

電容與電阻感測器與讀取電路系統整合設計

The Integration of the Capacitive and Resistive Sensors with the Readout Circuit Systems

蔡宗亨、曹育齊

Tsung-Heng Tsai, Yu-Chi Cao

本文介紹電容式、電阻式感測器與讀取電路之整合設計，並實現於單一 CMOS 晶片上之技術與研究成果。本文架構主要分四部份，首先是感測器簡介，說明電阻式、電容式感測器的運作原理；感測器與讀取電路整合製作技術於第二部份介紹，可透過微機電 (micro-electro-mechanical systems, MEMS) 技術進行感測器製作，而讀取電路則是由互補式金屬氧化物半導體 (complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS) 技術完成，將兩者整合則為 CMOS-MEMS 技術，用於將感測器和讀取電路同時製作於同一晶片上；第三部份則是說明電容式、電阻式感測晶片的設計與製作流程；最後則是一電容式感測系統的實踐與研究成果。

The design and research of integration both capacitive/resistive sensors and readout circuit on a CMOS chip is described and organized as follows: First part is the introduction of capacitive/resistive sensors; Integration of sensors and readout circuits realized by MEMS and CMOS technique is described in the second part; The third part describes the design flow of capacitive/resistive sensing chip; And the last part is the experimental results of a capacitive sensing chip.

一、感測器簡介

感測器被廣泛地應用於工業、生醫領域以及各式各樣電子產品當中，其功能為偵測所在環境之物理參數變化，並將其轉化為電性訊號，再搭配讀取電路進行訊號放大與處理，即可完成對某物理量的測量或監測。常見的偵測參數與其相關應用如：力 (用於壓力、應力偵測)、位移量 (用於速度與加速度、面積與體積之計算)、流量 (用於流速、質量與體積流量之計算)。感測器依照其工作原理可大致分為電容式以及電阻式兩大類。

1. 電容式感測器

電容器 (capacitor) 為兩金屬板中間存在絕緣層之電路元件，而電容式感測器 (capacitive sensor) 通常為一電容值可改變之電容器。當欲偵測的物理量產生變化時，通常電容器的結構相關參數會因而改變，進而使其電容值 (capacitance) 產生相對應的變化量，接著再搭配讀取電路以此電容值變化量做電性上的訊號處理。電容式感測器主要具有低靜態功率消耗、抗溫度變異、以及易與積體電路 (integrated circuit) 整合製作等優點；缺點則是當偵測訊號變化量較大時其線性度 (linearity) 通常較差。

電容式感測器結構如圖 1 所示，呈懸浮結構，上下電極板為金屬材質組成，而真空的感測間隙用來進行訊號的感測。此結構感測器的電容值 C 可以下列式子來表示：

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{(h_1 + h_2) \frac{\epsilon_0}{\epsilon_d} + g_0}$$

其中 A 為電容感測器面積， ϵ_0 、 ϵ_d 分別為真空跟介電質 (二氧化矽) 的介電常數， h_1 、 h_2 分別為上下極板介電質厚度，而 g_0 為上下極板的距離，亦即此感測器所能感測之間隙大小。

由於感測器電容值 C 可近似為：

$$C = \epsilon_r \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

其中 A 為感測器面積， d 為感測間隙大小， ϵ_0 為真空介電常數， ϵ_r 則是感測間隙內材料的相對介電常數。因此，主要感測原理有兩種：(1) 由待測物理訊號改變感測間隙大小來改變感測器電容值，可用於力、壓力、位移 (置)、加速度偵測。(2) 由待測物介電常數改變感測器電容值，可用於濕度、化學物質偵測。透過改變感測間隙大小來偵測壓力訊號如圖 2 所示，來自待測環境的力訊號 F 將由上方施加於電容感測器的上極板，假設感測間隙內為真空並無填充任何材質，因此上極板受力產生向下，大小為 x 的形變量，使得感測間隙大小由原本的 g_0 變小為 $g_0 - x$ ，由式子 $C = \epsilon_r \frac{\epsilon_0 A}{d}$ 可得知感測間隙 $d = g_0 - x$ 將使得電容值提高，透過此原理達到



圖 1. 電容感測器結構示意圖。

對力、壓力的偵測。於濕度、化學物質偵測方面，則常見將待測物填充於感測間隙中，改變上、下極板之間的介電係數，因而改變整體電容值。

2. 電阻式感測器

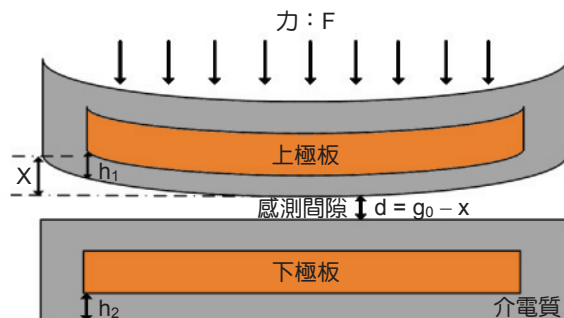
電阻 (resistance) 為一物體對於電流通過的阻礙能力，定義為電阻值 $R = V/I$ ，其中 V 為物理兩端的電壓差， I 則是通過物體的電流。任何能產生電阻值的電子元件都稱為電阻器 (resistor)，而電阻式感測器 (resistive sensor) 即為一電阻值會隨待測訊號改變的電阻器。常見的電阻感測器為壓阻材料 (用於力、壓力偵測)，其電阻值隨施加的壓力改變，如圖 3 所示，具有線性度較佳、易與積體電路整合製作的優點；缺點則是對溫度變化較敏感、製作程序較複雜以及有較大的靜態功率消耗。

