

國立交通大學

電子工程學系電子研究所碩士班

碩士論文

利用多晶矽於絕緣層之基底建立中心凸塊結構  
之壓力感測元件



**Center Boss Pressure Sensor Based on  
Poly-Si-on-Insulator Structure**

研究生：丁沛熙

指導教授：黃宇中 博士

中華民國九十三年六月

利用多晶矽於絕緣層之基底建立中心凸塊結構之壓力感測元件

**Center Boss Pressure Sensor Based on Poly-Si-on-Insulator Structure**

研究生：丁沛熙

Student : Pei-Hsi Ting

指導教授：黃宇中 博士

Advisor : Dr. Yu-Chung Huang

國立交通大學  
電子工程學系電子研究所碩士班  
碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Electronics Engineering and Institute of Electronics

College of Electrical Engineering and Computer Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Electronics Engineering

June 2004

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年六月

# 國立交通大學

## 博碩士論文著作權授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文中書名頁之次頁用)

本授權書所授權之論文為本人在國立交通大學(學院)電子工程系所 固態 組，92 學年度第 二 學期取得碩士學位之論文。

論文名稱：利用多晶矽於絕緣層之基底建立中心凸塊結構之壓力感測元件  
指導教授：黃宇中

同意  不同意 (國科會科學技術資料中心重製上網)

本人具有著作財產權之上列論文全文(含摘要)資料，授予行政院國家科學委員會科學技術資料中心(或改制後之機構)，得不限地域、時間與次數以微縮、光碟或數位化等各種方式重製後散布發行或上載網路。

本論文為本人向經濟部智慧財產局申請專利(未申請者本條款請不予理會)的附件之一，申請文號為：\_\_\_\_\_，註明文號者請將全文資料延後半年再公開。

同意  不同意 (圖書館紙本影印)

本人具有著作財產權之上列論文全文(含摘要)資料，授予教育部指定送繳之圖書館及國立交通大學圖書館，基於推動讀者間「資源共享、互惠合作」之理念，與回饋社會及學術研究之目的，教育部指定送繳之圖書館及國立交通大學圖書館得以紙本收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，不限地域與時間，讀者得進行閱覽或列印。

本論文為本人向經濟部智慧財產局申請專利(未申請者本條款請不予理會)的附件之一，申請文號為：\_\_\_\_\_，註明文號者請將全文資料延後半年再公開。

同意

本人具有著作財產權之上列論文全文(含摘要)，授予國立交通大學與台灣聯合大學系統圖書館，基於推動讀者間「資源共享、互惠合作」之理念，與回饋社會及學術研究之目的，國立交通大學圖書館及台灣聯合大學系統圖書館得不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論文電子檔以上載網路方式，於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行線上檢索、閱覽、下載或列印。

論文全文上載網路公開之範圍及時間：

本校及台灣聯合大學系統區域網路	<input checked="" type="checkbox"/> 中華民國 98 年 6 月 29 日公開
校外網際網路	<input checked="" type="checkbox"/> 中華民國 98 年 6 月 29 日公開

上述授權內容均無須訂立讓與及授權契約書。依本授權之發行權為非專屬性發行權利。依本授權所為之收錄、重製、發行及學術研發利用均為無償。上述同意與不同意之欄位若未勾選，本人同意視同授權。

研究生：丁沛熙

學號：9011574

親筆正楷：\_\_\_\_\_ (務必填寫)

中華民國 93 年 6 月 30 日

# 國家圖書館

## 博碩士論文電子檔案上網授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文中博碩士論文授權書之次頁用)

本授權書所授權之論文為本人在國立交通大學(學院)電子工程系所  
固態 組，92 學年度第 二 學期取得碩士學位之論文。

論文名稱：利用多晶矽於絕緣層之基底建立中心凸塊結構之壓力感測元  
件

指導教授：黃宇中

### ■ 同意

本人具有著作財產權之上列論文全文(含摘要)，以非專屬、無償授權國家圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。上述授權內容均無須訂立讓與及授權契約書。依本授權之發行權為非專屬性發行權利。依本授權所為之收錄、重製、發行及學術研發利用均為無償。上述同意與不同意之欄位若未勾選，本人同意視同授權。

研究生：丁沛熙

學號：9011574

親筆正楷：\_\_\_\_\_ (務必填寫)

中華民國 93 年 6 月 30 日

本授權書請以黑筆撰寫，並列印二份，其中一份影印裝訂於附錄三之一(博碩士論文授權書)之次頁；另一份於辦理離校時繳交給系所助理，由圖書館彙總寄交國家圖書館。

國立交通大學  
研究所碩士班  
論文口試委員會審定書

本校 電子工程系電子研究所 丁沛熙 君

所提論文 利用多晶矽於絕緣層之基底建立中心凸塊結構之壓力感測元件

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

口試委員：  
徐文祥      廖森茂  
余合興      黃宇中

指導教授：  
黃宇中

所長：  
陳紹基

系主任：  
李鎮宜

中華民國 93 年 6 月 16 日

# 利用多晶矽於絕緣層之基底建立中心凸塊結構之 壓力感測元件

研究生：丁沛熙

指導教授：黃宇中 博士

國立交通大學電子工程學系電子研究所碩士班

## 摘要

在傳統矽型壓阻式壓力感測元件，若要做接觸力感測時通常需要使用額外的封裝方式間接讓元件感應接觸力，此外在量測微小力時橫向應力不可忽略，此力導致傳統矽壓力元件在感測極微小力時線性度下滑而無法精準量測。在本篇論文將運用中心凸塊作為接觸力導引結構，可將接觸力直接施於晶片上，不需要使用特別的封裝方法即可解決感測接觸力的問題。在本論文中將由理論及有限元素分析方法推導撓度與應力，以此結果改良應變規的擺設，讓應變規間橫向應力相互抵消，增加元件對微小力的線性度。除此外中心凸塊亦可減少結構上應力集中，使結構能支撐更大的力，增加元件的量測範圍。文中將提出一簡易的覆晶封裝方法來封裝所設計的元件，此封裝方式將非常適合應用在我們所設計的微力感測元件。

關鍵字：接觸力、壓力、中心凸塊、覆晶封裝

# Center Boss Pressure Sensor Based on Poly-Si-on-Insulator Structure

Student : Pai-Hsi Ting

Advisor : Dr. Yu-Chung Huang

Department of Electronics Engineering and Institute of Electronics  
National Chiao Tung University

## Abstract

A piezoresistive sensor that is capable of measurement of normal contact force, the greater linearity at small force and the larger working range is proposed in this thesis. With a circular membrane as a sensing structure and a center boss as a force-conducting structure, the proposed sensor can be fabricated as a whole without an complicated package to provide force conducting structures. By the analytic solutions for the distribution of the deflection and the longitudinal/transverse stress of the sensor, it is obtained that the massing stress was dispersed and transverse stress in the four piezoresistors was balance in this structure. It assists the sensor in increasing the linearity and the limited force. Moreover, a Flip-Chip assembly of the tactile sensor is also described in this thesis to make the sensor more reliable in a practical use.

Keyword : contact force, pressure, center boss, Flip-Chip

## 誌謝

我常以為，學如逆水行舟，而今輕舟已過萬重山。一路走來點滴在心，因此下筆的此刻已經預料到，這將是一篇沉長的謝詞，雖然這不是一篇完美的論文，但這部論文的完成，要感謝的人真的很多，僅以此文表達我誠摯的謝意。

首先要感謝黃宇中老師的諄諄教誨及包容，在我思想困頓的時候適時指引我方向，還要感謝三位口試委員的指正與協助，使我獲益良多。在此特別感謝徐文祥老師及其實驗室的成員，在實驗上極需協助的同時伸出援手。感謝博士班張煒旭學長，在我實驗的同時點出許多我未考慮到的問題，使我的實驗能順利完成。感謝鍾君煒學長，在微機電儀器上的協助。感謝林稔杰學長在製程模擬軟體以及有限元素分析軟體上的幫忙。感謝交大奈米中心博愛校區技術員的范揚禎先生熱心協助，讓我能快速完成許多道實驗，亦感謝蝕刻系統技術員徐秀巒小姐、爐管系統技術員黃月美小姐、黃光室陳悅婷小姐與光罩室的葉雙得先生，在製程與光罩製作上的協助，讓我本來進度落後的實驗部份如期完成。此外亦要感謝台大奈米機電中心魏中聖博士和台大應力所博士班陳建甫學長在深蝕刻製程的鼎力協助，常花費他一次又一次的時間測試，甚為感激。還有感謝中正大學電機碩士班的許家豪、交通大學電信所博士班蘇珍儀在製作印刷電路板與打線上的協助，並借貴所的儀器協助我量測，本論文有如此精準的製作與量測結果，都是你們的功勞。

在碩一剛入學，對實驗狀況完全無法掌握的時候，感謝方淳泓學長熱心指導與提攜，同時感謝學弟郭定隆、張躍瀚學弟，在課業與實驗上相互砥礪，還有感謝郭耿誌、易育聖在積體電路設計上的指教，感謝朱濟群學

長在人生與生涯規劃的指引。還要感謝最要好的死黨，中華大學電機系沈信賢和逢甲大學財稅系的范令瑜同學，在一年級初次趟入這陌生的環境時協助我認識新竹，以及我要感謝大葉大學電機所的蔡秉諺同學，在我求學生涯最佳的死黨與玩伴，給我永遠難忘的環島。挂一漏萬，可能尚有一些未提及的朋友們，在此均一併致謝。最後，最要感謝的莫過於我的家人和我的女友，在我最失意的時候有他們的鼓勵，最煩悶的時候有他們的包容，此無形的力量使我能更堅強的邁進。

徐徐和風，田田荷葉，夏日的交大校園顯得分外恬靜，只剩枝葉婆娑，彷彿正迎接下批新學子的到來。千里聚首終須一別，彩雲片片已長留我心。此行不虛！



# 目 錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	v
表目錄.....	vii
圖目錄.....	viii
符號說明.....	x
<b>一、緒論.....</b>	<b>1</b>
1.1 文獻回顧.....	1
1.2 本文架構.....	5
<b>二、主要製程技術簡介.....</b>	<b>6</b>
2.1 微影技術.....	7
2.2 熱養化製程.....	8
2.3 薄膜沉積技術.....	10
2.3.1 物理氣相沉積.....	10
2.3.2 化學氣相沉積.....	11
2.4 蝕刻.....	14
2.4.1 濕式蝕刻.....	14
2.4.2 乾式蝕刻.....	17
2.5 離子佈植.....	19
<b>三、壓阻式壓力感測器之原理.....</b>	<b>21</b>
3.1 微力感測器工作基本原理.....	21
3.2 分析施力於薄板造成的形變與應力.....	22
3.2.1 壓力模式.....	28
3.2.2 接觸力模式.....	29
3.3 壓阻特性與原理.....	31
3.4 惠式電橋線性化.....	30
3.5 靈敏度分析.....	40
3.6 溫度效應與分析.....	41
<b>四、矽壓阻式壓力感測器之設計.....</b>	<b>45</b>

4.1 矽壓力感測器之結構設計與模擬.....	45
4.1.1 接觸力模式.....	46
4.1.2 壓力模式.....	59
4.2 壓阻設計.....	62
4.3 元件靈敏度估算.....	64
<b>五、感測元件製作與結果.....</b>	<b>66</b>
5.1 製作感測元件流程.....	66
5.2 封裝本壓力感測元件.....	72
5.3 量測環境架設.....	71
<b>六、結果討論與未來工作.....</b>	<b>80</b>
參考文獻.....	81
做者簡歷.....	83



## 表 目 錄

表 2-1 蒸鍍與濺鍍兩物理氣相沈積法之比較.....	11
表 2-2 LPCVD、APCVD、PECVD 沈積優劣比較.....	13
表 3-1 壓力模式下內外徑邊緣的縱向與橫向應力.....	29
表 3-2 接觸力模式下內外徑邊緣的縱向與橫向應力.....	31
表 3-3 各種材料之壓阻因子.....	34
表 3-4 各方向之 $\pi_i$ 、 $\pi_r$ 值.....	36
表 3-5 在室溫下之電阻與壓阻係數比較.....	37
表 4-1 施以 1kgf 的接觸力於不同直徑的中心凸塊上得邊緣縱橫向應力	58
表 4-2 施以壓力 1Pa 施於不同內徑的元件上所得之縱橫向應力.....	61
表 5-1 每一壓阻的未受力下的阻值.....	75



## 圖 目 錄

圖 2-1 熱氧化成長速率(a)乾式氧化(b)濕式氧化.....	9
圖 3-1 壓組元件工作原理示意圖.....	22
圖 3-2 本實驗所設計之結構示意圖.....	26
圖 3-3 對中心凸塊結構的兩種施力模式(a)壓力模式(b)接觸力模式...	28
圖 3-4 壓阻受外力示意圖.....	32
圖 3-5 單晶矽各晶格方向之楊氏模數.....	33
圖 3-6 單晶矽各晶格方向之蒲松比.....	33
圖 3-7 施於各方向力之示意圖.....	35
圖 3-8 P 型(100)矽之縱向與橫向壓阻係數.....	38
圖 3-9 N 型(100)矽之縱向與橫向壓阻係數.....	38
圖 3-10 惠斯同電橋之圖意.....	39
圖 3-11 摻雜濃度與壓阻溫度效應之關係.....	43
圖 3-12 壓阻特性與 Boron 摻雜濃度關係.....	44
圖 4-1 撓度模擬之模型，此內徑與外徑為 1:2.....	46
圖 4-2(a) 以通用有限元素模擬軟體 Ansys 模擬內外徑比為 1:2 之結果	47
圖 4-2(b) 模擬內外徑比為 1:2 之撓度曲線圖.....	47
圖 4-2(c) 模擬內外徑比為 1:2 之硬力強度曲線圖.....	47
圖 4-3 撓度模擬之模型，此內徑與外徑為 1:4.....	48
圖 4-4(a) 內外徑比 1:4 施以 1 公斤力之 Ansys 模擬結果.....	49
圖 4-4(b) Ansys 模擬內外徑比 1:4 之撓度曲線圖.....	49
圖 4-4(c) Ansys 模擬內外徑比 1:4 之硬力強度曲線圖.....	49
圖 4-5 撓度模擬之模型，此內徑與外徑為 3:4.....	50
圖 4-7(a) 內外徑比 3:4 施以 1 公斤力之 Ansys 模擬結果.....	51
圖 4-7(b) Ansys 模擬內外徑比 3:4 之撓度曲線圖.....	51
圖 4-7(c) Ansys 模擬內外徑比 3:4 硬力強度曲線圖.....	51
圖 4-8 無中心凸塊之撓度模擬模型.....	52
圖 4-9(a) 無中心凸塊施以 1 公斤力之 Ansys 模擬結果.....	53
圖 4-9(b) 以 Ansys 模擬之撓度曲線圖.....	53
圖 4-9(c) 以 Ansys 模擬無中心凸塊之硬力強度曲線圖.....	53
圖 4-10(a) 無中心凸塊、內外徑 1:2、1:4 三種撓度比較圖示.....	54
圖 4-10(b) 三種內外徑撓度曲線圖.....	55
圖 4-10(c) 三種內外徑應力曲線圖.....	55
圖 4-11(a) 內外徑比 1:2 的縱向應力、撓度部分之模擬與推導比較.....	56
圖 4-11(b) 內外徑比 1:4 的縱向應力、撓度部分之模擬與推導比較.....	57
圖 4-11(c) 無中心凸塊的縱向應力、撓度部分之模擬與推導比較.....	57
圖 4-12 施不同接觸力下內外徑邊緣應力曲線.....	59

圖 4-13(a) 內外徑比 1:2 的應力、撓度部分之模擬與推導比較.....	60
圖 4-13(b) 內外徑比 1:4 的應力、撓度部分之模擬與推導比較.....	60
圖 4-14 壓阻設計之外型大小與接線.....	64
圖 5-1 多晶矽壓阻式壓力感測元件製作流程.....	69
圖 5-2 壓力感測元件正反面實作結果.....	70
圖 5-3 覆晶封裝示意圖.....	71
圖 5-4 封裝後壓阻元件完成圖.....	72
圖 5-5 接觸力量測環境架設圖.....	73
圖 5-6 壓力量測環境架設圖.....	74
圖 5-7 電壓驅動源下，不同溫度環境下受不同接觸力的輸出結果.....	76
圖 5-8 電壓驅動源下，溫度對電壓輸出源輸出訊號的影響.....	77
圖 5-9 電流驅動源下，不同溫度環境下受不同接觸力的輸出結果.....	77
圖 5-10 電流驅動源下，溫度對電壓輸出源輸出訊號的影響.....	78
圖 5-11 壓力模式下量測輸出結果.....	79



## 符 號 說 明

$\nu$	: Poisson's ratio
$E$	: Young's Modulus
$\varepsilon$	: Strain
$\sigma$	: Stress
$G_D$	: Gauge Factor of Deformation
$\tau$	: Shear stress
$\gamma$	: Shear strain
$w$	: Deflection
$t$	: Thickness of the membrane
$D$	: Bending stiffness
$M$	: Bending Moment
$Q$	: Shearing force
$P$	: Pressure
$F$	: Tactile force
$\rho$	: Resistivity
$\pi$	: Piezoresistance coefficients
$S$	: Sensitivity



## 第一章 緒論

微機電系統(Micro Electro-Mechanical Systems)在全球已有如野火燎原般的在各國全力發展，產業界與學術界無一不熱切地投入這股趨勢當中，其應用領域已涵蓋電子、資訊、材料、醫學、生化、通訊及航太等等。本研究嘗試應用微機電系統技術在矽晶圓上加工，以體微細加工技術(Bulk Micromachining)製作大小為 $4100 \times 4100 \mu m^2$ 之矽型壓阻壓力感測器，相較傳統感測運用的原理相當多，有用可動膜片組成的電容式感測、用波頓管(Bourdon Tube)及彈簧管受力推動指針的電位計式、用利用線圈位移產生線圈磁阻變化的磁阻磁阻式、利用壓力差導致磁通量變化的電感電橋式、和利用材料本身受壓變化特性的應變計式等等，在此運用以純熟的半導體製程及對壓應力極敏感的矽材料做感測器可易於量產、降低成本、縮小體積、增加運用的範疇。此壓阻式微壓力感測器之製作完成，將可應用於解析度需求較高時的壓力量測，亦可用於一般實驗室的研究、工業，家庭、一般個人用品如汽車車胎計、血壓計等等。

### 1.1 文獻回顧

微機電系統的觀念，是將半導體製程技術融合機械的觀念和原理而發展的新興應用，其起源可推溯至1960年對機械微小化的研究，經過了數十年，隨著半導體製造技術漸進的成熟，以傳統電子、電機、機械和近代物理科學，將半導體製造技術延伸發展出目前的微機電系統，其技術包含了微製造技術、接合技術、組裝技術、檢測技術等等。就微製造技術方面主要分為半導體微加工、LIGA 技術、微機械加工三個大類。

在半導體微加工上更是引用了積體電路的半導體製程技術，其製程簡單的說有三個基本製程，即薄膜沉積(Deposition)、微影(Lithography)、

蝕刻 (Etching) 等，其特點為容易大量生產、製程之元件大小極小，而就其製程不同又可分為體型微細加工 (Bulk Micromachining) 和面微細加工 (Surface Micromachining)，缺點是其可製作之結構受到半導體製程的製程限制所侷限。

LIGA則是使用同步輻射產生之X-ray對矽表面做模具結構，在利用模完成之模具做設射出成型等加工方式做加工，優點是容易製作高深寬比的結構，但其缺點是此模具的製作過於昂貴、而且其石刻製程受限變化不大、除此之外同步輻射全台只有一台，全世界總共也只有五十餘台。微機器加工是使用製作更精密的機械工具，來對元件做加工，特點是可不再受限於半導體或LIGA製程的製程約束，製作任意想要之結構，但其缺點為難以製作極小、或是大量陣列式的元件。

其中微感測器是微機電系統中最早被商品化的產品之一，它用已成熟的半導體製程技術與基本的機械及材料等力學，也因此其發展極為快速。其中又以壓力感測器的製作最為成熟。這些微壓力感測器被使用在汽車的輪胎壓力量測、工業的氣體壓力感測器、以及家中使用的智慧型空調系統.... 等等。

在本文所要研究的主題為微力感測器。以傳統機械製作的力感測器因為體積大，無法做動態量測，並且其讀取壓力數據不易，不適合作動態自動量測及監控，後來改用電子式壓力感測器，可把所需要量測的物理量轉換成電訊號，方便做訊號的處理，並與整個系統做自動的控制。近年來半導體技術的成熟與微機電系統的興起，又將感測器帶入更微小化的階段。經過微小化的感測器不但可以保有原有的特性，其優點在於：微結構的熱時間常數 (Thermal Time Constant) 很短不易受到溫度的干擾、而還有元件共

振頻率高，工作頻帶加寬、感測區域面積變小、空間解析度提高等優點。

就矽壓力感測器的歷史演進[6]，可推至50年代，其當時半導體的壓阻特性與工作原理的研究的始祖首推貝爾實驗室(Bell Lab)，第一篇半導體壓阻特性的論文由C.S. Smith[10]等人發表於1954年，主要介紹矽和鍺元件的壓阻特性，並發現其壓阻特性遠超過一般金屬材料兩個階數(Order)，非常適合拿來做壓阻材料。於1958年，由Kulite、Honeywell、MicroSystems三家公司的共同設計，第一個以矽為壓阻的壓力元件問世，其利用薄膜形變來對壓阻材料產生材料特性改變，而其製作方式主要比較傾向微機械加工和比較粗糙的手工接合，雖然並非使用半導體的加工技術，但其薄膜撓度施力壓阻的元件結構與概念，奠定往後矽壓力感測元件的基本雛形，其當時元件大小約1/2英吋。1961年，Kulite公司將之前之同設計得結構加以改良，將原本需手工來接合矽壓阻材料，改用離子摻雜擴散(Diffused)的方式改變矽薄板的壓阻特性來製作壓力元件，而其結構是用挖穿的金屬和矽薄板作接合而成，其簡化了原本製程而不需再接合極小易脆的矽壓阻，也改進了元件的效能，但此時之元件依然無法有效的縮小，約1/3英吋。1966年，Honeywell公司使用微機械製程的方式，在矽薄板背面研磨出所需的凹槽(cavity)結構，這個構想使往後用化學蝕刻的體型微細加工(Bulk-micromachining)來製作壓力感測器，在此萌芽。

1970年，Kulite公司成功的使用等向性蝕刻(Isotropic Etching)化學的方式取代先前用機械研磨的方式製作其結構，大大提升元件生產的可行性。並於1974年，National Semiconductor公司將矽壓力感測器量產商品化，這個壓力感測器除了感測壓力部分外，還包含了溫度補償，算是一個完整的壓力感測產品。1976年，Kulite公司首度利用非等項性蝕刻(Anisotropic Etching)這種有方向性的蝕刻技巧來製作感測結構，其凹槽大小可經由半導體製程

的光罩來定義，而欲蝕科之厚度和形狀皆可由蝕刻時間來掌控，如此可製作出更精準的結構。而此間使用之等向與非等向蝕刻技術，皆是往後微機電體微加工中最重要之製程技術。1978年，Endevco公司嘗試使用中心凸塊(Center Bossed)的結構消弭結構受到壓力而非線性的形變，而電路上使用惠司登電橋來消除壓阻因子非線性段。隔年Honeywell使用離子佈植(Ion Implantation)來控制壓阻特性與溫度對阻值(TCR)和靈敏度(TCS)的效應；Kulite則是加入溫度補償來降低溫度效應。這些設計使得壓力元件更加穩定準確。

到1980年代開始使用以面型微細加工技術(Surface Micromachining)製程來設計壓力感測器，此面型加工壓力感測器與體型加工壓力感測器的不同是面型加工在建立了犧牲層(Sacrificial Layer)與定義完結構層後，再用濕蝕刻(Wet Etching)將犧牲層去除來建立感測器的結構，此等技術是可以將元件做的更小，更可以做到感測器陣列(Array)，相對的使用面加工的困難度比起體加工提高許多。

1990年，Chung, G. S. [7]等人利用SOI(Silicon-On-Insulator)架構的二氧化矽當作蝕刻停止層(Etching Stop Layer)，正面將壓阻定義出來，背面以KOH從蝕刻成薄膜，皆停止在二氧化矽，即完成初步壓力元件。面積為 $360 \times 1140 \mu\text{m}^2$ 的長方形，而量測壓力範圍為 $0.04 \text{ mV/V/mm Hg} - 700 \text{ mm Hg}$ 。1991年，S. Susumu[8]等人利用面型微細加工技術製作以氮化矽為薄膜之元件，再於薄膜上以化學沉積之多晶矽，並摻雜硼 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 。元件尺寸為 $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ ，而靈敏度大約為 $10 \text{ V/V/kPa}$ 。1998年，E. K. Vesten[9]等人利用表面微細加工技術製作壓力感測器以多晶矽(Poly-Si)作為薄膜材質，並以摻雜硼的多晶矽為壓阻，其大小為面積為 $103 \mu\text{m} \times 103 \mu\text{m}$ ，靈敏度為 $2.0 \mu\text{V/V/mmHg}$ ，已應用於血壓的量測。

往後壓阻壓力感測器設計原理和觀念大致相同，其結構與壓阻的設計改良目的在降低成本簡化製程、縮小元件體積、補償溫度效應、能得到更大的量測範圍、靈敏度、線性度等等、甚至能和CMOS等驅動或量測電路相結合，此些亦為本篇論文所提之壓阻壓力感測器改良的設計方向。

綜合以上矽壓阻式感測器的發展，若將已熟悉的機械的觀念配合上現有的積體電路的製程技術，即使的壓阻式壓力感測器應用趨於可行。此微壓力感測器將可能取代傳統感測器，所不能達到的量測解析度帶入新的領域，不論在學術研究、工業用、家庭、個人等等，將會帶給人類另一個新的貢獻。

