

行政院國家科學委員會補助  
大專學生參與專題研究計畫研究成果報告

\* \*\*\*\*\* \*  
\* 計 畫 \*  
\* : 低溫製程可撓式基板之加速度感測器研製 \*  
\* 名 稱 \*  
\* \*\*\*\*\* \*

執行計畫學生： 林昱呈  
學生計畫編號： NSC 98-2815-C-216-003-E  
研究期間： 98年07月01日至99年02月28日止，計8個月  
指導教授： 林君明

處理方式： 本計畫可公開查詢

執行單位： 中華大學機械工程學系

中華民國 99年03月31日

行政院國家科學委員會補助  
大專學生參與專題研究計畫研究成果報告

\*\*\*\*\*  
\* 計畫 \*  
\* : 低溫製程可撓式基板之加速度感測器研製 \*  
\* 名稱 \*  
\*\*\*\*\*

執行計畫學生：林昱呈  
學生計畫編號：NSC 98-2815-C-216-003-E  
研究期間：98年7月1日至99年2月底止，計8個月  
指導教授：林君明

處理方式(請勾選)：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：中華大學

中華民國 99年 3月 29日

## 一、前言

本專題目的是低溫製程可撓式基板(Flexible Substrate)上，進行加速儀感測器研製。其方法是利用本校機械系已有的電子槍蒸鍍機(E-Gun Evaporator)如圖 1、溫控烤箱(Temperature-Controlled Oven) 如圖 2，雷射(Nd:YAG 355 nm)退火(Annealing)圖 3，光阻塗佈機(Spin Coater)如圖 4 以及曝光對準機(Mask Aligner)如圖 5；故可以進行光阻的塗佈、曝光、顯影、及蝕刻等製程(Photolithographic Process)，在可撓式基板上，製作熱敏式加速儀。

其中一般半導體材料，絕緣材料及導電金屬等，是利用電子槍蒸鍍機，以電子束(E-Beam)加速聚焦的方式，熔化待鍍物，進行物理氣相沉積。其優點有別於一般半導體製程，需要在高溫下研製這些結構，所以本研究首先是把電子槍蒸鍍機，運用在可撓式軟性基板上，進行加速儀的研製。

由電子槍蒸鍍的材料性能，可能並不是很好，例如非晶矽薄膜，所以要用 Nd:YAG 雷射，進行退火製程(Annealing)，將非晶矽轉化為複晶矽(Poly-Silicon) 提升的品質。

此加速儀的工作原理，是運用蒸鍍的鉻(Cr)或鎳(Ni)等金屬薄膜，作為加熱器(Heater)，而在其兩旁各蒸鍍兩個由 P 型半導體材料(P-Type Semiconductor)，所構成的熱敏電阻(Thermistors)。而後運用兩組鉻(Cr)或鎳(Ni)金屬薄膜，作成的加熱器，及四個由 P 型半導體材料所構成的熱敏電阻，構成兩組雙差分式橋式電路(Differential Bridge Circuit)，即可偵測一維(One Dimension)的加速度。其優點是可以增大輸出信號，並降低共模雜訊與負載干擾(Common Mode Noise and Disturbance)的影響，使靈敏度增加。而重複上述三組電路，並在 X、Y 及 Z 方向安置，即可量測三維的加速度運動。

## 二、研究目的

現在的微機電系統(MEMS)技術不斷的發展，運用也已經非常的廣泛。MEMS 主要的產品類別大致可分為加速計、陀螺儀、壓力感測器、光通訊元件、數位光源處理、噴墨頭，以及無線網路 RF 感測元件等，目前已逐漸應用在包括汽車胎壓量測、光通訊網路、投影機、感測網路、數位麥克風、時脈振盪器，以及包括遊戲機在內的各種產品之中，甚至在新一代記憶體技術、生物晶片、顯示技術、新興能源等。

目前加速儀的應用已非常普遍，其中最簡單的一項，就是進行重力(Gravity Force)的感測，如傾斜計(Inclinometer)，可以測知物體的傾斜程度。現在國內人口已有很嚴重的老化現象，而行動不便居家老人的照顧，將來會是政府一項很大的社會福利負擔，如老人家是否有跌倒的現象？是否要出動勤務進行緊急救助？

加速儀也可以運用於車的防撞氣囊(Airbag)，有很大的應用，也可做為計步器(Pedometer)之用，無論是走路或跑步，都可以計算步數，並量測移動的距離，機器人的導航，未來也可以應用在視訊遊戲機(Video game)、手機(Mobile Phones)和商用電子(Consumer)產品上。甚至火星偵察軌道器，裡面也有搭載加速儀 Atmospheric Structure Investigation Accelerometers (大氣層結構探測加速儀)。

現在最火紅的 i-Phone 手機，其中就是運用一個加速儀，加速儀具備有幾項功能，例如可以調整影像旋轉模式(Image Orientation Mode)，藉由感測手機的位置，讓影像做適度的調整，快速進行畫面的轉換，手機傾斜姿態的感測，因而非常受到大家的青睞，目前市場也非常龐大。將來類似 Wii 的遊戲機，也會把此加速儀，運用在遊戲者手部揮動物體、腳部踢東西、或身體姿態傾斜彎曲的應用上，而增進休閒運動的推廣。

## 二、文獻回顧與探討

慣性感測元件在日常生活中是經常被應用的一種感測器，它被廣泛地應用在科學及工業上。例如：飛機、汽車及量測設備。近幾年來，由於汽車工業的蓬勃發展，使得感測元件大量地被運用在汽車零組件上。例如在安全氣囊、主動懸吊系統及安全帶等。為了提升其安全性，使得感測元件的需求明顯的增加，並且使得全球積極的研究發展慣性感測元件，也使得工業快速的成長與發展。在慣性感測元件中，加速儀是較具代表性的一種感測元件[1]。工業上，加速度感測器經常被應用在感測方面。最近這幾年精密機械產業的蓬勃發展，以及大量的應用加速度感測器，使得加速度感測器的需求逐漸增加，並且使得加速度感測器的研究及工業快速的發展。如今，已有非常多的加速度感測器，被發表出來，如：電容式、壓阻式、壓電式、光學式、熱型式……等等，種類繁多。

有一篇文章提到加速儀的設計與製造微原理[3]，設計上需要有懸浮矽臂，而若要此一懸浮結構，則需要有一層犧牲層(SLIGA 製程)，來配合製程。這種加速儀有可移動的結構，會有老化的問題。另一方面，製造這種加速儀，基板是矽晶圓，需要在高溫製程下製作，成本上相當昂貴。

有本書 Micro Electro Mechanical Systems Technology & Application (1) [5] 有提及製作熱阻型加速儀元件，由具有低熱導的感測懸浮薄板所構成，但這種方法也要用矽微細加工技術，也需要作在矽晶片之上，也要用到高溫製程。

1972 年，Frobenius 曾經利用多種不同懸臂標的長度，製作加速儀感測元件。當外界有加速度作用時，懸臂標之自由端會受到慣性力的作用，產生位移，而與懸臂標底下的導體接觸，產生開關 (On-Off) 的訊號。由於設計自由端懸臂標長度的不同，所以自由端位移的難易程度就各不同，因此可利用此特性，做出判斷加速移值的大小。但所設計之懸臂標，那時還無法能有效的量測出連續的類比訊號[6]。

1979 年，Roylance[7]利用矽的壓阻性值，成功地製作出一個由懸臂標與質量塊 (Proof Mass)，所構成的壓阻式微加速儀。提出改變懸臂標的尺寸，以降低測向的靈敏度 (Cross-axis Sensitivity)，以及利用阻尼來增大頻寬等概念，為日後的微型加速儀的結構，奠定了雛型基礎。

1982 年，美國加州大學柏克萊分校，發表以二氧化矽作為犧牲層的技術[8]。這種概念是在晶片上，做一個有倒「L」型結構的微機電結構晶片，即在矽晶圓基板上，先定義並沉積出一塊準備事後要被氫氟酸蝕刻掉的二氧化矽，這個部位就是「犧牲層」。

1993 年，Kampen [9]所設計出的加速度感測器，有包含控制電容的型式，它是利用靜電力迴授的方法，將阻尼控制至臨界值，這是為了使加速儀有較大的頻寬。1994 年 Rockstad [10]為了要達到大頻寬的需求，且為了克服頻率上的限制，所以提出了雙元件的設計，將質量塊和電能轉換器分成兩個部分，使其機械特性可以獨立。1998 年，Liwei Lin 等人[11]，同樣也使用多晶矽薄膜表面微加工技術，以及氮化矽真空密封技術，製作一串聯的梳狀共振器。並成功量測到工作於 18.7KHz 的中心頻率，及 1.2KHz 的 3dB 頻寬。但這些方法也要用矽微細加工技術，需要作在矽晶片之上，也要用到高溫製程。

清華大學陳榮順教授的研究群主要研究是利用其研究群所設計之熱汽泡式加速儀，清華大學陳榮順教授的研究群是利用熱氣泡作為重力塊，就像其他加速度感測器有重力塊一樣[12]。

和本計畫性質較接近的是 2007 年 10 月有一篇專利，提到單晶片三軸加速儀的設計[4]，其中有運用兩個熱敏電阻，配置在一個加熱器的兩邊；若有加速度運動時，則熱敏電阻會因加熱器的位置變化，而溫度及阻值也會相對的產生改變。因此可運用兩組加熱器，四個熱敏電阻，及兩組雙差分式橋式電路 (Differential Bridge Circuit)，即可偵測一維 (One Dimension) 的加速度。其優點是可以增大輸出信號，

並降低共模雜訊與干擾 (Common Mode Noise and Disturbance) 影響，使靈敏度增加。而重複三組相同的結構及電子電路，即可量測三維的加速度運動。這種加速儀沒有可移動的結構，所以不會有老化的問題，而為一優點。可是它也是作在矽晶片之上，要用到高溫製程，所以材料及製程的成本會比較高，而為其缺點。產品是否能夠進入市場，價格是一重要因素，對 Airbag 用的 High g 加速儀而言，如果是單軸感應器，其單價必須低於 1.8 美元才有機會；對於三軸感測器，價格則須在 5-6 美元下才有競爭力 [13]。

本專題是以微機電技術，在可撓式基板上，以低溫方式製作加速儀。先是製作加熱器 (Heater)，而後令一標準電流，通過此電阻，當作熱源。而在其兩旁各蒸鍍兩個由 P 型半導體材料 (P-Type Semiconductor)，所構成的熱敏電阻 (Thermistors)。而後運用兩組鉻 (Cr) 或鎳 (Ni) 金屬薄膜，作成的加熱器，四個由 P 型半導體材料所構成的熱敏電阻，兩組雙差分式 (Differential) 橋式電路 (Bridge Circuit)，即可偵測膜一維 (One Dimension) 的加速度。因外界加速度的大小，會使環境熱傳速度改變，如距離熱源一固定距離，有一組橋式熱敏電阻 (Bridge Resistors)，則此組橋式熱敏電阻值改變的速率，與載具的加速度有成差分比例 (Differential Proportion) 的關係，整合此橋式電路的輸出電壓，即可用來檢測載具的加速度。其優點是可以增大輸出信號，並降低共模雜訊與負載干擾 (Common Mode Noise and Disturbance) 影響，使靈敏度增加。而重複三組即可量測三維的加速度運動。這種加速儀的特徵，是沒有任何可移動的結構。其中最重要的就是要先做模擬分析，使熱敏電阻值與加速度變化，有更高的靈敏度。

#### 四、研究方法及步驟

本研首先是運用 TANNER Tools 光罩繪製套裝軟體，進行光罩的設計。因為它可同時繪製積體電路，與微機電系統的結構。此外尚搭配 IntelliSuite 微機電系統模擬軟體，進行加速儀設計與模擬。結合此兩套軟體，可設計出不同結構與外型之加速儀，提供深入的分析與探討。

在元件之設計與繪製方面，是利用 L-Edit 套裝軟體進行設計。L-Edit 具有高效率、互動性佳等特性，因其具備繪圖功能，同時兼具光罩產生功能，效率高，又可与不同的軟體相結合，例如 AutoCAD, IntelliSuite 等軟體相結合，所以本研究也是利用 L-Edit 進行光罩設計。在建立模型之前須先用 L-Edit 繪製光罩圖檔，然後透過轉檔過程，再利用 IntelliSuite 建立模型，過程中須檢視所轉檔過來的形狀，是否與原先設計相同，以確保模擬分析前所得的模型是正確的，之後才由 IntelliSuite 進行元件性能分析。

製作流程步驟詳述如下：首先利用電子槍蒸鍍 (圖 1) 的材料性能，可能並不是很好，例如非晶矽薄膜，所以要用控溫烤箱或 Nd:YAG 雷射 (圖 2 及圖 3)，進行退火製程 (Annealing)，將非晶矽轉化為複晶矽提升的品質，再利用光阻塗佈機 (Spin Coater) 如圖 4 以及曝光對準機 (Mask Aligner) 如圖 5；進行光阻的塗佈、曝光、顯影、及蝕刻等製程，在可撓式基板上，製作熱敏式加速儀。此加速儀的工作原理，是運用蒸鍍的鉻 (Cr) 或鎳 (Ni) 等金屬薄膜，作為加熱器 (Heater)，而在其兩旁各蒸鍍兩個由 P 型半導體材料 (P-Type Semiconductor)，所構成的熱敏電阻 (Thermistors)。而後運用兩組鉻 (Cr) 或鎳 (Ni) 金屬薄膜，作成的加熱器，及四個由 P 型半導體材料所構成的熱敏電阻，構成兩組雙差分式橋式電路 (Differential Bridge Circuit)，即可偵測一維 (One Dimension) 的加速度。其優點是可以增大輸出信號，並降低共模雜訊與負載干擾 (Common Mode Noise and Disturbance) 的影響，使靈敏度增加。而重複上述三組電路，並在 X、Y 及 Z 方向安置，即可量測三維的加速度運動，並進行電氣性能探針平台量測 (圖 6 及圖 7)。特別要提出說明的是：本項製程為自行研發者，已提出專利申請。



圖1 電子槍 (E-gun) 蒸鍍設備

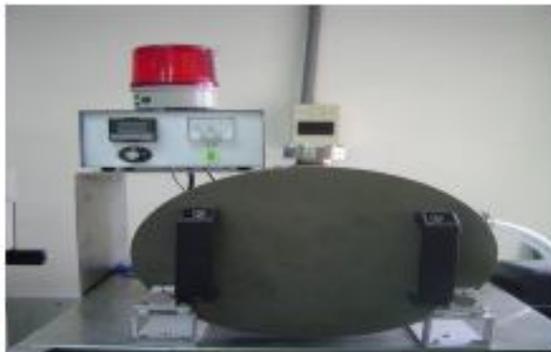


圖2 可控溫烤箱



圖 3(a) 準雷射退火設備



圖 3(b) 準雷射退火設備(聚焦模組)



