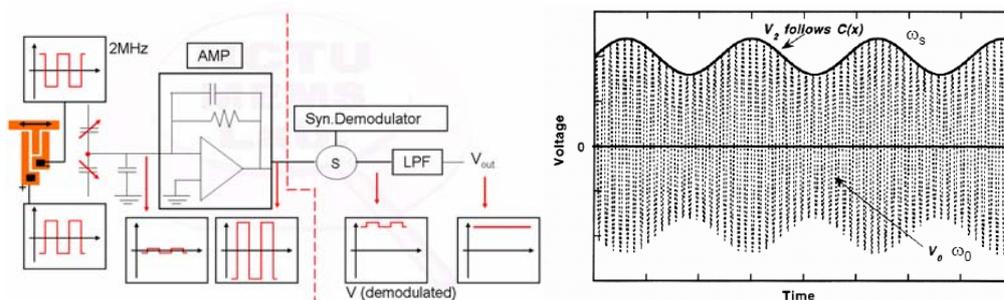


圖 4-21 (a) 感測電路

(b) 調變過的訊號

$$x(t) = V_{carrier} \left[1 + \frac{V_{signal}}{V_{carrier}} \cdot \cos(\omega_s \cdot t) \right] \cdot \cos(\omega_c \cdot t)$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt$$

$$= \pi \cdot V_{carrier} [\delta(\omega - \omega_c) + \delta(\omega + \omega_c)] + \pi \cdot V_{signal} \{ \delta(\omega - (\omega_c + \omega_s)) + \delta(\omega - (\omega_c - \omega_s)) + \delta[\omega + (\omega_c - \omega_s)] + \delta[\omega - (\omega_c - \omega_s)] \}$$

式 4-8 調變訊號的傅立葉轉換

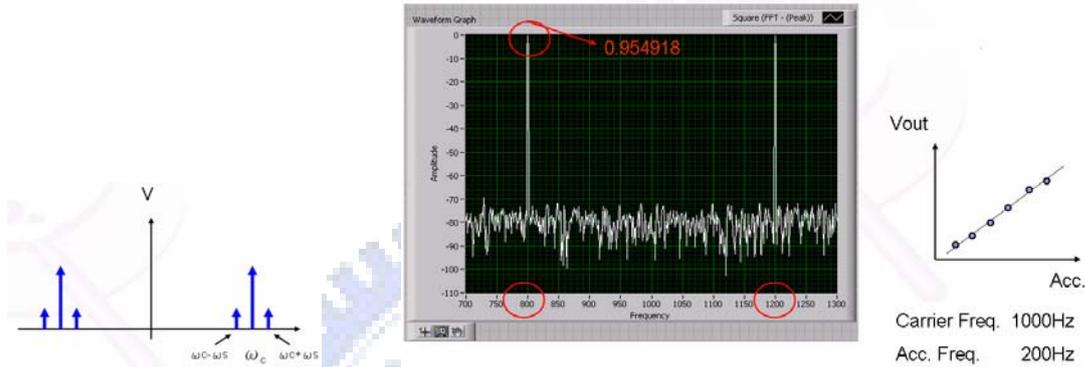


圖 4-22 加速度計靈敏度的量測

故當我們給予壓電致動器 200Hz，DC offset 50Volts，10V 的弦波時，其給予加速規晶片 0.67G 的加速度，紀錄從 0.67G 到 3G 頻譜儀的 \$V_{out}\$，取前面看起來較線性的六組數據作回歸線如圖 4-24，由此斜率可得加速規的靈敏度約 260mV/G。