## 1.2 本文架構

本文共敘述了六個章節來探討運用體微加工技術所製作之矽型壓阻式微壓力感測器。第一章緒論說明了研究的背景及目的，第二章敘述將運用的半導體製程製作微壓力感測器所需運用到之製程技術，第三章介紹本文研究的壓阻式微感測器的結構與動作原理，第四章說明微壓力感測器的設計與模擬分析。第五章對此元件之製作結果、量測與問題探討。第六章則是對此研究的結果做結論及未來工作。

## 第二章 主要製程技術簡介

先前提過微機電的基本製造技術主要可分為三大類—半導體微加工、LIGA技術、微機械加工。而本論文將使用其微機電中利用半導體的製程的方法，來製作所需的壓力感測元件，以現之半導體加工足以製作各種的元件，微感測器、微致動器、微結構等。本章節將討論所要研究的壓力感測器中關於製程部份，除了光罩設計與製作方面外，本論文將會使用半導體製程中的氧化、低壓化學沉積、離子佈植、離子乾式蝕刻、電漿輔助化學沉積及黃光流程與雙面對準技術。

在微機電製程製作微結構中，還可細分兩種不同的結構與加工模式：體型微細加工 (Bulk Micromachining)、面型微細加工 (Surface Micro-Machining)。而壓力感測器的製作亦可用此兩種不同的加工來製作。

a. 體型微加工：是對矽晶片本身蝕刻加工，而其製程與一般積體電路的製成有些不同，特點是使用矽晶片正反兩面皆可做加工處理。又因其通常會深石刻及正反面之結構相互對齊，所以會使用到紅外線等雙面對準技術。其特性如下：

- (1) 結構面積較大與厚度較厚
- (2) 晶片兩面皆加工
- (3) 結構層可為單一層矽，亦可與矽或玻璃做接合
- (4) 材料特性與晶格方向有關
- (5) 一般來說其製作容易度與成功率遠大於面型微加工

b. 面型微細加工：面型微細加工法並不針對矽本身做蝕刻加工，矽是當結構的底材，藉由沈積不同材料的方法來架構所需要的結構體，特點是常會用犧牲層來架空，最後再將犧牲層蝕刻掉。而就其他方面，面微加工比較接近一般半導體常用的製程。其特性如下：

- (1) 結構面積小與厚度薄
- (2) 結構可由許多材質沈積而成
- (3) 材料特性由所沈積的該層材料有關
- (4) 可與IC製程技術整合做批量生產
- (5) 有殘留應力(受沈積方式、摻雜濃度與退火等條件影響)及黏著(Stiction)之問題
- (6) 常會需去除犧牲層(Sacrificial Layer)，此步驟為元件製作易失敗之處

由於本實驗目的為製作壓阻元件，為盡量排除因結構及薄板內應力造成之壓阻效應，並探究中心凸塊(Center Boss)結構對線性化的貢獻，在此將使用體型為加工的方式來製作所需的壓力感測元件。

## 2.1 微影技術

微影技術是半導體製程步驟中最重要的一個步驟，而半導體元件的大小亦受到此步驟影響甚巨。由於其工作環境需在黃光的環境下作業，一般亦稱之為黃光步驟，其的目的主要在定義薄膜的圖形，被光阻阻擋住的區域在後續製程將不會被蝕刻，以達成圖形轉移之目的。在微影過程中光阻為必須用到的原料，光阻主要可分正光阻和負光阻兩種，所謂正光阻是被曝光到的區域，其光阻分子受到破壞而使它可以溶解再顯影液中；負光阻剛好相反，曝光的區域的光阻分子鍵結在一起而使其區之光阻不會溶解再顯影液中。光阻的種類繁多，通常後段製程及製程設計而選擇適當的光阻即可。在此由於製程上本論文所提之壓力感測元件是使用體微加工，將會需要長蝕刻多晶矽及矽基板，所以就阻擋層而言將選用正光阻AZP-4620此為一約 $9\mu\text{m}$ 厚膜光阻，以抵擋長時間的蝕刻及多次顯影曝光。其所需的參數(Recipe)如下：

1. 晶片清洗：RCA clean or H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> or ACE

2. 上 HMDS 附著層增加光阻附著力
3. 塗佈光阻 AZP4620 :
  - i. Step 1 : 600 rpm, 5sec
  - ii. Step 2 : 5000 rpm, 60sec
4. 軟烤 : 90°C, 30min
5. 曝光 : 7 min (Karl-Suss MA-4)
6. 顯影 : FHD-5 4 min
7. 硬烤 : 120°C, 30min

如此即可將所需的光罩圖形轉曝至光阻上，以進行下一道製程。

## 2.2 熱氧化製程

積體電路之所以偏愛用矽作為基材其中一個主要原因是，矽可以輕易產生一個優異的氧化物做隔絕層——二氧化矽。這種氧化物不論是在積體電路中或是微機電元件中，都是使用極為廣泛的材料，其生成二氧化矽的方式有許多，本章說明使用高溫爐管產生二氧化矽的反應和特性，此成長方式稱之為熱氧化製程。

高溫爐管成長二氧化矽的原理是利用矽基材，通入足量的氧氣或水氣至加以高溫之爐管中使矽表面氧化。其中因通入的氣體與化學反應不同，又有分濕式氧化沉積(Wet Oxidation)與乾式氧化沉積(Dry Oxidation)兩種，其化學式分別如下：



化學式(1)是屬於乾式氧化，其成長只通入純氧氣並施加900°C以上之高溫使其氧化；而化學式(2)是屬於濕式氧化，其成長為通入氧氣和氫氣，使其在高溫爐管中反應成水氣，再與矽表面產生化學反應，當然濕氧反應時

未反應之氧氣亦會在矽表面與矽反應。氧化主要受兩參數所控制[11]：

- (1) 質量輸送係數(Mass-Transport Coefficient)
- (2) 化學反應常數(Reaction-rate Constant)

物質傳輸係數指的是氧氣或是水氣從擴散至矽表面的速率，而化學反應常數指的是化學反應的速度。在一般情況下，濕氧化的成長速率遠比乾氧化的成長速率快上數倍，而其主要原因乃是由於濕氧所使用的氧化來源為水氣 $H_2O$ (分子量18)，其分子遠小於氧分子 $O_2$ (分子量32)所致。換句話說即是因為水氣質量傳輸係數高，擴散入矽基材的速率遠高於氧所致，而正因其反亦速率受擴散速率影響，當成長厚度越後厚，其擴散速率越慢，反應生成也就越慢，其氧化溫度、厚度與時間之關係圖如圖2-1。但也因為其成長速度快，其氧化矽之品質較乾氧化差。但不論乾氧化或濕氧化，其皆會消耗部分的矽來行程氧化層，每成長1單位的氧化矽就損失44%的矽。

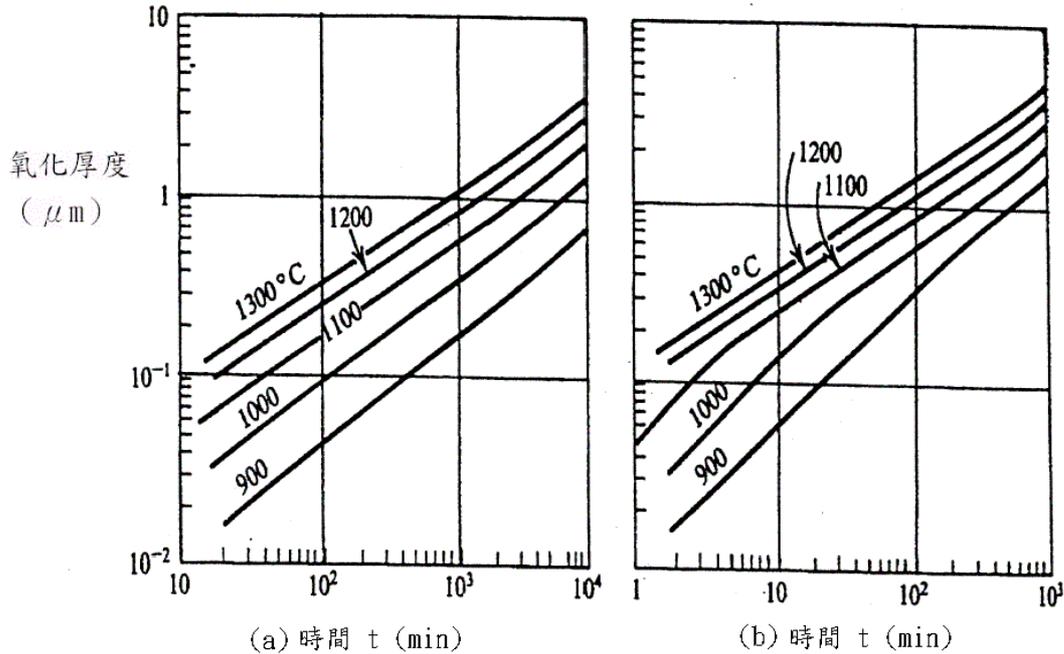


圖2-1 熱氧化成長速率(a)乾式氧化(b)濕式氧化[11]

而就本實驗而言，將會使用濕式氧化製程 $1000^{\circ}C$ 之高溫來成長 $5000\text{\AA}$ 厚之氧化矽，由圖2-1(b)可得，欲成長至所需的厚度大約需要80分鐘的成長時

間。

## 2.3 薄膜沈積技術

薄膜沈積製程在半導體積體電路製程算是已開發成熟的技術，因此若微機電製程中欲使用此技術也是相當容易運用。薄膜沈積依據沈積過程中，是否含有化學反應的機制，可以區分為物理氣相沈積（Physical Vapor Deposition，簡稱PVD）通常稱為物理蒸鍍及化學氣相沈積（Chemical Vapor Deposition，簡稱CVD）通常稱為化學蒸鍍，在本壓力感測器亦有所使用，分別介紹之。

### 2.3.1 物理氣相沈積

物理氣相沈積(PVD)顧名思義是以物理機制來進行薄膜沉積而不涉及化學反應的沈積方式，所謂物理機制即是指利用欲沈積之材料的相變化來進行沈積，其主要又包含下列兩種不同之技術：

- (1) 蒸鍍(Evaporation)
- (2) 濺鍍(Sputter)

蒸鍍是在高真空狀況下，將所要蒸鍍的材料利用電阻式（Thermal Evaporator 或稱 Thermal coater）或電子束式(E-Gun)加熱達到熔化溫度，使原子蒸發，到達並附著在基板表面上。在蒸鍍過程中，基板溫度對蒸鍍薄膜的性質會有很重要的影響。通常基板也須要適當加熱，使得蒸鍍原子具有足夠的能量，可以在基板表面自由移動，如此才能形成均勻的薄膜。基板加熱至 150°C 以上時，可以使沈積膜與基板間形成良好的鍵結而不致剝落。

濺鍍是利用電漿所產生的離子，如  $Ar^+$ ，藉著離子對被濺鍍物體電極的轟擊使之濺向被鍍物。由於濺鍍本身受到濺射原子多元散射方向的影響，

不易覆蓋填實鎮洞(Hole)或栓塞(Plug-In)；因此，現在濺鍍技術的重點，莫不著重於改進填洞時之階梯覆蓋率(Step Coverage)，簡化製造流程，降低成本等。

表 2-1 蒸鍍與濺鍍兩物理氣相沈積法之比較

	沈積速率	厚度控制	成份控制	可用材料	覆蓋能力
蒸鍍	極慢	差	差	少	佳
濺鍍	佳	佳	佳	多	差

本論文中壓力感測器將鍍鋁做壓阻間與接點(Pad)的連接線，由於在此最需要的是極佳的階梯覆蓋能力，以免接點處高度差過大而斷線，而並不需要考慮沈積速度的快慢、厚度誤差也並不要求非常精準，所以選擇使用電阻式的蒸鍍機(Thermal Coater)來。

### 2.3.2 化學氣相沈積

化學氣相沈積主要為利用化學反應的機制，先將所欲成長物之反應氣體通入封閉的爐管中，並加熱使其反應產生目標材料，其反應需仰賴氣體傳輸、熱能傳遞及化學反應進行，亦即反應氣體被導入反應器中，藉由擴散方式經過邊界層(Boundary Layer)到達晶片表面，再由爐管加熱提供反應所需的能量，反應氣體就在晶片表面產生化學變化，生成固體生而沈積在晶片表面。

探究化學氣相沈積的沈積速率，其與熱氧化製程一樣受制於質量輸送係數(Mass-transport Coefficient)和化學反應常數(Reaction-rate Constant)，不同的是在熱氧化時因其製程均為高溫所以只需要考慮質量傳輸係數，但在此我需分兩種情況討論 1.較高溫之化學沈積 2.較低溫之化學沈積。在高溫之沈積其反應速率受制於質量輸送機制，其主因乃是反應速率在高溫時極快導致反應物來不及補充而因此受侷限；而低溫沈積正好相反，其反應速

率受限於化學反應機制。在積體電路製程中，經常使用的化學氣相沈積技術有：

- (1).化學氣相沈積(Atmospheric Pressure CVD、縮寫APCVD)
- (2).低壓化學氣相沈積(Low Pressure CVD、縮寫LPCVD)
- (3).電漿輔助化學氣相沈積(Plasma Enhanced CVD、縮寫PECVD)

常壓化學氣相沈積(APCVD)顧名思義即化學反應在近於大氣壓的反應爐中進行的沈積，常壓在攝氏 0 度的海平面時壓力為 760 托(Torrs)，常用來沈積二氧化矽和氮化矽薄膜。此沈積方式優點為沈積速率快、製程屬於低溫製程(通常為 240~450°C)、良好的薄膜均勻度、反應裝置不需抽低壓亦不需將氣體電漿化為三者裝置中最簡單的，亦易應用於工業連續式的生產，但其缺點為步階覆蓋能不佳及容易有微粒(Particle)污染。所謂微粒污染乃是由於在常壓下氣體分子彼此碰撞機率就很高，反應又為了使速率和均勻度容易控制而會高速的通入氣體，導致氣體間容易發生氣相反應，產生製程不希望沈積的微粒沈積。

低壓化學氣相沈積(LPCVD)即是在低於大氣壓的環境下進行沈積。與 APCVD 系統相比較，LPCVD 系統的特點是利用均勻的溫度分佈來控制成長速率和品質，因此 LPCVD 有更優異的薄膜均勻度，再者由於 LPCVD 低壓環境使的分子具有較高的表面遷移率，因此其擁有極佳的階梯覆蓋能力，並且由於其壓力和氣體濃度較低，較不會產生氣體間反應而生之微粒；而 LPCVD 的缺點則是沈積速率較低，常操作於高溫的環境下(>650°C)需考慮前段製程之材料是否能夠承受，而且其常使用具有毒性、腐蝕性、可燃性的氣體。但由於 LPCVD 所沈積的薄膜具有優良的性質和覆蓋性，因此在積體電路製程中 LPCVD 是用以成長磊晶薄膜及其化品質要求較高的薄膜，如氧化物、氮化物或多晶矽等。

電漿輔助化學氣相沈積 (PECVD) 系統使用電漿的輔助能量，使得沈積反應的溫度得以降低，一般操作溫度約再 100~400°C 間。除了將反應物激發游離成電漿態外，PECVD 的沈積反應原理與一般的 CVD 之間並沒有太大的差異，其電漿中的反應物是來至於化學活性高的離子或自由基 (Radicals)，而基板表面受到離子的撞擊也會使得化學活性提高，這兩項因素都促進基板表面的化學反應速率，因此 PECVD 在較低的溫度即可沈積薄膜。PECVD 的主要優點是具有較低的沈積溫度，極高的沈積速率，並且可藉由控制射頻(RF)功率來調控薄膜的內應力；而 PECVD 的缺點則是產量低，容易會有微粒的污染，而且薄膜中常含有大量的氫原子。

表 2-2 LPCVD、APCVD、PECVD 沈積優劣比較

沈積方式	優點	缺點
APCVD	製程裝置較簡單 製程溫度低 沈積速率快	階梯覆蓋性差 微粒污染
LPCVD	階梯覆蓋能力強 薄膜品質極佳 微粒污染極少	溫度高 沈積速率低
PECVD	溫度低 沈積速度快 可控制材質應力	有微粒污染 含有大量氫離子 薄膜品質較差

本次實驗將需要沈積多晶矽作為元件中壓阻材料，一般來說要行成多晶矽會選擇高溫的製程，再者由於LPCVD沈積的微粒污染較少、薄膜品質較佳，正好為壓阻所必要的條件，所以本壓力感測元件將選擇使用LPCVD來沈積之。

再者，元件最後還會沈積二氧化矽及氮化矽作為元件保護層，由於其製程前端有金屬層鋁，且希望其薄膜沈積後內應力能最小，因此選擇使用低溫的PECVD來沈積所需的材料，由於此處只是用來當保護層，所以並不在意是否其有微粒和品質。

## 2.4 蝕刻

蝕刻製程的功能，就是要將進行微影製程前所沈積的薄膜，把沒有被光阻覆蓋及保護的部分，以化學反應或是物理作用的方式加以去除。蝕刻技術可以分為濕蝕刻(Wet Etching)與乾蝕刻(Dry Etching)兩類，其分別為濕蝕刻是利用液體蝕刻溶液，將晶片浸沒其中，或其噴灑至晶片上，經由溶液與被蝕刻物間的化學反應，選擇性的移除接觸的表面材料以達到蝕刻的目的；而乾式蝕刻則是使用氣體（通常為電漿態）來做蝕刻反應，所以又稱之為電漿蝕刻，其可以依靠射頻(Radio Frequency)來調控其蝕刻方向性，其蝕刻沒有晶元方向、側向蝕刻等問題，是目前半導體常用的蝕刻方式。由於此兩種蝕刻都有其適用的範圍和可蝕刻的材料並無優劣，應視需求和蝕刻的對象而選擇適合的蝕刻方式。

再本次壓阻壓力感測元件的製程中，將會蝕刻多晶矽、二氧化矽、鋁、氮化矽、單晶矽等物，其下分別探討之。

### 2.4.1 濕式蝕刻

濕式蝕刻是利用化學反應來進行薄膜的去除，對於非晶格結構的薄膜蝕刻通常為一等向性蝕刻，一般而言此方式不足以定義3微米以下的線寬，但對於3微米以上的線寬定義濕式蝕刻仍然為一可選擇採用的技術。其在微電子製作過程中被廣泛的採用乃由於其具有低成本、高可靠性、高產能及優越的蝕刻選擇比等優點。但相對於乾式蝕刻，除了無法定義較細的線寬外，濕式蝕刻仍有以下的缺點：1) 需花費較高成本的反應溶液及去離子水；2) 化學藥品處理時人員所遭遇的安全問題；3) 光阻附著性問題；4) 氣泡形成及化學蝕刻液無法完全與晶圓表面接觸所造成的不完全及不均勻的蝕刻；5) 廢氣及潛在的爆炸危險性。

濕式蝕刻之反應過程可分為三個步驟：1) 化學蝕刻液擴散至待蝕刻材料之表面；2) 蝕刻液與待蝕刻材料發生化學反應；3) 反應後之產物從蝕刻材料之表面擴散至溶液中，並隨溶液排出。三個步驟中進行最慢者為速率控制步驟，也就是說該步驟的反應速率即為整個反應之速率。大部份的蝕刻過程包含了一個或多個化學反應步驟，各種形態的反應都有可能發生，但常遇到的反應是將待蝕刻層表面先予以氧化，再將此氧化層溶解，並隨溶液排出，如此反覆進行以達到蝕刻的效果。如蝕刻矽或鋁時，即是利用此種化學反應方式。

濕式蝕刻的速率通常可藉由改變溶液濃度及溫度予以控制。溶液濃度可改變反應物質到達及離開待蝕刻物表面的速率，一般當溶液濃度增加或提高溶液溫度時，可加速化學反應速率進而蝕刻速率將會提高，但為了維持製程的穩定性，通常會將溶液濃度及溫度控制在固定的條件下。

除了溶液的選用外，選擇適用的遮罩物質亦是十分重要的，它必須與待蝕刻材料表面有很好的附著性、並能承受蝕刻溶液的侵蝕。而光阻是一個相當常用的遮罩選擇材料，其好處是圖案轉印步驟簡單，當蝕刻液對材料與光阻間的蝕刻選擇比高時，都會優先考慮使用光阻做遮罩層。

在本次壓力元件製作中將運用濕蝕刻技術來蝕刻金屬鋁、氮化矽及氧化矽與多晶矽四種。

#### a Al

鋁是半導體製程中最主要的導線材料，它具有低電阻、易於沉積及蝕刻等優點而廣為大家所採用，鋁或鋁合金的濕式蝕刻主要是利用加熱的磷酸、硝酸、醋酸及水的混合溶液加以進行。典型的比例為  $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{H}_2\text{O} = 50 : 2 : 10 : 9$  80%的磷酸、5%的硝酸、5%的醋酸及 10%的水。而一般加熱的溫度約在  $70^\circ\text{C}$ - $80^\circ\text{C}$  左右，溫度越高蝕刻速率越快，

一般而言蝕刻速率約為 1000-3000 Å/min，而溶液的組成比例、不同的溫度及蝕刻過程中攪拌與否都會影響到蝕刻的速率。

蝕刻反應的機制是藉由硝酸將鋁氧化成為氧化鋁，接著再利用磷酸將氧化鋁予以溶解去除，如此反覆進行以達蝕刻的效果。在濕式蝕刻鋁的同時會有氫氣泡的產生，這些氣泡會附著在鋁的表面，而局部地抑制蝕刻的進行，造成蝕刻的不均勻性，可在蝕刻過程中予於攪動或添加催化劑降低介面張力以避免這種問題發生。

#### b. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

氮化矽可利用加熱至 180°C 的磷酸溶液(85%)來進行蝕刻。其蝕刻速率與氮化矽的成長方式有關，以電漿輔助化學氣相沉積方式形成之氮化矽，由於組成結構(Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub>H<sub>z</sub> 相較於 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) 較以高溫低壓化學氣相沉積方式形成之氮化矽為鬆散，因此蝕刻速率較快許多。但在高溫熱磷酸溶液中光阻易剝落，因此在作氮化矽圖案蝕刻時，通常利用二氧化矽作為遮罩。一般來說，氮化矽的濕式蝕刻大多應用於整面氮化矽的剝除。對於有圖案的氮化矽蝕刻，最好還是採用乾式蝕刻為宜。

#### c. SiO<sub>2</sub>

在微電子元件製作應用中，主要是做絕緣層、保護元件與犧牲層之功能，在本實驗中二氧化矽亦是如此。而二氧化矽的濕式蝕刻通常採用氫氟酸溶液加以進行。而二氧化矽可與室溫的氫氟酸溶液進行反應，但卻不會蝕刻矽基材及複晶矽。反應式如下：



由於氫氟酸對二氧化矽的蝕刻速率相當高，在製程上很難控制，因此在實際應用上都是使用稀釋後的氫氟酸溶液，或是添加氟化銨作為緩衝劑的混合液，來進行二氧化矽的蝕刻。氟化銨的加入可避免氟化物離子的消

耗，以保持穩定的蝕刻速率。而無添加緩衝劑氫氟酸蝕刻溶液常造成光阻的剝離。典型的緩衝氧化矽蝕刻液(BOE : Buffer Oxide Etcher)(體積比 6:1 之氟化銨(40%)與氫氟酸(49%))對於高溫成長氧化層的蝕刻速率約為 1000Å/min。

在半導體製程中，二氧化矽的形成方式可分為熱氧化及化學氣相沉積等方式；而所採用的二氧化矽除了純二氧化矽外，尚有含有雜質的二氧化矽如 BPSG 等。然而由於這些以不同方式成長或不同成份的二氧化矽，其組成或是結構並不完全相同，因此氫氟酸溶液對於這些二氧化矽的蝕刻速率也會不同。但一般而言，高溫熱成長的氧化層較以化學氣相沉積方式之氧化層蝕刻速率為慢，因其組成結構較為緻密。

#### d. Poly-Si

在半導體製程中，單晶矽與複晶矽的蝕刻通常利用硝酸與氫氟酸的混合液來進行。此反應是利用硝酸將矽表面氧化成二氧化矽，再利用氫氟酸將形成的二氧化矽溶解去除，反應式如下：



上述的反應中可添加醋酸作為緩衝劑(Buffer Agent)，以抑制硝酸的解離。而蝕刻速率的調整可藉由改變硝酸與氫氟酸的比例，並配合醋酸添加與水的稀釋加以控制。

### 2.4.2 乾式蝕刻

反應性離子蝕刻(Reactive Ion Etching 簡稱RIE)乾式蝕刻中最為廣泛使用的方法，便是結合(1)物理性的離子轟擊與(2)化學反應的蝕刻。此種方式兼具非等向性與高蝕刻選擇比等雙重優點，蝕刻的進行主要靠化學反應來達成，以獲得高選擇比。加入離子轟擊的作用有二：一是將被蝕刻材質

表面的原子鍵結破壞，以加速反應速率。二是將再沈積於被蝕刻表面的產物或聚合物(Polymer)打掉，以使被蝕刻表面能再與蝕刻氣體接觸。而非等向性蝕刻的達成，則是靠再沈積的產物或聚合物，沈積在蝕刻圖形上，在表面的沈積物可為離子打掉，故蝕刻可繼續進行，而在側壁上的沈積物，因未受離子轟擊而保留下來，阻隔了蝕刻表面與反應氣體的接觸，使得側壁不受蝕刻，而獲得非等向性蝕刻。在本次實驗中，無需在矽晶片上製作一圓型的高深度結構，用濕蝕刻其側向蝕刻過於嚴重與晶格方向等非等向性蝕刻問題，因此選擇使用乾式蝕刻。

