

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

「高壓力負載高解析度微型壓力計之研製」

The Fabrication and Simulation of a New Micro High-Pressure Sensor

計畫編號：NSC-90-2218-E-032-011

執行期間：90年08月01日至91年07月31日

主持人：楊龍杰 執行機構：淡江大學機械工程學系

共同主持人：張益敏（永達技術學院機械系） 研究助理：王信雄、王俊民

E-mail: Ljyang@mail.tku.edu.tw

一、中文摘要

本計畫利用體型加工製造方形島塊高壓力負載微型壓力計。該壓力計係由傳統壓阻式壓力感測器之薄膜構型加以改良：於薄膜中央設計一與基材相接觸之方型島塊，使薄膜剛性上升，其所能承受之壓力亦隨之增加。計畫中應用有限元素軟體 ANSYS 分析壓力薄膜受力情形，並依據薄膜表面壓電阻受壓之應力值，直接推導出壓力計之理論輸出電壓值，其結果可作為感測器製作前之性能評估。計畫並完成壓力計原型晶片之製作，以及 300psi 的壓力測試結果，比對出理論值與實驗值的差異。

關鍵字：高壓力負載、壓阻式壓力計、ANSYS。

Abstract

A novel high-pressure sensor fabricated by the silicon bulk-micromachining is proposed in this paper. A strengthened diaphragm with adding a square fixed mesa, is demonstrated to be elegant over the conventional design of piezoresistive high-pressure sensors. This argument is justified by the numerical simulation of the FEM software, ANSYS through analyzing the stress of the silicon membrane as well as deriving the ideal output voltage of the high-pressure sensor. This calculated result of sensor performance is left to compare with

the testing data of sensor prototype.

Keywords: High-pressure sensor, piezoresistive, FEM, ANSYS

二、新型壓力感測器介紹

壓力計之應用範圍相當廣泛，利用微機電系統技術製造之微型壓力計，更已在市場中佔有一席之地。就商業、學術考量而言，如何降低生產成本、提高量測精度以及拓展壓力計應用範圍，是未來壓力計研究製造的重點。

在應用方面，極高壓範圍(100psi 到 3000psi 之間)的壓力計在工業監控量表上有極大之市場需求，這也是微機電感測器在本性上可擅場發揮優點之範疇。故為了解微型壓力計受壓之變形與訊號變化，本計畫採用電腦輔助分析(Computer Aided Engineering; CAE)之方式，應用有限元素分析(finite element method; FEM)軟體 ANSYS 建立高壓力負載壓力計之幾何模型，並模擬該強化型壓力薄膜受力之應力分布。藉由此分析結果，在感測器進行製作之前，便先行預知其輸出特性，作為壓力薄膜設計之依據。

本計畫進一步將全薄膜式與島塊強化式壓力計進行模擬比較，以明瞭在相同薄膜面積的情況下，島塊式壓力計的最大容許壓力遠大於全薄膜式壓力計，換言之，於薄膜中央增加一島塊確實可大幅擴展壓力計所承受之壓力負載範圍。

三、壓力計之微細加工製程

本研究中之壓力計採用{100} p 型矽晶片為基材，厚度為 400 ± 15 微米；並於晶片上成長一厚度為 20 ± 1 微米之 n 型磊晶層 (epitaxial layer)，此磊晶層即為壓力薄膜。整個壓力計的構型剖面圖如圖 1 所示，製作採矽晶體型微細加工 (silicon bulk micromachinings)，製程共分六道光罩，製造流程及光罩設計如圖 2、圖 3 所示。

第一道為氧化層開洞。第二道光罩輕度佈植以定義壓電阻之所在。第三道光罩重度硼離子佈植 (heavy boron implantation) 將第五道鋁線佈局下方摻雜成高濃度 p^+ 區域，此時 p^+ 區使鋁線接點形成歐姆接觸 (ohmic contact)。第四道定義鋁線接觸點，第五道蒸鍍鋁線電路佈局與第六道矽晶片背後蝕刻。其中前五道半導體製程交由台南統懋公司代工。