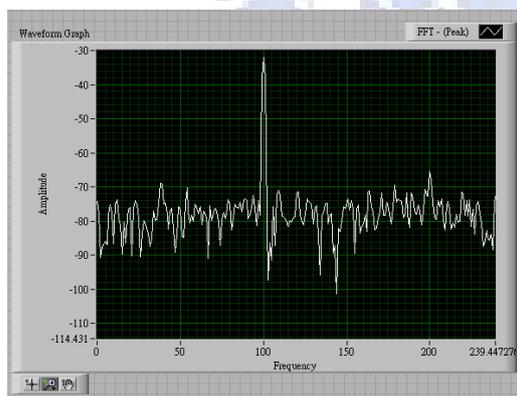
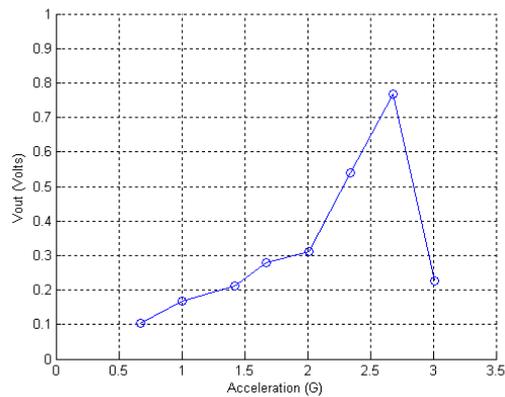


圖 4-23 (a)



(b)

(a)ADXL330 在 100Hz 1G 時的感測訊號

(b)ADXL330 在 200Hz 0.67 ~ 3G 時的 FFT 感測訊號

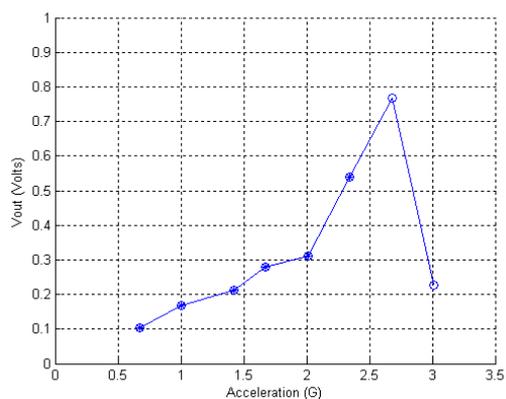
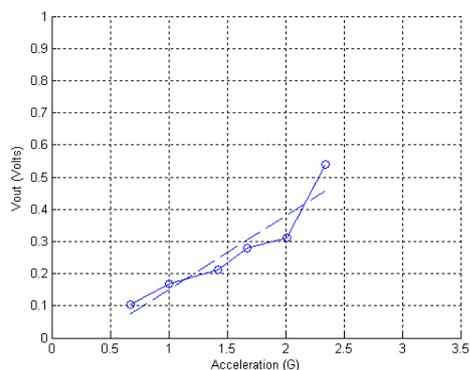


圖 4-24 (a) 線性區域



(b) 線性迴歸線

(2)解析度(Resolution): 加速度計單一頻帶下所能感測的最小加速度(mG)。

頻譜儀上可讀出雜訊的最高峰值(如下圖 4-25), 此值(Vout)與靈敏度做換算後, 可得到 $-66.7\text{dB} = 0.4624\text{mV} = (0.4624/260)\text{mG} = 1.78\text{mG}$ 。代表著此加速規在 100Hz 時最小可讀到 1.78mG 的解析度。