### Deep RIE Silicon Etch

如前所述，溼式矽非等向性蝕刻加工有蝕刻面與矽晶片方向相關、過大側蝕刻量及深寬比受限等缺點，而傳統的矽深蝕刻製程是在低基板溫度(約  $-110^{\circ}\text{C}$ ) 與高氟濃度下進行，雖可獲得微機電系統應用的蝕刻品質，但在此低溫製程下會產生光阻龜裂、晶片冷凝雜質形成黑矽、晶片無法穿透蝕刻  $500\ \mu\text{m}$  以上等缺點，再加上低溫液態氮的使用，增加了設備的複雜性。因此雖然乾式矽非等向性蝕刻 RIE 製程可突破溼式蝕刻性與矽晶片方向相關及過大側蝕刻量的缺點，但其蝕刻速率低 ( $< 1\ \mu\text{m}/\text{min}$ )，且亦無法得到高深寬比 ( $< 10:1$ )，因此兩者在微系統製程的應用上受限。

感應耦合電漿(ICP)矽性蝕刻具有高電漿密度低氣體壓力 (High Density Low Pressure, HDLP) 特性，可大幅提高蝕刻速率及改善深寬比，故已發展成微機電系統製程的關鍵技術。為了改善矽深蝕刻的缺點，ICP蝕刻利用 Bosch 的交替蝕刻與高分子鈍化 (Alternating Etch and Polymerization)，並改變不同的側壁鈍化方法來進行矽深蝕刻。以  $\text{CF}_4/\text{SF}_6$  反應氣體為例說明 ICP 蝕刻機制：

一、首先在矽壁沈積鈍化高分子： $\text{CF}_4$  被電漿分解成活性機，並進行

高分子沈積反應，使壁上形成鈍化膜。

二、矽底部的高分子與矽被蝕刻： $\text{SF}_6$  被電漿分解成  $\text{F}^-$  先蝕刻鈍化膜再蝕刻 Si，此時離子撞擊的角色在移除底部的鈍化膜與維持方向性。

三、步驟一、二交替反覆：必須選擇適當的反應氣體，維持鈍化沈積與蝕刻步驟的平衡。

ICP的主要特點在於不需低溫冷卻即可得到高蝕刻速率、高選擇比、高非均向性、高蝕刻深度及高深寬比的矽蝕刻結果。

## 2.5 離子佈植

離子佈植 (Ion Implantation) 在半導體工業中被廣泛地用來摻雜三五族雜質原子的技術；近年來更被應用於材料表面性質的改質上，藉以改變材料的摻雜(Doping)、導電性、歐姆接觸(Ohmic Contact)、以及硬度、強度和抗腐蝕性等機械性質，藉以得到最佳之材料性質。

在離子佈植的過程中，雜質原子或分子係以一個帶電離子的形式被加速至某一能量，直接撞擊靶材而進入其內。因此，佈植離子於靶材內的縱深分佈可由精確的控制離子能量來得到，而佈植離子的劑量則可由佈植的時間以及離子束的電流得到精確的控制。除了可精確地控制佈植離子的縱深分佈及劑量外，利用離子佈植的方法可以得到較均勻分佈及較高濃度的摻雜物，並且可簡單的利用光阻抵擋來選擇所欲佈植的區域。

離子佈植後需要經過一次退火的熱處理，熱處理主要有兩個目的：一為活化摻雜原子並使其擴散，一為恢復單晶體結構。常用的熱處理系統有，恆溫的爐管和短時間的快速熱處理爐 (Rapid Thermal Processing)。雜質原子的擴散，除了遵從定總量雜質的擴散行為外，尚需注意因佈植所產生之

點缺陷的影響，欲將摻雜的原子活化，則必須使其能取代矽原子的晶格位置，故同時亦需恢復晶體之完美原子排列。所以殘存缺陷的消除，成為一主要的課題。

殘存缺陷的消除並不容易，但是其主要成因為過多的填隙原子沉積，而空位與填隙原子結合，則成為完美晶格。針對此特性，有幾個方法可以將殘存缺陷減縮或消除：

1. 以高溫長時間熱處理：高溫長時間可以提供足夠的空位缺陷數量與移動能力，使其能和填隙原子結合而將殘存缺陷消除。但是同時摻雜離子的擴散距離將太深，而對元件工作特性具負作用。
2. 是利用非摻雜元素離子（如 Si、Ge、Ar 等...）的佈植：利用非摻雜元素離子佈植以產生空位缺陷與填隙原子對，於原先已接受摻雜佈植的矽靶材中，使其空位較多區和先前佈植的填隙原子較多區重疊，而促成空位缺陷與填隙原子結合，而將缺陷在元件區消除。
3. 為利用製程的界面反應：利用製程的界面反應所產生的點缺陷，來協助殘存缺陷的消除。例如氮化矽或金屬矽化（生成金屬矽化物）反應，其在界面上產生多餘的空位缺陷，並向矽靶材內部擴散，這有助於化解聚集的填隙原子。
4. 減少因離子佈所產生的填隙原子數量：低劑量佈植對靶材所造成的損傷很輕微，填隙原子數量少，因而熱處理後並無殘存缺陷產生。在低能量高劑量佈植下，靶材表面已受損成為非晶層，但是只要此非晶層厚度小於 400 埃，則經 900 °C 以上退火，即可消除殘存缺陷。這是因為在非晶與單晶界面之下的填隙原子數，遠小於能量大的佈植，且此區也較接近靶材表面，使得空位缺陷可以很容易且源源不斷的供應至靶材內，將填隙原子對消成為完美晶格。

## 第三章 壓阻式壓力感測器之原理

為了完成期望的壓力感測，我需設計一有效之力轉換器，將壓力訊號轉換成可供後續利用的電輸出訊號。在傳統的力感測運用的原理相當多，有用可動膜片組成的電容式感測、用波頓管(Bourdon Tube)及彈簧管受力推動指針的電位計式、用利用線圈位移產生線圈磁阻變化的磁阻磁阻式、利用壓力差導致磁通量變化的電感電橋式、和利用材料本身受壓變化特性的應變計式等等。

本次實驗希望結合半導體製程與微機電的觀念來完成期望之壓力感測元件。與傳統壓力感測原理類似，矽壓力感測元件亦可使用電容、磁場效應量測結構受壓形變的程度來計算壓力，或運用材料特性受壓改變的關係變化來設計之，概括可用運用的原理有：壓電效應、電容效應、磁性效應、共振效應及壓阻效應等等。在此本論文選擇用壓阻材料受力與阻值的特性來製作所需的感測器，而其材料選擇半導體常用的多晶矽(Poly-Silicon)，其壓阻特性遠比一般材料明顯，是極佳的壓阻材料，在往後的章節將探討之。

### 3.1 微力感測器工作基本原理

微力感測器的基本設計想法是產生之阻值變化與外力能產生一對一函數曲線，如此只要得到阻值變化即可得知其相應的壓力強度，但如此並不足夠，若阻值變化與輸入力只是單純一對一無規則的函數，將增加後端感測電路的複雜性，因次若能設計線性函數關係的壓力感測元件，將可以大幅降低元件使用的複雜性，這亦是所有壓力感測元件所探討的重心。而標準的壓阻壓力感測器架構，是在薄板上放置具有壓阻特性的材料，以此來產生線性之壓力元件。如圖 3-1 所示，當元件薄板受到外力  $P$  時，薄板會因受力而產生變形，此在薄板上方之壓阻材料也會隨著薄板的彎曲而產生一

股拉或擠壓的力，導致壓阻材料產生電阻值之變化。

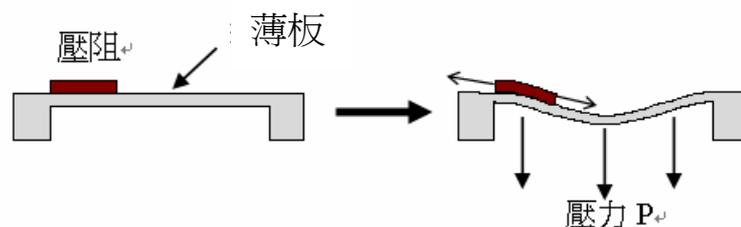


圖 3-1 壓阻元件工作原理示意圖

而產生電阻變化的同時，通常為了能得到更線性的壓力-電阻曲線及更大的壓阻變化值，常會使用惠氏電橋的差電路(Differential)來設計之，即可去除非線性之高次項、並且將原本單一壓阻的變化放大。將如此設計通上外加穩定電壓後，即可將電阻變化 $\Delta R$ 轉換成電壓訊號 $\Delta V$ ，由輸出電壓變化可得知壓力的大小。

### 3.2 分析施力於薄板造成的形變與應力

就上一節所敘，欲設計一壓阻式壓力感測器元件，首先要了解壓力對薄板結構的撓度(Deflection)關係。從材料力學與靜力學推導起，得到薄板撓度與力的關係方程式，加上邊界條件即可得到撓度解，並藉其解推算出力矩與其最大值位置，以便應用於後續的設計中。

當薄板受到力產生之薄板形變量和所施力大小之關係[5]，可從平衡方程式(Equilibrium Equation)推導起：

$$\begin{cases} Q_{yz} = \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} \\ Q_{xz} = \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial Q_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{yz}}{\partial y} = -P_z \quad (3.2)$$

其中  $Q_{yz}$ 、 $Q_{xz}$  為剪力 (Shearing Force)、 $P_z$  為施加於  $z$  軸之外力，將(3.1)式將代入(3.2)得：

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -P_z \quad (3.3)$$

再將(3.3)式代入合力方程式 (Resultants Equation)：

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} z \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \cdot dz \quad (3.4)$$

其中  $t$  為薄板之厚度，如此可得積分式(3.5)：

$$\int_{-t/2}^{t/2} z \left( \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} \right) dz = -P_z \quad (3.5)$$

經由上之推演可得外力  $P_z$  與內應力間之關係式，再由廣義的虎克定律 (Generalized Hooke's Law) 可得應力與應變的關係式，將其代入式(3.5)即可得壓力與之關係。下式(3.6)與(3.7)為虎克定律的兩種表示式 (Compliance and Stiffness Form)：

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

再經假設使其簡化成：

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

此二式稱之為本構方程式(Constitutive Equation)，由此得到一簡單的應力與應變的轉換式。再經由運動學方程式(Kinematics Equation)，將應力—應變關係式代換成應力—撓度的關係式：

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} = -z \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

代入(3.5)式得

$$\rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{Ez}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

由此得到材料內應力與撓度的關係式。將之代回先前(3.5)式可得

$$\int_{-t/2}^{t/2} \frac{Ez^2}{1-\nu^2} \left( \left( \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} - \nu \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2 \partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2 \partial y^2} + \left( \frac{\partial^4 w_0}{\partial y^4} - \nu \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2 \partial y^2} \right) \right) dz = P_z \quad (3.12)$$

$$\rightarrow \int_{-t/2}^{t/2} \frac{Ez^2}{1-\nu^2} dz \left( \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w_0}{\partial y^4} \right) = P_z \quad (3.13)$$

再此定義一個彎曲徑度(Bending Stiffness)參數：

$$D \equiv \int_{-t/2}^{t/2} \frac{E}{1-\nu^2} z^2 dz = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3.14)$$

使方程式(3.13)簡化成(3.15)式：

$$D \cdot \left( \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right) w_0 = P_z \quad (3.15)$$

$$\rightarrow \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \cdot \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) w_0 = \frac{P_z}{D} \quad (3.16)$$

將簡化方程式並將其中  $w_0$  以  $w$  取代、 $p_z$  以  $p$  取代之可得到下標準式：

$$\nabla^2 \nabla^2 w = \frac{P}{D} \quad (3.17)$$

此薄板方程式(Plate Equation)為一四階偏微分方程式，假設在矩形薄板且四邊皆為固定邊的邊界條件下，其解的通式為：

$$w(x, y) = k \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \quad (3.18)$$

其中  $k$ 、 $m$ 、 $n$ 、 $a$ 、 $b$  皆為常係數。除此外，若欲得薄板內之力矩與撓度的關係，將(3.11)式代入(3.5)式可得：

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} z \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \cdot dz = \int_{-t/2}^{t/2} \frac{Ez}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \cdot dz \quad (3.19)$$

$$\rightarrow \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = -D \cdot \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

對於求解圓形薄板之問題，將薄板方程式(3.17)轉換成極座標：

$$\nabla^2 \nabla^2 w = \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) w = \frac{P}{D} \quad (3.21)$$

此偏微分方程代入邊界條件即可求解所有球座標之撓度解。但可以在僅考慮軸對稱的情況下[4]，負載於  $z$  軸方向，(3.18)式可簡化整理成(3.22)式：

$$\nabla^2 \nabla^2 w = \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) w = \frac{2}{r} \frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{P}{D} \quad (3.22)$$

將均勻壓力  $P$  施於圓形薄板之應力，以產生的相應剪力 (Shearing force)  $Q$  取代可得(3.24)：

$$2\pi r \cdot Q = \pi r^2 \cdot P$$

$$\rightarrow P = \frac{2Q}{r} \quad (3.23)$$

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{Q}{D} \quad (3.24)$$

其定義之剪力與壓力關係有隱含負載軸對稱之假設，即距離圓心  $r$  之剪力均相同，其簡化之微分方程式(3.24)適用範圍亦為施力對稱之環境。針對本次實驗之結構如圖 3-2，為標準圓對稱之薄板問題，施力亦為對稱函數，以此整理後之微分方程式，可以簡化求解極座標之薄板撓度之複雜度。

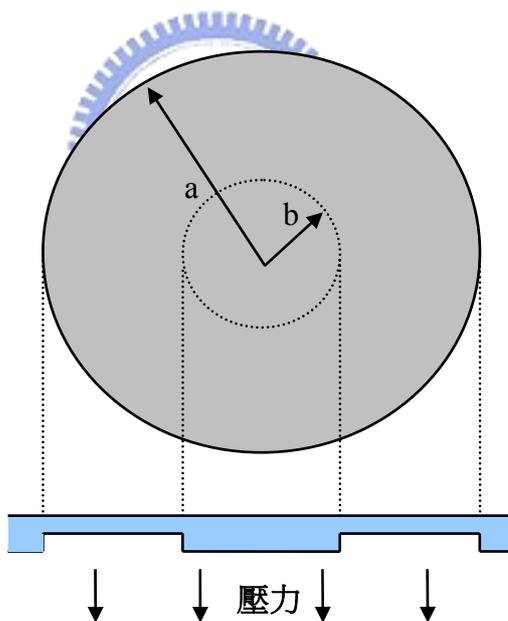


圖 3-2 本實驗所設計之結構示意圖

相同的將(3.20)做座標轉換成極座標後可得：

$$M_r = -D \cdot \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{v}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right] \quad (3.25)$$

$$M_t = -D \cdot \left[ v \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right] \quad (3.26)$$

$$M_{r\theta} = -D \cdot \left[ \frac{1-\nu}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \theta} - \frac{1-\nu}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right] \quad (3.27)$$

其中  $M_r$  為極座標中  $r$  方向之力矩， $M_t$  為垂直  $r$  軸之  $\theta$  方向之力矩  $M_{r\theta}$  為受  $r$ 、 $\theta$  兩方向之剪應力所產生之扭力矩(torque)。在本實驗之薄板結構，其為一對稱結構，即同樣距離中心  $r_a$  之結構面上，其位移量均相同，即是  $\partial w / \partial \theta = 0$ ，將式子(3.25)(3.26)(3.27)簡化可得力矩：

$$\begin{bmatrix} M_r \\ M_t \end{bmatrix} = -D \cdot \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \\ r & r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \\ \frac{\partial w}{\partial r} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

比較(3.20)式及(3.11)式可得知薄板上之力矩與應力關係：

$$\sigma_r = -\frac{6M_r}{t^2} = \frac{6D}{t^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \quad (3.29)$$

$$\sigma_t = -\frac{6M_t}{t^2} = \frac{6D}{t^2} \left( \nu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \quad (3.30)$$

其中  $t$  為薄板厚度，由此兩式可以輕易求薄板上各點應力強度，以利於設計適合的元件。



對於本次實驗中心凸塊結構，本論文以施力方式分成兩種操作模式，如圖 3-3，其(a)圖為量測氣體壓力的情況，壓力  $P$  均勻的施力於整個薄板，此施力方式稱壓力模式(Pressure Method)；(b)圖為量測力強度，其直接施力於中心凸塊之結構，稱之為接觸力模式(Tactile Force Method)，在這將分別探討此兩種施力模式的結構撓度與產生之應力變化。

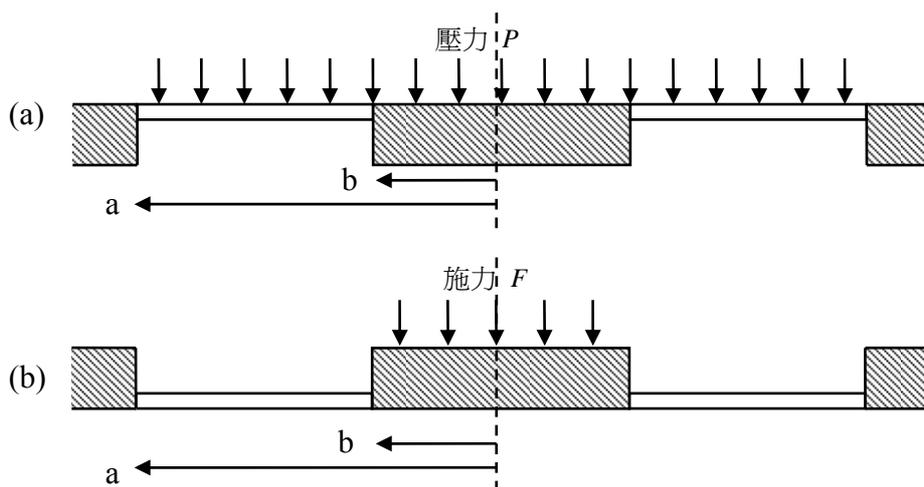


圖 3-3 對中心凸塊結構的兩種施力模式

### 3.2.1 壓力模式

在受均勻力  $p$  之情況下，可得薄板方程式(3.22)求得解為：

$$w(r) = \frac{Pr^4}{64D} + C_1 + C_2 \ln r + C_3 r^2 \quad (3.31)$$

式中  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  為待求之常係數，將(3.31)之解代入本實驗之邊界條件：

1. 距離中心  $a$  之薄板外緣處為一固定端(fixed)其撓度為 0、撓度變化量亦為 0。
2. 距離中心  $b$  之薄板內緣處為一會移動之固定端，其撓度變化量為 0

由此可列出三個邊界條件如下：

$$w(a) = 0, w'(a) = 0, w'(b) = 0$$

可得下式：

$$\begin{cases} \frac{Pa^4}{64D} + C_1 + C_2 \ln a + C_3 a^2 = 0 \\ \frac{Pa^3}{16D} + \frac{C_2}{a} + C_3 a = 0 \\ \frac{Pb^3}{16D} + \frac{C_2}{b} + C_3 b = 0 \end{cases} \quad (3.32)$$

解(3.32)聯立方程式可得解如下：

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \frac{P}{16D} \cdot \left[ a^2(a^2 + b^2) - a^2 b^2 \ln a - \frac{a^4}{4} \right] = \frac{pa^2}{16D} \cdot \left[ \frac{a^2}{4} + b^2 \left( \frac{1}{2} - \ln a \right) \right] \\
 C_2 &= \frac{P}{16D} \cdot \frac{b^2 - a^2}{\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2}} = \frac{pa^2 b^2}{16D} \\
 C_3 &= \frac{P}{16D} \cdot \frac{b^4 - a^4}{a^2 - b^2} = -\frac{p(a^2 + b^2)}{32D}
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

將(3.33)式係數  $C_1$   $C_2$   $C_3$  代入方程式(3.31)，即可得在均勻壓力下之撓度解。

由所得之撓度代入(3.29)(3.30)式即求得在均勻壓力下應力關係式：

$$\begin{aligned}
 \sigma_r(r) &= -\frac{6M_r}{t^2} = \frac{6D}{t^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \\
 &= -\frac{3P}{8t^2} (a^2 b^2 (\nu - 1) r^{-2} - (1 + \nu)(a^2 + b^2) + (3 + \nu)r^2)
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_t(r) &= -\frac{6M_t}{t^2} = \frac{6D}{t^2} \left( \nu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \\
 &= -\frac{3P}{8t^2} (a^2 b^2 (\nu - 1) r^{-2} + (1 + \nu)(a^2 + b^2) - (3 + \nu)r^2)
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

由此將  $r=a$  及  $r=b$  代入(35)與(36)式可得到在壓力模式下，邊緣處之縱向、橫向應力，整理於下表 3-1。

表 3-1 壓力模式下內外徑邊緣的縱向與橫向應力

	縱向應力	橫向應力
Outer edge( $r=a$ )	$-\frac{3(a^2 - b^2)P}{4t^2}$	$-\frac{3(a^2 - b^2)\nu P}{4t^2}$
Inner edge( $r=b$ )	$\frac{3(a^2 - b^2)P}{4t^2}$	$\frac{3(a^2 - b^2)\nu P}{4t^2}$

### 3.2.2 接觸力模式

另一種施力方式如圖 3-3(b)，於中心凸塊上施加力  $F$ 。其對內邊緣  $b$  所產生剪力  $Q$  可由下式算得：

$$F = 2\pi r \cdot Q$$

$$\rightarrow Q = \frac{F}{2\pi r} \quad (3.36)$$

代入圓對稱之薄板方程式(3.24)，可求得其撓度解通式：

$$w(r) = \frac{Fr^2}{8\pi D} \left( \ln \frac{r}{a} - 1 \right) + C_4 \frac{r^2}{4} - C_5 \ln \frac{r}{a} + C_6 \quad (3.37)$$

式中  $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_6$  為待求之常係數。由於求解相同結構之薄板，所以其邊界條件與先前圖 3-3(b)之條件相同：

1. 距離中心 a 之薄板外緣處為固定端(fixed)其撓度為 0、撓度變化量亦為 0。
2. 距離中心 b 之薄板內緣處為可動之固定端，其撓度變化量為 0。

此邊界條件式如下：

$$w(a) = 0, w'(a) = 0, w'(b) = 0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{Fa^2}{4\pi D} \left( \ln \frac{a}{a} - 1 \right) - C_4 \frac{a^2}{4} - C_5 \ln \frac{a}{a} + C_6 = 0 \\ \frac{Fa}{8\pi D} (2 \ln \frac{a}{a} - 1) - C_4 \frac{a}{2} - \frac{C_5}{a} = 0 \\ \frac{Fb}{8\pi D} (2 \ln \frac{b}{a} - 1) - C_4 \frac{b}{2} - \frac{C_5}{b} = 0 \end{cases} \quad (3.38)$$

求解(3.38)可得係數中  $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_6$

$$C_4 = \frac{F}{4(a^2 - b^2)\pi D} \left( 2b^2 \ln \frac{b}{a} - b^2 + a^2 \right)$$

$$C_5 = \frac{Fa^2 b^2}{4(a^2 - b^2)\pi D} \ln \frac{a}{b} \quad (3.39)$$

$$C_6 = \frac{Fa^2}{16(a^2 - b^2)\pi D} \left( 2b^2 \ln \frac{b}{a} + b^2 - a^2 \right)$$

將(3.39)式係數  $C_4$   $C_5$   $C_6$  代入方程式(3.36)如此可得所需之撓度解。將所得之撓度代入(3.28)(3.29)式得到薄板應力  $\sigma_r$   $\sigma_t$  與位置之關係式：

$$\begin{aligned}\sigma_r(r) &= -\frac{6M_r}{t^2} = \frac{6D}{t^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{v}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \\ &= \frac{3F}{2(a^2 - b^2)\pi t^2} \left( b^2 - a^2 - b^2(1+v) \operatorname{Ln}\left(\frac{b}{a}\right) \right. \\ &\quad \left. - a^2 b^2(1+v) \operatorname{Ln}\left(\frac{b}{a}\right) r^{-2} - (a^2 - b^2)(1+v) \operatorname{Ln}\left(\frac{r}{a}\right) \right)\end{aligned}\quad (3.40)$$

$$\begin{aligned}\sigma_t(r) &= -\frac{6M_t}{t^2} = \frac{6D}{t^2} \left( v \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \\ &= \frac{3F}{2(a^2 - b^2)\pi t^2} \left( b^2 v - a^2 v - b^2(1+v) \operatorname{Ln}\left(\frac{b}{a}\right) \right. \\ &\quad \left. + a^2 b^2(1-v) \operatorname{Ln}\left(\frac{b}{a}\right) r^{-2} - (a^2 - b^2)(1+v) \operatorname{Ln}\left(\frac{r}{a}\right) \right)\end{aligned}\quad (3.41)$$

由此可得到邊緣處之縱向、橫向應力分別計算得表 3-2

表 3-2 接觸力模式下內外徑邊緣的縱向與橫向應力

位置	縱向應力	橫向應力
外緣處(r=a)	$-\frac{3F(a^2 - b^2 + 2a^2 \ln(\frac{b}{a}))}{2(a^2 - b^2)\pi t^2}$	$-\frac{3Fv(a^2 - b^2 + 2b^2 \ln(\frac{b}{a}))}{2(a^2 - b^2)\pi t^2}$
內緣處(r=b)	$-\frac{3F(a^2 - b^2 + 2b^2 \ln(\frac{b}{a}))}{2(a^2 - b^2)\pi t^2}$	$-\frac{3Fv(a^2 - b^2 + 2a^2 \ln(\frac{b}{a}))}{2(a^2 - b^2)\pi t^2}$

### 3.3 壓阻特性與原理

材料因其電阻特性受壓應力而改變稱之為壓阻材料，又稱之為應變規，在本節中將對於壓阻式壓力感測器中的壓阻材料做分析，探討其原理和特性，以找出適合的材料與形狀大小，得到最好的感測效率。