至於第六道流程，是以矽晶非等向性腐蝕 (anisotropic etching)，製作壓力計之薄膜與中央加強島塊結構。由於該中央島塊的四個角落，乃是兩個{111}平面相交之稜線所在，亦即為晶面不確定的位置，此處將會快速被 KOH 腐蝕液侵蝕消失而導致圓角之情形，故而腐蝕保護膜圖樣除了原先島塊方形圖樣外，須另加上凸角補償 (convex corner compensation) 之突出圖案。由於本計畫中矽晶片之蝕刻採用濃度 30% 之 KOH 蝕刻液，並未加入異丙醇 (IPA)，故 $\langle 100 \rangle$ 蝕刻速率較 $\langle 110 \rangle$ 要快，而採用 $\langle 100 \rangle$ 延伸法來做凸角補償 (圖 4)[1]。並採用電化學自動停止蝕刻 (electro-chemical etch-stop)[2]，又名反向偏壓蝕刻法 (negative biased etching) 來監控薄膜之厚度。本加工在臺灣矽微電子公司完成。

四、感測器設計與 ANSYS 力電分析

(一) 壓力計之構型參數與關係

在圖 1 壓力計之剖面圖中， W_a 為晶片總

寬度， W_b 為鍵合區域， W_m 為島塊寬度， W_s 是{100}矽晶片蝕刻壓力凹槽所產生之 $\langle 111 \rangle$ 斜坡投影寬度， W_d 則是薄膜寬度， T 為薄膜厚度， H 為晶片整體厚度。上述幾何參數滿足下式：

$$W_a = 2W_b + W_m + 4W_s + 2W_d \quad (1)$$

$$(H-T) = \sqrt{2} W_s \quad (2)$$

考慮到島塊凸角補償的情況下，島塊大小不得小於 $1130 \times 1130 \mu\text{m}^2$ ，且整體壓力計大小 $4000 \times 4000 \mu\text{m}^2$ ；依據(1)(2)式先取三組不同幾何參數之島塊式壓力計 1~3，以及與編號 1、2 薄膜面積相同之全薄膜式壓力計 4、5(如表 1)進行有限元素法之分析模擬。

(二) 有限元素法之應力分析

本計畫以有限元素分析軟體 ANSYS 進行分析，由於此壓力計為對稱結構，故採四分之一模型分析以節省軟體計算時間。在元素型態 (element type) 選用方面，薄膜部分使用 SHELL63 薄殼元素，壓力計的其他部分則是使用 SOLID45 實體元素。而矽之材質為正交等向 (orthotropic) 且均質，材料性質數據與元素基本特性如表 2 [3]、表 3 [4] 所示。邊界條件為壓力計底部全部夾持，亦即鍵合區域、島塊區域與底部接觸部分自由度皆為零，外加負載由 100psi 至 1000psi 間(若有需要則繼續提高到 1000psi 以上)取十個壓力值分析之，壓力計網格分割如圖 5。以薄殼元素之大變形 (large deformation) 方式計算求解 [4]。

由分析可知島塊式薄膜受壓後應力值 f_x 與 f_y 之分佈，如圖 6、圖 7 所示。我們參酌最大應力之所在(框狀薄膜的中線位置)，指定為壓電阻的擺放位置，並連接成惠司同電橋 (Wheatstone bridge) 的構型，如圖 8 所示。至於全薄膜式的壓電阻位置(在薄膜邊緣)，以及其惠司同電橋構型，請參酌文獻[3]。

吾人比較島塊式與全薄膜式壓力計，在相同薄膜面積與相同外加壓力下的最大應力數值，顯示全薄膜式之最大薄膜應力值約是島塊式的 6 倍，變形量更是超過 10 倍以上。若以單晶矽的破壞強度 7.0GPa，並配合安全係數 3.0 來看，厚度 20 微米 $1680 \times 1680 \mu\text{m}^2$ (壓力計 4) 之全薄膜，大約只能承受 300psi 的壓力；但若以相同面積之島塊式壓力薄膜(壓力計 1)來分析，則可輕易承受超過 1500psi 以上的壓力負載。剛性提昇為五倍左右。表 4 即為壓電阻最大應力超過 2.33GPa 時，個別壓力計的最大容許壓力值。表 4 的計算結果，可評估方形島塊之壓力計可大幅提升壓力計所受負載之能力。