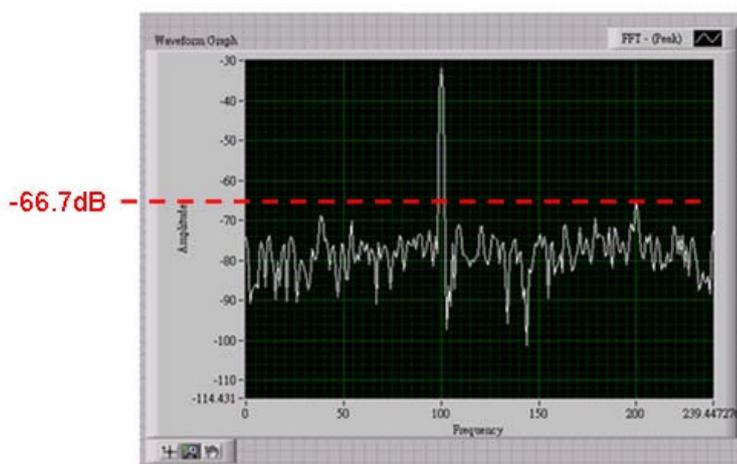


圖 4-25 100Hz 頻譜儀上的雜訊

(3)雜訊(Noise Density): 與解析度是同樣的一項參數，最高的解析度即雜訊。

將前述的解析度再除以工作頻率的根號值即可得到雜訊強度此參數，如下式表示。

$$\sqrt{\frac{a_{\text{noise}}^2}{\Delta f}} = \frac{\sqrt{4kT \cdot b}}{m} \quad \text{式 4-9}$$

(4)耦合度(Cross Sensitivity): 受到單軸加速度時，另一軸的誤差輸出比(%)

耦合度代表多軸感測時，他軸對感測軸的影響程度，此值越小越好，代表結構軸與軸間的耦合不嚴重，以此計畫的雙軸來說可分為 x 對 y 的耦合度($C_{x_to_y}$)以及 y 對 x 的耦合度($C_{y_to_x}$)，利用前述頻譜儀量測靈敏度的方法，當系統在 Y 方向震動時，求得此時兩者輸出的比值(X 軸靈敏度與 Y 軸靈敏度)如下圖 4-26，就可以得到耦合度。X to Y = 17.2 %，Z to Y = 5.3 %。

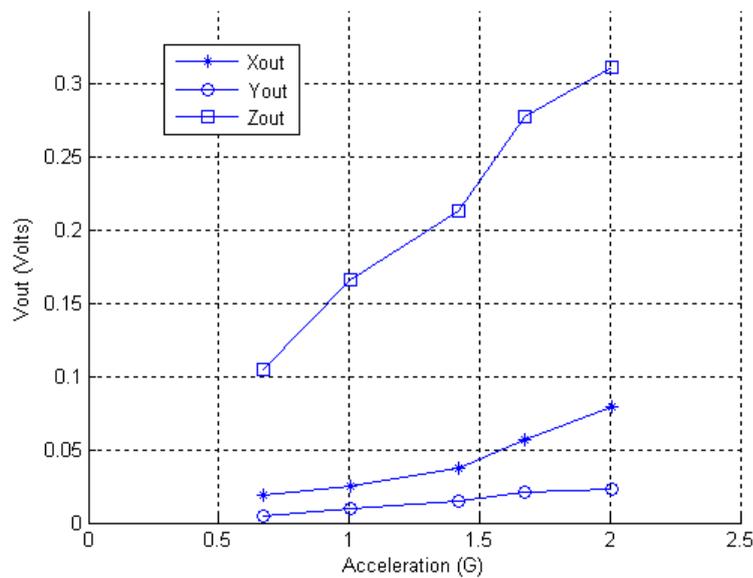


圖 4-26 ADXL330 耦合度量測

(5)非線性度(Nonlinearity):隨著加速度增加，訊號增加的線性關係(%)

由前面頻譜儀得到的靈敏度圖，求其與線性迴歸線的差的方均根值，除上整個 Scale 的 Vout 可得到此批 ADXL330 的量測非線性度為 5%

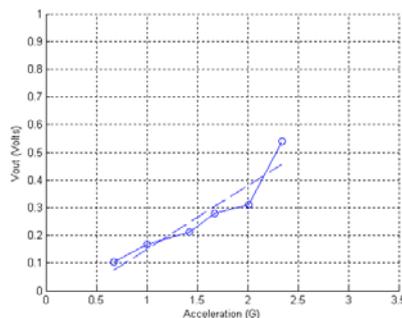


圖 4-27 ADXL330 的非線性度

將前述靈敏度的 Data，作線性迴歸線，每筆資料對回歸線的差取方均根值，與最大輸出的比值，此為非線性度的定義，此值越小越好，0%代表著量測數據完全線性。

(6)動態範圍(Dynamic Range): 加速度計可量測的範圍。

加速度計受到停止器的阻擋，以及感測電容間不同電位的 Pull-in Effect，會造成當系統受到再大的加速度時，輸出已達一飽和的電壓，故此飽和電壓的加速度即為加速度計的動態範圍，亦可稱做為此加速度計的量測範圍，由此圖可得到量測範圍為 $\pm 2.35G$ 。