感測器的電阻值 R 可表示：

$$R = \rho \frac{L}{ab}$$



圖 2. 電容式感測器壓力偵測原理。



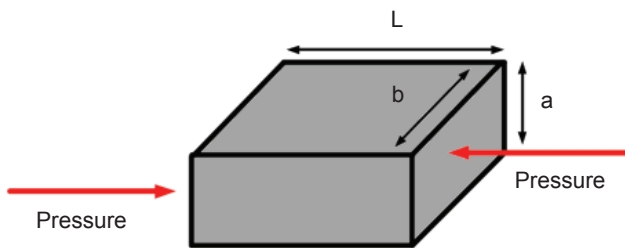


圖 3. 電阻式感測器 (壓阻材料) 示意圖。

其中 ρ 為電阻率 (resistivity), L 、 a 、 b 分別為感測器的長度、高度以及寬度, 感測原理為當感測器受到外力產生變形, 使其電阻值產生改變, 由讀取電路進行此電阻值訊號變化的處理。當壓力施加於壓阻時, 壓阻產生形變, 在長 (L)、高 (a)、寬 (b) 的使尺寸變化分別由下式所示:

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

其中 ν 為蒲松氏比 (Poisson ratio), ε 為應變 (transverse strain), 應變如下所示:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

由以上述關係式, 壓阻材料受力形變後的電阻值 R_ε 可表示為:

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

其中 $\Delta R = -(1 + 2\nu)\varepsilon R$, 定義壓阻因子 (gauge factor) $G = -(1 + 2\nu)$ 壓阻材料的特性可用壓阻因子 G 來表示, 會受到參雜濃度與外在溫度的影響, 當環境溫度改變時, 壓阻會受到溫度影響而造成電阻值飄移。在製作電阻感測器時需要設計懸浮結構, 使得壓阻材料得以發生形變。

二、CMOS-MEMS 技術

一個完整的感測系統包含感測與處理的功能, 由前端感測器結構將待測訊號轉換為電性訊號再交由後端讀取電路進行處理。感測器結構可由微機電 (micro-electro-mechanical systems, MEMS) 技術進行製作, 而讀取電路可透過半導體製程, 如互補式金屬氧化物半導體技術 (complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS) 製作在矽晶圓上。然而, 透過 CMOS-MEMS 技術可以將感測器元件與讀取電路兩者整合於同一顆晶片 (integrated circuit) 上, 完成一個完整的感測系統。以下將介紹感測系統的製造: CMOS-MEM 技術。

1. 互補式金屬氧化物半導體技術

金屬氧化物半導體場效電晶體 (metal-oxide-semiconductor field effect transistor, MOSFET), 為半導體產業中最基本的元件之一, 廣泛的被用在類比電路與數位電路中, 可依照通道極性的不同分為電子占多數的 N 通道型金氧半場效電晶體 (NMOS) 與電洞占多數的 P 通道型金氧半場效電晶體 (PMOS)。互補式金屬氧化物半導體 (complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS), 為一種積體電路的設計製程技術, 可透過此技術在矽晶圓上同時製作 NMOS 與 PMOS 元件。CMOS 名稱原由於 NMOS 和 PMOS 在物理特性上為互補性, 因此被稱為互補式金屬氧化物半導體, 具有較省電以及發熱量較少的優點, 用來製作感測器系統中處理電性訊號的讀取電路。

2. 微機電技術

微機電 (micro-electro-mechanical systems, MEMS) 系統涵蓋機械、電子、材料、光電等領域, 製作的元件大小從微米到毫米等級, 可用來製作感測器元件或是機械結構, 其主要有兩種製造技術: (1) 體形微加工技術 (bulk micromachining), 透過選擇性蝕刻 (selective etching) 的方式對基板進行蝕刻將機械結構製造出來。(2) 面形微加工技術 (surface micromachining), 在基板表面以沉積

(deposition)、蝕刻 (etching) 的方式製作出機械結構。由於 MEMS 技術是使用如薄膜沉積、微影 (photolithography)、蝕刻等類似 CMOS 製程技術，因此 MEMS 元件和 CMOS 技術具有很大的相容性，且兩者元件尺寸也相近。

3. CMOS-MEMS 設計平台

將兩整技術的整合稱為 CMOS-MEMS 技術，即：透過標準的 CMOS 製程進行電路製作輔以上述 MEMS 特有的微加工技術，即可在矽晶圓上製作微米等級的懸浮結構，這些懸浮結構可以產生機械性運動或是形變，做為感測器使用。以 CMOS-MEMS 技術具有下列優勢：(1) CMOS 標準製程中的每一層材料均可做為機械結構或是做為釋放微結構的犧牲層，由於 CMOS 標準製程已具有完善的製程設備和穩定的製程參數，因此可以減少非標準製程所帶來的機台參數之不確定性。(2) 可將 MEMS 感測元件與讀取電路整合成一顆晶片，降低因寄生效應導致訊號的衰減與雜訊的產生。(3) 使用現有的半導體晶圓代工服務可以減少標準製程必須付出的設備成本。

三、感測晶片製作流程

1. 電容式感測晶片製作

電容式感測晶片包含感測器結構以及讀取電路可以透過標準 CMOS 製程製作，接著再透過後製程濕式蝕刻 (wet etching) 步驟將 CMOS 製作出的犧牲層蝕刻掉，釋放電容感測器的感測間隙。