從基本形變的角度來看，在一個塊狀的壓阻材料的兩側，施以一大一小相等、方向相反的外力 F，如圖 3-4，將會使此壓阻產生形變，進而造成電阻 R 的改變。

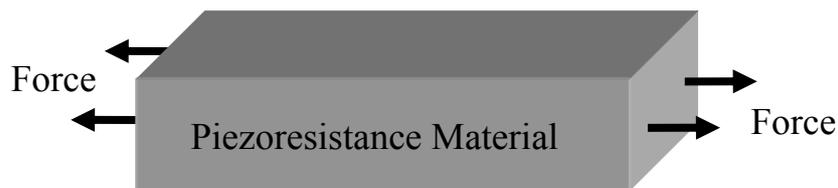


圖 3-4 壓阻受外力示意圖

受力前之電阻值為：

$$R = \rho \frac{L}{ab} \quad (3.42)$$

式(3.42)中  $\rho$  為電阻係數(Resistivity)、 $L$  為其壓力阻之長度、 $a$  與  $b$  分別代表壓阻截面積的高度與寬。當受到外力擠壓後，尺寸由材料力學應變的知識得知，其尺寸會形變成

$$\begin{aligned} L &\rightarrow L \times (1 + \varepsilon) \\ a &\rightarrow a \times (1 - \nu\varepsilon) \\ b &\rightarrow b \times (1 - \nu\varepsilon) \end{aligned} \quad (3.43)$$

式(3.43)的  $\varepsilon$  定義為  $L$  方向之應變，及單位長度受應力導致的變化量，即

$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ 。 $\nu$  為蒲松比(Poisson's ratio)，為當物體因受力導致縱向變化時，伴

隨引起其橫向的應變的改變比值，其與材料特性有關如圖 3-5 單晶矽各晶格方向的楊氏模數圖 3-6 單晶矽各晶格方向的蒲松比。

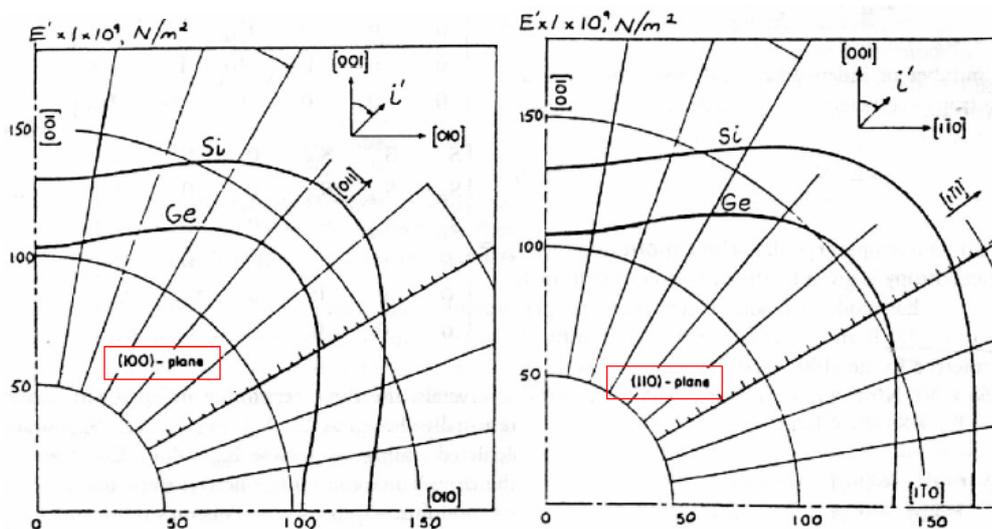


圖 3-5 單晶矽各晶格方向之楊氏模數(Young's Modulus)[3]

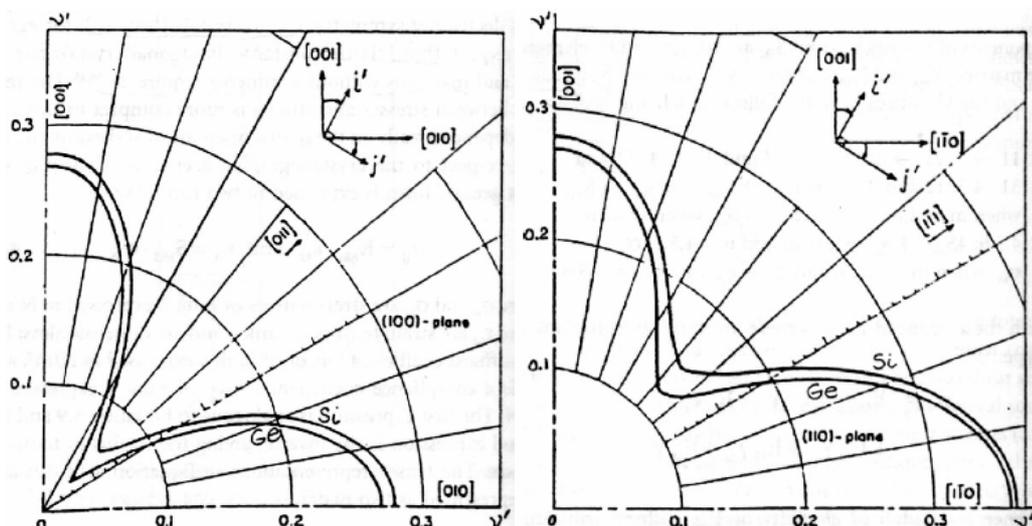


圖 3-6 單晶矽各晶格方向之蒲松比(Poisson's Ratio)[3]

其因受力形變導致的新電阻值為

$$\begin{aligned}
 R_{new} &= \rho \frac{L(1+\varepsilon)}{ab(1-\varepsilon\nu)^2} \\
 &= R \frac{1+\varepsilon}{(1-\varepsilon\nu)^2} \cong R \times (1+\varepsilon)(1-2\varepsilon\nu) \cong R \times [1+(1+2\nu)\varepsilon] \\
 &= R + \Delta R.
 \end{aligned} \tag{3.44}$$

其中

$$\begin{aligned}
 \Delta R &= (1+2\nu) \cdot \varepsilon \cdot R \\
 \rightarrow \frac{\Delta R}{R} &= (1+2\nu) \cdot \varepsilon = G_D \cdot \varepsilon
 \end{aligned} \tag{3.45}$$

在此我定義一參數  $G_D$ ，此為應變規因形狀受力改變而產生的壓阻改變因數 (Gauge Factor of Deformation)，其與材料之蒲松比值成正比。之前的假設，單考慮形變對阻值所造成的影響，而並未考慮材料本身電阻係數  $\rho$  受到此力所產生的變化，而就。從電阻的基本定義：

$$\begin{aligned}
 R &= \rho \frac{L}{A} \\
 \rightarrow dR &= \frac{\rho}{A} dL - \frac{\rho L}{A^2} dA + \frac{L}{A} d\rho \\
 \rightarrow \frac{dR}{R} &= \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho}
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

其中前兩項( $dL/L - dA/A$ )尺寸所造成的電阻變化已經分析過了，等於  $(1+2\nu)\varepsilon$ ，因此得：

$$\begin{aligned} \frac{dR}{R} &= (1+2\nu)\varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} \\ &= \left[ (1+2\nu) + \frac{d\rho}{\rho} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \right] \cdot \varepsilon \end{aligned} \quad (3.47)$$

及其壓阻因數 G 修正為

$$G = (1+2\nu) + \frac{d\rho}{\rho} \frac{1}{\varepsilon} \quad (3.48)$$

對於金屬而言，壓力造成之電阻係數  $\rho$  之變化極小可以忽略不計，但對於晶體結構的半導體如矽，其電阻係數的變化受壓所產生的變化值  $d\rho/\rho$  遠大於前項，其中前項矽的蒲松比(Poisson Ratio)由圖 3-6 得之，約 0.01~0.3 之間微乎其微。各材料之 G 值可參考表 3-3 如下，由表可知半導體與一般材料比較起來，擁有極高的壓阻因數 G，非常適合拿來做壓力元件的壓阻材料。

表 3-3 各種材料之壓阻因子[1]

Type of Strain Gauge	Gauge Factor (G)
Metal Foil	1 to 5
Thin-Film Metal	≈ 2
Single crystal Si	≈ 90
Poly-crystalline Si	≈ 30

因此針對矽半導體材料的壓阻特性做探討。單晶矽是屬於規則的晶體結構，也因如此，其電阻係數的變化也會因為其施加的力方向不同而有所不同，此稱為各向異性(anisotropic)，也因此針對各個晶格方向作分析。從歐姆定律：

$$E = \rho \cdot J \rightarrow \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 & \rho_6 & \rho_5 \\ \rho_6 & \rho_2 & \rho_4 \\ \rho_5 & \rho_4 & \rho_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

$E$  為電場 (electric field vector),  $J$  為電流密度 (current density), 而  $\rho$  為一  $3 \times 3$  的對稱矩陣, 表示施以不同電場方向, 所得各方向的電阻係數。而當受到外力時使得  $\rho$  改變, 在一般情況下, 可將  $\rho$  定義成:

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \\ \rho_5 \\ \rho_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho \\ \rho \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \Delta\rho_3 \\ \Delta\rho_4 \\ \Delta\rho_5 \\ \Delta\rho_6 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

如此可以將每一個應力效應所對應一組電阻係數的改變率  $\Delta\rho_i / \rho$ 。

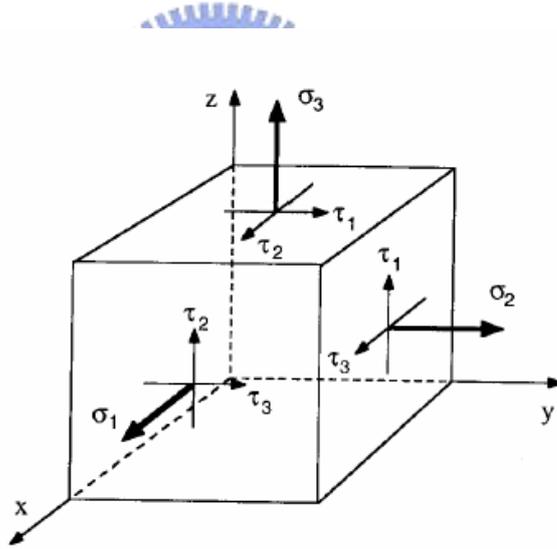


圖 3-7 施於各方向力之示意圖

$$\frac{1}{\rho} \begin{bmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \Delta\rho_3 \\ \Delta\rho_4 \\ \Delta\rho_5 \\ \Delta\rho_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

其中  $\sigma_i$  為正向力(Normal stress)， $\tau_i$  為切方向之剪應力(shearing stress)，對應之矩陣  $\pi$  稱為壓阻常數 (piezoresistance coefficients)。由於矽半導體晶格結構分析的方向，假設兩相互垂直的座標  $(l_1, m_1, n_1)$ 、 $(l_2, m_2, n_2)$  兩施力方向做分析，將上矩陣式作座標轉換簡化可得：

$$\frac{\Delta R}{R} = \sigma_l \pi_l + \sigma_t \pi_t \quad (3.52)$$

其中  $\sigma_l$  為縱方向所施加之應力，而  $\pi_l$  為縱向壓阻係數 (longitudinal piezoresistance coefficient)； $\sigma_t$  為橫方向所施加之應力， $\pi_t$  為橫向壓阻係數 (transverse piezoresistance coefficient)：

$$\pi_l = \pi_{11} + 2(\pi_{44} + \pi_{22} - \pi_{11})(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2) \quad (3.53)$$

$$\pi_t = \pi_{12} + 2(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 n_2^2 + n_1^2 n_2^2) \quad (3.54)$$

當縱向與橫向之應力施加於不同晶格方下時，會產生不同的  $\pi_l$ 、 $\pi_t$ ，如表 3-4 所示：

表 3-4 各方向所得的  $\pi_l$ 、 $\pi_t$  值

Longitudinal Direction	$\pi_l$	Transverse Direction	$\pi_t$
(100)	$\pi_{11}$	(010)	$\pi_{12}$
(001)	$\pi_{11}$	(110)	$\pi_{12}$
(111)	$(\pi_{11} + 2\pi_{22} + 2\pi_{44})/3$	(110)	$(\pi_{11} + 2\pi_{12} - \pi_{44})/3$
(110)	$(\pi_{11} + \pi_{22} + \pi_{44})/2$	(111)	$(\pi_{11} + 2\pi_{12} - \pi_{44})/3$
(110)	$(\pi_{11} + \pi_{22} + \pi_{44})/2$	(001)	$\pi_{12}$
(110)	$(\pi_{11} + \pi_{22} + \pi_{44})/2$	(110)	$(\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})/2$

針對(100)的 wafer，當其縱向與側向應力都在(110)方向的情況，由上表 3-4 中可得  $\pi_l = (\pi_{11} + \pi_{22} + \pi_{44})/2$ ，而  $\pi_t = (\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})/2$ ，而由下表 3-5 可知，針對 p-type 之 Si wafer，通常  $\pi_{11}, \pi_{12} \ll \pi_{44}$ ，將其簡化可得

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \frac{\pi_{11} + \pi_{22} + \pi_{44}}{2} \sigma_l + \frac{\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44}}{2} \sigma_t \\ &\approx \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_l - \sigma_t) \end{aligned} \quad (3.55)$$

而對於 n-type 之 Si wafer 正好相反，其通常  $\pi_{11}, \pi_{12} \gg \pi_{44}$ ，其簡化可得

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \frac{\pi_{11} + \pi_{22} + \pi_{44}}{2} \sigma_l + \frac{\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44}}{2} \sigma_t \\ &\approx \frac{\pi_{11} + \pi_{12}}{2} (\sigma_l + \sigma_t) \end{aligned} \quad (3.56)$$

表 3-5 在室溫下之電阻與壓阻係數比較

material	$\rho$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$\pi_{11}$ ( $10^{-11} \text{Pa}^{-1}$ )	$\pi_{12}$ ( $10^{-11} \text{Pa}^{-1}$ )	$\pi_{44}$ ( $10^{-11} \text{Pa}^{-1}$ )
p-Si	7.8	+6.6	-1.1	+138.1
n-Si	11.7	-102.2	+53.4	-13.6
p-Ge	15	-10	+3.2	+96.7
n-Ge	9.9	-4.7	-3.9	-136.8

而當應力方向皆於(100)方向，其  $\pi_l = \pi_{11}$ 、 $\pi_t = \pi_{12}$ ，其不論 n-type 或 p-type，皆可簡化成：

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_{11} \sigma_l + \pi_{12} \sigma_t \quad (3.57)$$

假設在 p-type、(100)之 Si wafer 上作壓阻測試，可得圖 3-8 之結果[3]，由圖 3-8 可知針對 P 型(100)矽上，在(110)方向會有最大的縱向壓阻係數  $\pi_l$ 。

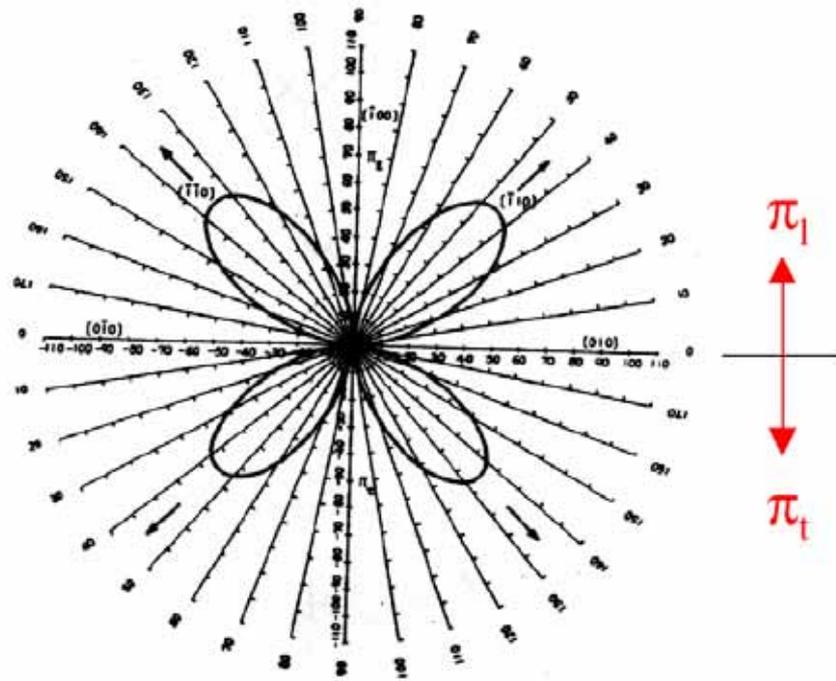


圖 3-8 P 型(100)矽之縱向與橫向壓阻係數[3]

而對於 n-type、(100)之 Si wafer，所量測到之壓阻係數如圖 3-9。由圖中可得知，其正向之壓阻出現於(100)方向，並且有比 n-type 更大的壓阻值，因此我選擇 p-type 的 Si，作為本次實驗的壓阻材料。

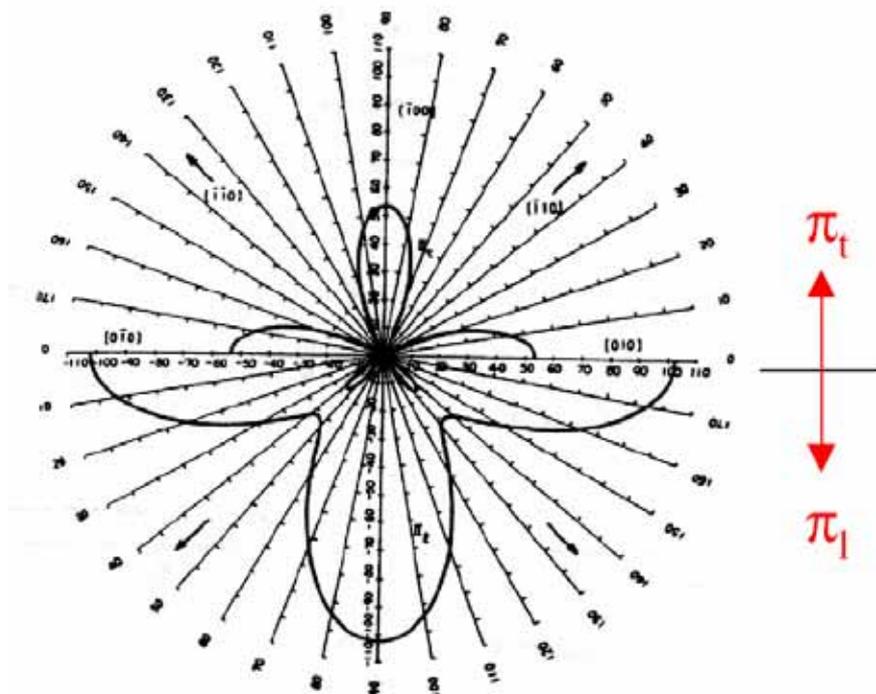


圖 3-9 N 型(100)矽之縱向與橫向壓阻係數[3]

### 3.4 惠氏電橋線性化

惠氏電橋(Wheatstone Bridge)是壓力元件常用的設計結構，可以有效的將元件非線性的高次項消去，亦可經設計將原本輸出的結果放大，其如圖 3-10。其中  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  為元件中的四個應變規，而  $\Delta R_a$ 、 $\Delta R_b$  為受一壓應力產生之電阻變化，各壓阻受壓增加與減少可由擺設於結構位置不同、受到正反向力不同而得。

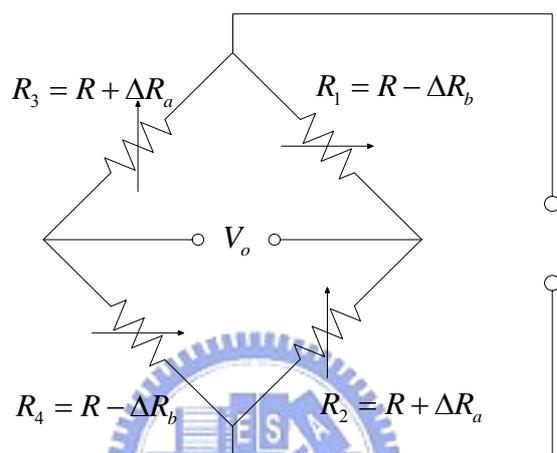


圖 3-10 惠氏電橋之圖意

就壓力元件驅動方式可分兩大類：定電壓源方式驅動與定電流驅動，此對兩種驅動對溫度的靈敏度略有不同，在下一章節將分別介紹其溫度效應。若在定電壓源  $V_B$  驅動情況下，其輸出電壓  $V_o$  可由簡單的電路學得到下 (3.57)(3.59) 式結果：

$$\begin{aligned}
 V_o &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_B - \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_B \\
 &= \frac{R + \Delta R_a}{2R + \Delta R_a - \Delta R_b} V_B - \frac{R + \Delta R_b}{2R + \Delta R_a + \Delta R_b} V_B \\
 &= \frac{\Delta R_a - \Delta R_b}{2R + (\Delta R_a + \Delta R_b)} V_B
 \end{aligned} \tag{3.58}$$

其中假設  $2R \gg \Delta R_a + \Delta R_b$ ，將分母  $\Delta R_a + \Delta R_b$  忽略，並定義等效壓阻變化(3.59)式：

$$\Delta R_{effect} = (\Delta R_a - \Delta R_b) / 2 \tag{3.59}$$

可將(3.58)式簡化得下式：

$$V_o \approx \frac{\Delta R_a - \Delta R_b}{2R} V_B = \frac{\Delta R_{effect}}{R} V_B$$

$$\rightarrow \frac{V_o}{V_B} = \frac{\Delta R_{effect}}{R} \quad (3.60)$$

### 3.5 靈敏度分析

微力感測元件最重要的特性，就是對力強度的靈敏度，其基本定義如下式(3.59)：

$$V_o = S \times P \times V_B \rightarrow S = \frac{V_o}{V_B} \frac{1}{P} \quad (3.61)$$

式中的 S 代表感應器靈敏度(Sensitivity)， $V_o$  表輸出電壓， $V_B$  為驅動電壓，而 P 表示欲感測之力強度。而就前章節已得知，在惠氏電橋的架構下，輸出訊號與阻值變化的關係如(3.58)式得到之結果：

$$\frac{V_o}{V_B} \approx \frac{\Delta R_{effect}}{R} = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta R_a}{R} - \frac{\Delta R_b}{R} \right) \quad (3.62)$$

而就前(3.55)式描述，對於 n-type 矽的壓阻特性  $\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_r - \sigma_i)$  代入得到下式：

$$\frac{V_o}{V_B} = \frac{\pi_{44}}{4} [(\sigma_r(b) - \sigma_i(b)) - (\sigma_r(a) - \sigma_i(a))] \quad (3.63)$$

將之代回(3.59)式，可得到本壓力元件的靈敏度通式：

$$S = \frac{V_o}{V_B} \frac{1}{P} = \frac{\Delta R_{effect}}{R} \frac{1}{P} = \frac{\pi_{44}}{4} [(\sigma_r(b) - \sigma_i(b)) - (\sigma_r(a) - \sigma_i(a))] \frac{1}{P} \quad (3.64)$$

若在壓力模式下，將表 3-1 邊界應力關係代入(3.62)式，即可得到壓力模式下元件靈敏度關係式：

$$S = \frac{\pi_{44}}{4} [(\sigma_r(b) - \sigma_i(b)) - (\sigma_r(a) - \sigma_i(a))] \frac{1}{P}$$

$$= \pi_{44} \frac{3(a^2 - b^2)(1 - \nu)}{8t^2} \quad (3.65)$$

若在接觸力模式下，將表 3-2 邊界應力關係代入(3.62)式，即可得到接觸力模式下元件靈敏度關係式：

$$S = \frac{\pi_{44}}{4} [(\sigma_r(b) - \sigma_t(b)) - (\sigma_r(a) - \sigma_t(a))] \frac{1}{F}$$

$$= \pi_{44} \frac{3(1-\nu) \ln(\frac{b}{a})}{4\pi t^2} \quad (3.66)$$

### 3.6 溫度效應與分析

半導體材料做壓阻不同於其他材料，除了擁有極高壓阻因子外，另一更大的特點就是半導體材料具有敏銳的溫度特性，溫度效應對半導體材料而言是個不可忽略的參數。就本論文設計的矽壓阻式壓力感測器由四個同值電阻組成惠氏電橋，雖說理論上輸出電壓和輸入壓力應成正比，但實際情況下亦會受溫度改變而影響其阻值輸出結果。針對壓力感測器再溫度變化係數之定義可分三類：

- (1) 靈敏度溫度係數 (TCS)
- (2) 零點偏移溫度係數 (TCO)
- (3) 電阻溫度係數 (TCR)

就零點偏移(TCO)而言，產生的主因是在未受力時，電橋各壓阻值或摻雜不相同，在未受壓力不同溫度的情況下，因各壓阻溫度特性不相同導致輸出偏移，定義如式(3.66)，式中  $V_{o,zero}$  表示在未施外力的情況下輸出電壓訊，此係數須從製程改進而抑制。TCS 為元件受不同壓下輸出訊號的變化大小，即靈敏度，受溫度影響的程度，定義如方程式(3.67)，S 在上節已分析，其代表感應器靈敏度(Sensitivity)；而 TCR 為應變規在固定壓力下阻值受溫度影響的程度，定義如方程式(3.68)，R 表應變規之基本阻值。TCS 與 TCR 係數受應變規之材料特性牽制，此兩項不如 TCO 般可由製程改進，所以 TCS 與 TCR 關係壓力感測器設計的優劣，本節將研究其對元件的影響程

度及其補償方法。

$$TCO = \frac{1}{V_{o,zero}} \frac{\partial V_{o,zero}}{\partial T} = \frac{V'_{o,zero}}{V_{o,zero}} \quad (3.67)$$

$$TCS = \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial T} = \frac{S'}{S} \quad (3.68)$$

$$TCR = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} = \frac{R'}{R} \quad (3.69)$$

從(3.67)式出發推導 S 之通式，根據惠氏電橋(3.60)式、及作用於 P-type 矽(110)面上壓阻阻值之受力方程(3.55)式，可以得到靈敏度與壓應力及壓阻係數的關係(3.69)式，再代入 TCS 基本定義(3.67)式，即可得到 TCS 與壓阻係數的關係(3.70)式。

$$S = \frac{V_o}{V_B} \frac{1}{P} = \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\Delta P} \approx \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_l - \sigma_t) \cdot \frac{1}{\Delta P} \quad (3.70)$$

$$TCS = \frac{S'}{S} = \frac{1}{\pi_{44}} \frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} + \frac{1}{\sigma_l - \sigma_t} \frac{\partial (\sigma_l - \sigma_t)}{\partial T} \quad (3.71)$$