圖 4 光阻塗佈機



圖 5 曝光對準機



圖 6 Keithley 4200 IV 電性量測儀



圖 7 顯微鏡 I-V 電性量測探針平台

### Part 1. 加速儀製作

1. 在可撓式基材之背面，以電子槍加熱(E-Gun Evaporation)等低溫製程方式，先蒸鍍一層二氧化矽(厚度為 10 至 100 微米)，作為後續加速儀的隔熱及防濕層。這個製程是屬於低溫製程，所以成本很便宜。其後塗上一層正極性之光阻(厚度為 20 至 100 微米)，而後烤乾。
2. 在可撓式基材之正面塗上一層正極性之光阻(厚度為 20 至 100 微米)，而後烤乾。
3. 在可撓式基材之正面，也以電子槍加熱方式，先蒸鍍一層二氧化矽(厚度為 10 至 100 微米)，作為後續加速儀的隔熱及防濕層。其後塗上一層負極性之 SU\_8 光阻(厚度為 100 至 300 微米)，而後烤乾。(圖 8)
4. 用第一塊光罩，並運用黃光製程，在可撓式基材之正面，定義出外圍負極性之 SU\_8 光阻(照到紫外線曝光後轉變成短鏈)。經過顯影製程後，這些外圍部份的光阻就可以留下來，作為後續製程支撐中間加熱器(鉻及鎳之兩層金屬)，以及熱敏電阻(P 型參雜之非晶矽及複晶矽)等懸浮結構的柱子。(圖 9)

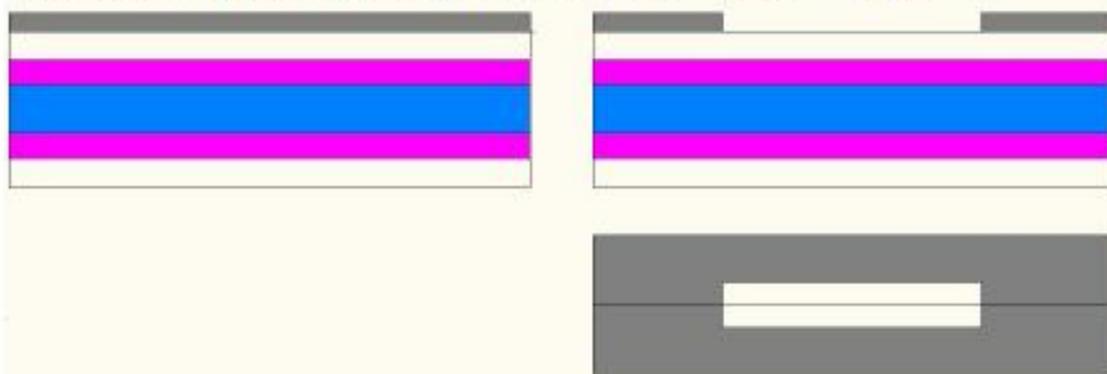


圖 8

圖 9

5. 在可撓式基材之正面，用電子槍等低溫製程，蒸鍍一層二氧化矽(厚度為 100 至 250 微米)。在可撓式基材之正面，塗上一層正極性之一般光阻(厚度為 20 至 100 微米)，而後烤乾。(圖 10)
6. 用第一塊光罩，並運用黃光製程，在可撓式基材之正面，定義出中央部份之正極性一般光阻(外圍光阻照到紫外線曝光後轉變成短鏈)。經過顯影製程後，就可以去掉這些外圍部份的光阻。(圖 11)

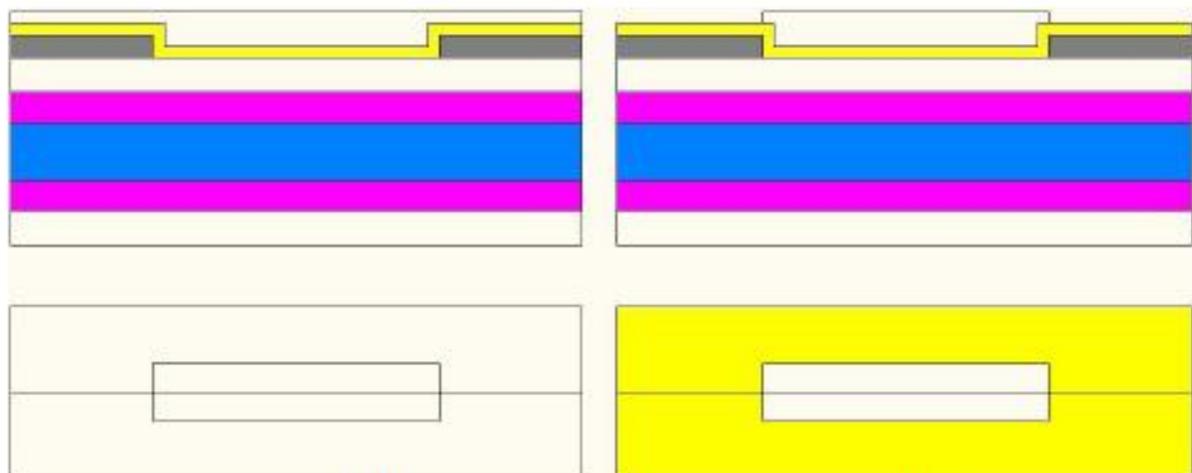


圖 10

圖 11

7. 用氫氟酸緩衝溶液(Buffered HF Solution)，將沒有光阻保護的外圍二氧化矽蝕刻掉。而留在中央部份的二氧化矽(當作犧牲層)上面，就可以作後續製程的加熱器(鉻及鎳之兩層金屬)，以及熱敏電阻(P 型參雜之非晶矽或複晶矽)等裝置的支撐

結構。將來再將這些二氧化矽犧牲層，用氫氟酸緩衝溶液蝕刻掉。如此加熱器(鉻及鎳之兩層金屬)，以及熱敏電阻(P型參雜之非晶矽或複晶矽)等結構，就可以懸浮了。(圖 12)

8. 用丙酮(Acetone)去掉中央部份作蝕刻保護用之一般光阻。(圖 13)

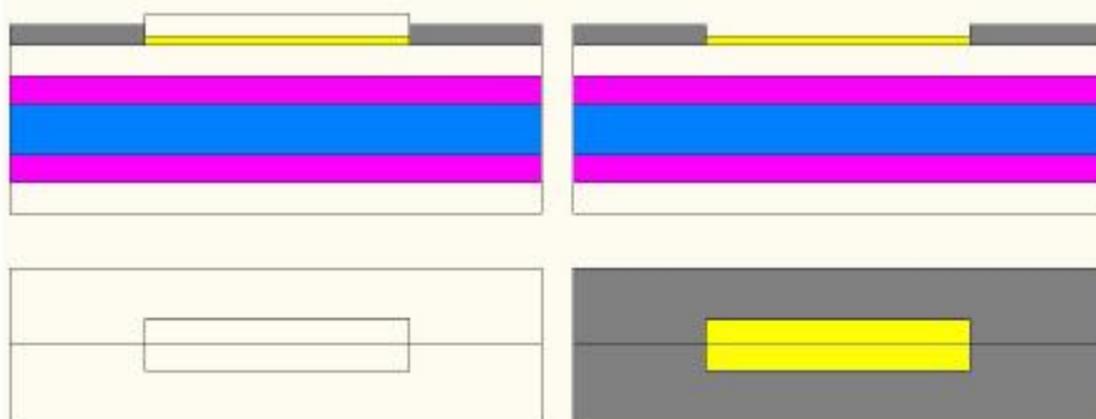


圖 12

圖 13

9. 用電子槍蒸鍍一層氮化矽(厚度為 100 至 250 微米)，作為支撐加熱器(鉻及鎳之兩層金屬)，以及熱敏電阻(P型參雜之非晶矽或複晶矽)的結構。(圖 14)
10. 在可撓式基材之正面，塗上一層負極性之 SU\_8 光阻(厚度為 100 至 300 微米)，而後烤乾。(圖 15)

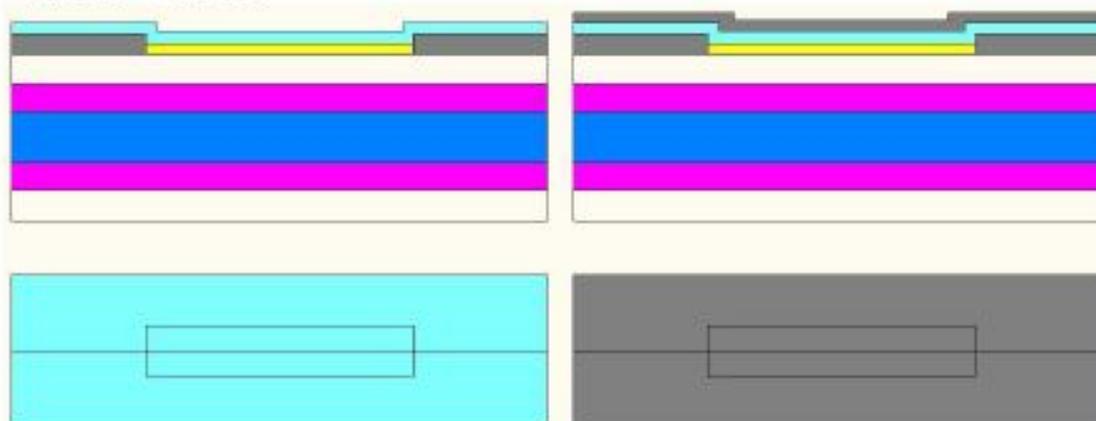


圖 14

圖 15

11. 用第二塊光罩，並運用黃光製程，在可撓式基材之正面，定義出中央部份三條長鍵光阻(這三條光阻原為負極性，照到紫外線曝光後轉變成長鍵)，及其他外圍之支撐結構。經過顯影製程後，就可以去掉其他部份沒有照到紫外線的光阻。(圖 16)
12. 運用磷酸溶液，將沒有光阻保護的氮化矽層蝕刻掉。而留在中央的三條氮化矽層上面，就可以作後續製程之加熱器(鉻及鎳之兩層金屬)，以及熱敏電阻(P型參雜之非晶矽或複晶矽)等之支撐結構。(圖 17)
13. 用丙酮(Acetone)去掉保護之一般光阻。(圖 18)
14. 用電子槍等低溫製程，蒸鍍一層非晶矽(厚度為 100 至 250 微米)，再用離子植入法形成 P 型參雜。或用電子槍等低溫製程，先蒸鍍上一層硼酸(厚度為 10 至 100 奈米)，再以雷射進行退火，如此即可在低溫環境下，使非晶矽轉變成複晶矽，另一作用是可在低溫環境下，將硼擴散進入複晶矽中，以形成 P 型參雜，作為性能非常好的熱敏電阻結構，最後將殘留在表面的硼酸蝕刻掉。(圖 19)
15. 在可撓式基材之正面，塗上一層負極性之一般光阻(厚度為 20 至 100 微米)，而後烤乾。(圖 20)

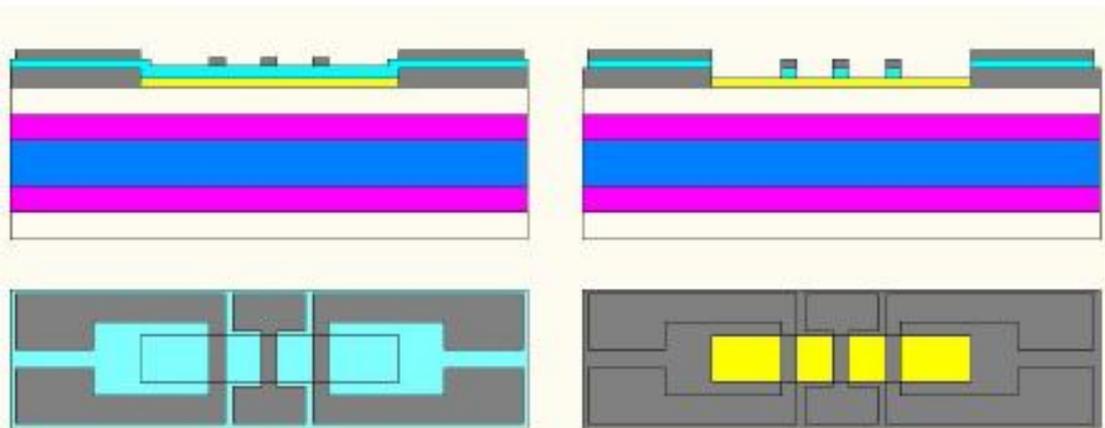


圖 16

圖 17

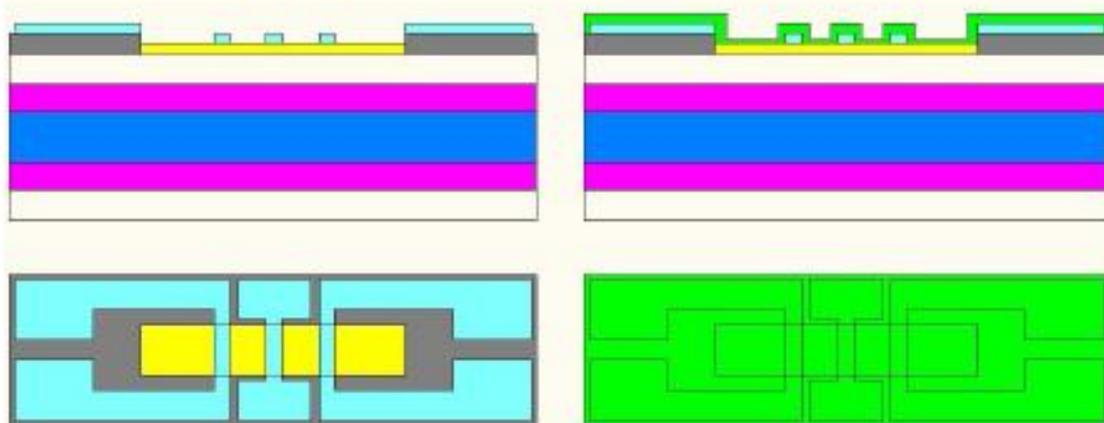


圖 18

圖 19

16. 用第三塊光罩，並運用黃光製程，在可撓式基材之正面中央部份，定義出兩條長鍵光阻(這兩條光阻原為負極性，照到紫外線曝光後轉變成長鍵)。經過顯影製程後，就可以去掉其他部份的光阻。(圖 21)

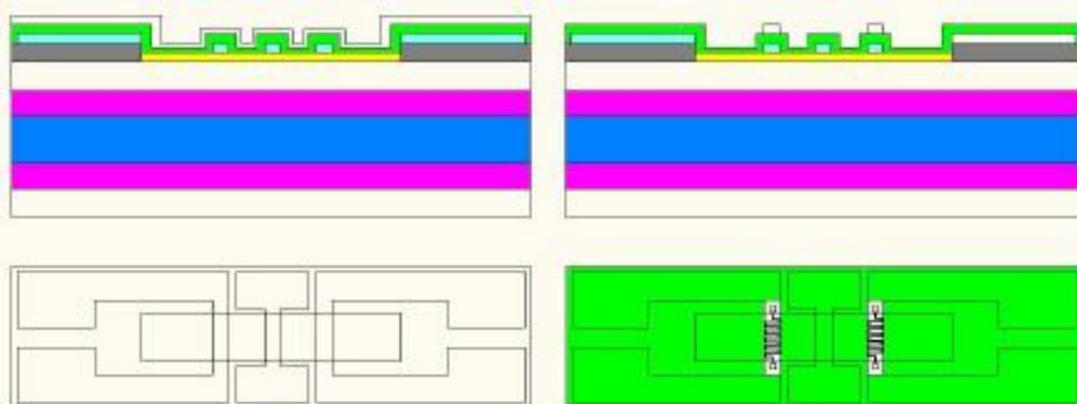


圖 20

圖 21

17. 用氫氧化鉀溶液(KOH Solution)，蝕刻掉沒有光阻保護的P型參雜之非晶矽(如第 15 步驟之運用離子植入法)，或複晶矽(如第 15 步驟之運用低溫雷射退火擴散法)層。而留在中央部份的兩條P型參雜之非晶矽或複晶矽，就可以作後續製程熱敏電阻之結構。(圖 22)
18. 用丙酮(Aceton)去掉保護之一般光阻。(圖 23)
19. 用電子槍蒸鍍鉻及鎳等兩層金屬(作為加熱器的結構)。(圖 24)
20. 在可撓式基材之正面，塗上一層負極性之一般光阻(厚度為 10 至 100 微米)，而後