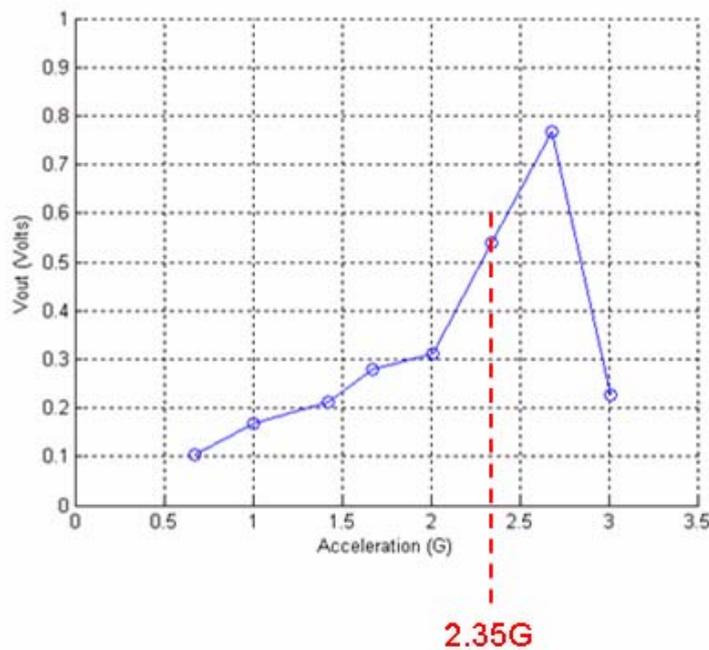


圖 4-28 ADXL330 的動態範圍

	ADXL330 Measurement	ADXL330 Datasheet	Unit
靈敏度 Sensitivity @ 3V	~ 260 mV/G	300 mV/G (+/-10%)	mV/G
頻寬 Bandwidth (kHz)	No Result	1.6 kHz	kHz
解析度 Resolution @ 100Hz	1.78 mG	N.A	mG
雜訊強度 Noise Density	178 ($\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$)	280 ($\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$)	$\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$
耦合度 Cross Sensitivity (%)	17.2 % (y to x) 5.3 % (z to x)	N.A	%
非線性度 Nonlinearity (%)	~ 4 %F.S	N.A	%F.S
動態範圍 Dynamic Range	+/- 2.35 G	+/- 3 G	+/- G

表 4-3 量測平台所得 ADXL330 性能表

第五章 結論

5.1 總結

從製程、設計分析到量測技術上主要有三大部分的結果，說明如下：

(i) 製程

Poly-MEMS 雖因與 Oxide 熱膨脹係數相近而具備低殘留應力的優勢，但此開發中的製程尚在調整階段，不易取得降低殘留應力的熱製程；實驗證明結構實行 750°C 退火製程時，可成功調整試片表面的殘留應力從 +15MPa 到 -20MPa，藉以改變電容板翹曲，嘗試提升加速規的靈敏度；但由於前端搭配電路製程，且沉積 4 μ m 厚的 Poly 結構造成晶片有相當大的應力存在，在製程尚未穩定前，降低殘留應力的製程參數尚須長時間的累積來取得。

Metal-MEMS 使用 Tungsten 作為結構層材料，原本期望藉由其高密度的特性來減少所佔用的晶片面積，但目前受限於 Tungsten 本身薄膜應力過大，且黏著層 Ti/TiN 會被後製程的蝕刻液所攻擊，尚無法成功製作出感測結構體。