若以定電壓源驅動的情況下，從(3.60)式起頭，其中溫度  $V_o$ 、 $S$  為溫度相關函數，將(3.60)式對溫度微分最後可得到式(3.71)，由(3.71)式可清楚得到，在電壓驅動源的情況下，溫度對輸出訊號的變化直接受到溫度靈敏係數(TCS)所影響。因此若以電壓驅動源，將材料選擇低 TCS 將會大大降低其溫度效應。

$$\begin{aligned} V_o &= S \times P \times V_B \\ \rightarrow V'_o &= S' \times P \times V_B \\ \rightarrow \frac{V'_o}{V_o} &= \frac{S'}{S} = TCS \end{aligned} \quad (3.72)$$

若以定電流源驅動的情況下探討溫度效應，其等效的驅動電壓可寫成

$V_B = I_B R$ ，代換後得到(3.72)式，其中溫度  $V_o$ 、 $S$ 、 $R$  為溫度相關函數，將(3.72)式對溫度微分可得到 (3.73)式，此為溫度對輸出訊號的變化。得到結論當以電流為驅動源時，輸出電壓訊號受到靈敏度溫度係數(TCS)與電阻溫度係數(TCR)所影響，即  $TCS+TCR$ 。

$$V_o = S \times P \times (I_B R) \quad (3.73)$$

$$V_o' = S' P I_B R + S P I_B R'$$

$$\frac{V_o'}{V_o} = \frac{S'}{S} + \frac{R'}{R} = TCS + TCR \quad (3.74)$$

就 TCR 而言如同(3.60)式描述，其物理意義為未施壓之應變規之溫度係數，換言之 TCR 的大小直接受到材料摻雜影響，如圖 3-11 所示，由圖可看出對於在常溫下，由  $10^{14}$  到  $10^{16}$  其 TCR 值由負數漸變成正值，而零點位置約在摻雜濃度  $6.2 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^2$ ，之後變為正值。

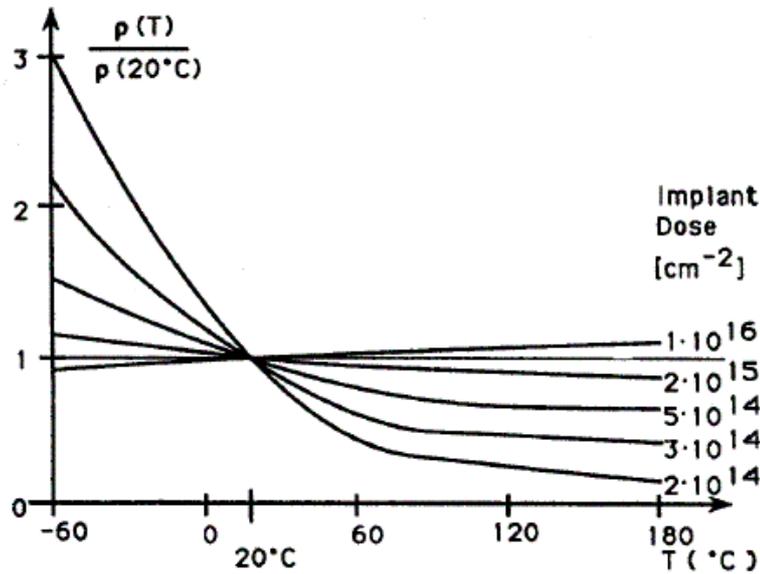


圖 3-11 摻雜濃度與壓阻溫度效應之關係[13]

將 TCR 與 TCS 對摻雜濃度作圖，可得下圖 3-11，圖中單位，左邊為  $\pi_{44} \times 10^{12} \text{ cm}^2 / \text{dyne}$ ，右邊分別為 TCR 與 TCS 每  $55^\circ\text{C}$  為一百分單位，即  $\%/55^\circ\text{C}$ 。圖中可知，TCS 為正值摻雜濃度，TCS 值越低；TCR 值在摻雜濃

度  $10^{17} \sim 10^{20}$  atoms/cm<sup>3</sup> 間呈現下拋線，約在  $3 \times 10^{17}$  與  $5 \times 10^{19}$  atoms/cm<sup>3</sup> 時 TCS 與 TCR 相交；由圖中亦可得  $\pi_{44}$  隨摻雜增加而線性下降，由(3.64)式可知，TCS 為  $\pi_{44}$  之強烈函數正比於  $\pi_{44}$  之斜率，摻雜濃度增加使得  $\pi_{44}$ 、壓阻特性下降的同時 TCS 溫度靈敏係數也隨之下降。

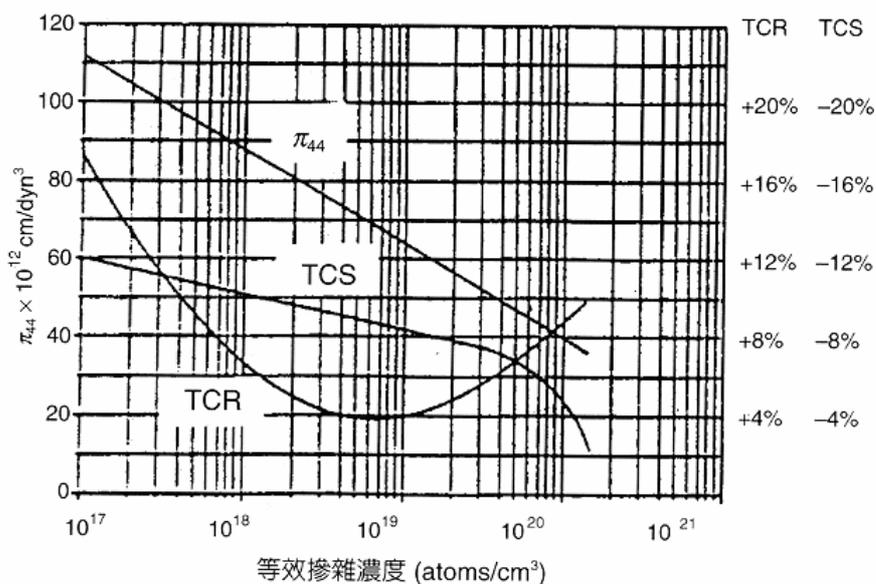


圖 3-12 壓阻特性與 Boron 摻雜濃度關係[13]

由以上可得幾個結論：

1. 愈使用電壓源與調整摻雜濃度，必須有極高的濃度使 TCS 趨近 0，但相對壓阻係數下降，並不適用。
2. 使用電流源可選擇兩 TCS+TCR 值為零之點，相互抵消的結果可使輸出溫度相互補償。

因此本論文選擇濃度  $3 \times 10^{17}$  atoms/cm<sup>3</sup> 作壓阻摻雜，比較其在電流驅動源與電壓驅動源的溫度效應與靈敏度。而摻雜後之後  $\pi_{44}$  可由圖 3-12 約為  $100 \times 10^{-12}$  cm<sup>2</sup>/dyn 換成 SI 標準單位得  $1 \times 10^{-9}$  Pa<sup>-1</sup>，而 TCS、TCR 約為  $\pm 11\%/55^\circ C$ ，換算後得  $\pm 0.2\%/^\circ C$ 。

## 第四章 矽壓阻式壓力感測器之設計

矽壓力感測器和一般傳統感測器之設計考量類似，設計一個壓力元件不外乎考慮感測元件的線性度、量測範圍、感測的靈敏度及其溫度等環境效應。依前章所描述，矽壓阻式壓力感測器基本原理是利用薄板受壓產生形變，其形變對壓阻產生應力而導致壓阻阻值的改變，而薄板的形變對壓力撓度之線性度，直接影響此感測器的好壞，因此我們設計重點分做兩部份：(1)先決定薄板的中心凸塊內外徑的比例、厚度、結構及壓阻放置的位置，使之能對壓阻產生線性的應力與有效的力轉換 (2)設計壓阻的形狀及摻雜濃度，由形狀的設計來得到最佳的壓力靈敏值，使壓阻材料能能得到最有效的力轉換，摻雜改變壓阻材料特性，降低壓阻的溫度對感測器之影響。

因此在本章節中，首先在第一節中將分析薄板結構、中心凸塊的大小在不同施力模式(接觸力模式與壓力模式)下結構撓度、各方向的應力關係，並探討優缺點及決定內外徑比例；第二節將設計壓阻的大小與形狀、並分析可能得到的壓阻阻值；在第三節將推算所設計矽型壓阻式壓力感測器在不同施力模式下所得到的靈敏度。

### 4.1 矽壓力感測器之結構設計與模擬

矽壓阻微力感測器所使用之結構不外乎使用懸樑與薄板作為力轉換結構，其利用該結構將壓力(Pressure Method)或外接力(Tactile Force Method)之物理量轉換成形變撓度，再將載於結構上的應變規施以線性強度之正向力，以增加其靈敏度與線性度。由前章結構力學分析結果代進本節，經由模擬與理論分析，選擇適當結構。

在本節將以兩種施力模式，分別將所設計的結構之應力分布與撓度，由應力分布圖來決定壓阻擺設位置。

#### 4.1.1 接觸力模式

在此將壓力結構設定在半徑  $1.476\text{mm}$  的大小、結構板厚度  $50\mu\text{m}$ ，設計不同內外徑比：內外徑比為 1:2、1:4、3:4 及無中心凸塊四種結構做比較，假定施以接觸力 1 公斤力於中心凸塊上，並做有限元素分析及代之理論分析，從中決定適當的內外徑比作為力導引結構。圖 4-1 為內徑 1:2 之結構圖，內徑為  $0.738\mu\text{m}$ ，已知矽材料的楊氏模數(Young's Modulus)約為  $130\text{GPa}$ ，蒲松比  $\nu$ (Poisson's ratio)約為 0.28 將之代入有限元素 ANSYS 模擬，可得結果如圖 4-2。



圖 4-1 撓度模擬之模型，此內徑與外徑為 1:2

模擬結果圖 4-2(a)為模擬呈現結構形變，可以明顯看出模擬結果為標準圓對稱，最大撓度在中心凸塊位置約為  $4.08\mu\text{m}$ ；圖 4-2(b)為由中心到外緣的表面剖面撓度曲線圖，由線型曲率可以約略估計在  $1.4\mu\text{m}$  表面有最大拉應力，而約在  $0.7\mu\text{m}$  表面有最大壓應力；圖 4-2(c)為表面產生之應力強度的剖面曲線，由曲線可看出薄板表面應力在邊緣處可得最大正反向應力，分別為  $123.42\text{MPa}$  及  $-91.0254\text{MPa}$ ，此模擬結果與第三章推導近似。

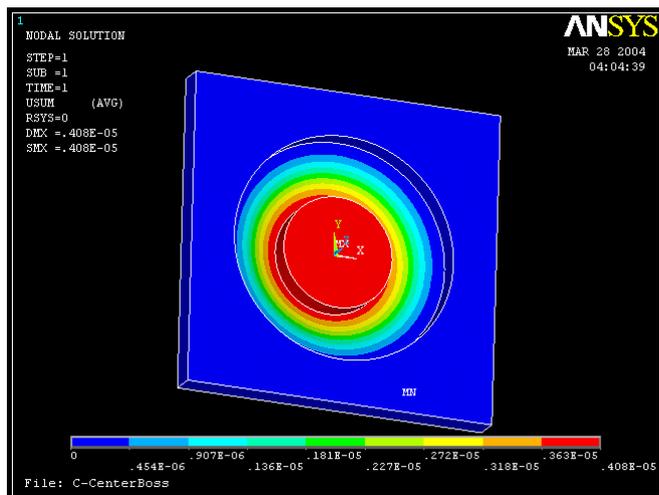


圖 4-2(a) 以通用有限元素模擬軟體 Ansys 模擬內外徑比為 1:2 之結果

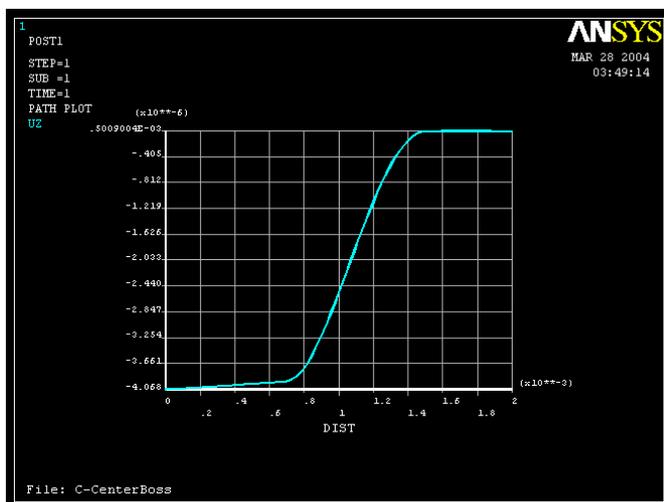


圖 4-2(b) 模擬內外徑比為 1:2 之撓度曲線圖

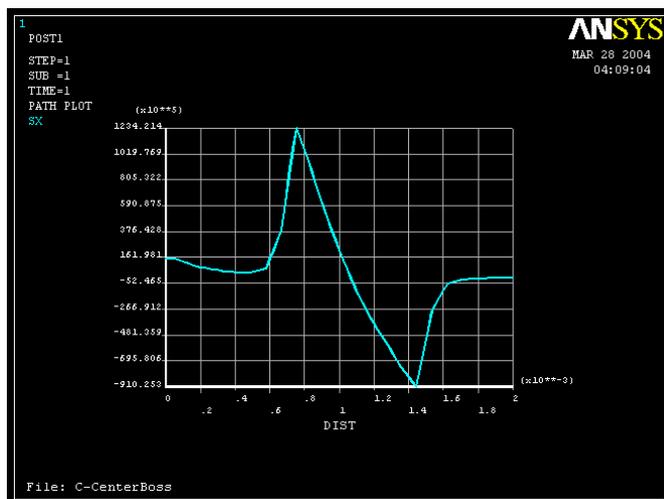


圖 4-2(c) 模擬內外徑比為 1:2 之應力強度曲線圖

第二種模擬結構為內外徑比 1:4，如圖 4-3，此中心凸塊設計較小，考量當中心凸塊改小後的撓度與應力分布，當將一公斤力施於中心凸塊並代入楊氏模數及蒲松比，可得到圖 4-4 之結果。

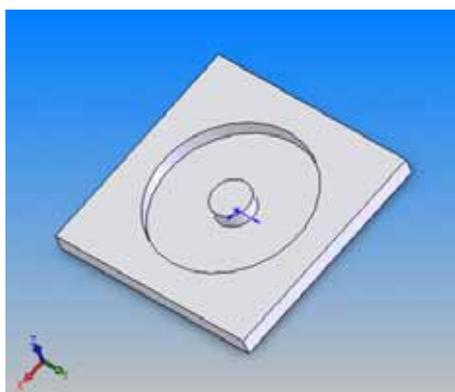


圖 4-3 撓度模擬之模型，此內徑與外徑為 1:4

由圖 4-4(a)為施力後模擬呈現結構形變，可以明顯看出最大撓度約為  $14.3\mu\text{m}$ ，約為內外徑比 1:2 之 3 倍，圖 4-4(b)為由中心到外緣的表面剖面撓度曲線圖，由線型曲率可以約略估計在  $1.4\mu\text{m}$  表面有最大拉應力，而約在  $0.4\mu\text{m}$  表面有最大壓應力，圖 4-4(c)為表面產生之應力強度剖面曲線，亦可由曲線可看出薄板表面應力在邊緣處可得最大正反向應力，分別為  $282.7990\text{MPa}$  及  $-144.9542\text{MPa}$ 。

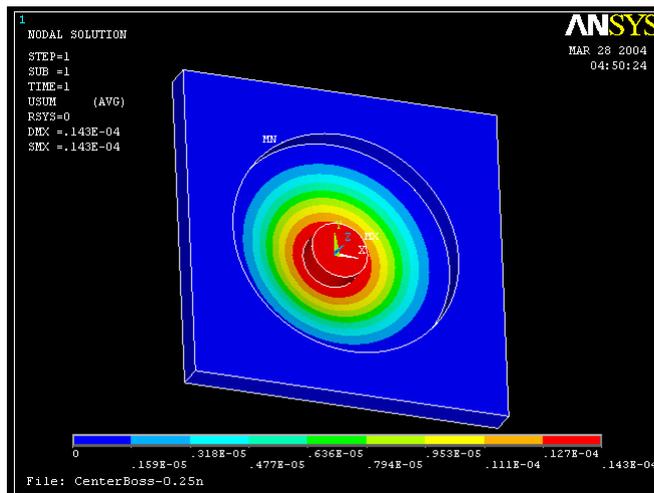


圖 4-4(a) 內外徑比 1:4 施以 1 公斤力之 Ansys 模擬結果

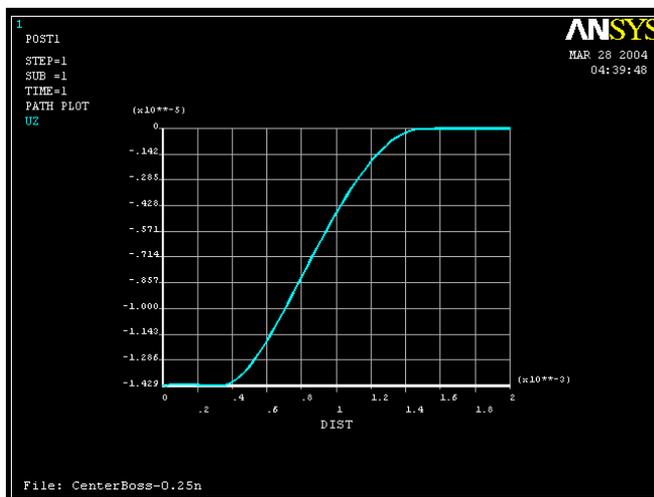


圖 4-4(b) Ansys 模擬內外徑比 1:4 之撓度曲線圖

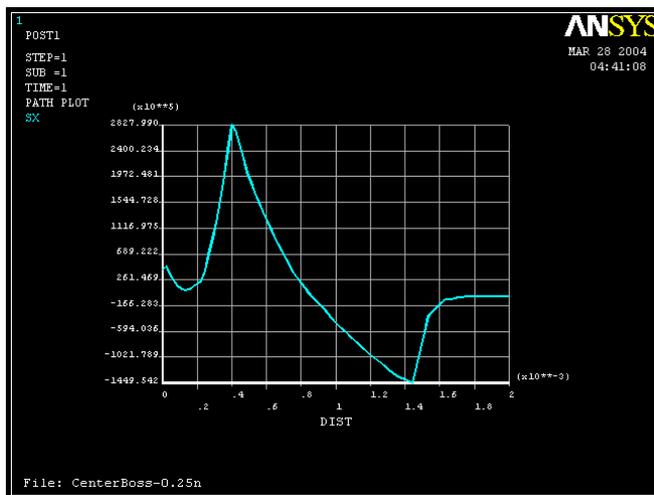


圖 4-4(c) Ansys 模擬內外徑比 1:4 之應力強度曲線圖

跟內外徑 1:2 的結構比較可發現，當使用 1:4 的結構時，得到的撓度將會比 1:2 大許多，且產生的應力效果也較大，不過從模擬結果也發現內外徑邊緣的應力差比例也越來越高，如此應力集中將導致結構承受壓力極限降低，而縮小量測範圍。

第三種模擬結構為內外徑比 3:4，如圖 4-5，將一公斤力施於中心凸塊並代入楊氏模數及蒲松比，得到結果如圖 4-6。

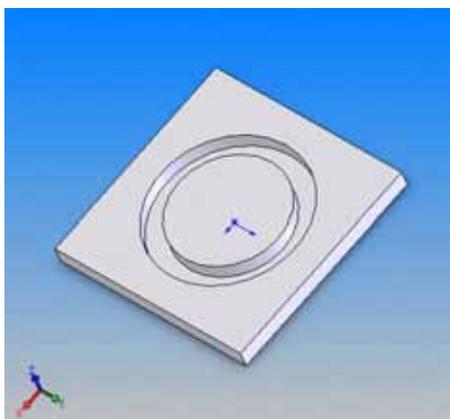


圖 4-5 撓度模擬之模型，此內徑與外徑為 3:4

由圖 4-6(a)為內外徑比 3:4 施力後模擬呈現結構形變，可以明顯看出最大撓度約為  $0.683\mu m$ ，約為內外徑比 1:2 之  $1/8$  倍，圖 4-6(b)為由中心到外緣的表面剖面撓度曲線圖，由線型曲率可以約略估計在  $1.4\mu m$  表面有最大拉應力，而約在  $1.1\mu m$  表面有最大壓應力，圖 4-6(c)為表面產生之應力強度剖面曲線，亦可由曲線可看出薄板表面應力在邊緣處可得最大正反向應力，分別為  $30.52031 MPa$  及  $-41.21070 MPa$ 。

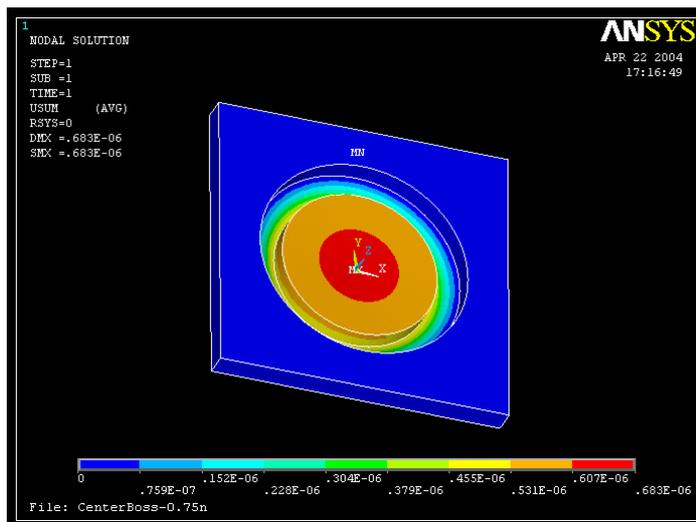


圖 4-7(a) 內外徑比 3:4 施以 1 公斤力之 Ansys 模擬結果

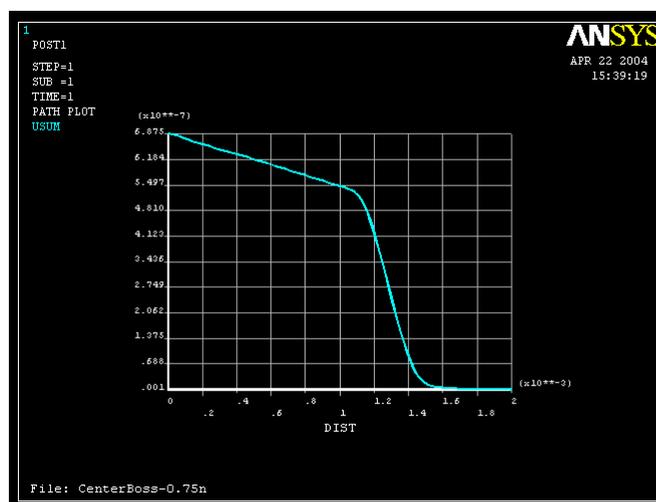


圖 4-7(b) Ansys 模擬內外徑比 3:4 之撓度曲線圖

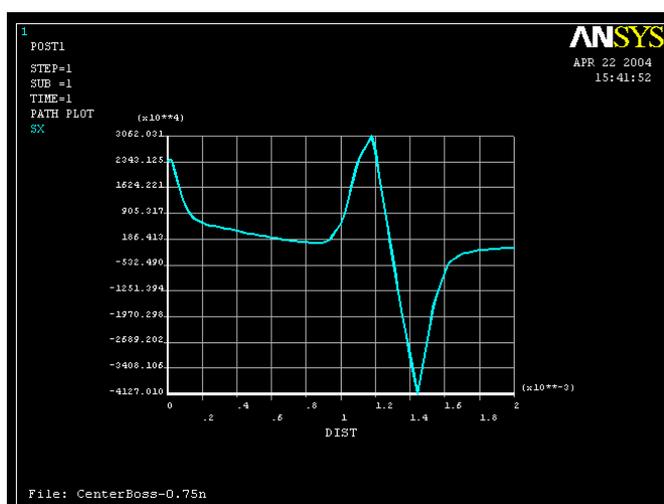


圖 4-7(c) Ansys 模擬內外徑比 3:4 應力強度曲線圖

由圖 4-6 結果看出，由於其中心凸塊面積較大，施力於凸塊上亦對凸塊產生不可忽略的撓度形變與應力影響，大大降低了薄板的形變量與表面應力。

第四種模擬無中心凸塊結構之應力與撓度分佈情形，其結構如圖 4-8，將一公斤力施於中心凸塊並代入楊氏模數及蒲松比，得到結果如圖 4-9。

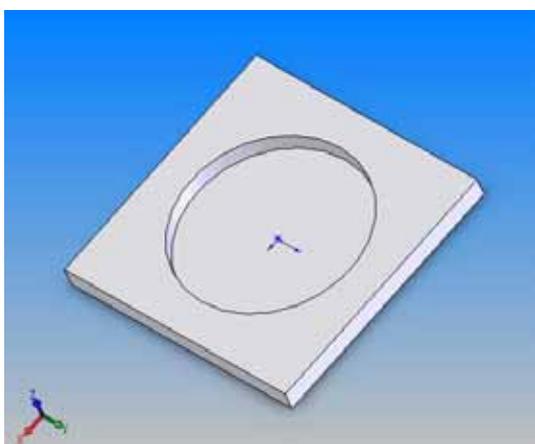


圖 4-8 無中心凸塊之撓度模擬模型

由圖 4-9(a)為無中心凸塊施力後模擬呈現結構形變，可以明顯看出最大撓度約為 $30.37\mu\text{m}$ ，約為內外徑比 1:2 之 7 倍，圖 4-9(b)為由中心到外緣的表面剖面撓度曲線圖，由線型曲率可以約略估計在 $1.4\mu\text{m}$ 表面有最大拉應力，而在中心附近有最大壓應力，圖 4-9(c)為表面產生之應力強度剖面曲線，可由曲線可看出薄板表面應力在邊緣處與中心位置可得最大正反向應力，分別為 $712.0581\text{MPa}$ 及 $-174.7113\text{MPa}$ 。