烤乾。(圖 25)

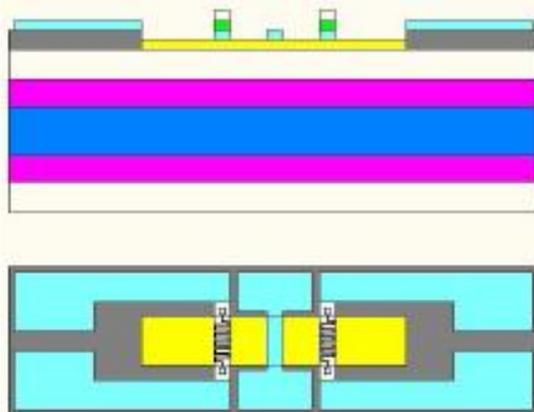


圖 22

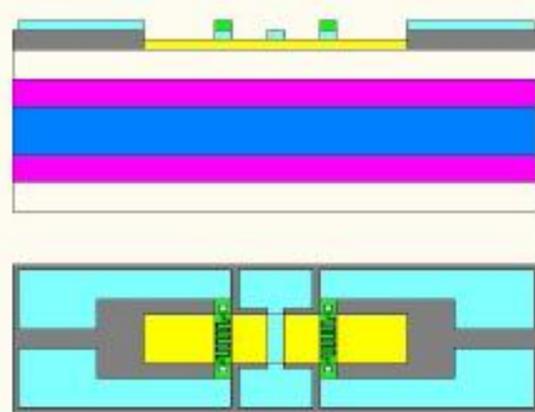


圖 23

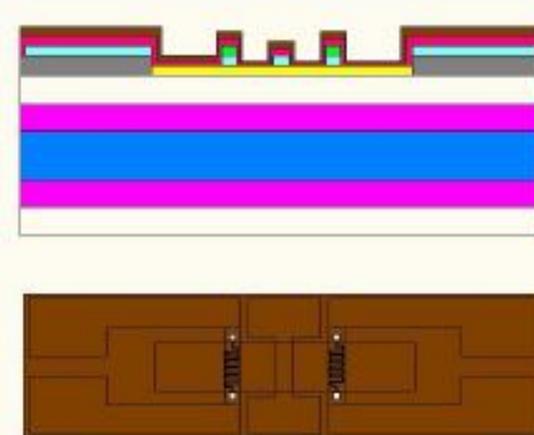


圖 24

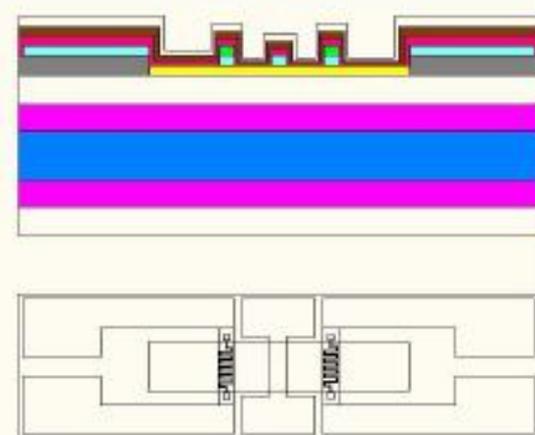


圖 25

21. 用第四塊光罩，並運用黃光製程，在可撓式基材之正面中央部份，定義出一條長鍵光阻(這一條光阻原為負極性，照到紫外線曝光後轉變成長鍵)。經過顯影製程後，就可以去掉其他部份的光阻。(圖 26)

22. 將沒有光阻保護的金屬鉻及鎳蝕刻掉。而留在中央部份的一條金屬鉻及鎳。就可以作為加熱器的結構，最後將光阻去掉。(圖 27)

註 1：步驟 20 至步驟 23，此段製程可改用下列之掀離顯影製程(Lift-off Process)較佳。即先定義出一層厚光阻 SU\_8，將中央部分去掉，而後蒸鍍鉻及鎳金屬。最後用掀離顯影製程(Lift-off Process)之方法去掉光阻，即可留下中央部份的鉻及鎳薄膜作為加熱器，結果如上圖所示。

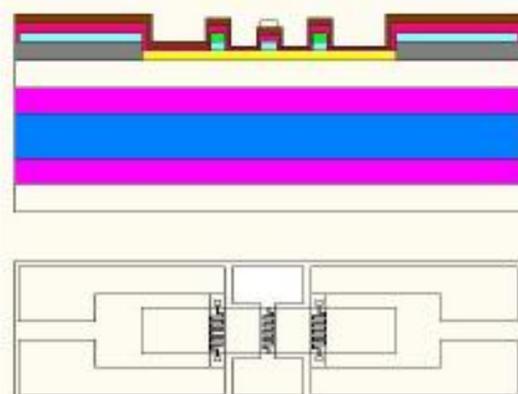


圖 26

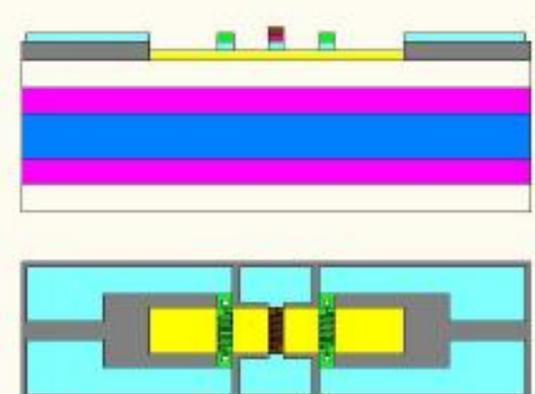


圖 27

23. 用電子槍蒸鍍一層金(厚度為 0.1 到 0.5 微米)，作為加熱器以及熱敏電阻的焊墊 (Pad)。(圖 28)
24. 在可撓式基材之正面，塗上一層負極性之一般光阻(厚度為 20 至 100 微米)，而後烤乾。(圖 29)

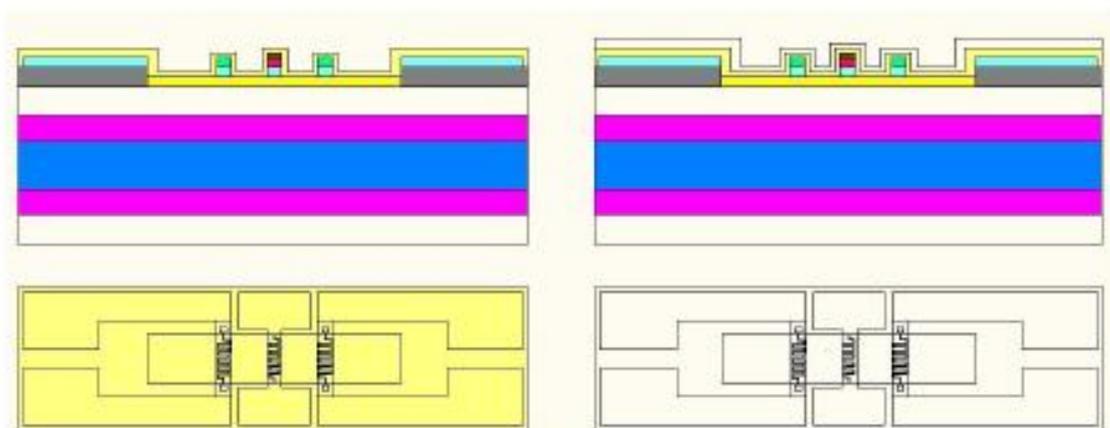


圖 28

圖 29

25. 用第五塊光罩，及黃光製程在可撓式基材外圍部份，定義出六塊焊墊及其連線部份的長鍵光阻(這些部份的光阻原為負極性，照到紫外線曝光後轉變成長鍵)。經過顯影後，去掉其他部份的光阻。(圖 30)
26. 用王水溶液，將沒有光阻保護的金蝕刻掉。(圖 31)

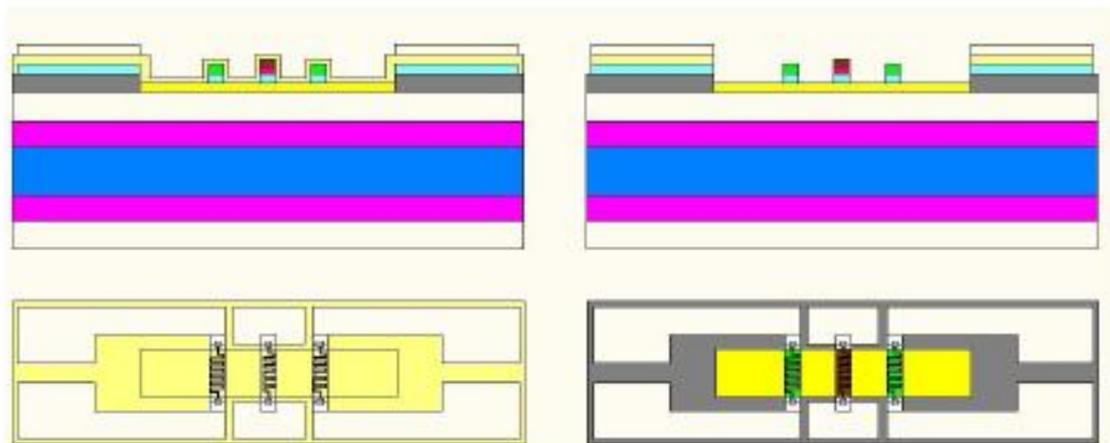


圖 30

圖 31

27. 用丙酮(Aceton)去掉正面保護之一般光阻。(圖 32)
- 註 2：步驟 24 至步驟 28，這些步驟是做金連線部分，也可以用掀離顯影製程方法 (Lift-off Process)，只留下要連線部分的金薄膜即可，結果如上圖所示。因為不需用到王水作蝕刻製程，所以較容易。
28. 用氫氟酸緩衝溶液(Buffered HF Solution)，將沒有被鉻及鎳等金屬，及 P 型參雜之非晶矽或複晶矽保護的二氧化矽蝕刻掉。如此加熱器(鉻及鎳之兩層金屬)，及熱敏電阻(P 型參雜之非晶矽)等結構，就可以懸浮了(氫氟酸緩衝溶液也不會蝕刻氮化矽，所以氮化矽可以當作支撐加熱器以及熱敏電阻的結構)。(圖 33)

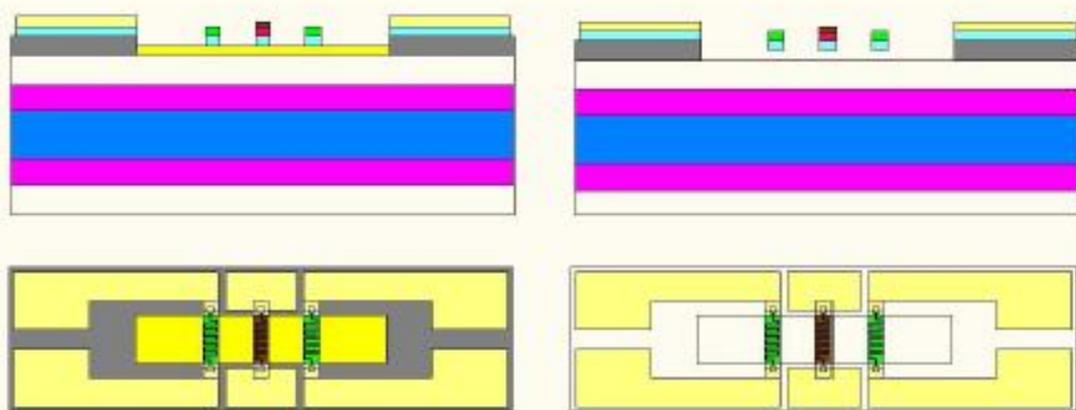


圖 32

圖 33

### Part 2. 双差分式橋式電阻加速度感測電路

在前述可撓式基材之水平 X 及 Y 軸方向，各自組成兩組双差分式橋式電路，如圖 34 及 35。本元件是固定在載具之上，如圖 34 當載具向左邊移動時(-X 軸向加速度為負值)，則 R1 及 R3 之溫度會降低，而其電阻值，則會因半導體 P 型材料之電阻率，隨溫度降低而增大。反之 R2 及 R4 之電阻值，則會降低，可表示如下：

$$R_1 = R_3 = R_0 + \Delta R \leftarrow \text{溫度降低}$$

$$R_2 = R_4 = R_0 - \Delta R \leftarrow \text{溫度增加}$$

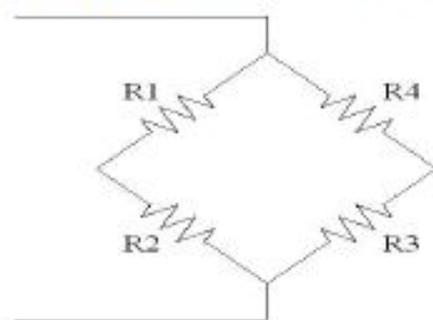


圖 34 橋式溫度感測電路(單軸加速儀)電路示意圖

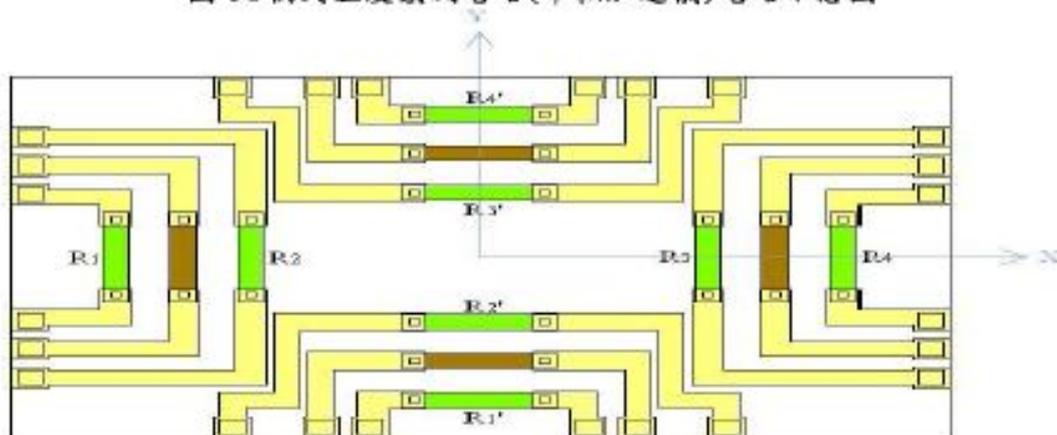


圖 35 以四組相同的溫度感測單元組成 XY 平面加速儀之佈局圖

如以上述相同之步驟，可在同一個基材之上，重複做出四組溫度感測單元 R1、R2'、R3'、及 R4' 如圖 34。或同理，在對稱之垂直方向設計安置四組溫度感測單元 R1''、R2''、R3''、及 R4''，即可做為 X 及 Z 軸的加速儀。

## 五、實驗設備運用說明

### 1. 電子槍 (E-Gun) 蒸鍍設備

蒸鍍原理是在高真空狀況下，將所要蒸鍍的材料，利用電阻或電子束，加熱達到熔化溫度，使原子蒸發，到達並附著在基板表面上的一種鍍膜技術。電子槍加熱方式是藉由磁場的協助，電子槍加熱可以控制蒸發點的大小和位置，所以可以均勻的消耗坩堝中的材料，得到厚度均勻的生成膜層。藉由施加大電壓，電子槍會發射出高速度的電子粒，高動能在碰撞時，會產生高熱，因此可以造成局部非常高的溫度昇華靶材。