CMOS 0.35 μm 製程一般總共有 4 層金屬以及兩層多晶矽 (polysilicon) 做為材料，可用來製作電路與電容感測器結構，其中金氧半場效電晶體 (MOSFET) 通道長度最小可以至 0.35 μm ，以下將以此標準 CMOS 製程介紹電容式感測晶片製作流程。

電容式感測晶片是以標準 CMOS 製程輔以濕式蝕刻後製程完成製作，感測器結構設計部份，主要包含下金屬極板、犧牲層與蝕刻通道，其中犧牲層將被蝕刻掉形成感測間隙。結構設計上以第四層金屬 Metal-4 做為電容的上極板，第二層金屬 Metal-2 做為電容的下極板，其中上下板金屬有介電層包覆阻擋蝕刻液，而犧牲層則是第三層金屬 Metal-3，需要透過濕式蝕刻將 Metal-3 蝕刻掉進行懸浮結構的釋放且形成感測間隙，另外蝕刻通道則是由 Metal-4 以及連接 Metal-3、4 的通孔 (Via-34) 組成可以讓蝕刻液進入 Metal-3 將其蝕刻掉。除了感測器部份以外，為了檢驗濕式蝕刻是否完成，須額外再設計測試元件 (test key) 進行觀察，測試元件的結構與感測器相似但其少了上下板，使得 Metal-3 上方僅有透明的介電層，後製程結束後即可以由光學顯微鏡觀測 Metal-3 是否蝕刻成功。圖 4 為感測器與測試元件結構剖面圖，由左至右分別為感測器、測試元件。

電容式感測晶片主要有三個製作步驟：(1) 感測器結構與讀取電路經 CMOS 標準製程做於矽晶圓上，這時晶片上只有感測器結構中用來引入蝕刻液的蝕刻孔是裸露的，其餘皆被保護層 (Passivation layer) 覆蓋，保護晶片內不需蝕刻的部

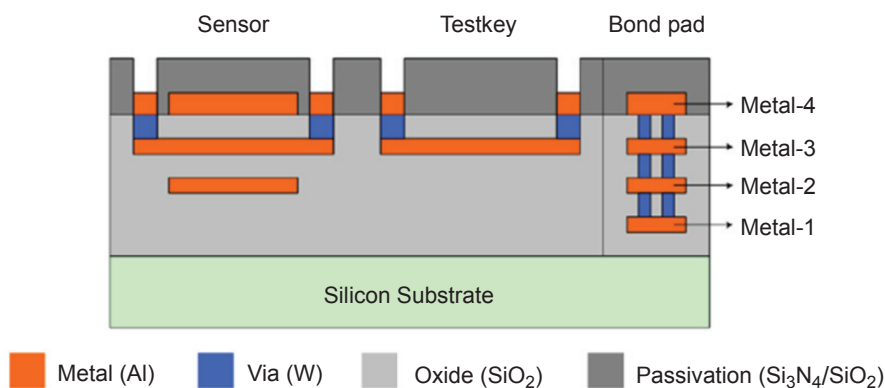
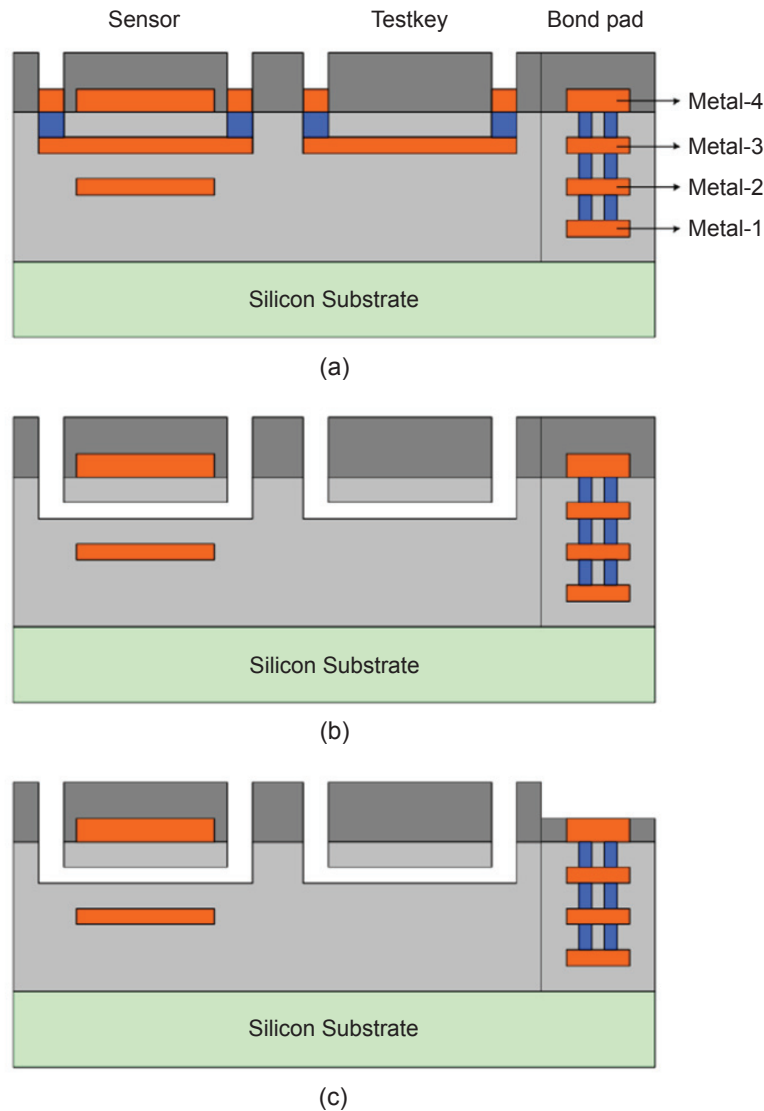