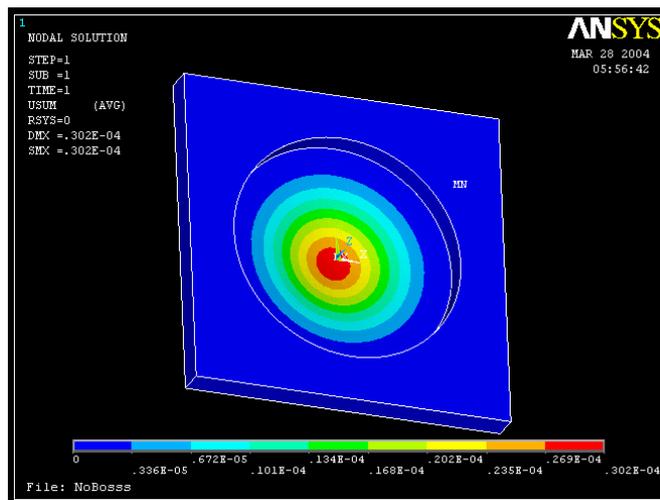


圖 4-9(a) 無中心凸塊施以 1 公斤力之 Ansys 模擬結果

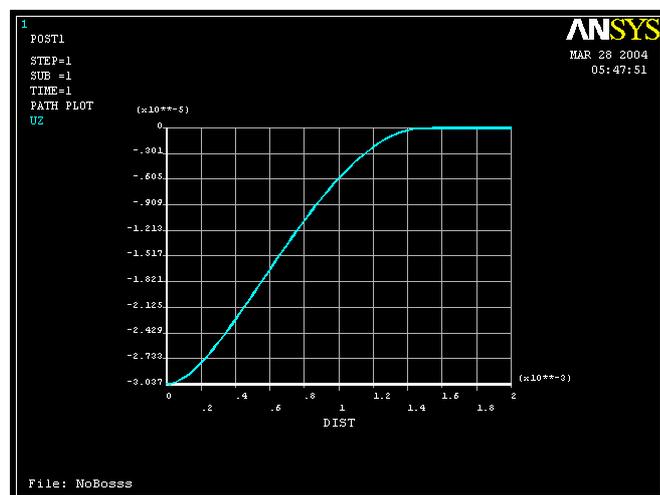


圖 4-9(b) 以 Ansys 模擬無中心凸塊之撓度曲線圖

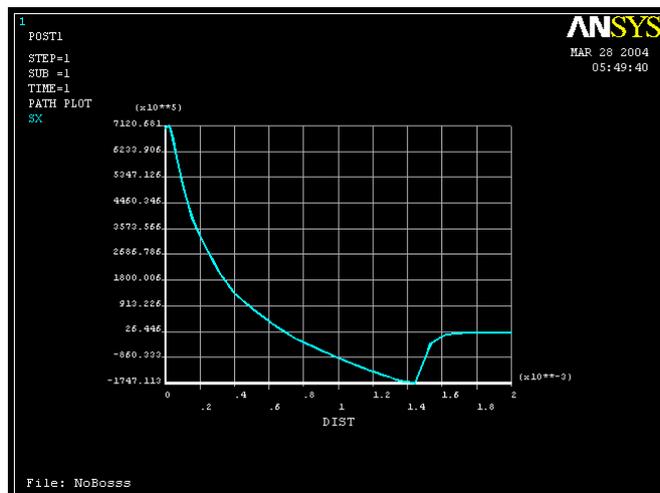


圖 4-9(c) 以 Ansys 模擬無中心凸塊之應力強度曲線圖

將以上模擬之結果作數據整理可得下列圖 4-10，圖 4-10(a)為將撓度繪製成立體立體圖做比較，圖 4-10(b)為撓度的曲線圖，其中明顯看出中心凸塊對撓度的影響，凸塊直徑越小形變量越大，相對靈敏度也越高；圖 4-10(c)為應力比較曲線圖，明顯看出在接觸力模式下，中心凸塊越小，其表面所產生的內外徑邊緣應力相差越大。

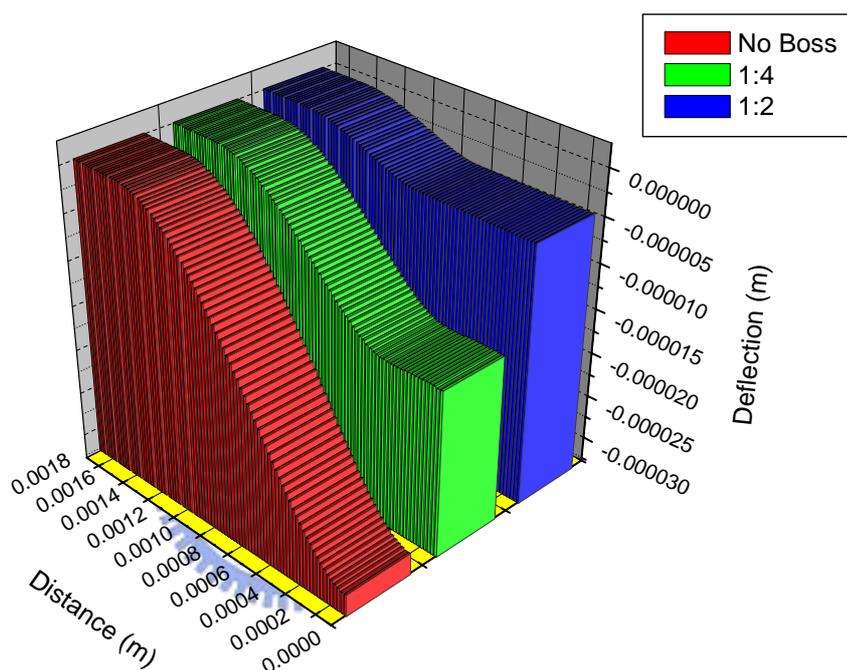


圖 4-10(a) 無中心凸塊、內外徑 1:2、1:4 三種撓度比較圖示

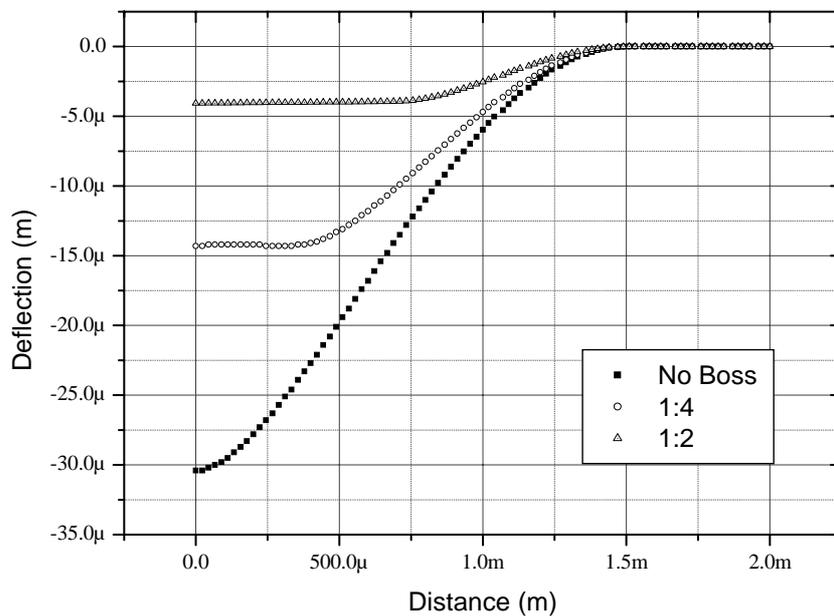


圖 4-10(b) 三種內外徑撓度曲線圖

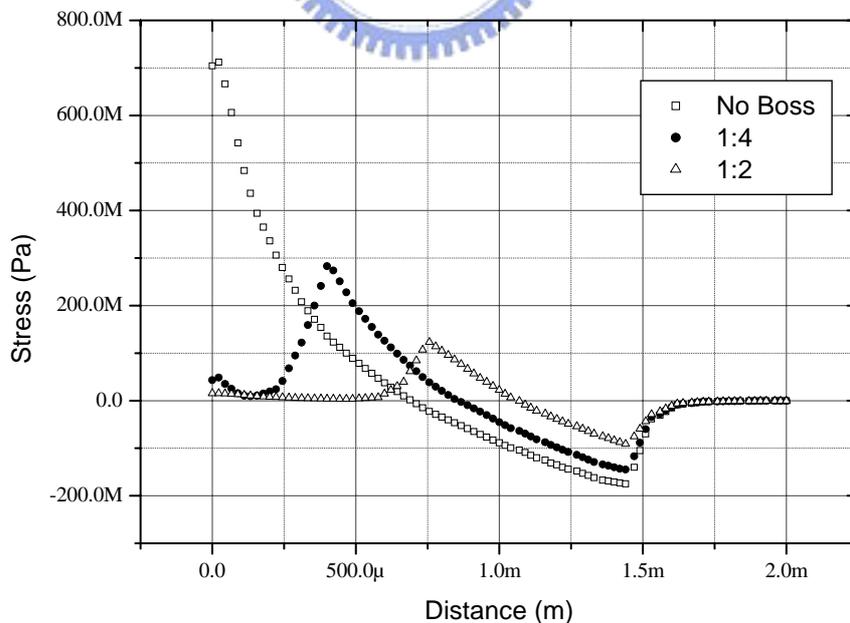


圖 4-10(c) 三種內外徑應力曲線圖

由模擬結果可以明顯看出，無中心凸塊施力，應力過於集中施力點，約為內外徑比 1:4 的內環邊緣三倍大，由於應力集中將使元件容易損壞，因此中心凸塊結構的另一項優點是能分散應力、增大力可量測範圍。

將前第三章力學分析薄板方程所得接觸力模式下之撓度與表面應力解，代入外徑  $a=1.4\mu\text{m}$ 、厚度  $t=50\mu\text{m}$  及不同內徑參數，加上矽材料的楊氏模數  $E=130\text{GPa}$ ，浦松比  $\nu=0.28$ ，其推算出曲線如圖 4-11。

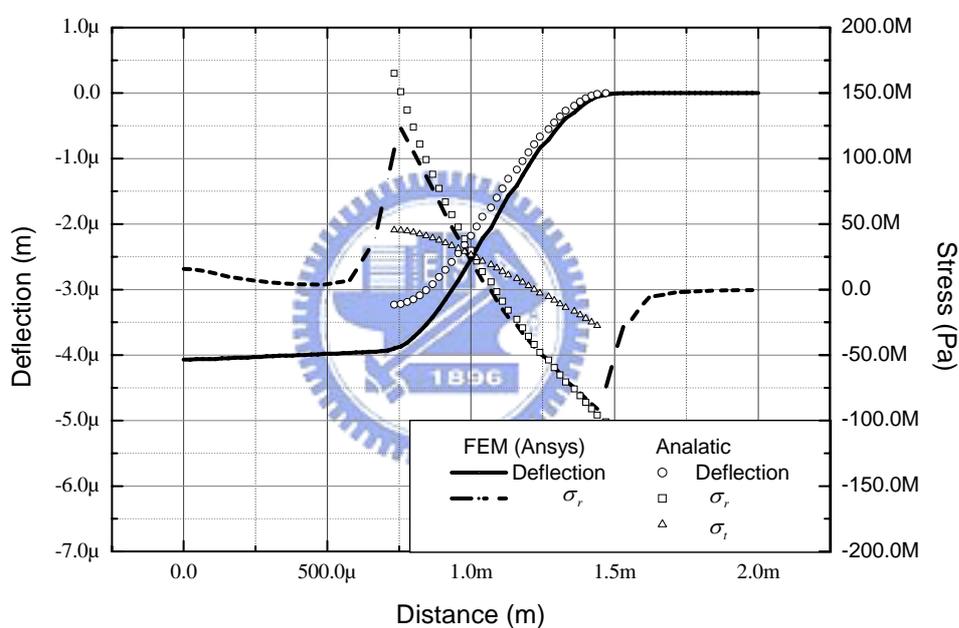


圖 4-11(a) 內外徑比 1:2 的縱向應力、撓度部分之模擬與推導比較

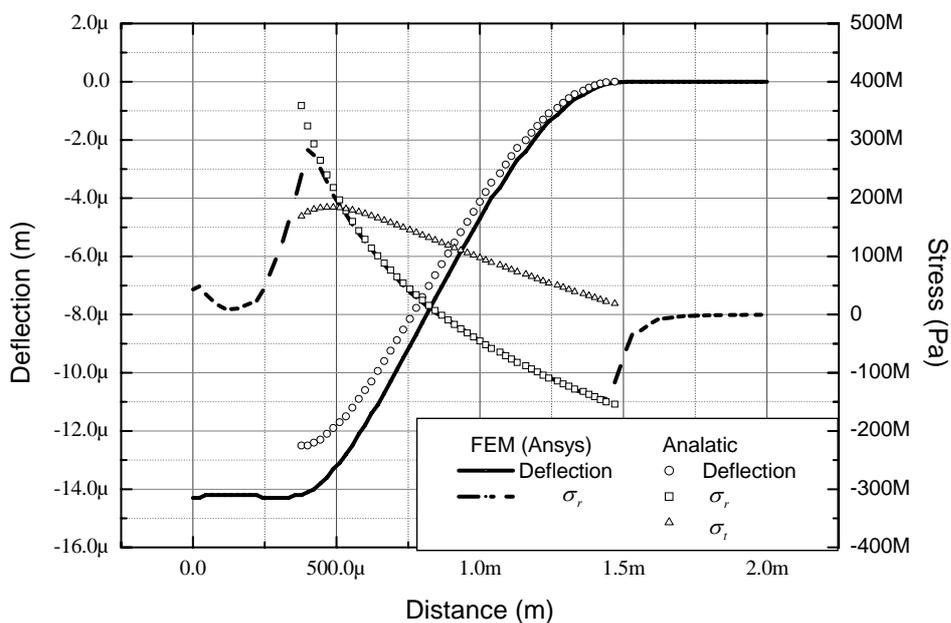


圖 4-11(b) 內外徑比 1:4 的縱向應力、撓度部分之模擬與推導比較

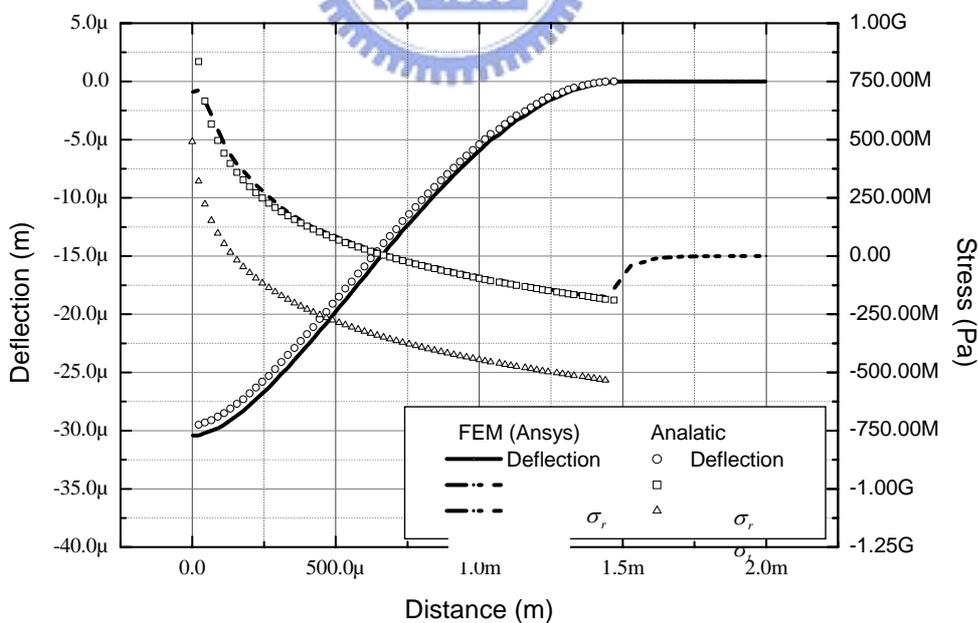


圖 4-11(c) 無中心凸塊的縱向應力、撓度部分之模擬與推導比較

圖 4-11(a)為內外徑比為 1:2 之撓度與應力曲線，粗線為模擬曲線，細

線為力分析後得之曲線，而實線為撓度、虛線為應力，圖 4-11(b)為內外徑比 1:4 之撓度應力曲線，圖 4-11(c)為無中心凸塊之曲線，由圖中可看出，推導之結果與模擬結果相接近，些微的差距乃因中心凸塊再推導中假設為剛體結構，而模擬亦考慮其中心凸塊形變，但其結果相近不遠，為可適用之函數模型。本論文所得的推導結果列於表 4-1，由表中亦可以得知中心凸塊另一個優點是可將圓心的應力效果分散，減少崩壞的可能，因此除了改變板厚的方法外，增大中心凸塊亦可增加量測力的範圍。

表 4-1：施以 1Kgf 的接觸力於不同直徑的中心凸塊上得邊緣縱橫向應力

Type	b:a	Outer (MPa)		Inner (MPa)	
		$\sigma_r$	$\sigma_t$	$\sigma_r$	$\sigma_t$
Force Tactile	No Bosed	-190.9	-53.4	3327.1	931.59
	1:4	-155.7	-43.6	373.8	104.7
	1:2	-102.7	-28.8	162.0	45.4
	3:4	-49.7	-13.9	60.2	16.9

由模擬以及推導的結果可以得到一相同的結論：(1).薄板環上邊緣處是應力極大點且內外徑邊緣產生應力方向相反，是擺設壓阻的最佳位置；(2).在接觸力模式下內外徑邊緣所產生的應力強度不同，所產生的壓阻變化亦不同，但只要接觸力與邊緣產生的應力成線性關性(如圖 4-9)，可以依前章橋電路分析中所推導之有效壓阻變化  $\Delta R_{effect} = (\Delta R_a + \Delta R_b) / 2$ ，其變化量依然維持線性關係。

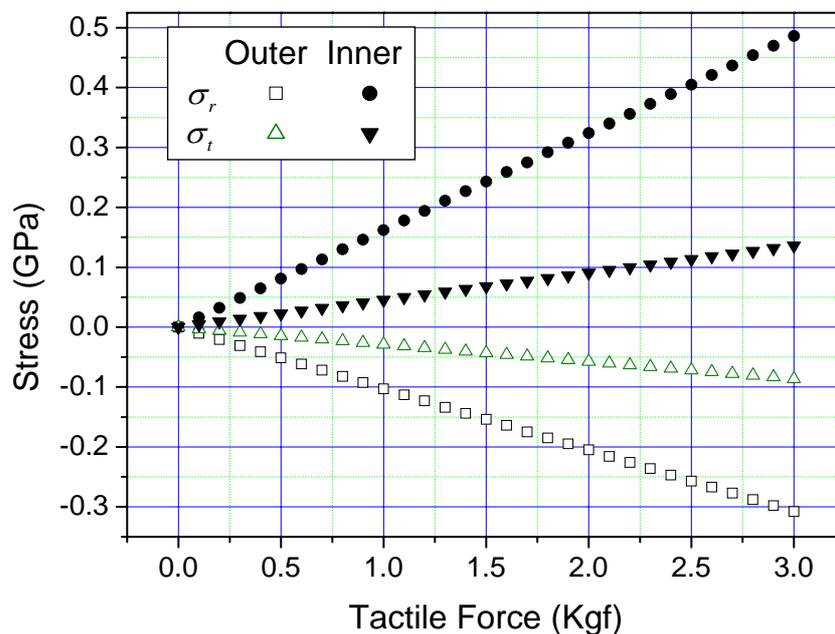


圖 4-12 施不同接觸力下內外徑邊緣應力曲線

#### 4.1.2 壓力模式

就前所述，就本論文所提著力感測元件的施力方法可分為接觸力模式與壓力模式兩種，其差別為一個是以點施力於中心凸塊，一是以面方式施力於整個感測元件，在此將施以  $1\text{ Pa}$  之壓力於半徑  $1.476\text{ mm}$  的大小、結構板厚度  $50\text{ }\mu\text{m}$  之結構上，與接觸力模式一樣，設計不同內外徑比：內外徑比為 1:2、1:4、3:4 及無中心凸塊四種結構做比較。

圖 4-12 為內徑 1:2 之結構圖，內徑為  $0.738\text{ }\mu\text{m}$ ，已知矽材料的楊氏模數 (Young's Modulus) 約為  $130\text{ GPa}$ ，蒲松比  $\nu$  (Poisson's ratio) 約為 0.28 將之代入有限元素 ANSYS 模擬，可得結果圖 4-2。

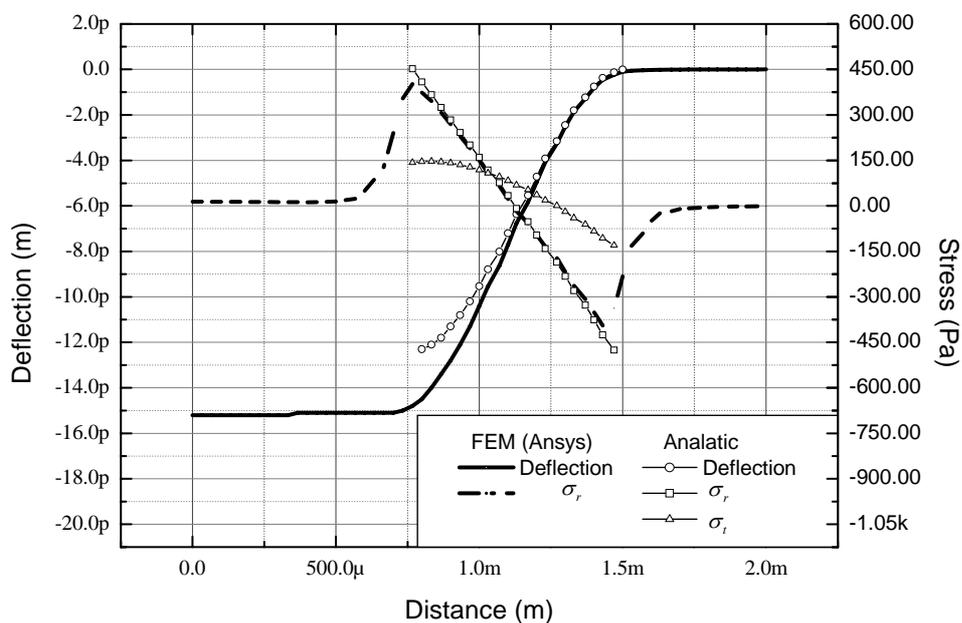


圖 4-13(a) 內外徑比 1:2 的應力、撓度部分之模擬與推導比較

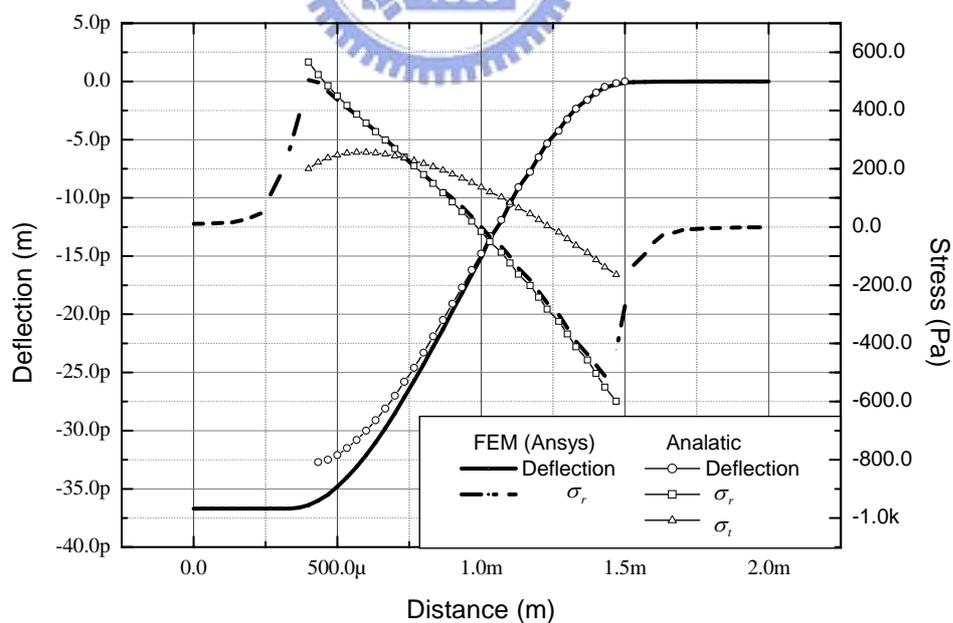


圖 4-13(b) 內外徑比 1:4 的應力、撓度部分之模擬與推導比較

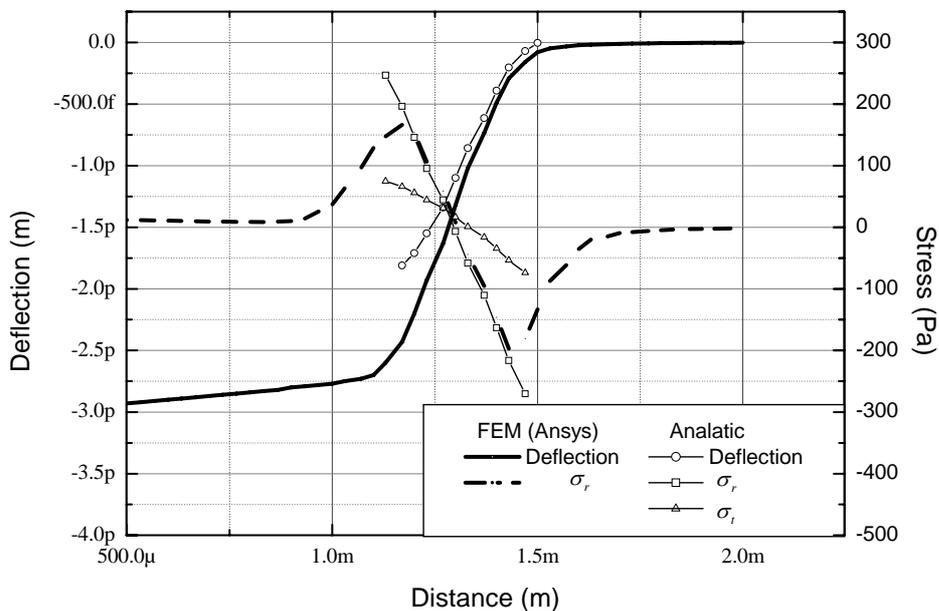


圖 4-13(c) 內外徑比 3:4 的應力、撓度部分之模擬與推導比較

從 4-13 圖可以清楚看出，如上一章節所推導在壓力模式下，縱向應力在內徑( $r=b$ )邊緣處與外徑( $r=a$ )邊緣處力強度相等、方向相反，橫向應力亦如此，將以上推導各種不同內外徑邊緣的縱橫向應力列於下表 4-2，結果正如觀察，得到在壓力模式下內外徑邊緣處的應力關係強度相等方向相反的特性。