(三)壓阻式壓力計之電阻變化

圖 8 壓電阻的電阻變化率可由式 (3) 來表示 [5]：

$$\frac{\Delta R}{R} = \tau_l \Pi_l + \tau_t \Pi_t \quad (3)$$

其中

τ_l = 電阻所受的縱向應力

τ_t = 電阻所受的橫向應力

Π_l = 縱向壓阻係數

Π_t = 橫向壓阻係數

對於{100}矽晶圓，若壓電阻沿著主切邊(primary flat)<110>方向製作，則相關之壓阻係數定義如下：

$$\begin{aligned} \Pi_l &= \frac{1}{2}(\Pi_{11} + \Pi_{12} + \Pi_{44}) \\ \Pi_t &= \frac{1}{2}(\Pi_{11} + \Pi_{12} - \Pi_{44}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 Π_{11} 、 Π_{12} 與 Π_{44} 之值由表 5 [6] 可得。經由式(3)之定義，可知電阻變化率($\frac{\Delta R}{R}$)為 τ_l 與 τ_t 的函數。對 R_1 或 R_3 而言，壓力之縱橫方向定義如下：

$$\tau_l = \tau_x \quad (5)$$

$$\tau_t = \tau_y \quad (6)$$

故將計算所得的 τ_x 與 τ_y 代入式中，即可得出各個壓電阻之阻值變化率(R_2 與 R_4 操作亦類似，唯縱橫方向與 R_1 或 R_3 相反)。結果如圖 9、圖 10、圖 11 所示。

(四)壓阻式壓力計之電壓輸出特性

當電阻如圖 8 所示排列時，輸出與輸入電壓之關係式如下：

$$V_{out} = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_0 \quad (7)$$

當 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 時， $V_{out} = 0$ 。而當壓力薄膜受一均布負載時，圖 8 各條壓電阻之阻值會產生變化如下：

$$\begin{aligned} R_1 &= R_3 = R_0 + \Delta R_1 \\ R_2 &= R_4 = R_0 + \Delta R_2 \end{aligned} \quad (8)$$

將阻值變化之式 (8) 代回式 (7)，則得到電壓變化率：

$$\begin{aligned} \frac{V_{out}}{V_0} &= \frac{R_0 + \Delta R_1}{R_0 + \Delta R_1 + R_0 + \Delta R_2} - \frac{R_0 + \Delta R_2}{R_0 + \Delta R_1 + R_0 + \Delta R_2} \\ &= \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2}{2R_0 + \Delta R_1 + \Delta R_2} \end{aligned} \quad (9)$$

若將計算所得之阻值變化率代入式(9)，並假設偏壓 V_0 為 1(Volt)，可直接求出整個電路之電壓輸出 V_{out} 如圖 12。圖 12 的斜率即為壓力計電壓輸出之靈敏度(sensitivity)。靈敏度愈高，則表示壓力計承受單位負載時，所能得到之輸出較大，感測壓力之解析度亦較高。

對壓力計來說，靈敏度與線性度(linearity)是評估其性能優劣的兩個重要參數。在設計壓力薄膜時，不只要注意壓力計輸出之靈敏度高低，更要研究輸出電壓與施加壓力的線性關係，一個線性度良好的壓力計，便於我們估算量測所得之壓力值，以及簡化訊號處理的過程。利用式(9)所得之輸出電壓值可估

算出壓阻式感測器靈敏度與線性度之用。表 6 即為預估之線性度及靈敏度。

五、壓力計的結果與討論

(一)輸出預測與性能評估

以薄膜面積為分野，將較為相近的壓力計 1、4 與 2、5 分成兩組來比較之間的線性度與靈敏度。由表 5 可看出，全薄膜式的壓力計靈敏度皆比相同面積之島塊式壓力計要高，這是由於壓力薄膜之勁度小容易變形所造成。若要承受高壓力，則必然得犧牲靈敏度(不過卻可以在後段製程中設計一放大電路來放大其輸出訊號。)至於線性度方面，在表 5 同一組的壓力計(1、4 與 2、5)中，島塊式壓力計的線性度也有小幅提升。在分析過程中亦可得知壓電阻佈植之最佳區域，以及預估輸出電壓大小，了解壓力計之特性；節省了許多實作測試的繁複步驟與耗費成本，對於日後不同需求之壓力計設計來說，具有相當大的幫助。