圖 4. 感測器與測試元件剖面示意圖。



■ Metal (Al)
 ■ Via (W)
 ■ Oxide (SiO₂)
 ■ Passivation (Si₃N₄/SiO₂)

圖 5. 電容式感測晶片製作流程圖 (a) 製程廠製作完成 (b) 利用金屬濕式蝕刻的方式釋放懸浮結構形成感測間隙 (c) 利用反應式離子蝕刻的方式將焊墊層上的保護層移除。

位。(2) 接著將裸晶泡入蝕刻液使其經蝕刻通道進入 Metal-3，利用金屬濕式蝕刻的方式將 Metal-3 蝕刻掉，釋放懸浮結構形成感測間隙。(3) 最後為裸晶打線封裝，將晶片封裝保護並接出對外連接線，需要透過反應式離子蝕刻 (reactive ion etch, RIE) 的方式將焊墊層 (bond pad) 上的保護層移除以進行。整個電容式感測晶片製作流程如圖 5 所示，由 (a)–(c) 依序為上述步驟 (1)–(3)。

2. 電阻式感測晶片製作

本章節以 CMOS 0.35 μm 2P4M 製程介紹電阻式感測晶片製作流程。感測器與讀取電路的構造可以透過標準 CMOS 製程先行製作，完成標準製程後接著還需要再透過額外的乾式蝕刻 (dry etching) 步驟釋放懸浮結構給予感測器形變的空間，完成感測器製作。其中乾式蝕刻可分為兩步驟 (1) 使用三氟甲烷 (化學式為 CHF₃) 氣體對氧化層進行

選擇性的非等向性蝕刻 (anisotropic etching)，被定義的蝕刻區域將會被垂直蝕刻直到矽基板 (silicon substrate) 裸露。(2) 使用六氟化硫 (化學式為 SF_6) 對矽基板進行選擇性的等向性蝕刻 (isotropic etching) 來釋放懸浮結構。在結構製作上由 RLS 光罩定義蝕刻區域，使用多晶矽 (polysilicon) 做為壓阻材料並且以第一層金屬層 (Metal-1) 做為阻擋層降低等向性乾式蝕刻造成的側擴散影響，乾式蝕刻剖面示意圖如圖 6 所示。(a)、(b) 分別為上述乾式蝕刻的步驟 (1)、(2)。

四、電容式機器人觸覺感測系統設計

現今已有許多成熟的智慧型機器人產品，如機器人手術系統、工業機械手臂、娛樂性機器人等等，其涵蓋包含機械、電機、光學、資訊、通訊等相關領域。智慧型機器人主要三種要素組成，首先為感測器，使機器人能接收外界資訊，如紅外線感測器、超音波感測器、壓力感測器及攝影機等。第二為致動器，使機器人能產生運動行為，最後則是微控制器，使機器人能將感測器接受到的外界資訊由電腦運算後控制致動器做出相對應的動作。然而，機器人要具有像動物般的靈敏觸覺是相當困難的，目前僅以裝設觸覺感測器接收壓力訊號為主，使機器人藉由對外界壓力的偵測做出相對應的控制。例如：當觸覺感測器裝置於機器人手掌時可做握力偵測並控制機器人使其不會捏壞所抓取的物品；當觸覺感測器裝置於機器人腳底時，可進行足底壓力偵測用來修正走路姿態，控制機器人的平衡，使機器人能在不平坦的地形中行走。以下以三部份說明觸覺感測器系統設計，包含了電容式感測器設計、讀取電容設計以及兩者整合而成的機器人觸覺感測晶片。

1. 電容感測器設計

以微機電模擬軟體 CoventorWare[®] 進行感測器結構設計，軟體提供 2D 設計圖繪製與 3D 模型的建立，並且透過模擬分析可以得到施加於感測器的壓力對應感測間隙的位移量，進而推得所施加的壓力對應感測器電容值變化。我們的設計中提