表 4-2 施以壓力 1Pa 施於不同內徑的元件上所得之縱橫向應力

Type	b:a	Outer ( Pa )		Inner ( Pa )	
		$\sigma_r$	$\sigma_t$	$\sigma_r$	$\sigma_t$
Pressure	No Bosed	-654.0	-183.1	654.0	183.1
	1:4	-613.1	-171.7	613.1	171.7
	1:2	-490.5	-137.3	490.5	137.3
	3:4	-286.1	-80.1	286.1	80.1

由本章節討論總結，經由不同的內外徑來做比較分析後，本論文選擇使用 1:2 標準內外徑比為此處使用的結構，並將壓阻擺設於最邊緣，以獲得最大力轉換特性。



## 4.2 壓阻設計

壓阻設計考慮因素主要為靈敏度(Sensitivity)、線性度(Linearity)和溫度效應(TCS、TCR)，而其中提升靈敏度和線性度的方法有：

1. 選擇適當的位置擺設壓阻
2. 適當的壓阻形狀與大小
3. 選擇高壓阻因子(Gauge Factor)材料

壓阻應變規擺設位置於上一節已經探討，將之擺設於薄板環內外徑最邊緣處，可以得到最高的應力轉換效率。壓阻因子高的材料於第三章討論，以摻雜硼之 n-type 多晶矽(Poly-Si)為最適合的材料，若將材料施力於(100)晶格方向可得到最大的壓力因子。

就溫度響應的問題，半導體材料做壓阻不同於其他材料最大的特點就是敏銳的溫度特性，為了降低效應其改進的技巧很多，主要可分為兩大類：

1. 使用外電路作溫度補償
2. 壓阻摻雜濃度的選擇

對於感測元件設計而言，以不依靠外電路做補償下能降低元件溫度效應為首，而選擇適當的壓阻摻雜濃度在第三章已描述，此處將使用硼摻雜濃度為  $3 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^2$  來降低元件的溫度效應。因此，壓阻放置位置、壓阻材料選擇、和濃度摻雜都已決定後，現在需設計適當的壓阻形狀和大小，來得到最佳的靈敏度。



就文獻[15]中分析，應變規的過大或過小都會導致線性度和靈敏度的下滑，文中分析得最佳的壓阻大小，以邊長  $a$  的方型薄板為例，當應變規長度設計為  $a/10$  時，可以獲得佳的線性度和靈敏度；而以半徑  $a$  之圓形薄板，應變規長度設計為  $2a/10$  為最佳；若以本論文研究，圓環之內外徑分別為  $b$  和  $a$ ，其直徑上板所佔之長度為  $(2a-2b)$ ，最佳的應變規長度為  $(2a-2b)/10$ ，以設計之內外徑  $a$  約為  $1.4 \text{ mm}$ ， $b$  約為  $0.7 \text{ mm}$ ，因此吾人以長度  $140 \mu\text{m}$  應變規。因此將壓阻寬度設計為長度之  $1/4$ ，且設計雙壓阻並聯以增加其轉換效率，設計形狀與大小如圖 4-14。

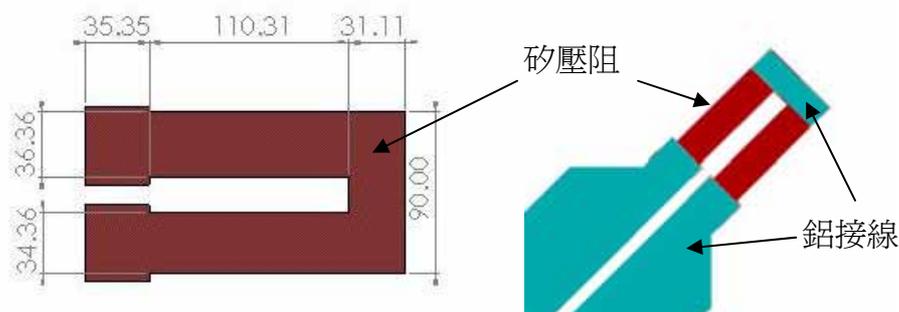
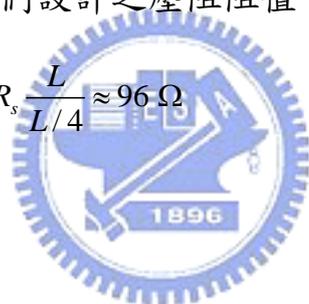


圖 4-14 壓阻設計之外型大小與接線(單位： $\mu m$ )

當決定壓阻形狀大小後，亦須估計其阻值，先再絕緣層上將成長板厚 500nm 的多晶矽並以離子佈植硼  $6.2 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^2$  之試片後，用四點探針量測儀(Four Point Probe)直接量測此試片電阻(Sheet Resistance)，得其片電阻  $R_s$  約  $12 \Omega$ ，約略估計我們設計之壓阻阻值：

$$R_{total} \approx 2R = 2 \cdot R_s \frac{L}{W} = 2 \cdot R_s \frac{L}{L/4} \approx 96 \Omega$$



### 4.3 元件靈敏度估算

對於設計感測器而言，推算靈敏度是一非常重要的工作，若推算得的靈敏度太低，則需改變原始地設計以提高靈敏度。在前幾節將元件結構模擬分析、設計完成壓阻的大小以及決定好擺設壓阻的位置後，根據第三章第五節中靈敏度部分，當我們將壓阻擺設於內外徑邊緣，只要設計好內外徑大小、薄板厚度及決定應變規，壓阻靈敏度便可輕易算出。就本論文所提出的矽壓阻式力感測元件將分別就壓力施力模式與接觸力施力模式探討分析之：

#### 壓力模式

在壓力模式下，已知壓力元件的外徑  $a$ 、內徑  $b$ ，薄板厚度  $t$  和矽的蒲

松比  $\nu$  (Poisson's ratio)、摻雜濃度 Boron  $3 \times 10^{17}$  atoms/cm<sup>3</sup> 之 n-type 單晶矽的壓阻係數  $1 \times 10^{-9}$  GPa 代入接觸力模式的靈敏度方程式(3.64)可得：

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{\pi_{44}}{4} [(\sigma_r(b) - \sigma_t(b)) - (\sigma_r(a) - \sigma_t(a))] \frac{1}{P} \\
 &= \pi_{44} \frac{3(a^2 - b^2)(1 - \nu)}{8t^2} \\
 &= 1 \times 10^{-9} \frac{3 \times (0.0014^2 - 0.0007^2)(1 - 2.8)}{8 \times (50 \times 10^{-6})^2} \\
 &= 1.76569 \times 10^{-7} V / V / Pa \\
 &= 1.21707 mV / V / Psi
 \end{aligned}$$

### 接觸力模式

在接觸力模式靈敏度已在前章推導，結果如(3.65)式，將元件的外徑  $a$ 、內徑  $b$ 、薄板厚度  $t$  和矽的蒲松比  $\nu$  約為 0.28、摻雜濃度 Boron  $3 \times 10^{17}$  atoms/cm<sup>3</sup> 之 n-type 單晶矽的壓阻係數  $1 \times 10^{-9}$  GPa 代入接觸力模式的靈敏度方程式(3.65)得：

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{\pi_{44}}{4} [(\sigma_r(b) - \sigma_t(b)) - (\sigma_r(a) - \sigma_t(a))] \frac{1}{F} \\
 &= \pi_{44} \frac{3(\nu - 1) \ln(\frac{b}{a})}{4\pi t^2} = 1 \times 10^{-9} \frac{3 \times (0.28 - 1) \ln(\frac{0.007}{0.014})}{4\pi (50 \times 10^{-6})^2} \\
 &= 47.6573 mV / V / Kgf
 \end{aligned}$$

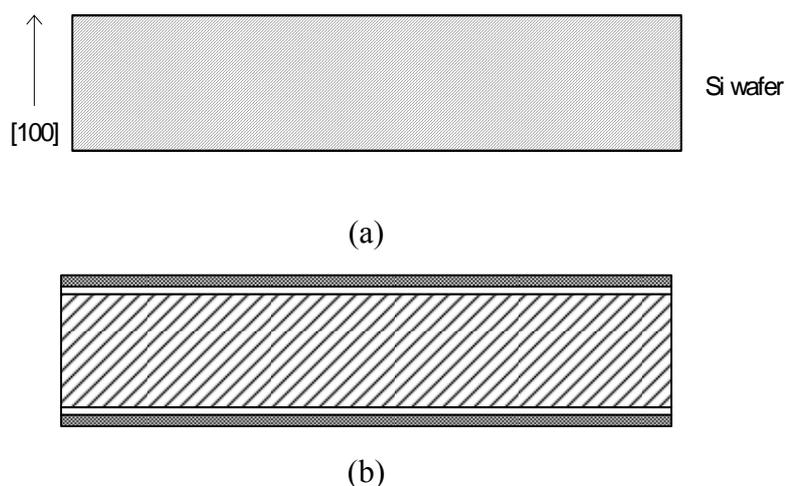
## 第五章 感測元件製作與結果

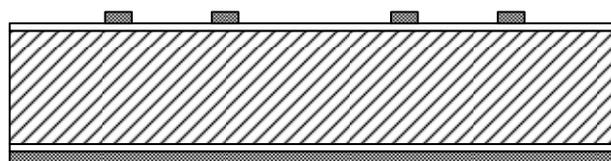
經過前章節的原理推導、設計與模擬，在此章節將實作本論文所設計的矽壓阻式壓力感測元件。首先在將第一節將描述本元件的製程與實作完成的結果；第二節將介紹本論文設計的覆晶封裝方式(Flip Chip Package)，並說明選擇此方法的原因並展示完成圖；第三節將介紹本次論文架設的量測環境與平台，並詳述此平台的設計構想；第四節將完成地元件分別針對個別壓阻特性、接觸力模式特性、壓力模式特性作測量，並分別對電壓驅動源與電流驅動源時溫度補償效應做分析，探討溫度對元件的影響。

### 5.1 製作感測元件流程

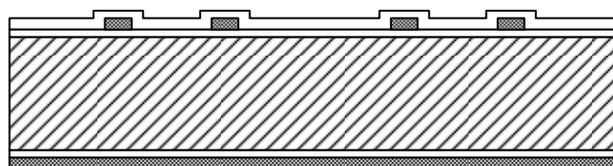
元件製程流程描述如圖 5-1，首先將 n-type (100) 雙拋的晶片做標準 RCA 清洗，作為本實驗之基材如圖 5-1(a)，厚度用機械式的游標尺做量測，約 340~350  $\mu\text{m}$  左右，而游標尺的精準度為 1  $\mu\text{m}$ ，厚度將決定最後薄板結構須蝕刻的深度。在經過標準清洗後，將晶片用爐管沉積上濕氧化層 500nm 做絕緣層，並用低壓爐管沉積 500nm 的多晶矽做為壓阻元件材料如圖 5-1(b)，用離子佈植 Boron 摻雜壓阻使其濃度達到所設計的  $3 \times 10^{17}$ 、 $6.2 \times 10^{15}$  atoms/cm<sup>3</sup>，並將壓阻形狀由第一道光罩經由標準的黃光流程及濕蝕刻定義出來，如圖 5-1(c)，再使用爐管沉積乾氧化層 100nm 保護壓阻如圖 5-1(d)，再使用第二道光罩與 BOE 蝕刻二氧化矽將壓阻接點(Contact Holes) 定義好，並用離子佈植摻雜高濃度的 Boron 作歐姆接觸(Ohmic Contact)降低矽材料與金屬接觸的接面特性與阻值，之後將晶片放入高溫 1000 度兩小時把剛做離子佈植後的多晶矽退火，如圖 5-1(e)，藉由蒸鍍機(Thermal Coater) 鍍上 1~2  $\mu\text{m}$  的鋁做金屬接線如圖 5-1(f)，再用第三道光罩並用鋁蝕刻將金屬接線定義完成，並以 450°C 30 分鐘將金屬線與半導體的接點燒結(Sintering)

降低界面阻值，如圖 5-1(g)，用 PECVD 長  $\text{SiO}_2$  100nm 與  $\text{Si}_3\text{N}_4$  做保護層，如圖 5-1(h)，做保護元件之用，再用第四道光罩與 HDP 將保護層蝕刻定義接線接點(Bond Pad)如圖 5-1(i)，如此正面的工作即完成。往後的製程將把背面的薄板與中心凸塊結構製作出來，先用 AZP4620 厚膜光阻旋鍍在正面，並用光阻黏稠性將另一片新的晶片黏上，如圖 5-1(j)，其目的是在往後做深蝕刻時，避免離子轟擊長時間將晶片打薄的製程，晶片無法承受後崩裂，將背面用第五道光罩用 IR 紅外線對準作背面對準，在用 ICP 做背蝕刻 300  $\mu\text{m}$  左右，而 ICP 對矽與對光阻的蝕刻選擇比約為 1:60，至少需 5  $\mu\text{m}$  厚的光阻才能抵擋，因此本論文背蝕刻是選擇使用 AZP4620，此光阻可輕易旋鍍 9  $\mu\text{m}$  以上的厚度來阻擋長時間的蝕刻，之後使用濕蝕刻將被面的多晶矽與氧化矽去除如圖 5-1(k)，如此即可送入深蝕刻機台 ICP 作背面結構製程，蝕刻率約 2  $\mu\text{m}/\text{min}$ ，蝕刻完成後如圖 5-1(l)，經紅外線測距儀量測結果得蝕刻後膜厚約為 100  $\mu\text{m}$ 。經過 ICP 背蝕刻後，將晶片以丙酮(ACE)將兩片晶片分開及去掉背面的光阻，最後完成如圖 5-1(m)，如此即完成矽壓阻式壓力感測元件的製作。

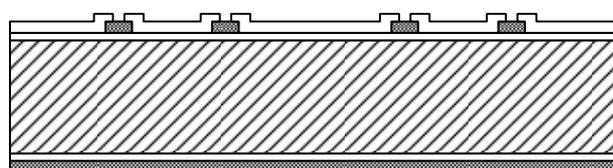




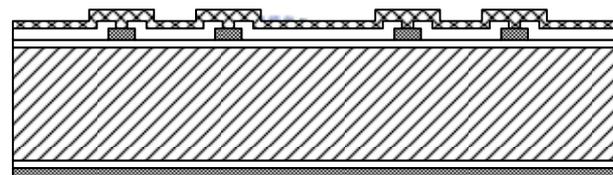
(c)



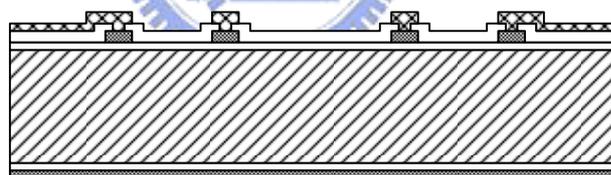
(d)



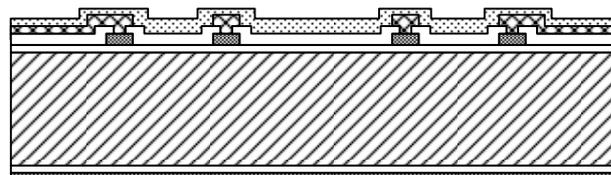
(e)



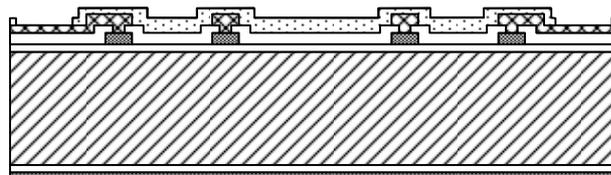
(f)



(g)



(h)



(i)

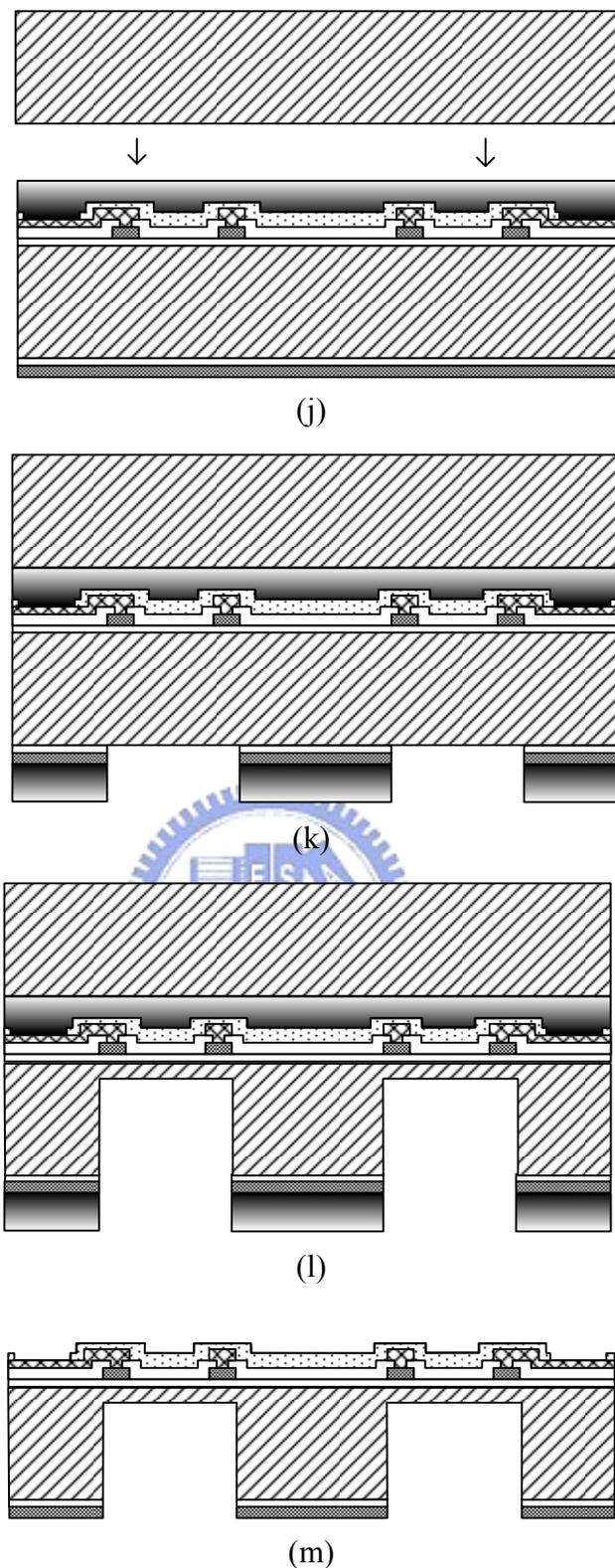


圖 5-1 多晶矽壓阻式壓力感測元件製作流程

製程中總共使用五道光罩及沉積、蝕刻、氧化、離子佈植等共 24 道步驟，每道製程步驟於第二章已詳述，最後製程完成圖如圖 5-2，左上角為元

件正面圖，右邊為原件背面圖，下面為背面之立體圖。圖中可看到背面結構用 ICP 做高深度蝕刻的結果相當垂直，薄板粗糙度也相當的低，非常適合用於本壓力結構深蝕刻製程。

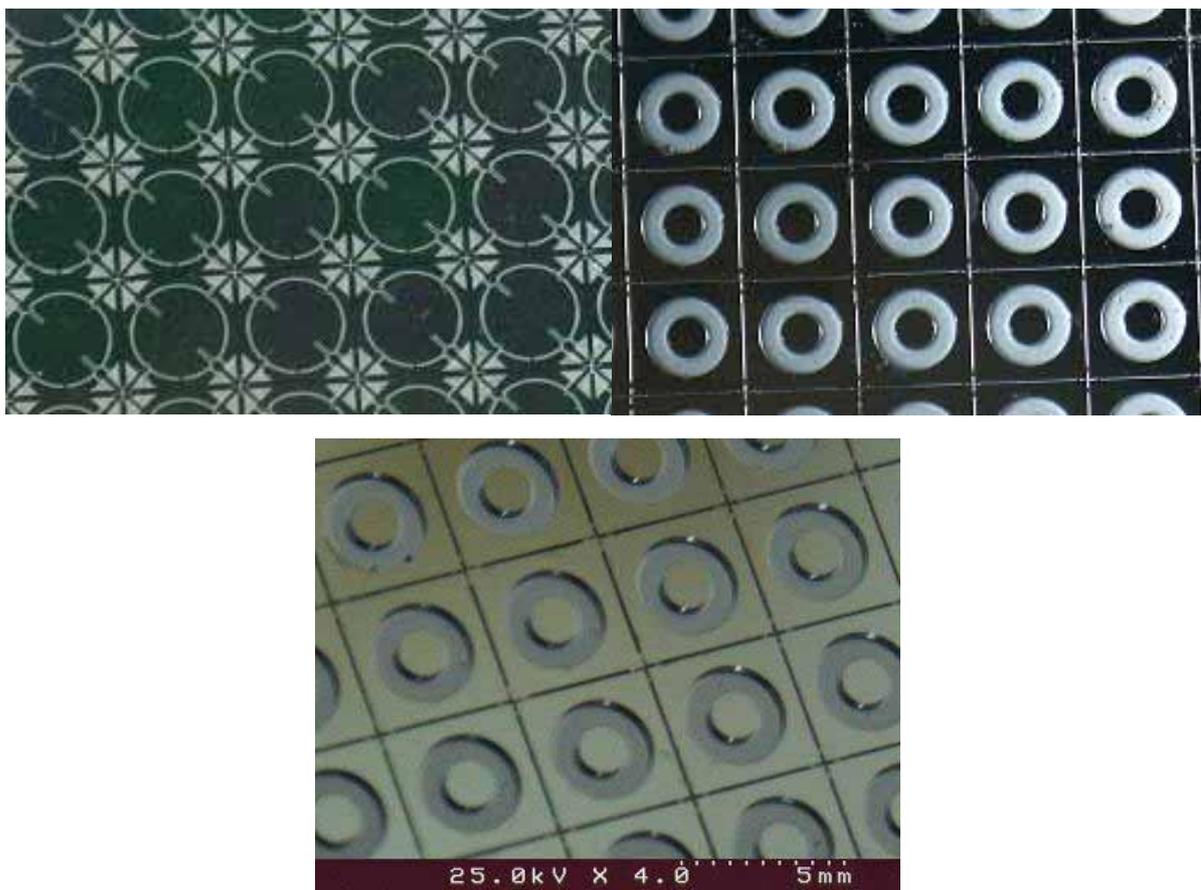


圖 5-2 壓力感測元件正反面實作結果

## 5.2 封裝壓力感測元件

完成壓力感測器製作後，根據接觸力與壓力的施力兩種模式的需求，整合一兩用的封裝架構。就接觸力元件而言，最重要乃是施力的中心凸塊需裸露於外以方便施力，封裝不需要封閉氣室即可正常工作；而對壓力模式而言，由於其施力原理是靠正反兩面的壓力差，在封裝時將一邊氣密封裝再由另一邊裸露欲感測壓力的環境即可，此為是最簡單的封裝方法，因

此對於壓力模式而言，任一面裸露都可，但最重要的是另一面的氣密封裝必須確實。綜合以上兩種模式需要的封裝條件，本論文使用覆晶封裝(Flip Chip)將元件倒置封裝於封裝腳座上，使施力的凸塊結構裸露，然後再用高分子材料將之氣密即完成，如圖 5-3。如此除了上述優點外，還可以不用打線減少金屬線在高溫量測時軟化；使用高分子材料做氣密亦可以強化覆晶接合的，因此相當此適用於本力感測元件。