(二)壓力測試輸出與預測值之比較

圖 13 為完成圖 2、3 之微細加工製程，並且切割完成的壓力計晶片(仍黏在切割藍膠片之上。)圖 14 晶片背面顯示的島塊凸角補償效果，代表圖 3「背面蝕刻」光罩之凸角補償圖形奏效；而且在完成靜電鍵合之後，發覺中央矽質島塊與邊緣方框一樣，與玻璃鍵合良好。圖 15 則是壓力計晶片黏貼於電路板上，並且打線(wire bonding)、封膠後之情形；圖中的編號 1-3 腳為 DC 偏壓、編號 2-4 腳為輸出電壓。而圖 16 係壓力計晶片完成加壓外罩之封裝；圖 16 的中央洞口為加壓孔，只要從此處接上外加壓力的管路，輔以 1-3 腳 3V 的 DC 偏壓，便可以監控壓力計隨壓力變化的實驗數據。

表 7 即為壓力計施以加壓測試的輸出電壓靈敏度與線性度性能數據。由於壓力薄膜

製作完成的厚度約只有 30 μ m(合作代工的 reverse-biased etch-stop 所需的金屬接點與腐蝕操作上出現些許問題)，尚未達到原先 20 μ m 的規格要求(換言之，實際製作出來的壓力計薄膜結構遠較原先設計為強健)，故而表 7 靈敏度的實驗數據比起表 6 的理論設計值小一半以上；反之，實驗的線性度數據(除了壓力計 2、3 之外)卻略比設計值優良。

薄膜在壓阻式壓力計中扮演著舉足輕重的角色。由於薄膜本身的特性，只要在設計時稍稍改變其構型，往往所得之性能便大異其趣[7][8]。如同本報告中提及兩種形式之薄膜，全薄膜式的壓力計雖具有較高的壓電阻變化率，但由於其壓力峰值區域很小，實際製程很難準確將壓電阻佈植於其上，但新型壓力薄膜上的島塊卻可將應力變化侷限在較狹長的區域如圖 6、圖 7 之深色區域，如此壓電阻較容易製作於其上，整體壓電阻阻值隨壓力變化接近實驗值的程度，反而優於全薄膜式(請比較表 6、7 兩大類壓力計之理論與實驗值差距)；且島塊壓力計亦獲得線性度改善以及壓力負載範圍之大幅提升。綜合來說，島塊式薄膜較傳統形式的薄膜適合於製作高壓力負載之壓力計。

當然同時提昇感測器靈敏度與線性度性能之背後，必須付出代價：因為本壓力計是以體型微細加工法為之，增加中央島塊代表必須花費更大的晶片面積(犧牲許多{111}斜面之有效晶片面積)，或者代表每壓力計晶片之製作成本較為高昂。

六、結論

薄膜絕對是壓力計需要的結構，但不一定得是全薄膜的型式。本計畫經由有限元素分析結果顯示：具有方形島塊的強化型薄膜壓力計，比起同樣薄膜面積的全薄膜式壓力計，可承受 5 倍高的壓力負載而不會損壞，故能夠應用於高壓力範圍的壓力環境中。本

計畫並將應力數據進一步分析轉為電壓輸出，預測出壓阻式壓力計的靈敏度與線性度，並與初步實作完成的壓力計原型測試結果(0-300psi)比對出差異。

七、感謝詞

感謝國科會北區微機電系統研究中心、國家毫微米實驗室、與交通大學半導體中心，開放半導體製程機台供本計畫使用或代工。並感謝台灣矽微電子公司熊治民博士和許志民經理之諮詢協助與協助製程之完成。以及感謝淡江大學機電系李俊賢、楊伯強和許竣為先生在有限元素法 ANSYS 之協助分析。

八、參考文獻

1. Marc Madou, Fundamentals of Microfabrication, CRC Press, New York, pp.200~204.
2. Jackson, T.N., Tischler, M.A. and Wise, K.D., Electrochemical p-n junction etch-stop for the formation of silicon microstructures, IEEE Electron Device Letter, EDL-2, n.2, pp.44-45, 1981.
3. 鄭金郎，新型 SOI-like 壓力計之設置作測試與應用，碩士論文，淡江大學機械工程研究所，2001。
4. ANSYS 6.0 Element Reference Table of Contents.
5. 楊龍杰，認識微機電，第 136-139 頁，滄海書局，台北，2001。
6. Sze, S.M., Semiconductor Sensor, Wiley, 1994, pp.160~184.
7. 江振家，半導體微型壓力感測器之研製，碩士論文，台灣大學電機工程研究所，1995。
8. Yang, L.J., Jian, C.C. and Chang, P.Z., The application of V-groove slot-array method to the piezoresistive pressure sensors, Journal of the Chinese Institute of Engineers, v.20, n.3,

pp.335-341, 1997.