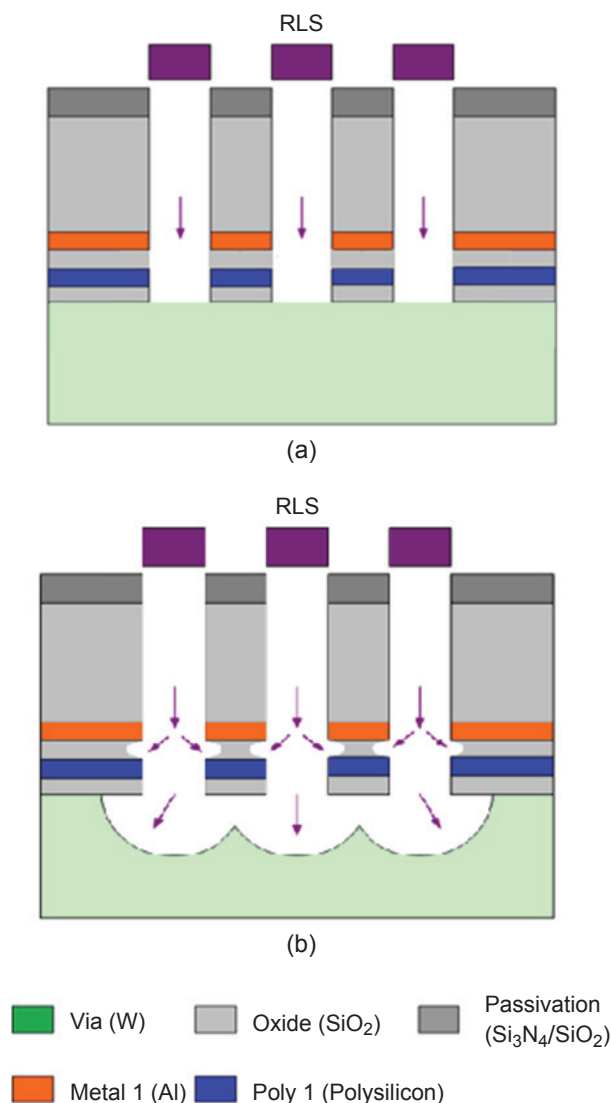


圖 6. 乾式蝕刻剖面圖 (a) 以 CHF_3 氣體對保護層進行選擇性非等向性乾式蝕刻 (b) 以 SF_6 對矽基板做選擇性等向乾式蝕刻

出 T 型結構 (T-shaped) 感測器，提升感測器靈敏度並與一般型感測器結構進行比較與模擬分析。圖 7 為 T 型結構感測器，以 CMOS 0.35 μm 2P4M 製程製作，我們設計第三層金屬 Metal-3 與第一層金屬 Metal-1 為電容感測器上下極板，第二層金屬 Metal-2 做為犧牲層將用來形成感測間隙，而蝕刻通道由 Metal-4、通孔 3-4、Metal-3、通孔 2-3 組成。與一般型結構差異在於上極板多了一個以保護層 (passivation) 組成的 T 型結構突出物，其主要將施加的壓力集中在上極板中央，以增加感測間隙的

位移量進而增加電容值變化量，達到提高靈敏度 (sensitivity) 的效果。透過對 Metal-4 (將於金屬濕蝕刻時被去除) 的布局 (layout) 設計可以精準的控制 T 型突出物的大小和位置。如同先前所提，電容式感測器主要有三步驟製作，分別對應圖 8 的 (a)–(c)，為完成結構製作，再利用金屬濕蝕刻釋放懸浮結構 (T 型結構在此步驟形成)，以及利用 RIE 去除焊墊層上的保護層，方能進行電路系統封裝打線。

在感測器的模擬分析方面，完成結構設計後接著透過模擬軟體進行模擬分析，驗證 T 型結構與一般型結構感測器的靈敏度差異，圖 8 的 (a) 與 (b)，分別為 T 型結構感測器與一般形結構感測器剖面圖。T 型結構感測器透過上極板上方的 T 型突出物乘載壓力並且使施加之應力 (stress) 能集中分布於上極板中央，達到增加靈敏度的效果，以下將說明感測器結構設計以及由模擬結果驗證感測器靈