### 2. 可控溫烤箱 (Oven)

本設備主要是由加熱爐，及 PID 回饋控制器兩個單元所組成。設定溫度，調整 PID 回饋控制器的相關參數，將待測物樣品放入高溫爐中央，可由溫度顯示器觀察溫度的變化。烤箱上方連接抽氣管，可將待燒結物體的廢棄物抽去。本研究中使用烤箱，烘烤透明導電薄膜，以達到回火作用，並針對不同透明導電薄膜，與不同厚度等條件，進行回火後之電性檢測。

### 3. 準雷射退火 (Excimer Laser Annealing)

本設備是利用準分子雷射退火方式將轉化非晶矽薄膜成為複晶矽，但此方法有些許缺點，如較狹窄的雷射製程條件、小晶粒與隨機分佈的晶粒邊界隨機分佈等等。準分子雷射的工作物質是準分子氣體。一般的氣體分子，他們在一般的狀況下，如果沒有外來影響，例如加熱、光照或電子碰撞，不會自行分解成其他分子或離子，準分子則不會。

### 4. 光阻塗佈機 (Spin Coater)

本設備主要是使用旋轉塗佈法，將定量光阻施佈於晶片中心，再藉由二階段不同的轉速與時間使光阻均勻塗佈於晶面表面。

### 5. 曝光機 (Aligner)

本設備主要是讓晶片表面所覆光阻吸收適當能量以進行光化轉換，如此顯影後光阻才能成功且正確地轉移光罩上之圖形至晶片上。而曝光主要操作條件為：光源強度及曝光時間，決定此兩條件之步驟為光阻厚度、軟烤程度、顯影條件和顯影後光阻線寬容許誤差等。

### 6. 電性量測儀 (KEITHLEY 4200)

本設備可進行 I-V 特性量測，可加裝 2-8 組 SMU，最大 1A 電流，具 0.1fA 電流解析能力，可量測 Pre-Amp，或由無到 100fA。實驗當中，有利用此設備進行各薄膜沉積層之電性狀態分析。

### 7. 表面形狀量測系統 (ET-4000)

本設備是利用微型觸針，檢測物體表面形狀、平坦度、波紋度、粗度及膜厚。其觸針變位的檢出，是採用線性可變差動變壓器，利用此機構來保持觸針穩定度，而觸針上之彈簧係拉引觸針於尖端位置上，設置於被測定面上，使觸針的重量不會加於被測定面上，接著，往上至被測定面，測定面承受相當彈簧的力牽引，觸針沿著待測物掃描追隨特性，檢驗物體表面輪廓。此設備主要是量測 ITO 等層之膜厚。

## 六、研究方法及結果：

因為本模擬程式中，沒有溫度的選單，但是因為溫度跟能量，具有著如下關係：

$$\frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} MV^2 \quad (1)$$

而壓力與速度又具有如下關係：

$$P = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2)$$

所以由以上公式(1)及(2)可以得到公式(3)，壓力圖其實可以等同溫度圖，壓力分佈即近似於溫度分佈。

$$T = (2M/k\rho) P \quad (3)$$

於是即可以由總壓(Ptot)的分佈圖，得到加速儀熱敏電阻的溫度變化，進一步可換算出和加速度的線性度及靈敏度關係。

模擬說明：完成 x 軸向加速儀，於小氣泡空間、大型氣泡空間、以及中型氣泡空間，下列特性的初步模擬結果。在具有加速度的部份，載具有  $0.3 \text{ m/s}^2$  之 X 方向的加速度 ( $A_x = 0.3 \text{ m/s}^2$ )。

- (1) 內能(K)分佈圖
- (2) 速度場(V)分佈圖
- (3) 總壓(Ptot)分佈圖

基本邊界條件設定：

空間設定如圖 36

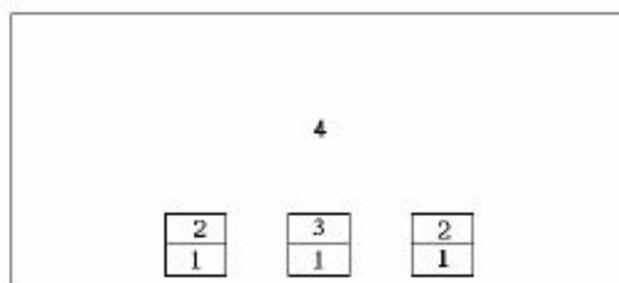


圖 36 基本空間設定

空間中標示材料依序為：

1. 基材：SiO<sub>2</sub> 基板
2. 感應模組：P Type Silicon
3. 熱電元件：Ni-Co 合金加熱元件
4. 密閉熱氣泡空間，填充氣體：氬。這個空間的大小、形狀，會依據不同的模擬項目變動。

體積設定：

不同的材料模擬塊狀物體積，依序為：

1.  $4 \times 4 \times 9 \text{ mm}^3$
2.  $4 \times 4 \times 9 \text{ mm}^3$
3.  $4 \times 4 \times 9 \text{ mm}^3$
4.  $14 \times 40 \times 6 \text{ mm}^3$  (根據模擬需要有所不同)

溫度設定：

基板、感應模組、充氣體皆為 300K

熱電元件：鎖定溫度 400K

外部必面（六個方向）設定熱傳量  $-50\text{W/m}^2\cdot\text{s}$

## 1. 大型熱氣泡空間加速規靜態模擬結果

### 1.1 大型熱氣泡空間的內能(K)分佈(圖 37)

由圖 37 可知大型熱氣泡空間的內能(K)分佈，在 Y 軸向方面有很明顯的高能量區塊，表示該區域所含有的內能較高，也表示在空間內氣體的上升區塊。

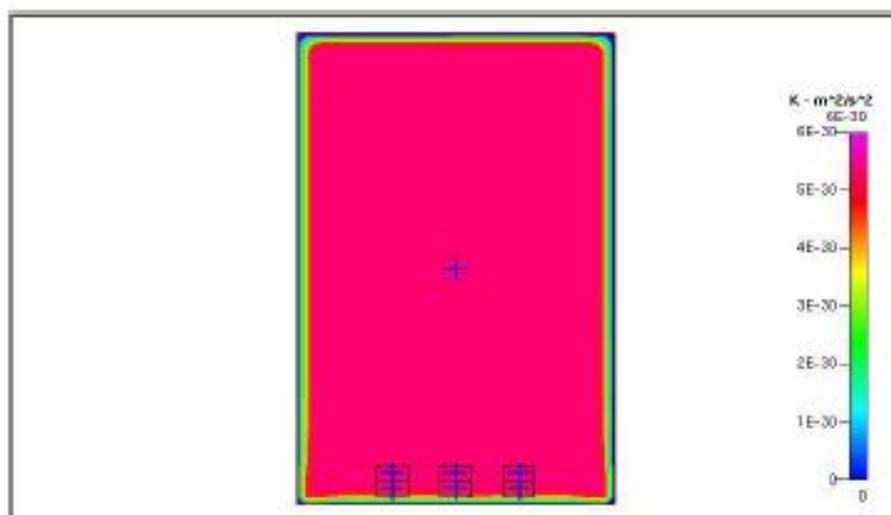


圖 37 大型熱氣泡空間的內能(K)分佈圖(Ax = 0)

### 1.2 大型熱氣泡空間的總壓 (Ptot) 分佈(圖 38)

由圖 38 可知大型熱氣泡空間的總壓 (Ptot) 分佈，可以發現所產生的壓力梯度，呈現梯形斷面，和一般預測的尖錐形熱氣泡斷面不同，是因為空間目前是一六面體，流場受邊界擠壓形成方形，和一般預測的球體不同。

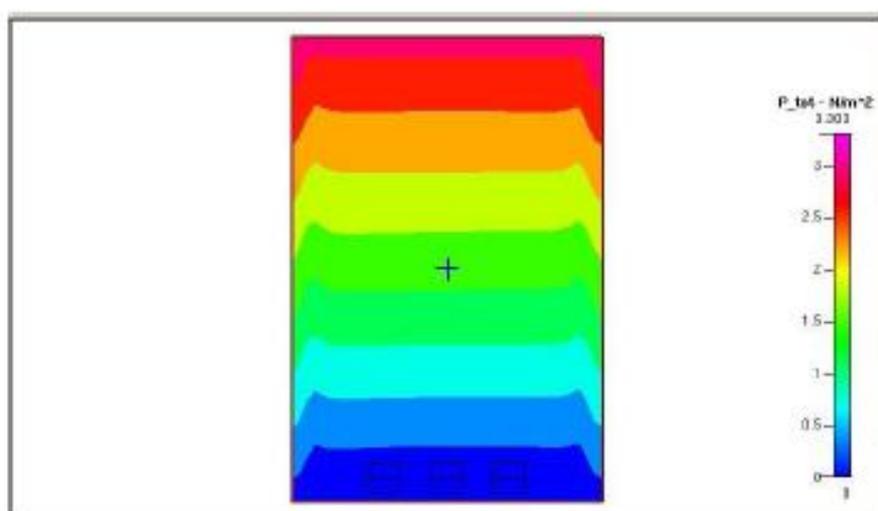


圖 38 大型熱氣泡空間的總壓 (Ptot) 分佈 (Ax = 0)

### 1.3 大型熱氣泡空間的速度場 (V) 分佈(圖 39)

由圖 39 可知大型熱氣泡空間的速度場(V)分佈，主要由於流場受到方形邊界擠壓，使得原先在開放空間中，會形成的球形斷面，擠壓成為方形斷面。同時，又因為能量在邊界散出腔體，所以降溫後的氣體也在邊界冷卻沈降，因此原早先論文中所預測的高溫區，由一個端點變成了一個寬廣的上升氣流平面。

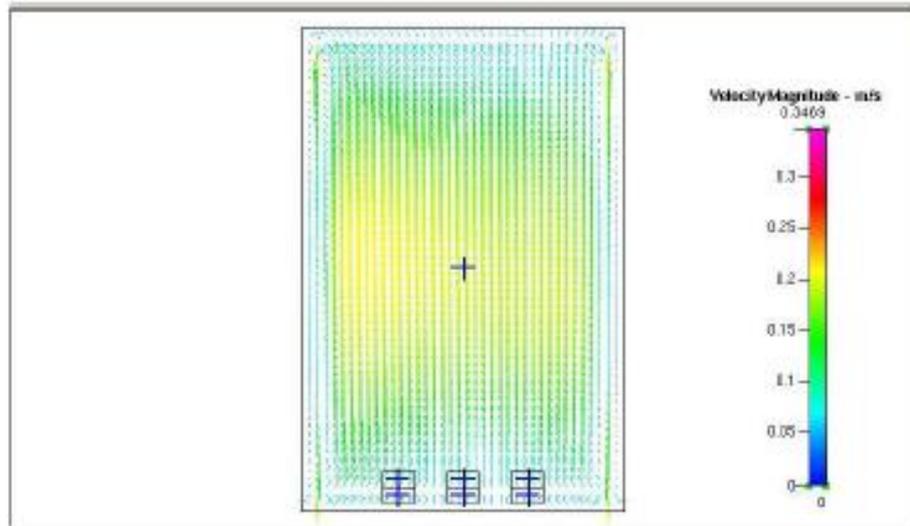


圖 39 可知大型熱氣泡空間的速度場(V)分佈( $A_x = 0$ )

## 2. 大型熱氣泡空間加速規動態模擬結果

該項模擬的模擬環境為，載具有  $0.3 \text{ m/s}^2$  之 X 方向的加速度( $A_x = 0.3G$ )。同時，在內能(K)的方面，加速度存在與否，沒有多大變化，反應空間內氣體所含的能量，和加速度存在與否無關。

### 2.1 大型熱氣泡空間的內能(K)分佈(圖 40)

由圖 40 可知大型熱氣泡空間的內能(K)分佈，在內能(K)的方面，加速度存在與否，沒有多大變化，可知空間內氣體所含的能量，和加速度存在與否無關。

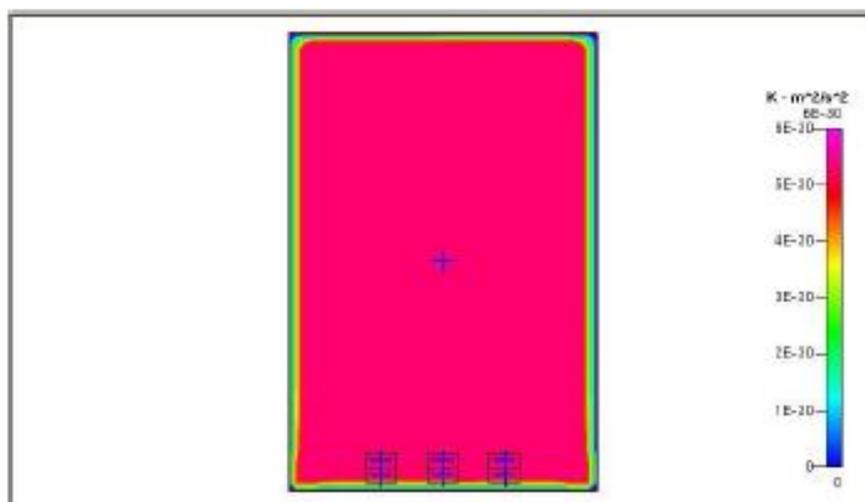


圖 40 大型熱氣泡空間的總壓 (Ptot) 分佈圖

## 2.2 大型熱氣泡空間的總壓 (Ptot) 分佈(圖 41)

由圖 41 可知大型熱氣泡空間的總壓 (Ptot) 分佈，與上一節中的靜態總壓分佈圖(圖 3) 比對可以發現，該壓力梯度受到向右方向的  $0.3 \text{ m/s}^2$  影響非常顯著，呈現向右邊大幅傾斜的現象，符合設計加速規的初始目的，但是在熱敏電阻部份因為溫度梯度(R1)、(R2) 之間區別過於狹小，因此在感應靈敏度方面，表現較為不佳。

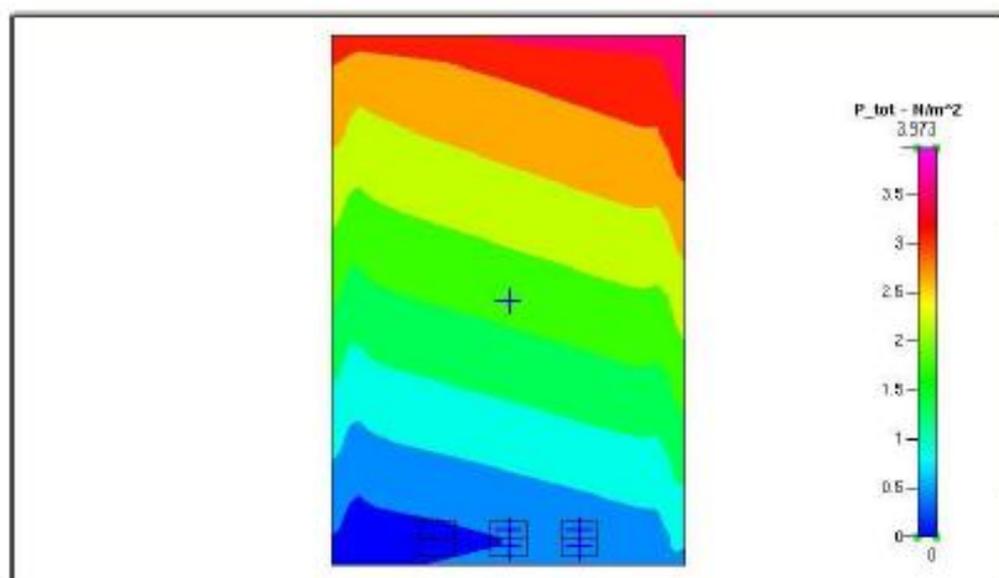


圖 41 大型熱氣泡空間的總壓 (Ptot) 分佈圖( $A_x = 0.3 \text{ m/s}^2$ )