九、圖表彙整

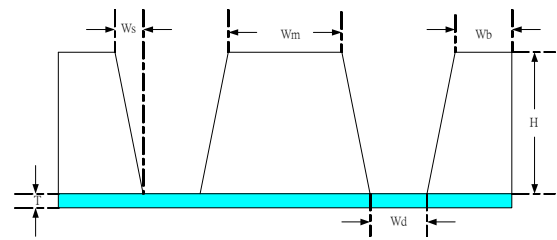


圖 1 壓力計之結構剖面圖。

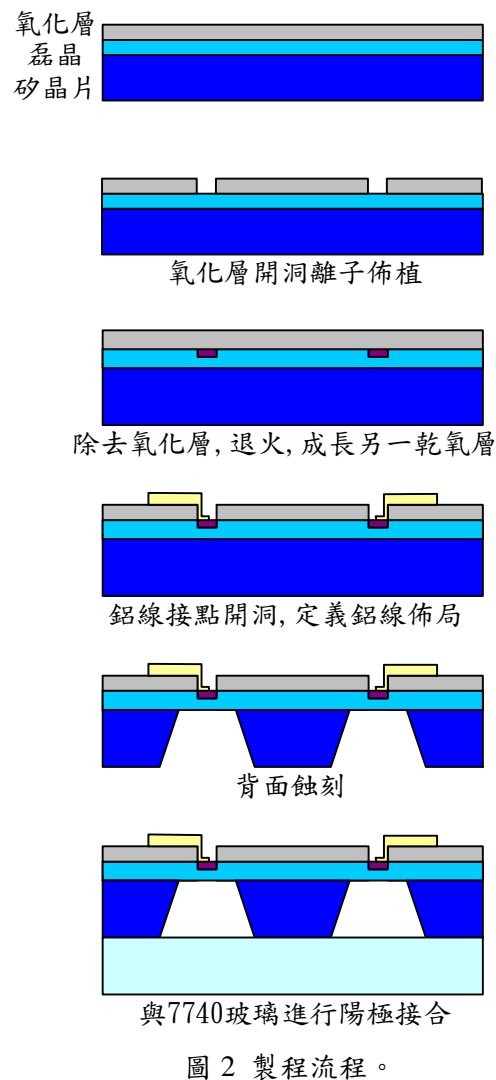


圖 2 製程流程。

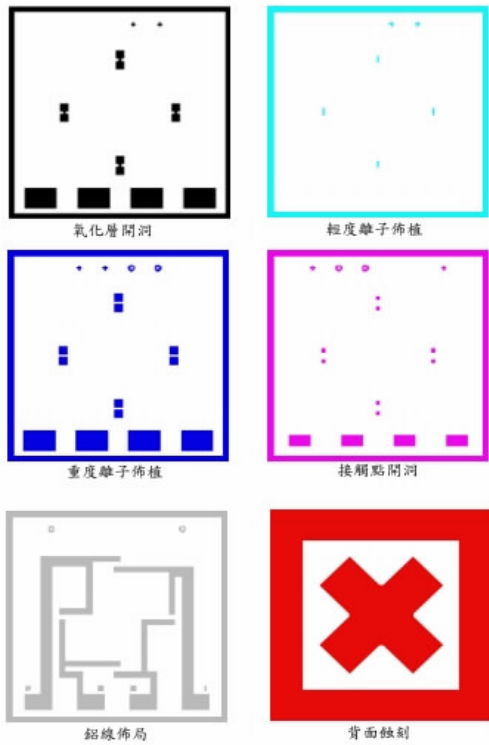


圖 3 光罩示意圖。

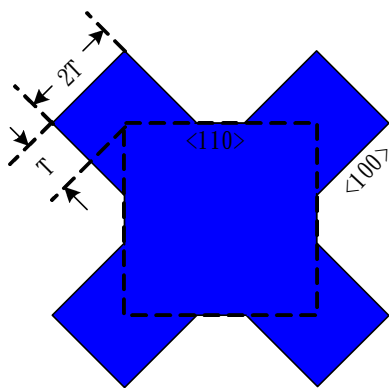


圖 4 凸角補償示意圖。

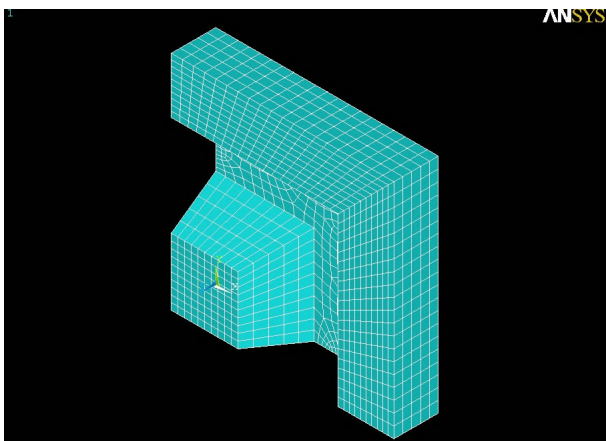