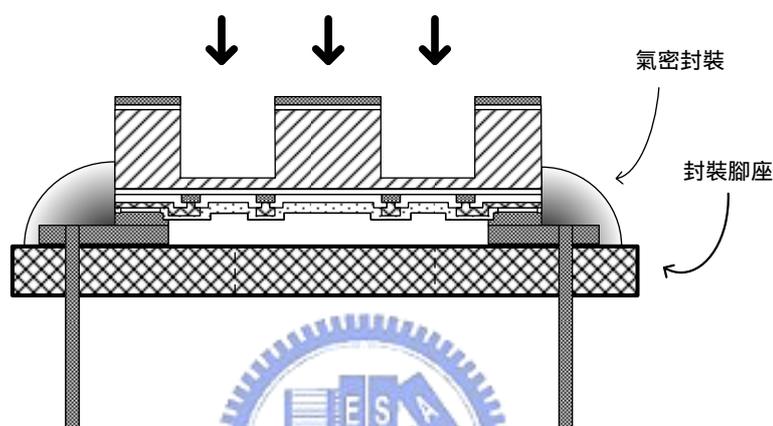


圖 5-3 覆晶封裝示意圖

本實驗所使用的封裝儀器是 Ok Industries 公司的 MP-2000 覆晶對準平台，此儀器是利用光學菱鏡將欲對準的元件與封裝腳座的相對腳位對準，並使用銀膠做接點接合，結果如圖 5-4。在此將封裝腳座的 PCB 板設計較大的目的是為了之後量測接觸力環境將把元件架在面包板上，針腳必須敷合面包板上的針腳規範，而 PCB 板上之銅箔厚度約  $18\mu m$ ，約可讓此感測元件承受  $9kgw$  產生的位移量。最後在用黑蠟等氣密材料將元件周圍密封即完成封裝。

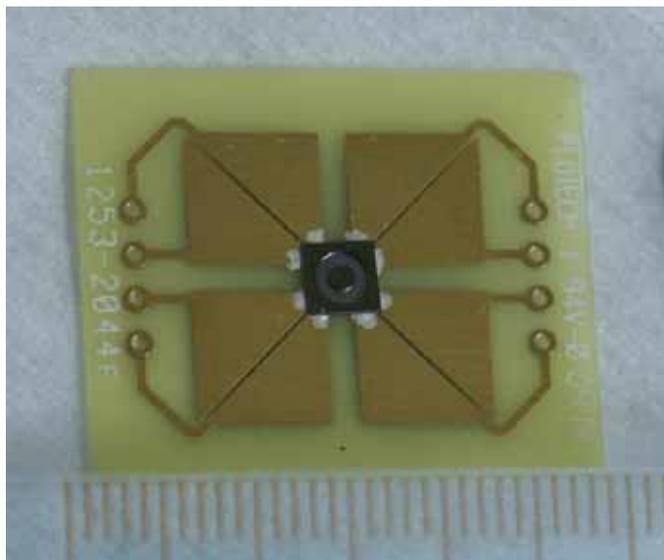


圖 5-4 封裝後壓阻元件完成圖

### 5.3 量測環境架設

元件完成後，量測環境的建置也是實驗相當重要的一環，在本篇力感測元件將分別作接觸力的量測與壓力環境做量測。圖 5-5 為本實驗架設的接觸力量測環境，右側為驅動電壓源(Source)和輸出量測儀器(multi meter)；元件上方以鐵氟龍(Teflon)製作一對準中心凸塊的施力平台，在平台上放至精準的砝碼做接觸力施力；在平台上架設一 Keyence 公司的 LC-2101 雷射微距儀(Laser Displacement Meter)，目的是測量中心凸塊撓度量，測精確度為 0.2 $\mu$ m；除此之外，元件下方放置一可控溫的加熱板，針對元件施加溫度以測量元件的溫度靈敏係數。

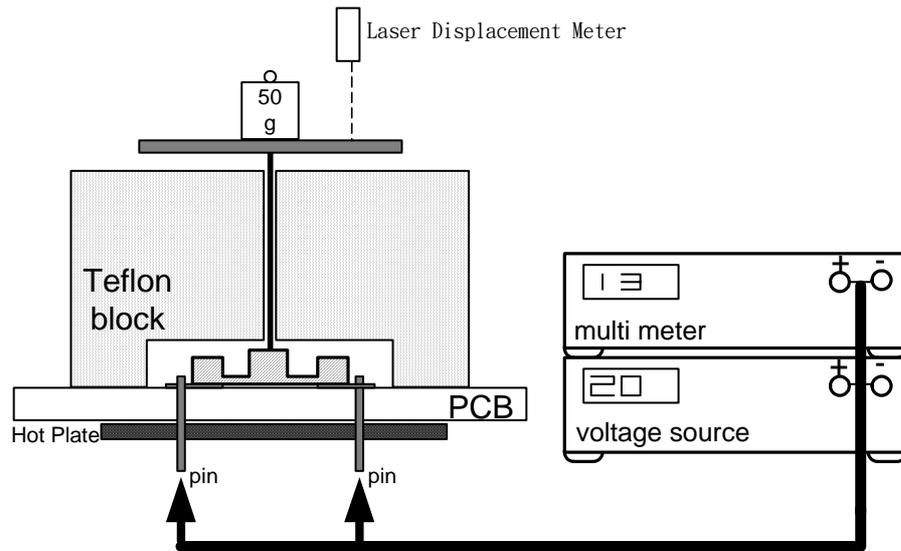


圖 5-5 接觸力量測環境架設圖

除了量測接觸力外，亦需對元件做壓力部份的測試。本論文設計一簡單的感測方式，圖 5-6 為此針對壓力架設的量測環境示意圖，主要利用液體深度與壓力正比的觀念設計。圖中右方為驅動電壓源(Source)和輸出訊號量測儀器(multi meter)，由於我們使用比重較小的水，壓力來源比較小產生的輸出訊號將會為  $\mu V$  等級，此將難以被電壓測量儀測量，因此在輸出端使用 AD620 儀表放大器將壓力元件輸出訊號放大 1000 倍，再量測結果除回 1000 即為元件電壓實際的變化量。分別接於上元件接腳，將元件電極用高分子材料封裝好，放至於水杯中，杯中液面高度決定元件受壓強度，此可以由水杯上測量；除此之外，元件下方放置一可控溫的加熱板，主針對量測液體施加溫度以測量元件的溫度效應，而水杯內亦置一溫度計監測目前量測環境溫度。此環境有兩缺點：一、量測壓力範圍受到容器高度侷限，本論文使用 50cm 高的量桶作為水壓環境，最深水壓約為 0.71 psi，二、水式導體，需將元件所有導電層皆用防水蠟保護住。但由於此環境只須一高容器和加熱器，而不需架設壓力管、真空泵控制壓力和管路升溫裝置，因此亦是一不錯的方法。

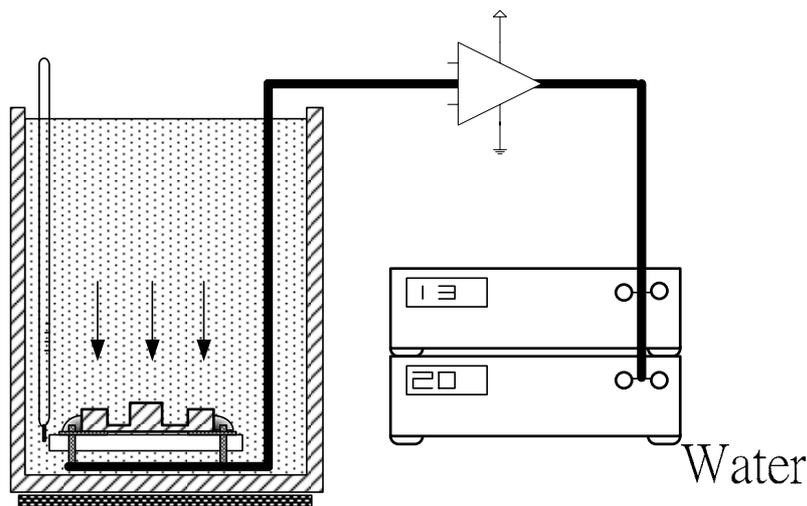


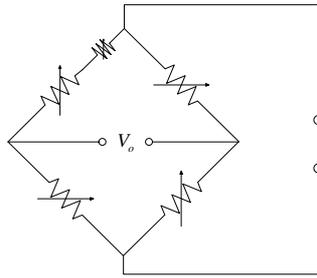
圖 5-6 壓力量測環境架設圖

#### 5.4 壓力感測元件製程結果與特性量測

完成製程、封裝與架設好量測環境後，再本節將對元件在不同環境、不同溫度下的運作情況，量測製作結果。本節將分別對接觸力模式之特性量測，以及元件壓力模式之特性量測二部份，分別討論結果，特別需注意的是此壓力感測器經製程後的量測，膜厚約為  $100\ \mu\text{m}$ 。

首先對於個別壓阻阻值之量測，如表 5-1 中明顯看出，在實作中製作的誤差不小，四個壓阻的阻值並非相近似，這將直接影響到元件未施力的情況下，輸出訊號在零點的位置，因此我們將在電路中加一可變電組，用以作零點矯正如表 5-1 旁之附圖。

表 5-1 每一壓阻的未受力下的阻值



	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
$\Omega$	82.8	88.8	82.9	80.9

### 5.4.1 感測元件在接觸力模式下之特性量測

本論文製作的壓阻式壓力元件對接觸力模式的特性量測，利用圖 5-5 的量測環境，分別針對力、溫度對微力感測元件輸出訊號作圖，並考慮不同驅動源產生的溫度補償效果，其將測試數據有：

- (a) 固定常溫、80、135°C 的溫度量測不同力的輸出變化
- (b) 將電壓驅動源換成電流驅動源、重複做(a)
- (c) 受到接觸力下中心凸塊的移動情況

如圖 5-5，我們將完成封裝的元件置於加熱盤上，並架上鐵氟龍施力平台，接上驅動電壓源 5V 及電壓訊號量測器後，先於常溫下直接施力，由於施力使用法碼，因此以每 50gw 記錄三次，以穩定之平均值紀錄，直到 1kgw；之後將加熱盤升溫，設定於 80 度並如常溫施加法碼量測、記錄之，完成後再將溫度深至 135 度，再以同樣方法紀錄；完成後為確保元件並未脆化，逆向降至 80 度再量測一次結果，之後再關閉加熱盤直到室溫再量測，如此可得到圖 5-7。

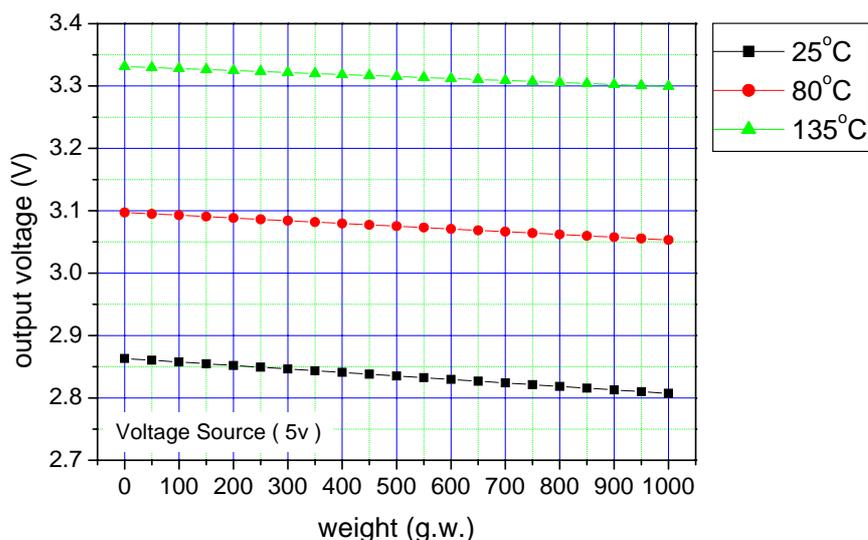


圖 5-7 電壓驅動源下，不同溫度環境下受不同接觸力的輸出結果

圖中明顯看出零點偏移，此為由於製程上所導致的 TCO 誤差值，約為  $0.29\%/^{\circ}\text{C}$ ，其中約略可以看出當溫度上升時，除了零點偏移增加外，元件受接觸力輸出值漸緩。圖 5-5 為平移後的輸出訊號曲線圖，去除 TCO 後明顯看出輸出訊號受溫度影響而減弱，就第三章溫度係數部份描述，由式(3.70)得電壓驅動源輸出訊號只受 TCS 所影響，由圖中計算得元件 TCS 約為  $-0.39\%/^{\circ}\text{C}$ 。由圖中對常溫下輸出訊號計算，本論文製作之矽型壓阻式壓力感測器在接觸力模式下，靈敏度為  $11.2\text{mV}/\text{V}/\text{kgf}$ ，約只有第四章估計值  $47.6573\text{mV}/\text{V}/\text{kgf}$  的  $\frac{1}{4}$  倍。

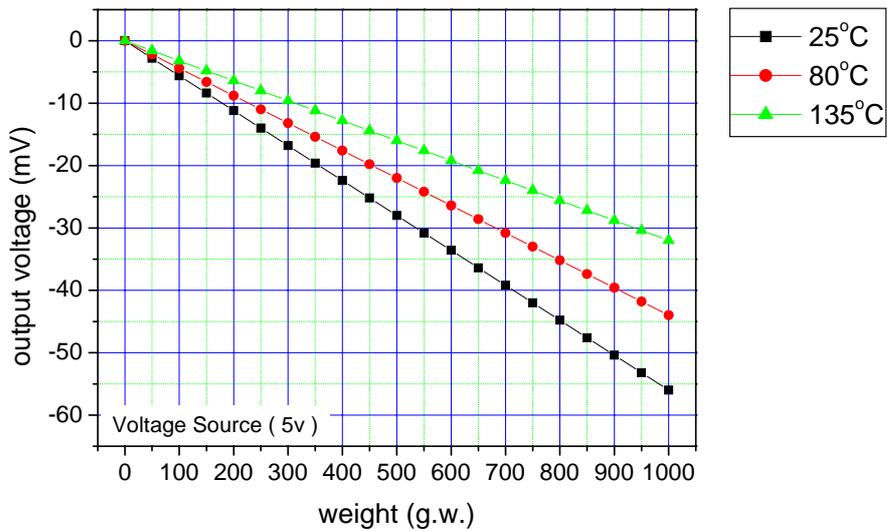


圖 5-8 電壓驅動源下，溫度對電壓輸出源輸出訊號的影響

除了電壓驅動源元件外，亦可使用電流源驅動，將裝置中電壓驅動源置換成電流源，並作如電壓源一樣的量測動作；從室溫、80°C、135°C，以每 50 顆為單位進行接觸力量測，如此可得到圖 5-5。

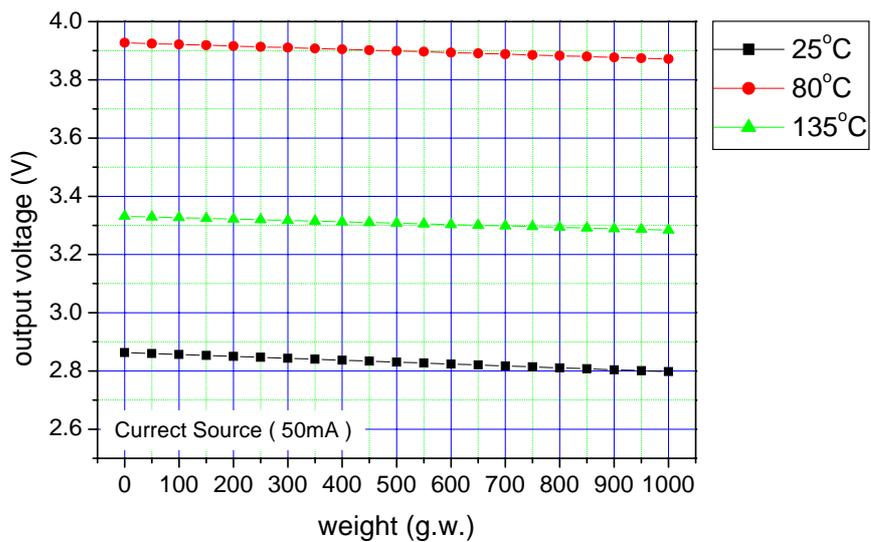


圖 5-9 電流驅動源下，不同溫度環境下受不同接觸力的輸出結果

在圖 5-9 中亦可看到與電壓源相似的 TCO 零點偏移，除此之外當溫度上升時，元件受接觸力輸出值漸緩的情況較電壓輸出源小許多，將圖平移後的輸出訊號曲線圖 5-9，去除 TCO 後看出輸出訊號亦受溫度影響而減弱，但稍較電壓輸出源小，就第三章溫度係數部份描述，由式(3.71)得知電流驅動源輸出訊號受 TCS 與 TCR 相互補償所影響，當 TCR 與 TCS 異號、甚至值相近時使用電流驅動源可以降低元件溫度效應。其中由量測結果可估算 TCR 約為  $0.16\%/^{\circ}\text{C}$ 。

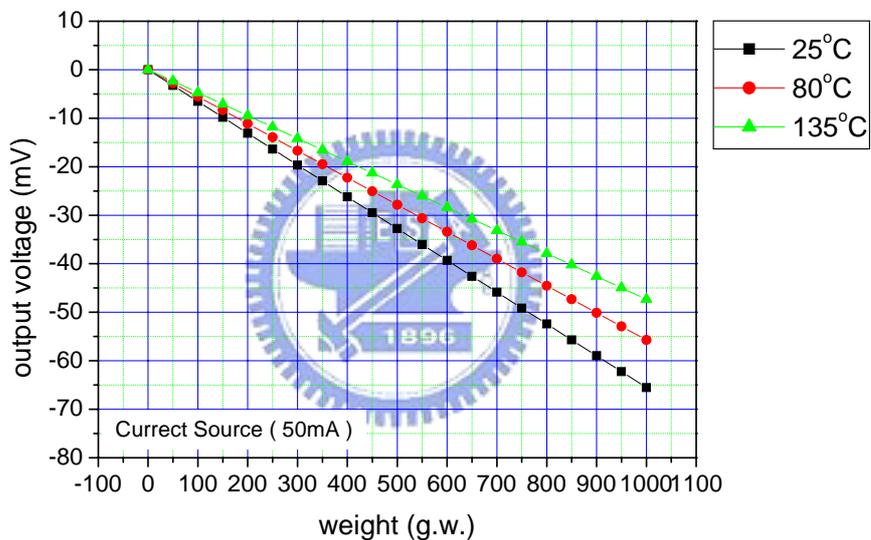


圖 5-10 電流驅動源下，溫度對電壓輸出源輸出訊號的影響

#### 5.4.2 感測元件在壓力模式下之特性量測

前節深入討論壓力元件的靈敏度、薄板受力撓度、溫度效應與補償結果，本節將針對元件壓力模式下靈敏度做量測，圖 5-5 為本實驗壓力測試環境示意圖，是運用液面深度即決定壓力強度的觀念所架設，再利用加熱水溫方式改變環境溫度，用以測量溫度效應，並考慮不同驅動源產生的溫度補償效應。在此量測方式中，必須將所有裸露的電極用塑酯或高分子材料

包起來，避免非純水導電性導致量測偏差，必且要徹底將中心氣室氣密封裝，如此才能良得準確值。

元件封裝完成後，將元件接上電壓驅動源 5V 與訊號量測儀器，將水注滿，移動每水深 50mm 取得數個穩定的數據取平均值紀錄，到底後在返回每 50mm 記錄直到水面，如此得到如圖 5-10。

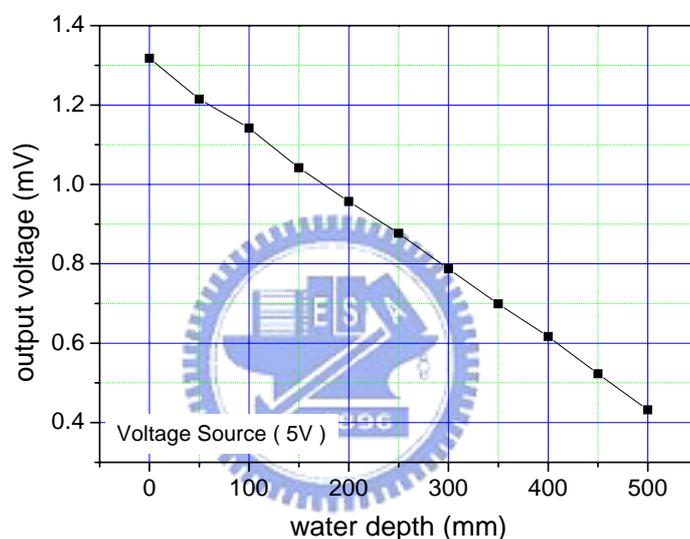


圖 5-11 壓力模式下量測輸出結果

如此靈敏度得到約  $0.001791986 \text{ mV/V/mmH}_2\text{O}$ ，經壓力換算結果約為  $0.2524 \text{ mV/V/Psi}$ 。

## 第六章 結果討論與未來工作

經過本論文的推導、設計到實作，運用中心凸塊的力導引結構完成一接觸與壓力感測兩用的矽微力感測器，在實作中背蝕刻未 KOH 做結構深蝕刻而使用 ICP，無  $K^+$  離子污染問題，此為 CMOS 製程可以接受的製程技術，並由於其為低溫製程，可用於最後段製程，因此本論文設計的壓力元件可以輕易的與傳統 CMOS 製程整合，再透過簡單且低廉的覆晶封裝技巧即可達到高靈敏度、高量測範圍的力感測元件，如此將能運用自動控制或機械手臂等接觸力上的感測。

而本論文的製程結果並非此種設計的最佳情況，在第三張理論與推導中對於靈敏度的估計值與最後結果落差 1/4 倍以及零點偏移量過大，此誤差的主因乃是製程精確度，此問題須靠汰換製程設備解決；此外，第三章的溫度補償與實際補償效果也差之甚遠，主要因素可能是參考文獻的材料是單晶矽做摻雜，而我們所使用的材料是多晶矽摻雜，導致材料溫度效應不相同，這在未來改良元件上可以考慮的。除此之外，就文獻中使用 p-type 的單晶矽並施力於(100)方向將擁有最高的壓阻係數，若在此處從新選擇材料與改變製程方式將可以大為提昇靈敏度。最後封裝所使用的氣密材料並未經過長時間、高溫、高壓等情況測試，氣密度與可靠度仍須存疑，此可參考[24]，有深入的探討，以此應用在本論文的封裝上將可以使元件完全的應用在壓力量測上。

## 參考文獻

- [1] Soloman and Sabrie, "Sensor Handbook," p64.1-67.19,1999
- [2] CS. Smith, "Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon,"  
Phys. Rev. , 94, pp. 42-49, 1954
- [3] Madou, Marc J. "Fundamentals of Microfabrication," CRC Press.,1997
- [4] Arthur P. Boresi, Richard J. Schmidt and Omar M. Sidebottom., "Advanced  
Mechanics of Materials 5<sup>th</sup>," John Wiley & Sons, Inc, New York,  
pp.542-555, 1993.
- [5] Maan H. Jawad, "Theory and Design of Plate and Shell Structures,"  
Chapman & Hall, New York,pp1-15, 1994
- [6] S. Middelhoek, et al., "Silicon Sensors," Academic Press,1989
- [7] G. S. Chung, et al, "Novel Pressure Sensors with Multilayer SOI  
Structure," Electronics Letters, 26, pp. 775-777, 1990.
- [8] S. Susumu, and K. Shimaoka, "Surface Micromachined Micro-Diaphragm  
Pressure Sensors," Solid-State Sensors and Actuators, pp. 188-191, 1991.
- [9] E. Kalvesten, "The First Surface Micromachined Pressure Sensor for  
Cardiovascular Pressure Measurements," IEEE, MEMS-98, pp.574-579,  
1998
- [10] C.S. Smith, "Piezoresistive effect in germanium and silicon," Phys. Rev., 94,  
April 1954.
- [11] S. Wolf and R.N. Tauber, "Silicon Processing for the VLSI Era: Vol. 1  
Process Technology 2nd Ed," Lattice Press, 2000
- [12] S. Timoshenko, etc, "Theory of Plates and Shells 2<sup>nd</sup> ed," 1959
- [13] S. M. Sze, "Semiconductor sensors," 1994.
- [14] W. Z Sadeh, and H. J. Brauer, "A visual Investigation of Turbulence in  
Sygnation Flow about a Circular Cylinder," J. Fluid Mech., 99.1,p.53,1980
- [15] L. W. Lin, and W. J. Yun, "MEMS Pressure for Aerospace Applications,"

- IEEE Aerospace Conference, vol 1, 1998.
- [16] O. N. Tufte, P. W. Chapman and D. Long, "Silicon Diffused-Element Piezoresistive Diaphragms," J. Appl. Phys., Vol. 33, pp. 3322, 1962.
- [17] J. Suski, V. Mosser and J. Goss, "Polysilicon SOI Pressure Sensor," Sensors and Actuators, pp. 405-414, 1989.
- [18] H. Schafer, V. Graeger and R. Kobs, "Temperature-independent pressure sensors using polycrystalline silicon strain gauges," Sensors and Actuators, 17, pp. 521-527, 1989.
- [19] W. Germer, "Microcrystalline Silicon Thin Films for Sensor Applications," Sensors and Actuators, 7, pp. 135-142, 1985.
- [20] E. Obermeier and P. Kopystynski, "Polysilicon as a Material for Microsensor Application," Sensors and Actuators, 7, pp. 195-155, 1992.
- [21] S. Timoshenko and W. Woinowsky-Krieger, "Theory of plates and shells", 1959
- [22] Ristic and Ljubisa, "Sensor technology and devices," 1994
- [23] Lau, John H., "Flip chip technologies," 1996
- [24] W. H. Chang, "A Study of High Temperature Piezoresistive Sensors," pp. 77-78, 2004

## 作者簡歷

1. 姓名：丁沛熙

2. 籍貫：台灣省高雄縣

3. 出生地：台中縣

4. 生日：民國六十八年三月二十日

5. 學歷：

- 桃園縣平鎮市立新勢國民小學 -----民國 74 年 9 月至民國 80 年 6 月
- 桃園縣平鎮市私立復旦中學 -----民國 80 年 9 月至民國 83 年 6 月
- 桃園縣省立楊明中學 -----民國 83 年 9 月至民國 86 年 6 月
- 逢甲大學電子工程學系 -----民國 86 年 9 月至民國 90 年 6 月
- 國立交通大學電子研究所碩士班 -----民國 90 年 9 月至民國 93 年 6 月



利用多晶矽結構之絕緣層之壓力感測元件建立

交通大學電機資訊學院  
電子工程學系電子研究所

丁沛熙

# 書背