## 2.3 大型熱氣泡空間的速度場 (V) 分佈 (圖 42)

由圖 42 大型熱氣泡空間的總壓 (Ptot) 分佈圖可知，在速度場的部份，大型空間受到側向加速度的影響，只有些微區別，與後面 (圖 19) 所顯示的小空間加速規形成明顯對比，反應要加速規內部氣流穩定，高度不可以太過低矮的事實。

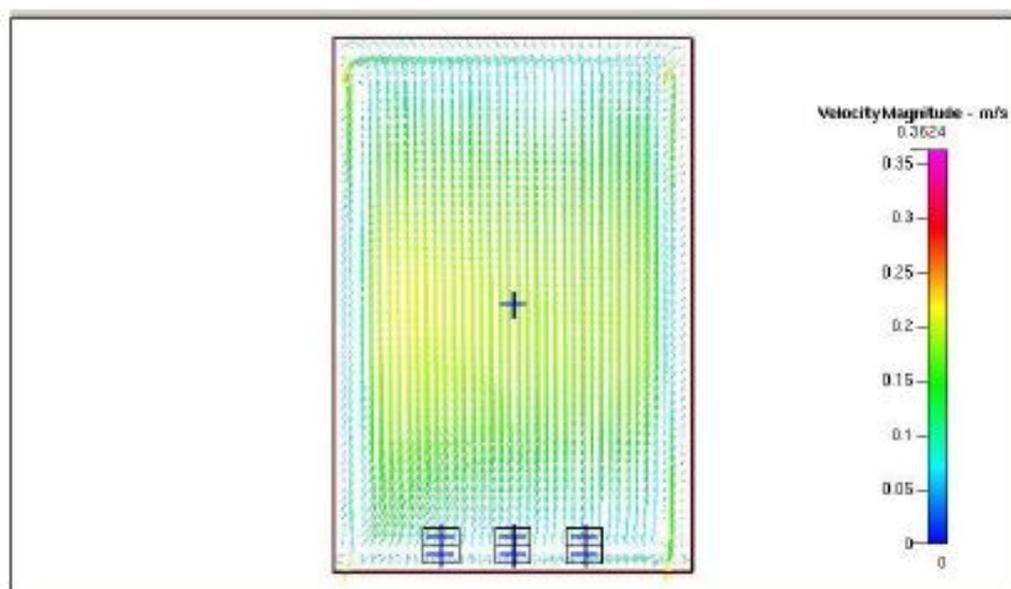


圖 42 大型熱氣泡空間的總壓 (Ptot) 分佈圖( $A_x = 0.3 \text{ m/s}^2$ )

### 3. 中型熱氣泡空間加速規靜態模擬結果：

本項目的模擬為一折衷方案表現，在於加速規廣大空間以及狹小空間之間之間，高度取捨的一種折衷方案。目的在驗證，過高的空間以及過低的空間對於感測器設計有不良影響。過高靈敏度表現低下、過低則呈現流場混亂的情況。

#### 3.1 中型熱氣泡空間的內能(K)分佈(圖 43)

由圖 43 可知中型熱氣泡空間的內能(K)分佈，本圖是表現在對流空間中的能量轉移變化，由途中可知在邊界的部份，明顯是能量散出的方向，必須有熱量散出，才能形成有效對流，熱氣泡才能生成。圖中所顯示的結果與前後節的大型空間，以及小型空間沒有差異。

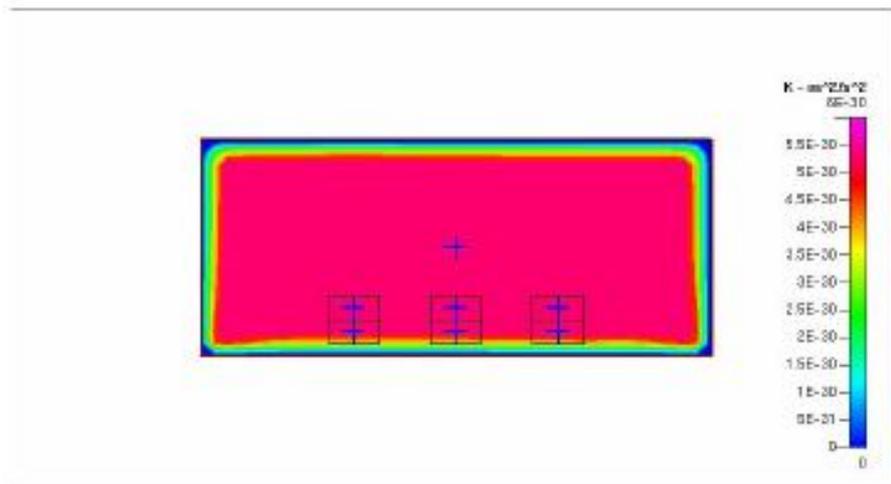


圖 43 中型熱氣泡空間的內能(K)分佈圖(Ax= 0 G)

#### 3.2 中型熱氣泡空間的總壓(Ptot)分佈(圖 44)

由圖 44 中型熱氣泡空間的總壓(Ptot)分佈圖，可以發現，在空間的左上角，有一較高溫的突起，顯示該區域存在紊流現象(Turbulence)，顯示流場的穩定性已經受到過於低矮的高度影響，而呈現不穩定的現象，與上一節的穩定梯度的結果呈現對比。

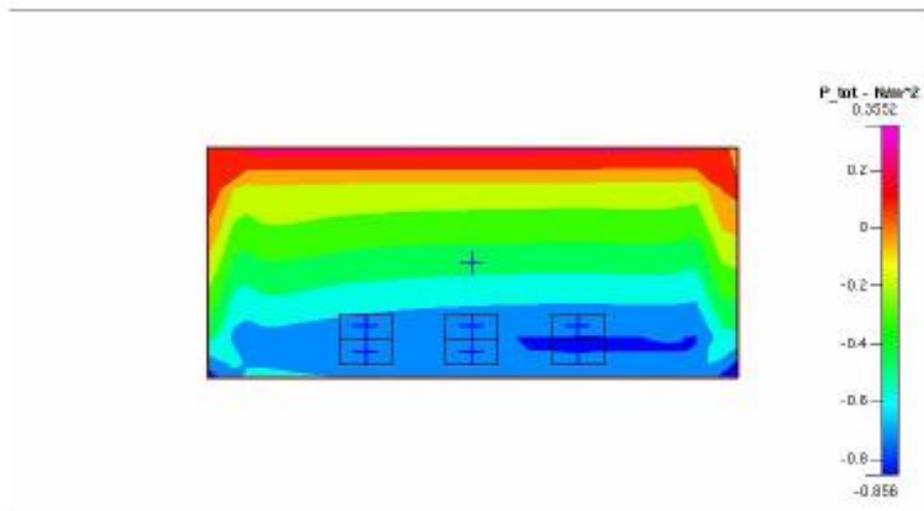


圖 44 中型熱氣泡空間的總壓(Ptot)分佈(Ax= 0 G)

### 3.3 中型熱氣泡空間的速度場(V)分佈(圖 45)

由圖 45 中型熱氣泡空間的速度場(V)分佈圖得知，確實在空間中的左右上角形成不穩定的紊流現象，反應了高度的不足，以及流場的混亂。對於感測器的穩定性形成影響。

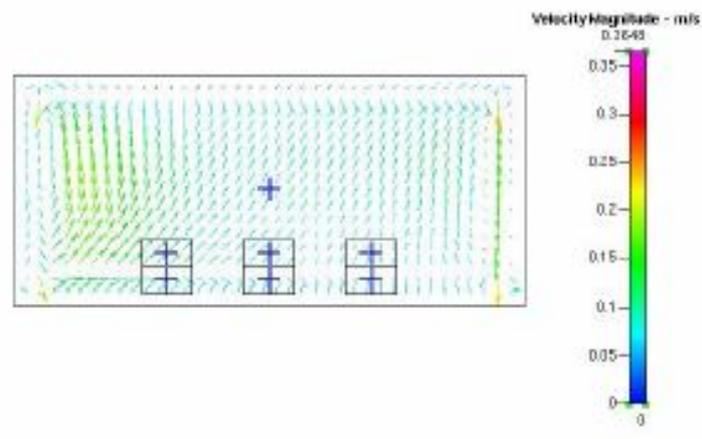


圖 45 中型熱氣泡空間的速度場(V)分佈(A = 0 G)

### 4. 中型熱氣泡空間加速規動態模擬結果：

該項模擬結果，整體給定具有  $0.3\text{m/s}^2$  之 X 方向的加速度。

#### 4.1 中型熱氣泡空間的內能(K)分佈(圖 46)

由圖 46 可知中型熱氣泡空間的內能(K)分佈，本圖是表現在對流空間中的能量轉移變化，由途中可知在邊界的部份，明顯是能量散出的方向，必須有熱量散出，才能形成有效對流，熱氣泡才能生成。圖中所顯示的結果與前後節的大型空間，以及小型空間沒有差異。

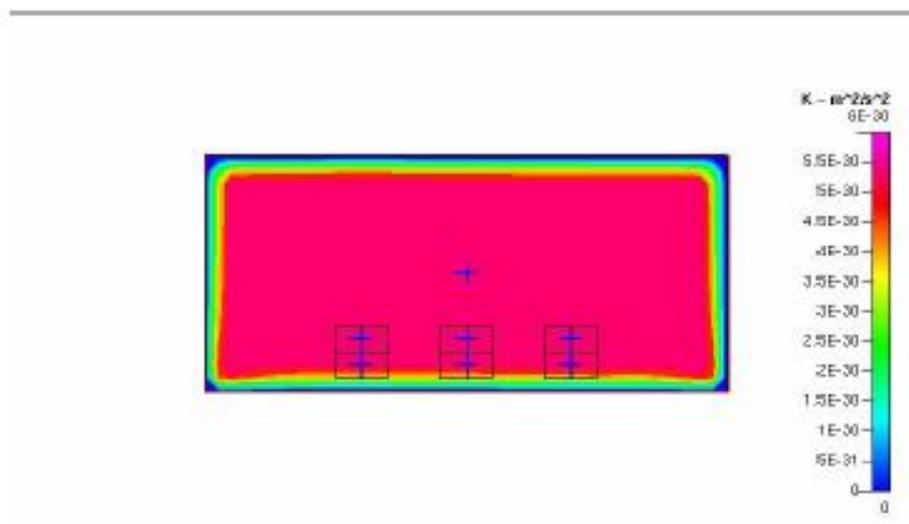


圖 46 中型熱氣泡空間的內能(K)分佈圖( $A_x = 0.3\text{m/s}^2$ )

#### 4.2 中型熱氣泡空間的總壓(Ptot)分佈(圖 47)

由圖 47 可知中型熱氣泡空間的總壓(Ptot)分佈，在正 X 軸(右邊)熱敏電阻處的溫度較高，則其電阻(R1)較小。相反的，負 X 軸(左邊)熱敏電阻處的溫度較低，則其電阻(R2)較大。同時在溫度梯度方面呈現得也差別較為大(溫度差較大)，可以證明降低高度，可以提昇加速規的靈敏度。

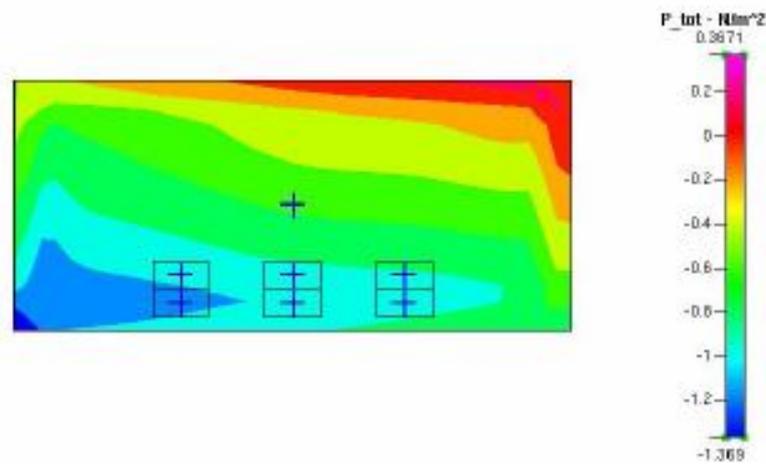


圖 47 中型熱氣泡空間的總壓(Ptot)分佈圖( $A_x = 0.3 \text{ m/s}^2$ )

#### 4.3 中型熱氣泡空間的速度場(V)分佈(圖 48)

由圖 48 中型熱氣泡空間的速度場(V)分佈可知，在較小空間中的流動，對於側向加速度的感知十分明顯，而且有效。同時也代表著在溫度梯度，以及壓力梯度方面，對加速度的表現十分敏感，有助於提昇感測器靈敏度，同時也可以證明在流場不會太混亂的情況之下，降低空間高度換取靈敏度確實可行。

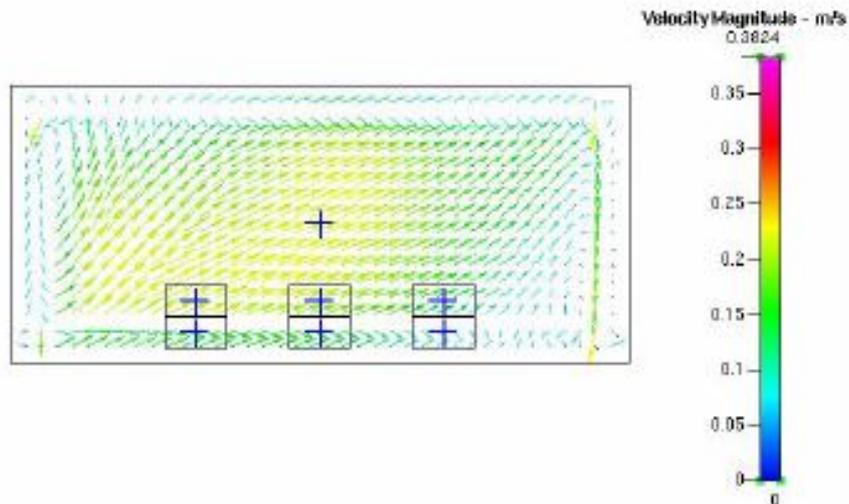


圖 48 中型熱氣泡空間的速度場(V)分佈( $A_x = 0.3 \text{ m/s}^2$ )

## 5. 小型熱氣泡空間加速規靜態結果：

本項目的模擬在於證明，過於狹小的對流空間，不能使得感測器靈敏度大幅度提升，反而因為流場紊流(turbulence)太過嚴重，反而造成感測器的不穩定現象，有助證明：最佳的對流空間不在於大小，而在於靈敏度以及流場穩定性之間的取捨。

### 5.1 小型熱氣泡空間的內能(K)分佈(圖 49)

由圖 49 可知小型熱氣泡的空間的內能(K)分佈，本圖是表現在對流空間中的能量轉移變化，由途中可知在邊界的部份，明顯是能量散出的方向，必須有熱量散出，才能形成有效對流，熱氣泡才能生成。圖中所顯示的結果與前後節的大型空間，以及小型空間沒有差異。