圖 5 壓力計網格分割圖形。

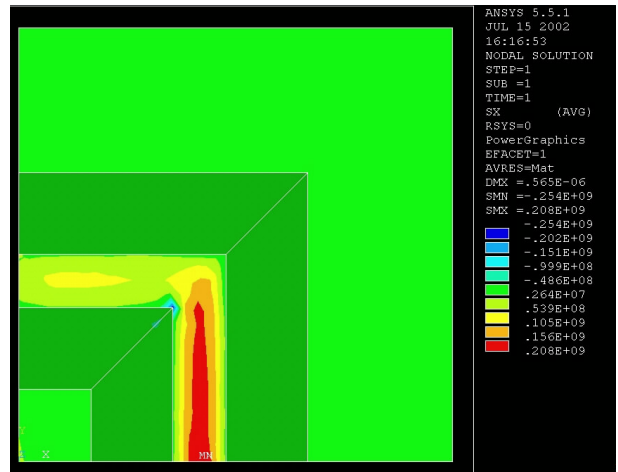


圖 6 X-方向應力分佈圖(1/4 晶片圖)。

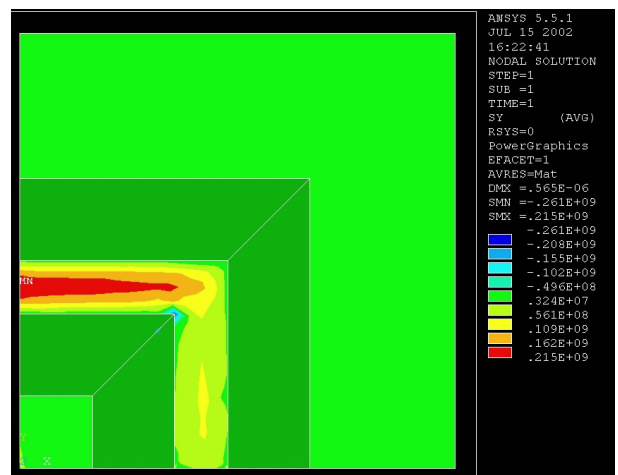


圖 7 Y-方向應力分佈圖(1/4 晶片圖)。

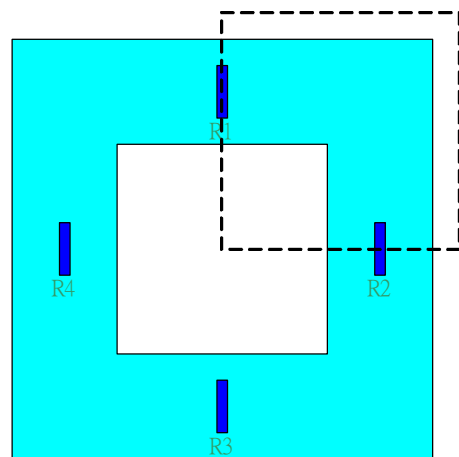


圖 8 壓電阻位置圖；
框線即為圖 5~圖 7 模擬之區域。

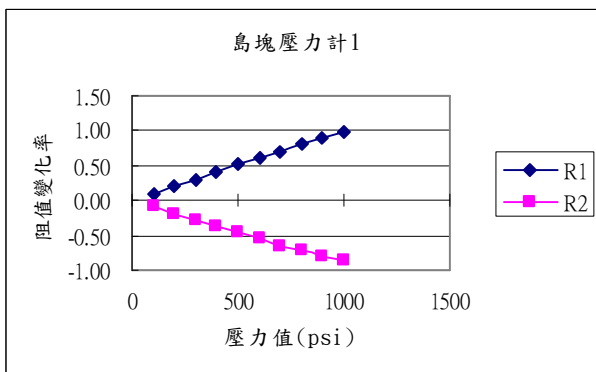


圖 9 島塊壓力計 1 之阻值變化率預測值。