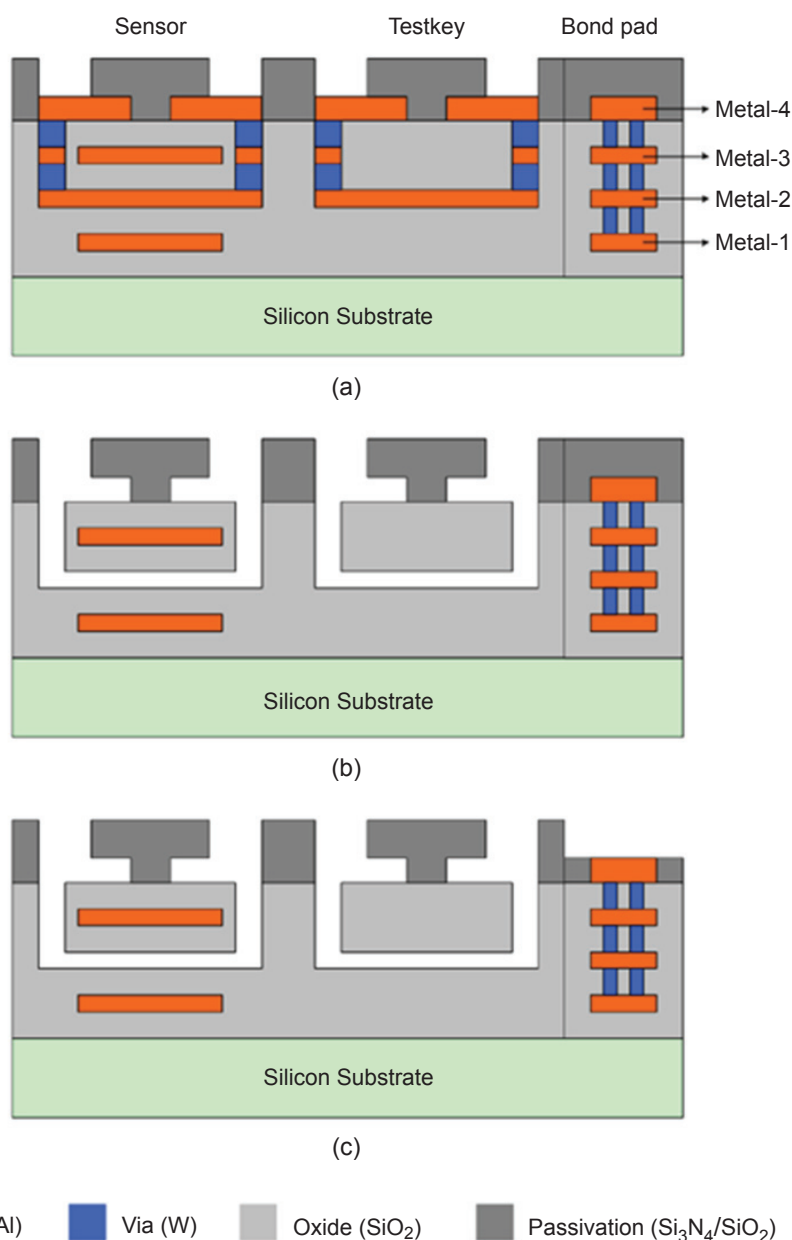


圖 7. T 型結構之電容式感測器製作流程 (a) 製程廠完成 (b) 金屬濕蝕刻步驟 (c) 由 RIE 移除焊墊層上的保護層。

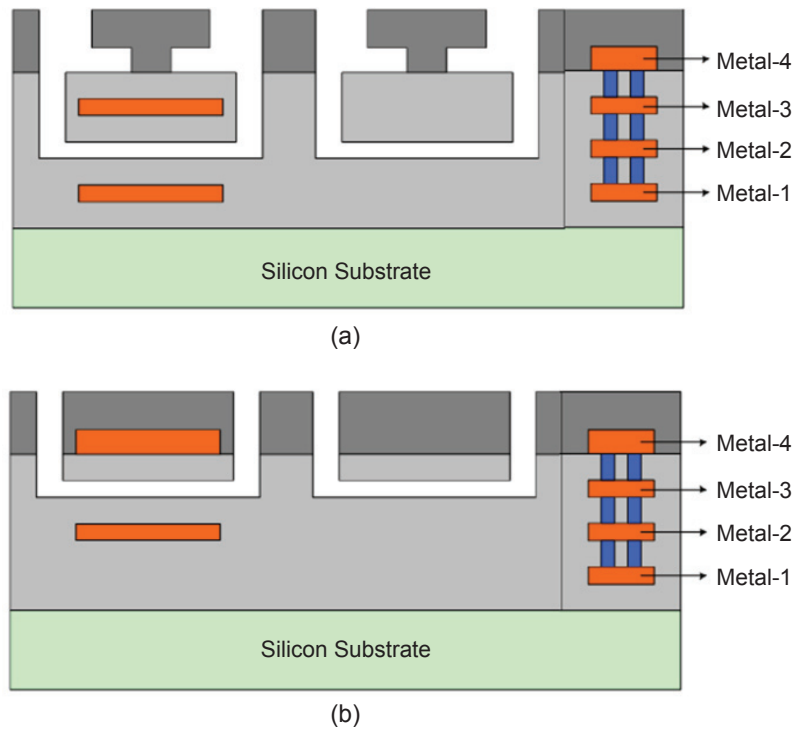


圖 8. T 型結構感測器與一般型結構感測器剖面圖。

■ Metal (Al)
 ■ Via (W)
 ■ Oxide (SiO₂)
 ■ Passivation (Si₃N₄/SiO₂)

敏度之提升。

圖 9 為以 CoventorWare[®] 軟體建構之電容感測器 3D 模型，(a)、(b) 分別為無 T 型突出以及具有 T 型突出結構之設計，圖中紅色部份為感測器上極板與介電層；藍色部份為感測器下極板與介電層，而灰色部份則是由保護層組成的 T 型突出物。兩種結構的上極板均設計為半徑 25 μm 圓盤狀且以 8 根大小皆為 $2 \times 4 \mu\text{m}^2$ 的懸臂梁 (cantilever beam)

做為支撐固定。而 T 型突出物上半部為用來乘載壓力半徑 20 μm 圓盤結構，下半部則是用來集中應力的半徑 10 μm 圓盤結構。

完成感測器結構設計後，接著進行行為模擬，模擬在施加壓力於感測器時，感測器上板的最大位移量分布以及應力分部。在此以 1 MPa 的壓力進行模擬，首先觀察感測器上極板的位移量分布，圖 10(a)、(b) 分別為一般型結構與 T 型結構位移量