(ii) 尺寸設計

本論文在 Poly-MEMS 設計上建立尺寸最佳化的機制，各參數列表如下：

	單軸	雙軸
晶片面積	550 x 500 μm^2	700 x 700 μm^2
感測質量塊	1.2 μg	2.95 μg
懸吊系統 K 值	1.1 N/m	KX: 1.16 N/m KY: 1.09 N/m
感測懸臂	長 170 μm 寬 3 μm	長 170 μm 寬 3 μm
單邊差動對數目	35	16
靈敏度	1.96 fF/G	2.01 fF/G
感測軸共振頻率	7279.4 Hz	X: 2855.5Hz Y: 2942.2Hz
頻寬	5000 Hz	1500 Hz

表 5 - 1 尺寸設計參數

由上表可看出單雙軸的設計頻寬皆較規格要求的 1.6kHz 來的小許多，乃由於此批試片期望在開發中的製程裡，將靈敏度推高至極限，之後的設計再降靈敏度來獲得頻寬。

(iii)量測技術

目前已利用壓電致動器、LabView 程控軟體與 NI Scope 5122 完成加速規量測平台的架設，並以加速規 ADXL330 作驗證測試。其量測所得性能與產品標示比較如下；

	ADXL330 Measurement	ADXL330 Datasheet	Unit
靈敏度 Sensitivity @ 3V	~ 260 mV/G	270 ~ 330 mV/G	mV/G
頻寬 Bandwidth (kHz)	No Result	1.6 kHz	kHz
解析度 Resolution @ 100Hz	1.78 mG	N.A	mG
雜訊強度 Noise Density	178 ($\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$)	280 ($\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$)	$\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$
耦合度 Cross Sensitivity (%)	17.2 % (x to y) 5.3 % (z to y)	N.A	%
非線性度 Nonlinearity (%)	~ 4 %F.S	N.A	%F.S
量測範圍 Dynamic Range	+/- 2.35 G	+/- 3 G	+/- G

表 5 - 2 ADXL330 量測性能比較表

若以 ADXL330 所公佈的 Datasheet 為參考，此量測可驗證的參數為靈敏度、雜訊強度、量測範圍；靈敏度有著 260mV/G，與產品規格誤差在 15%以內；量測範圍 +/- 2.35 G 與規格 +/- 3 G 有約 21%的誤差，若在 2.4 ~ 2.7G 多擷取幾組數據應可拉長其線性的範圍，減少與 3G 的誤差；另外值得注意的是耦合度測得的 17.2% 與 6.4%相較於其他 Reference(<4%)略嫌高了些，造成此較大差別的主因應該在於量測時，致動器的致動軸並沒有完全百分之百地對準感測軸，造成加速度的給予在非感測軸(X 軸)亦有些微的訊號輸出。

5.2 未來工作

5.2.1 Poly-MEMS

(i) 性能量測

此研究所架設的量測平台，乃直接擷取結構體的訊號，故待此批設計試片完成打線後，可透過此量測平台，獲得靈敏度、解析度、雜訊強度、耦合度、非線性度與量測範圍等六項參數。

(ii) 整合電路製作後的量測

除了結構體訊號的擷取，加速規搭配電路感測是必須的，期望之後的試片能完成電路與結構體的整合製作，再行如前述的性能量測。

(iii) 封裝後的再量測

封裝的進行，可減低系統的壓力，期望藉由降低系統阻尼，來提升加速規的性能，並完成從設計、製程、封裝到量產的目標。

(iiii) 懸吊系統的改進

由此次實驗結果可觀察出，雙軸設計的感測質量塊受殘留應力影響而翹曲嚴重，初步評估為雙軸懸吊系統的懸臂過長，拉長了質量塊連接點與 Anchor 的距離，故期望改進懸吊系統的設計，維持同樣的 K 值，但拉近質量塊連接點與固定點(Anchor)的距離，減少質量塊翹曲量的增加，同時改變雙軸感測懸臂的配置，避免其位於四個受殘留應力影響甚大的角落。