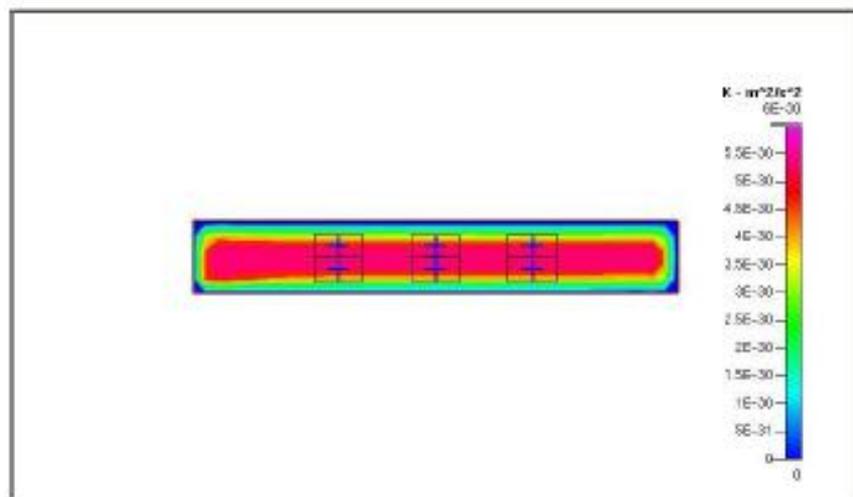


圖 49 小型熱氣泡空間的內能(K)分佈圖(Ax = 0 G)

### 5.2 小型熱氣泡空間的平均總壓(Ptot)分佈(圖 50)

由圖 15 小型熱氣泡空間的平均總壓(Ptot)分佈可知，在空間的左側以及右側上方，存在著由渦流形成的高溫區塊，代表著因為高度過低，梯形的流動梯度受到破壞，呈現嚴重紊流的情況。這對感測器的靈敏度以及誤差容許，都是十分不利的。

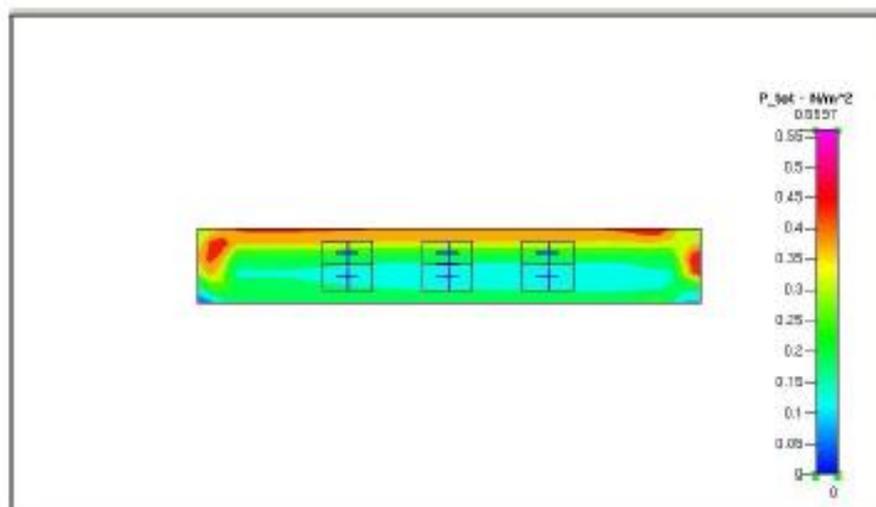


圖 50 小型熱氣泡空間的平均總壓(Ptot)分佈(Ax= 0 G)

### 5.3 小型熱氣泡空間的平均速度場(V)分佈(圖 51)

由圖 51 可知小型熱氣泡空間的平均速度場(V)分佈，可以發現，由於流場已經紊流十分嚴重，上下對流非常的差，流動甚至呈現不對稱現象，表示該感測器在靜態時就極不穩定，量測誤差很大。

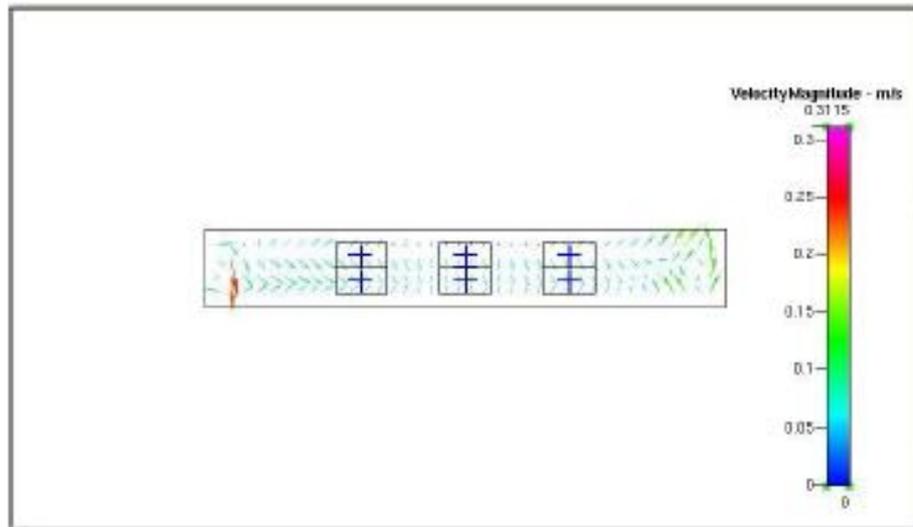


圖 51 小型熱氣泡空間的速度場(V)分佈圖( $A_x = 0\text{ G}$ )

## 6. 小型熱氣泡空間加速規動態結果

該項模擬結果，整體給定具有  $3\text{m/s}^2$  之  $X$  方向的加速度。

### 6.1 小型熱氣泡空間的內能(K)分佈(圖 52)

由圖 52 可知小型熱氣泡的空間的內能(K)分佈，本圖是表現在對流空間中的能量轉移變化，由途中可知在邊界的部份，明顯是能量散出的方向，必須有熱量散出，才能形成有效對流，熱氣泡才能生成。圖中所顯示的結果與前後節的大型空間，以及小型空間沒有差異，但卻形成十分嚴重的紊流，對於感測器而言，這是十分不良的結果。

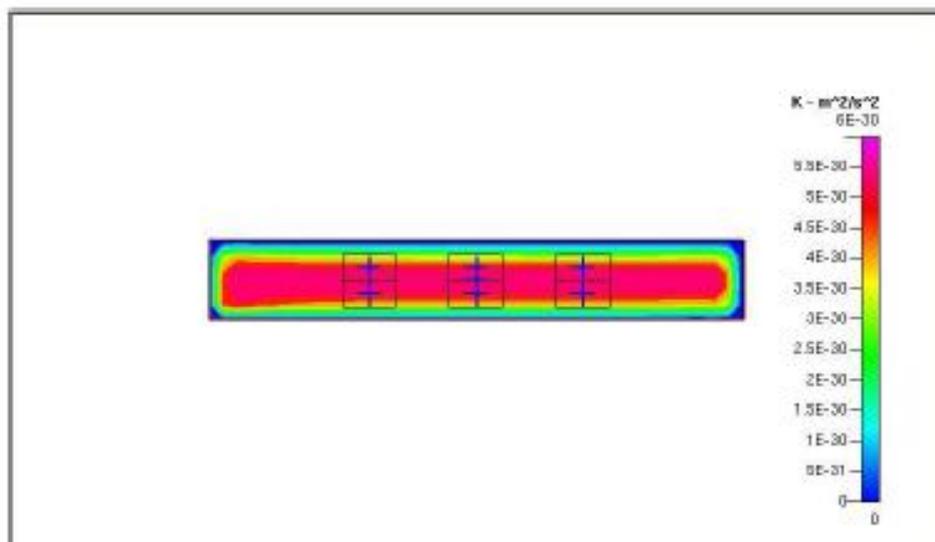


圖 52 小型熱氣泡空間的內能(K)分佈圖( $A_x = 0.3\text{m/s}^2$ )

## 6.2 小型熱氣泡空間的總壓( $P_{tot}$ )分佈(圖 53)

由圖 53 可知小型熱氣泡空間的總壓( $P_{tot}$ )分佈，由途中可以知道梯形梯度已經完全消失，顯然已經因為反應過度靈敏，失去對於加速度的感知能力，反而形成紊流的嚴重攪拌現象，失去感知功能。

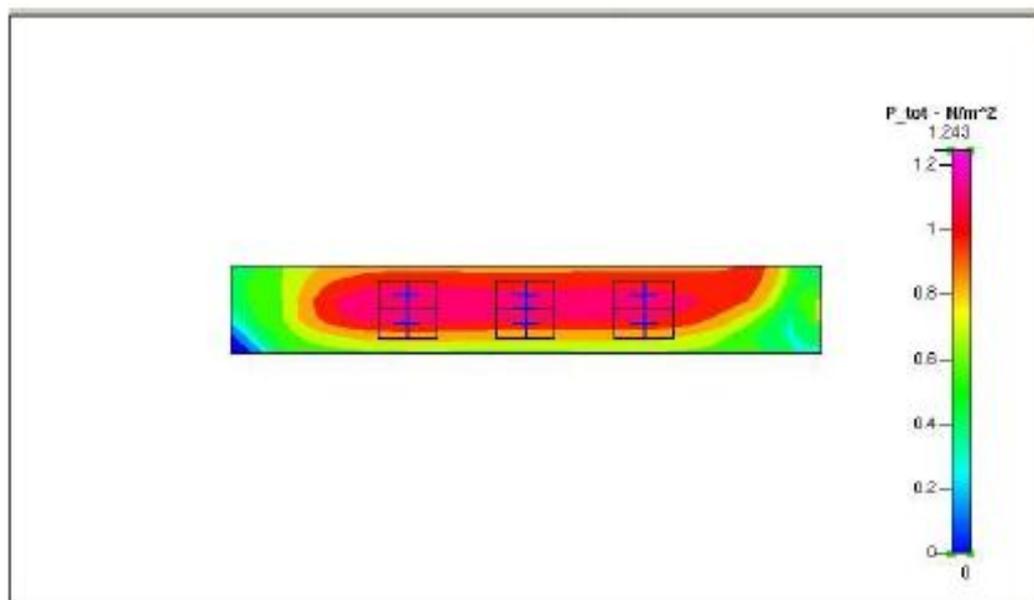


圖 53 小型熱氣泡空間的總壓( $P_{tot}$ )分佈圖( $a_x=0.3\text{m/s}^2$ )

## 6.3 小型熱氣泡空間的平均速度場( $V$ )分佈(圖 54)

由圖 54 小型熱氣泡空間的平均速度場( $V$ )分佈可知，在空間中的兩側面，流場呈現極度混亂的現象，完全沒有固定方向。同時在中央部份的速度場，呈現過大角度的傾斜，幾乎呈現水平。可知在如此狹小的空間中，該裝置不能成為一具有效的加速度感測器。

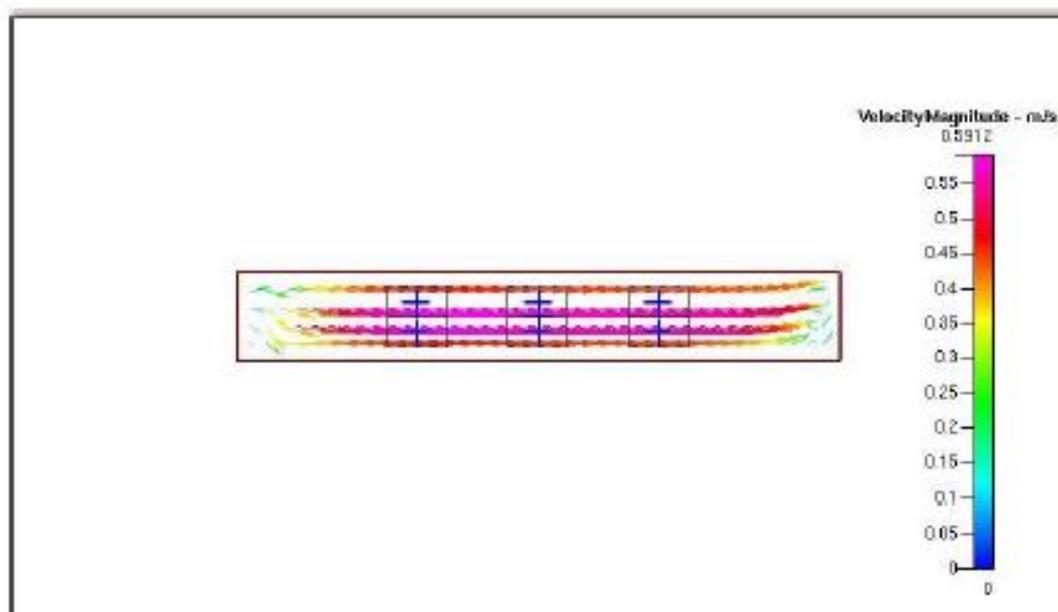


圖 54 小型熱氣泡空間的平均速度場( $V$ )分佈( $a_x=3\text{m/s}^2$ )

## 最佳高寬比的討論

由模擬結果可以發現：空間較大者，流場比較穩定，但反應較差；空間較小者，反應極佳，但是流場相當混亂。一個良好的感應器，是希望能有在需求的量測範圍內，有足夠的精度，且反應時間迅速。但又同時，我們相當不希望，在高靈敏度以及高反應速率的同時，流場變得相當混亂，使的感測器數據穩定時間加長，甚至無法穩定。本章節所討論的，就是最低限度的高寬比（指的是感測元件之間的距離和元件到頂蓋上端的高度之比值），能夠得到流場的高穩定性。本模擬討論，就是集中在不同高寬比的測試結果，期待能夠得到最為穩定的流場高寬比值。

本章節模擬的高寬比樣本為：12/4、20/4 以及 54/4

靜態為靜止達到穩定的流場之結果

動態的部份，所有樣本皆設定具有  $0.3G \text{ m/s}^2$  向右方向的加速度

### 1. 高寬比為 54/4 樣本的壓力(Ptot)

#### 1.1 靜態模擬結果(圖 55)

高寬比為 54/4 樣本的壓力(Ptot)靜態模擬結果，可以發現所產生的壓力梯度，呈現梯形斷面，和一般預測的尖錐形熱氣泡斷面不同，是因為空間目前是一六面體，流場受邊界擠壓形成方形，和一般預測的球體不同。