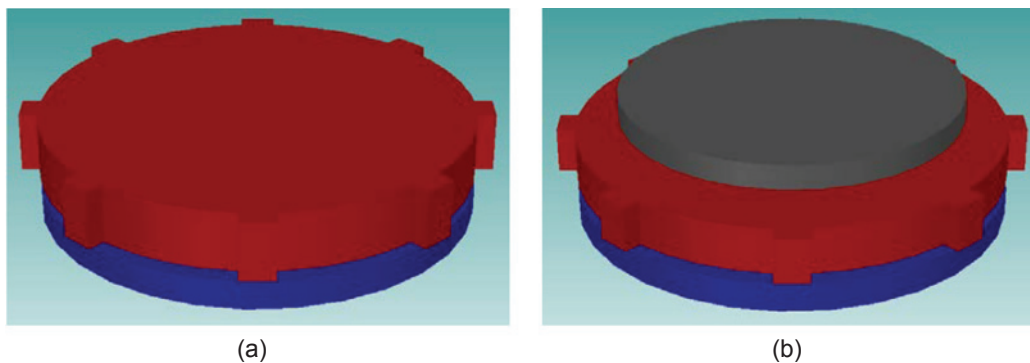


圖 9. 觸覺感測器 3D 模型。

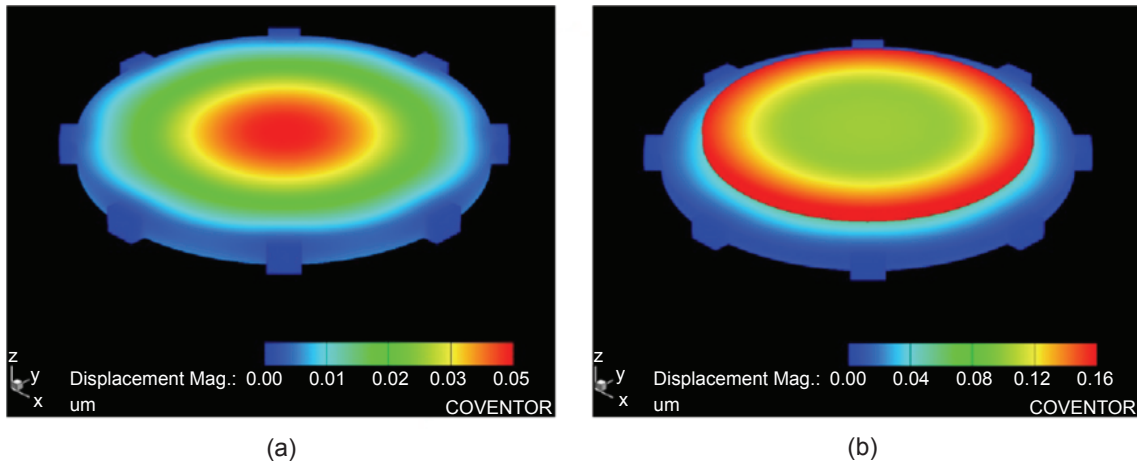


圖 10. 觸覺感測器上極板位移分布圖 (a) 一般型結構 (b) T 型結構。

分布。可以觀察到：一般型結構感測器的最大位移量會出現在上極板中央，約為 $0.05 \mu\text{m}$ ，而 T 型結構感測器則是會出現在 T 型突出物上半部圓盤結構周圍 (因為壓力施加於 T 型突出物造成)，在此 T 型結構感測器最大位移量約為 $0.16 \mu\text{m}$ ，遠小於突出物與上極板間的距離 $0.925 \mu\text{m}$ ，故在操作壓力範圍內皆可確保感測器能正確操作且只要 T 型突出物部因為壓力而碰觸到上極板，施加的壓力還是能夠透過其集中於上極板中央，使 T 型結構感測器具有較佳的靈敏度。

在應力分布模擬部份，圖 11 (a)、(b) 分別為一般型結構與 T 型結構應力分布圖，由模擬結果顯示，一般型結構感測器的最大應力皆發生在支撐的

懸臂梁上，而 T 型結構感測器的最大應力除了發生在懸臂梁上外，還有發生在 T 型突出物上半部的圓盤結構上。

施加的壓力對應感測器位移與電容值變化量的關係如圖 12，(a)、(b) 分別為施加壓力對應感測器位移與電容值變化關係，由模擬結果可知：在相同壓力之下，T 型結構感測器會有較大的形變量，因此也有較大的電容變化量。一般型結構感測器與 T 型結構感測器的靈敏度分別為 $0.3\text{fF}/\text{MPa}$ 及 $1.04\text{fF}/\text{MPa}$ ，T 型結構感測器的靈敏度約為一般型結構感測器讀 3.47 倍，感測器規格如表 1。將應用靈敏度較佳的 T 型結構感測器於機器人觸覺感測系統中。

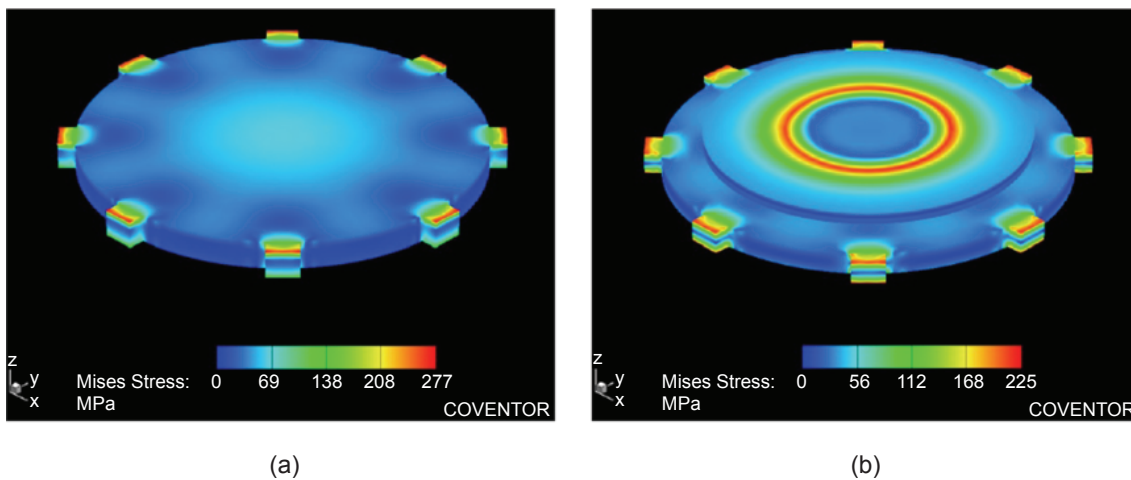
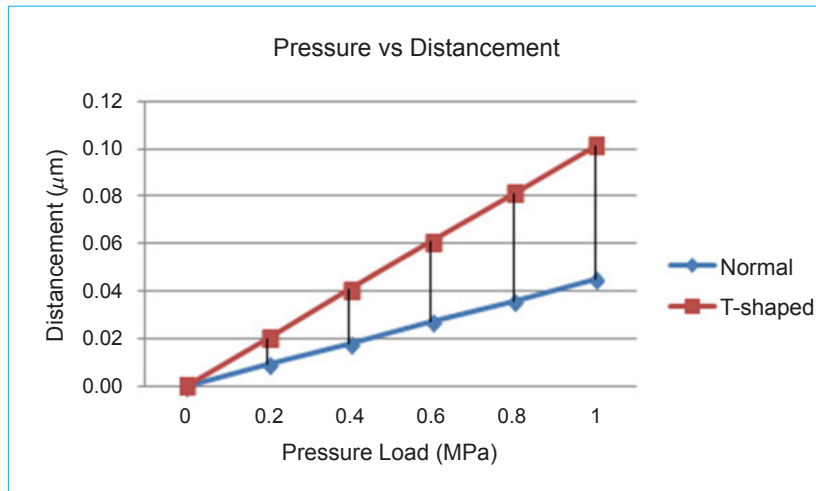
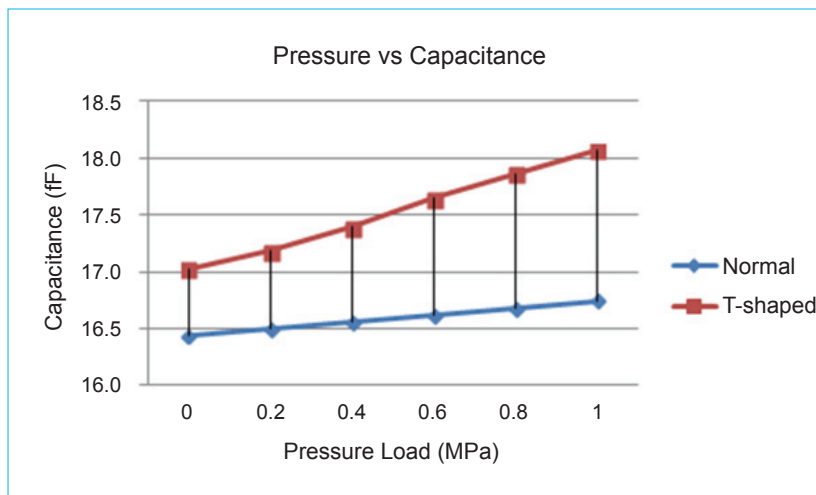