5.2.2 Metal-MEMS

(i) Metal-MEMS 加速規的實現

目前使用 Tungsten 當感測結構的問題存在於 Anchor 之間的站立，期望藉由改變製程的設計，保護黏著層 Ti/TiN，使 Tungsten 感測結構能成功固定在晶片上，實現 Tungsten 加速規的結構體製作。

参考文献

- [1] WTC, <http://www.wtc-consult.com/english/mems-microsystems/>
- [2] Analog Device Inc., <http://www.analog.com>
- [3] Wolfgang Kuehnel, "A Surface Micromachined Silicon Accelerometer with On-Chip Detection Circuitry," Sensors & Actuators A 45, 1994, p.7-16.
- [4] Stephen D. Senturia, "Microsystem Design," Kluwer Academic Publishers, Boston, 2001, p.520-523.
- [5] 徐泰然, "MEMS & Microsystems Design and Manufacture," Mc Graw Hill International, 2003.
- [6] Ke-Min Liao, Rongshun Chen, Bruce C.S. Chou, "A Novel Thermal Bubble Based Micromachined Accelerometer," Sensors & Actuators A 130-131, 2006, p282-289
- [7] O. Brand, G. K. Fedder, "Advanced Micro & Nanosystems v.2 CMOS-MEMS", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005.
- [8] F. Rudolf, A. Jordon, J. Bergqvist and H. Leuthold, "Precision Accelerometer with μg Resolution", Sensors & Actuators, A21-A23, 1990, p.297-302.
- [9] Crist Lu, Mark Lemkin, and Bernhard E. Boser, "A Monolithic Surface Micromachined Accelerometer with Digital Output," IEEE Journal of Solid State Circuit, Vol. 30, No. 12, 1995.
- [10] Timothy J. Brosnihan, James M. Bustillo, Albert P. Pisano, Roger T. Howe, "Embedded Interconnect and Electrical Isolation for High-Aspect-Ratio, SOI Inertial Instruments," In : Technical Digest of the 9th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators; Transducers, 1997, p.637-640.
- [11] Tracy Hudson, Sherrie Holt, Paul Ruffin, Jim McKee, Michael Whitley, Michael Kranz, Eric Tuck, "Embedded Interconnect and Electrical Isolation for High-Aspect-Ratio, SOI Inertial Instruments," IEEE, 2006.

- [12] Wenmin Qu, Christian Wenzel, Gerald Gerlach, "Fabrication of a 3D differential-capacitive acceleration sensor by UV-LIGA," V77, Issue1, 28 September 1999, p. 14-20.
- [13] S. Michaels, H.-J. Timme, M. Wycisk, J. Binder, "Acceleration Threshold Switches from an additive electroplating MEMS Process," Sensors & Actuators A 2000, 85, p.418-423.
- [14] Huikai Xie, Lars Erdmann, Xu Zhu, Kaigham J. Gabriel, , and Gary K. Fedder, "Post-CMOS Processing for High-Aspect-Ratio Integrated Silicon Microstructures," Journal of MEMS, Vol.11, No.2, 2002.
- [15] Gary K. Fedder, Xu Zhu; Carnegie Mellon University, "Method of Fabricating Micromachined Structures and Devices Formed Therefrom," US-Patent No.6458615, Mar 1 2002, filed Sep. 30 1999.
- [16] Huo Luo, Gang Zhang, L. Richard Carley and G. K. Fedder, "A Post-CMOS Micro- machined Lateral Accelerometer," in IEEE Journal of Micromechanical Systems, Vol 11, No.3, June 2002.
- [17] Howard R. Samuel, David C. Holloncher, Michael Judy, Thor Juneau, "Reducing Offset in Accelerometers," US-Patent No.6892576, May 17 2005, filed July 18 2003.
- [18] 陳精一, "ANSYS震動學實務分析", 高立圖書有限公司 2005
- [19] Fraden, Jacob, Jacob Fraden, , "Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications," American Institute of Physics, 1996,p.89-138
- [20] 國家晶片設計中心CIC, <http://www.cic.org.tw>