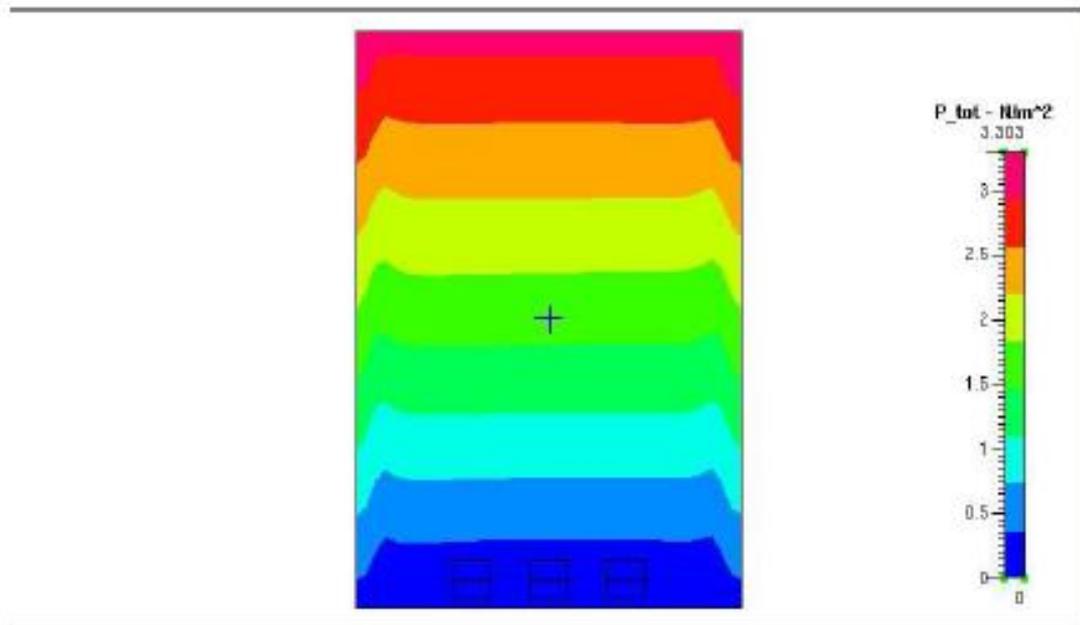


圖 55 高寬比為 54/4 樣本的壓力(Ptot)靜態模擬結果

#### 1.2 靜態模擬曲線圖(圖 56)

高寬比為 54/4 樣本的壓力(Ptot)靜態模擬曲線圖可以發現，雖然是在靜止的狀態下，但是壓力模型的左右兩端不是完全一模一樣，兩側尖端處還存在著  $0.02\text{Pa}$  的誤差，因為流體本身仍存在一定程度的攪拌之故，要完全成為層流狀態，方形的結構是有所限制的。

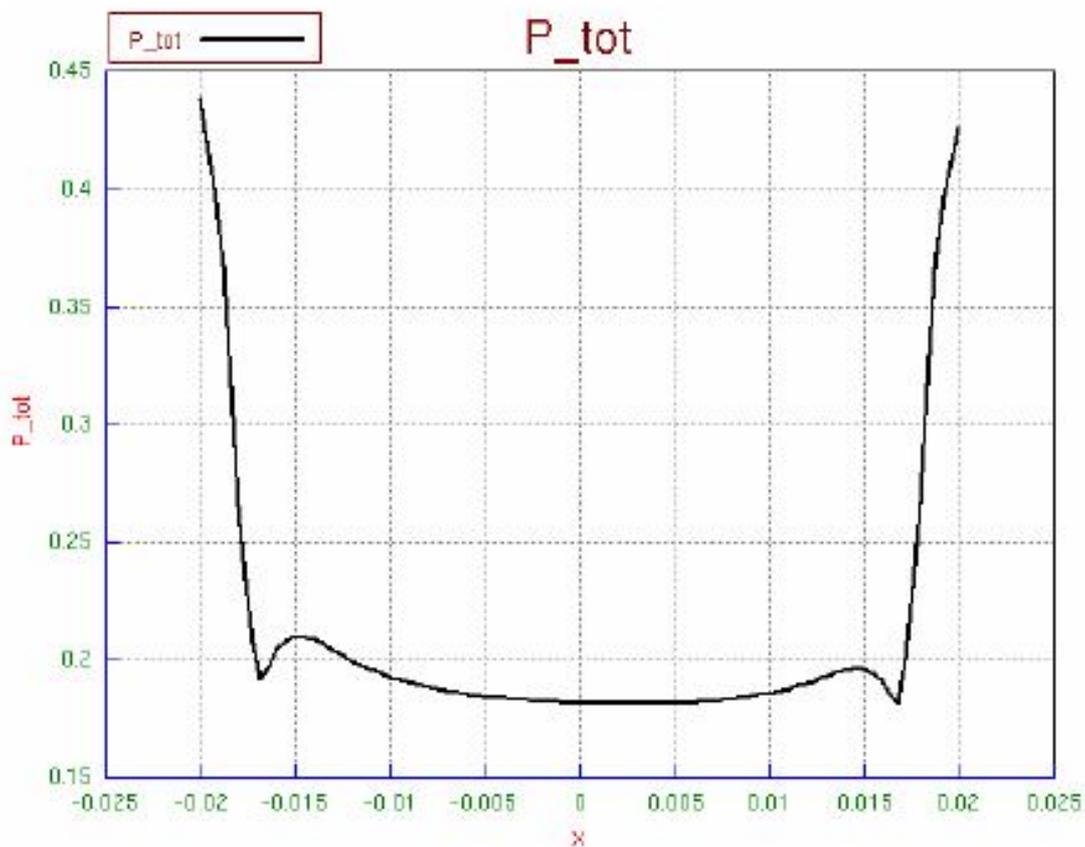


圖 56 高寬比為 54/4 樣本的壓力 (Ptot) 靜態模擬曲線圖

### 1.3 0.3G 動態態模擬曲線圖(圖 57)

高寬比為 54/4 樣本的壓力 (Ptot) 0.3G 動態態模擬曲線圖比對可以發現，該壓力梯度受到向右方向的  $0.3 \text{ m/s}^2$  影響非常顯著，呈現向右邊大幅傾斜的現象，符合設計加速規的初始目的。

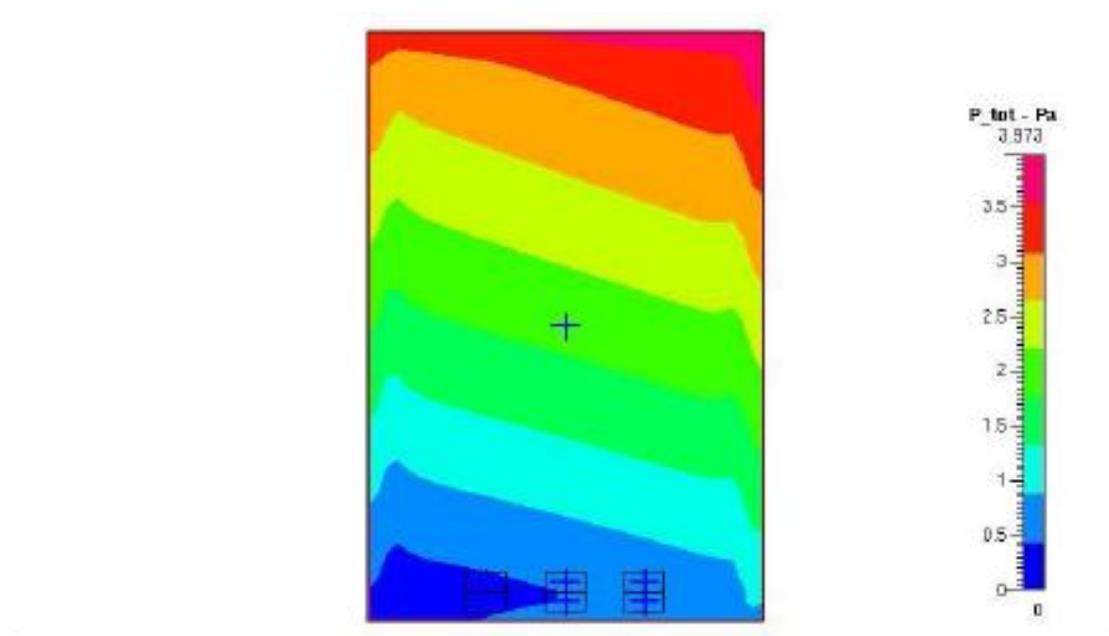


圖 57 高寬比為 54/4 樣本的壓力 (Ptot) 0.3G 動態模擬結果

#### 1.4 動態模擬曲線圖(圖 58)

高寬比為 54/4 樣本的壓力( $P_{tot}$ ) 0.3G 靜態模擬曲線圖可以發現，在正負 0.01 公尺的地方，存在著 0.3Pa 的壓力差，由公式  $T = (2M/k\rho) P$  換算成溫度結果，可知溫度的變化是十分明顯的。

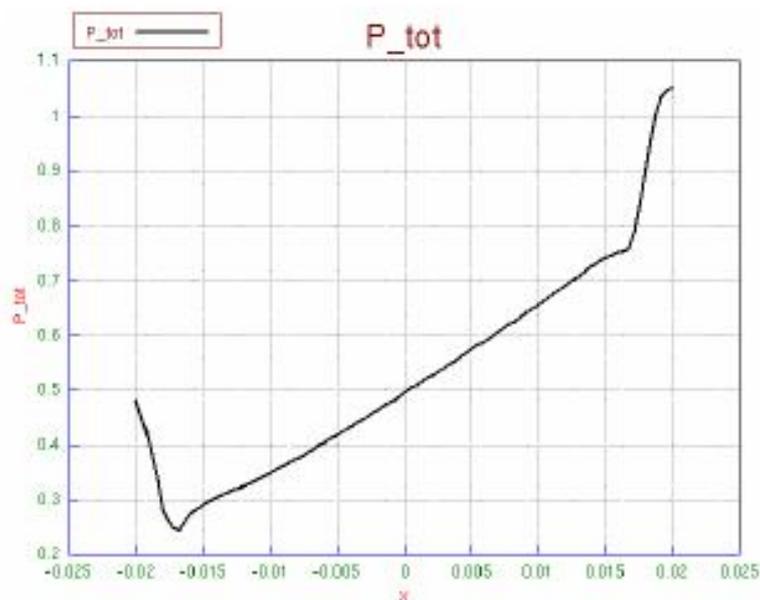


圖 58 高寬比為 54/4 樣本的壓力( $P_{tot}$ ) 0.3G 動態模擬曲線圖

#### 2. 高寬比為 20/4 樣本模擬結果

本模擬空間，是縮小高度 34mm 而成，為模擬前估測的最佳高寬比（五到十倍）的下限，在這種長寬比的狀態下，存在的紊流可在取得較高精確度的同時，也能夠保持相對的反應時間優勢，使感測器能在更短的反應時間達到穩定。

##### 2.1 高寬比為 20/4 樣本的壓力( $P_{tot}$ )靜態模擬結果(圖 59)

高寬比為 20/4 樣本的壓力( $P_{tot}$ )靜態模擬結果，在靜態的情形之下顯得相對穩定，要成為可靠的感測器，在靜態時就需要保持穩定。

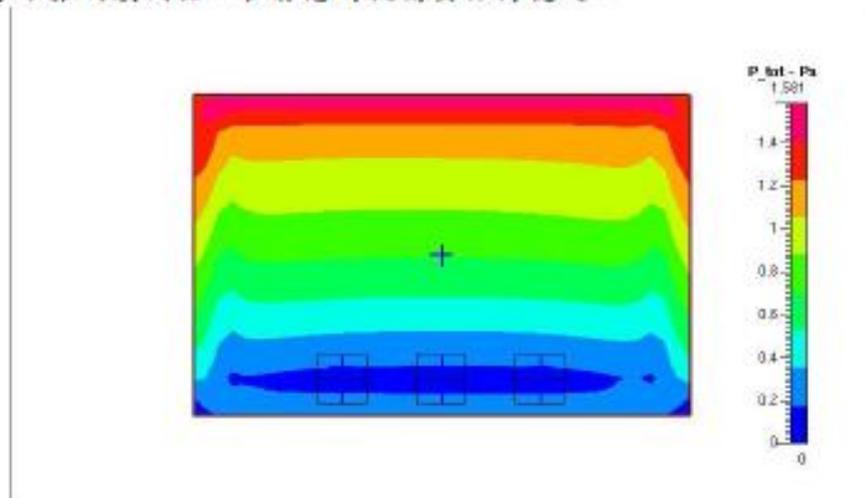


圖 59 高寬比為 20/4 樣本的壓力( $P_{tot}$ )靜態模擬結果

## 2.2 高寬比為 20/4 樣本的壓力(Ptot)靜態模擬曲線圖(圖 60)

高寬比為 20/4 樣本的壓力(Ptot)靜態模擬曲線圖可以發現，在 X 軸向正負 0.01 公尺的位置，壓力幾乎是相等的，也就表明了在這個高寬比之下，有著最為良好的流體穩定性。

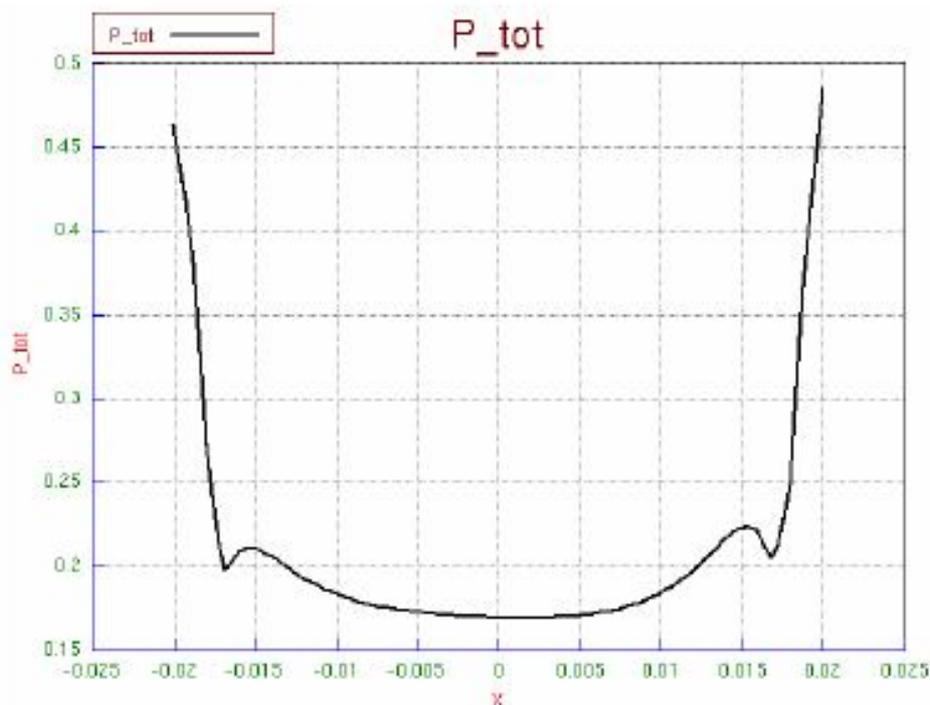


圖 60 高寬比為 20/4 樣本的壓力(Ptot)靜態模擬曲線圖

## 2.3 高寬比為 20/4 樣本的壓力(Ptot) 0.3G 動態模擬結果(圖 61)

高寬比為 20/4 樣本的壓力(Ptot) 0.3G 動態模擬結果可知，該空間比例，對於側向加速度十分敏感，同時又不會失去流場穩定性，是良好的空間比例設定。

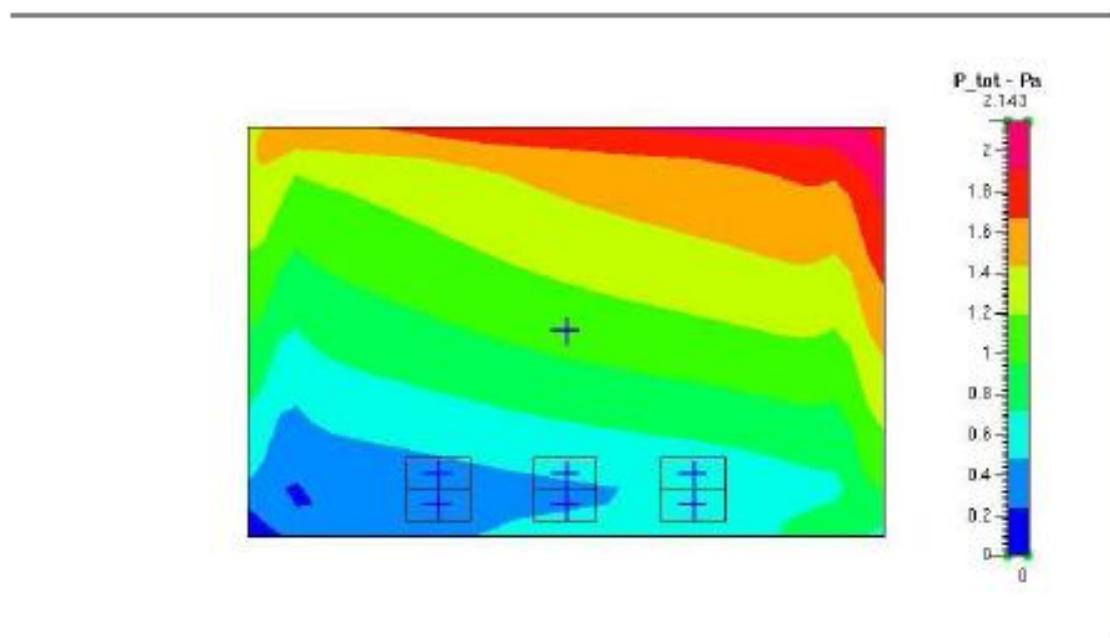


圖 61 高寬比為 20/4 樣本的壓力(Ptot) 0.3G 動態模擬結果

## 2.4 20/4 樣本的壓力(Ptot) 0.3G 動態模擬曲線圖(圖 62)

高寬比為 20/4 樣本的壓力(Ptot) 0.3G 動態模擬曲線圖可知，在熱敏電阻的位置（正負 0.01 公尺）存在著 0.32Pa 的壓力差，較前一節的模擬結果，壓力差更為顯著，表示在這一空間比例之下，有著更為良好的反應能力，也就是更為靈敏。