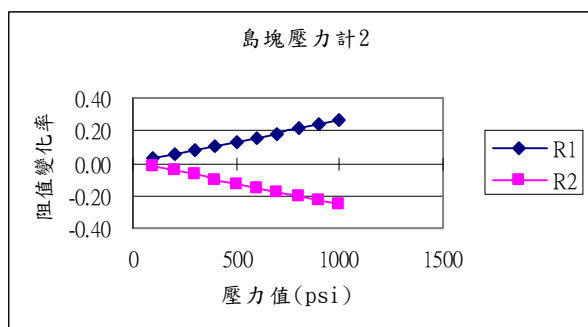


圖 10 島塊壓力計 2 之阻值變化率預測值。

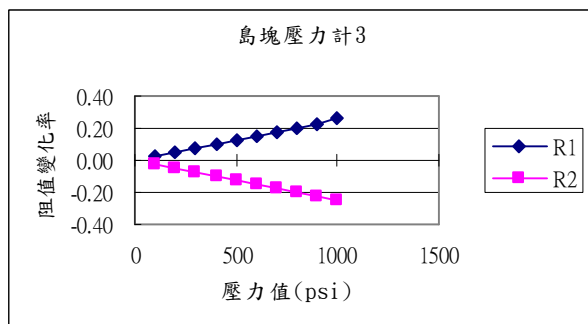


圖 11 島塊壓力計 3 之阻值變化率預測值。

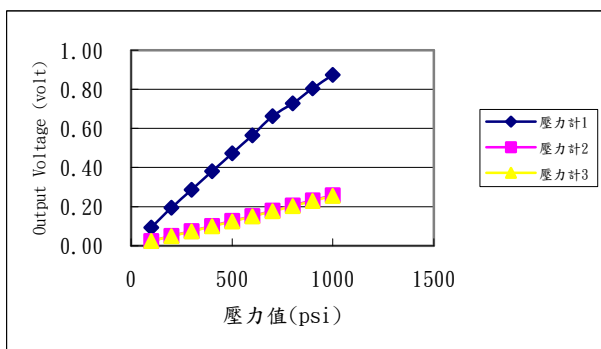


圖 12 不同壓力負載下之輸出電壓預測值。

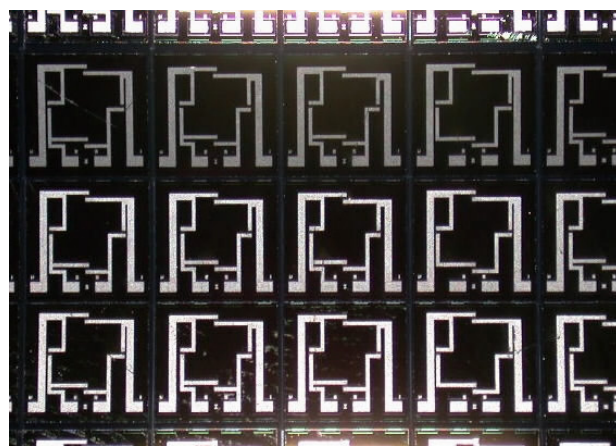


圖 13 切割完成的壓力計晶片(仍黏在切割藍膠片之上。)

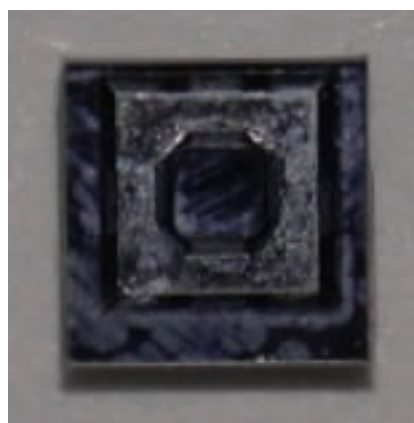


圖 14 晶片背面顯示的島塊凸角補償效果。

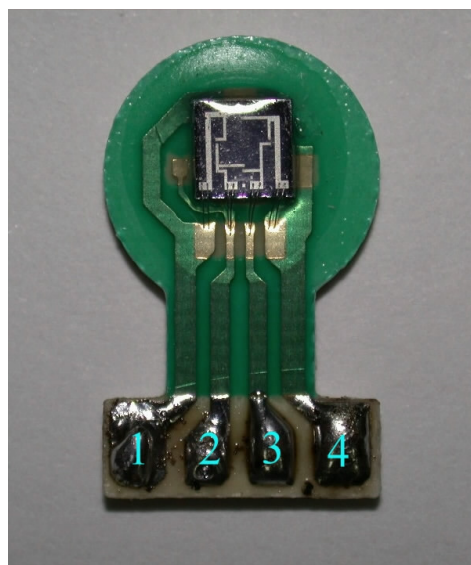


圖 15 壓力計晶片黏貼於 PCB、打線、封膠後之情形。1-3 腳為 DC 偏壓、2-4 腳為輸出電壓。

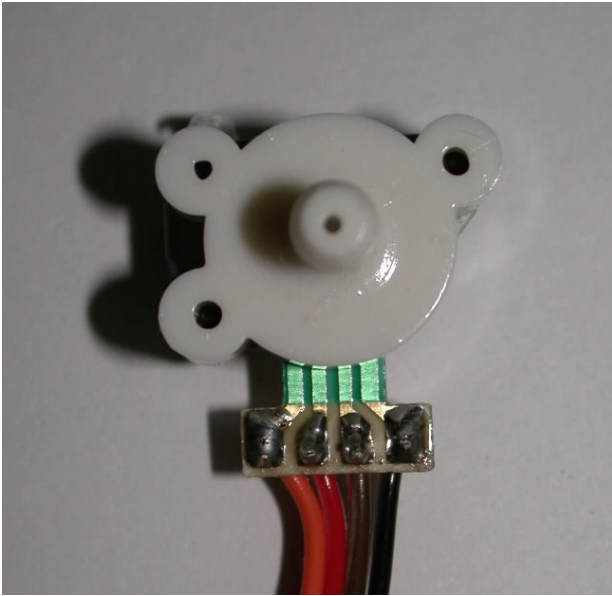


圖 16 壓力計晶片完成加壓外罩之封裝；中央洞口為加壓孔。

表 1 壓力計幾何參數(單位 μm)：

Sensor	島塊壓力計			全薄膜壓力計	
編號	1	2	3	4	5
W_b	500	500	600	595	790
W_m	1200	1500	1300		
W_s	282.5	282.5	282.5	282.5	282.5
W_d	335	185	185	1680	1290

表 2 矽晶片之材料性質[3]：

材料	楊氏係數 $E(\text{GPa})$	剪彈性模數 $G(\text{GPa})$
Silicon<110>	168.0	61.7
Silicon<100>	129.5	79

表 3 本計畫分析所使用之元素特性[4]：

	節點(node)	自由度(DOF)
SHELL63	I,J,K,L	UX,UY,UZ, ROTX,ROTY,ROTZ
SOLID45	I,J,K,L,M,N,O,P	UX,UY,UZ, ROTX,ROTY,ROTZ

表 4 壓電阻最大應力超過 2.33GPa 時，個別壓力計的最大容許壓力值(psi)：

Sensor #		最大容許壓力(psi)
島塊式	壓力計 1	1500
	壓力計 2	6000
	壓力計 3	6000
全膜式	壓力計 4	400
	壓力計 5	900

表 5 室溫下之壓阻係數值 (單位： 10^{-11}Pa) [6]：

Type	ρ ($\Omega\text{-cm}$)	Π_{11}	Π_{12}	Π_{44}
p-Si	7.8	+6.6	-1.1	+138.1
n-Si	11.7	-102.2	+53.4	-13.6

表 6 靈敏度與線性度 (壓力計 4 與 5 為全薄膜式，靈敏度極佳，但 200psi 以上便有損壞之虞)(設計的壓力薄膜為 $20\mu\text{m}$)：

Sensor #		靈敏度 (mV/V/psi)	線性度(%)
島塊式	壓力計 1	0.868	3.63
	壓力計 2	0.259	0.78
	壓力計 3	0.256	1.05
全膜式	壓力計 4	3.532	3.97
	壓力計 5	1.638	1.80

表 7、壓力計的輸出性能比較 (壓力薄膜製作完成的厚度：約 $30\mu\text{m}$ 。)

Sensor #		Sensitivity (mV/V/psi)	Linearity (%)
島塊式	壓力計 1	0.1142	1.57
	壓力計 2	0.0579	3.15
	壓力計 3	0.0588	1.25
全膜式	壓力計 4	0.2425	1.12
	壓力計 5	0.1466	1.78