圖 62 高寬比為 20/4 樣本的壓力(Ptot) 0.3G 動態模擬曲線圖

## 3. 高寬比為 12/4 樣本模擬結果

本項目的模擬，在於做一個對照組的表現，對照在空間不足的情形之下，流體會因為過度攪拌形成不穩定的情形，作為合理高寬比推定的證明。

### 3.1 高寬比為 12/4 樣本的壓力(Ptot)靜態模擬結果(圖 63)

高寬比為 12/4 樣本的壓力(Ptot)靜態模擬結果可知，模擬結果的梯形曲線有一些不一致，說明系統中的流體，處在較多紊流(turbulence)的狀態，表示空間中的流體攪拌較為劇烈而且不穩定，表示流體空間屬於不足的狀態。

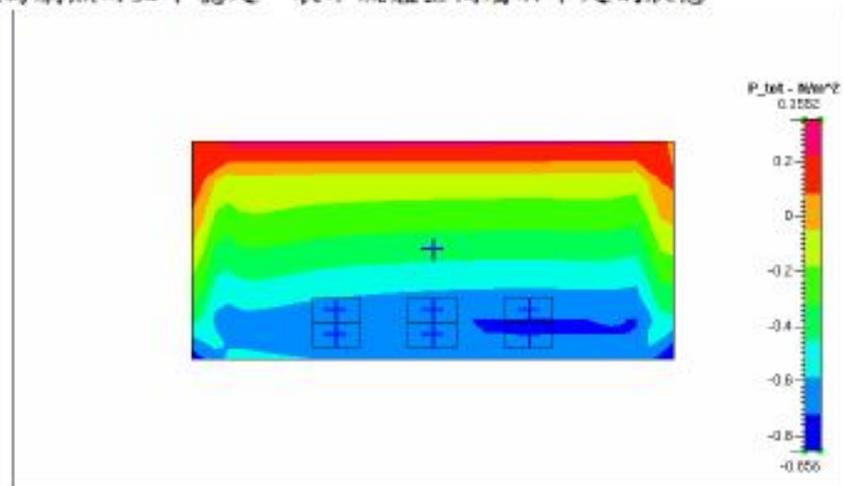


圖 63 高寬比為 12/4 樣本的壓力(Ptot)靜態模擬結果

### 3.2 高寬比為 12/4 樣本的壓力 (P<sub>tot</sub>) 靜態模擬曲線圖(圖 64)

高寬比為 12/4 樣本的壓力 (P<sub>tot</sub>) 靜態模擬曲線圖，可以發現，在溫度感測器所在位置 (X 軸正負 0.01 公尺)，在靜態的時候，仍然存在著不算小的壓力差，早逝在此種壁立的高寬比之下，流體在不受外部加速度的情形之下，仍然差具有 0.04Pa 的壓力差，雖然不是很大，但是在感測器靈敏度，以及穩定性方面，依然是需要注意的。

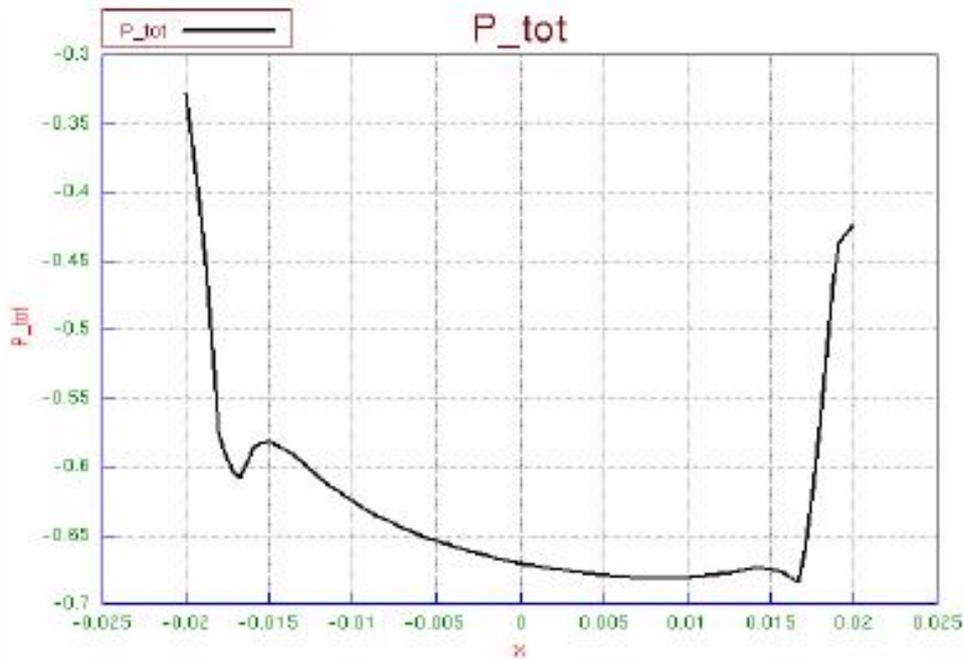


圖 64 高寬比為 12/4 樣本的壓力 (P<sub>tot</sub>) 靜態模擬曲線圖

### 3.3 高寬比為 12/4 樣本的壓力 (P<sub>tot</sub>) 0.3G 動態模擬結果(圖 65)

高寬比為 12/4 樣本的壓力 (P<sub>tot</sub>) 0.3G 動態模擬結果，與之前做過的模擬結果相比，差異並不明顯。

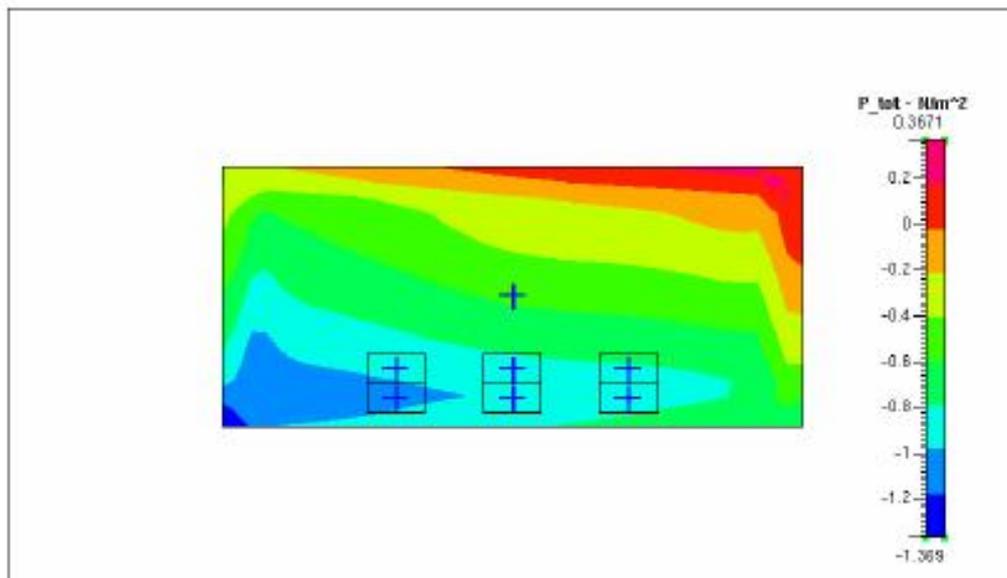


圖 65 高寬比為 12/4 樣本的壓力 (P<sub>tot</sub>) 0.3G 動態模擬結果

### 3.4 高寬比為 12/4 樣本的壓力(Ptot) 0.3G 動態模擬曲線圖(圖 66)

高寬比為 12/4 樣本的壓力(Ptot) 0.3G 動態模擬曲線圖可以發現，在曲線的左右測，與之前的模擬結果相比，壓力差是小了許多，只有 0.15Pa 而已，如果要更為優秀的曲線，顯然必須使用曲面空間形狀，才能夠解決紊流過大的問題。

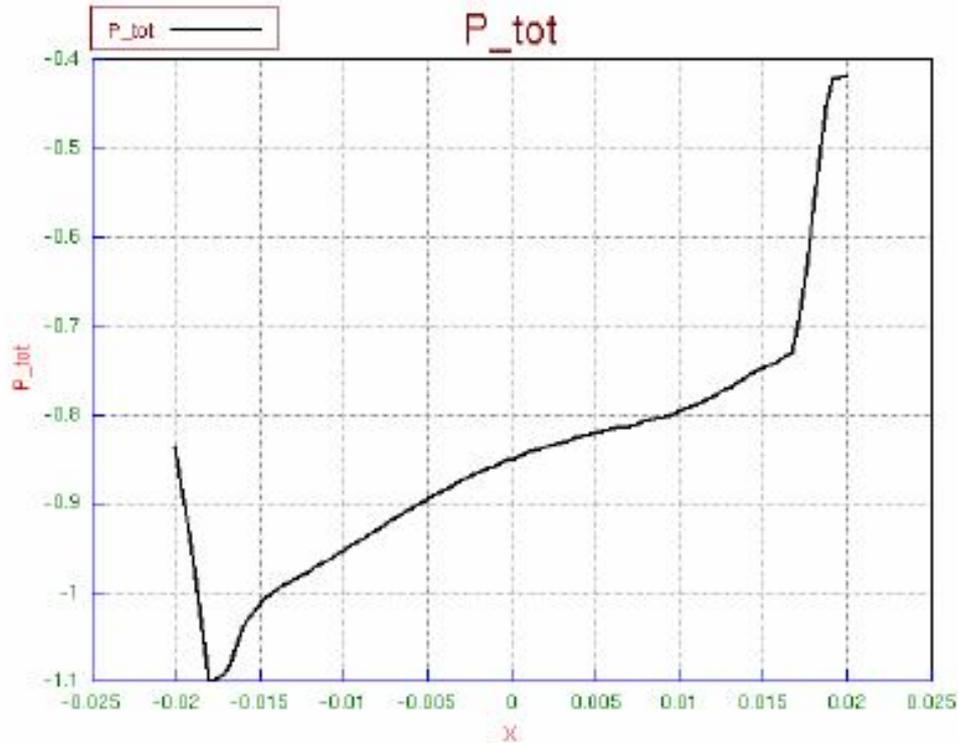


圖 66 高寬比為 12/4 樣本的壓力(Ptot) 0.3G 動態模擬曲線圖

#### 模擬結果討論

由圖(37, 38)、(43, 46)及(49, 52)之大、中及小型熱氣泡空間的平均壓力(P)，及總壓(Ptot)分佈圖，可知：以圖 42 及 43 所得到的平均壓力(P)及總壓(Ptot)分佈圖，均有最佳的梯度分佈。這也就是說，此種結構溫度感測器的靈敏度較大，即溫度和 X 軸加速度，有較好的線性度及靈敏度關係。

如此一來，將來用兩組加熱器及 4 個熱敏電阻，所構成的圖 67 雙差分式惠斯登電橋(Double Difference Wheatstone Bridge)輸出電壓，和 X 軸加速度，就會有較好的線性關係。

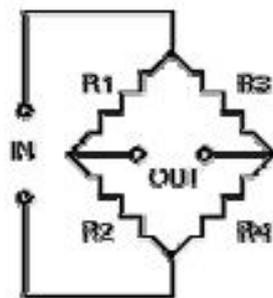


圖 67 雙差分式惠斯登電橋(Double Difference Wheatstone Bridge)

後續模擬將就此情況，再做深入的研究，例如：

- (1) 需要再加入支撐結構(氮化鋁)及下氣室的結構
- (2) 需要再做空間長寬比例的精確調整
- (3) 模擬用的感應元件溫度資料收集
- (4) 收集更多在不同加速度模擬下的溫度分佈結果
- (5) 需要將流速圖以及著色梯度圖，分開表示，以免混淆，影響判讀效果
- (6) 熱敏電阻溫度轉換成電阻靈敏度的模擬
- (7) 雙差分式惠斯登電橋輸出電壓與加速度的靈敏度關係圖

## 六、參考文獻

- [1] 賴振民，微型加速儀與力感測器之設計與製造之初步探討，國立交通大學機械工程研究所博士論文，1999。
- [2] 李泰然 著 朱銘祥譯，微機電系統與微系統，麥格羅希爾出版。
- [3] Yapin Hua, Leyue Jiang, Yongyao Cai, Albert Leung, Yang Zhao, "Single Chip Tri - Axis Accelerometer," US Patent NO : US 2007/0101813 A1.
- [4] Tai-Ran Hsu, MEMS & Microsystems Design and Manufacture, US Patent NO : 6639313.
- [5] Micro Electro Mechanical Systems Technology & Application (I)，行政院國家科學委員會精密儀器發展中心出版，pp. 529~531
- [6] 周元昉、李也增，“加速儀設計簡介”，工業材料，第 87 期，1994，pp. 99~104。
- [7] Roy lance, L. M, and Angell, J.B., "A Batch-Fabricated Silicon Accelerometer," IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.ED-26, No.12, 1979, pp.1911~1917.
- [8] 張志誠 著，“微機電技術”，20/11/2002，p.52。
- [9] P.M.Zavracky, F Hartley, N Sherman, T. Hansen and K. Warner, "A New Force-Balanced Accelerometer using tunneling tip position sensing, Abstract," Late News Papers, 7<sup>th</sup> Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'93), Yokohama, Japan, June 7-10, pp. 50-51, 1993.
- [10] H. K. Rockstad, T. K. Tand, J. K. Reynolds, T. W. Kenny, W. J. Kaiser, T. B. Gabrielson, "A miniature, high-sensitivity, electron tunneling accelerometer," Sensors and Actuators A, Vol. 53, pp. 277-231, 1996.
- [11] Liwei Lin, Roger T. Howe, and Albert P. Pisano, "Micro-electromechanical filters for signal processing", J. Micro-electromechanical System, Vol. 7 No. 3, p. 294, 1998.
- [12] K.-M. Liao, R. Chen , and Bruce CS Chou, "Numerical Analysis of Thermal-Bubble-Based Micro machined Accelerometer," 奈米工程暨微系統技術研討會論文，2004
- [13] 電子微機電零組件應用促進聯誼會 <http://www.twmig.org.tw/epaper/以微機電技術發展之慣性感測器的市場分析1.PDF>