圖 11. 觸覺感測器之應力分布圖 (a) 一般型結構 (b) T 型結構。



(a)



(b)

圖 12. 觸覺感測器之壓力與位移、電容值變化關係圖。

2. 讀取電路設計

電容式的機器人觸覺感測系統如圖 13 所示，包含了前面敘述的 MEMS 電容式感測器以及讀取電路－電容轉電壓轉換器。採用電容轉電壓轉換器 (capacitance to voltage converter, CVC) 做為觸感測系統之讀取電路，其將感測器電容值變化訊號 (感測介面訊號) 轉換為電壓訊號 (電性訊號)，最後交給後端的數位類比轉換器 (analog to digital converter, ADC) 將電壓訊號轉為數位訊號做最後數位訊號的處理。以下介紹電容轉電壓轉換器之設計考量與模擬結果。

表 1. 觸覺感測器規格。

	一般型結構	T 型結構
感測器尺寸	$56 \times 56 \mu\text{m}^2$	
感測器上極板面積	$25^2 \pi \mu\text{m}^2$	
懸臂梁大小／數量	$2 \times 4 \mu\text{m}^2 / 8$ 個	
感測間隙大小	$0.64 \mu\text{m}$	
T 型突出物上半部面積	無	$20^2 \pi \mu\text{m}^2$
T 型突出物下半部面積	無	$10^2 \pi \mu\text{m}^2$
感測器靈敏度	0.3fF/MPa	1.04fF/MPa

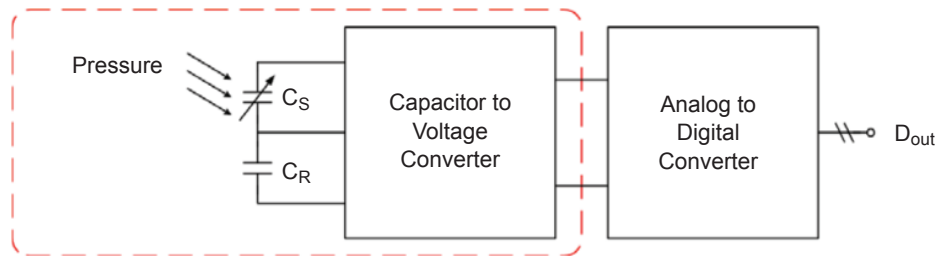


圖 13. 機器人觸覺感測系統架構圖。

首先制定讀取電路的規格，將機器人觸覺感測器的壓力範圍定為 0–400 kPa，為了能精準讀取每 1 kPa 的壓力值，此感測系統的訊號動態範圍 (signal dynamic range) 為 9 位元 (bits)，考慮系統會受寄生效應、製程與環境變易等非理相效應影響，為了提高感測電路的準確性因此將電路的解析度 (resolution) 定為 10 位元，而系統頻寬 (bandwidth) 定為 1 kHz，同時能滿足壓力訊號偵測或是其他生醫應用等需求，由感測器模擬得到的感測器靈敏度、設定的操作壓力範圍，以及電路的目標解析度，整個感測系統的規格如表 2。

圖 14 為整個讀取電路架構圖與時序圖，為一全差動 (fully differential) 的相關性雙取樣 (correlated double sampling, CDS) 電容轉電壓轉換器，主要由兩級放大器 (amplifier) 構成，將感測器偵測到的電容變化轉為電壓訊號並且放大輸出。採用全差動的架構抑制電路的共模雜訊 (common mode noise)，搭配相關性雙取樣技術可以降低放大器輸入端的低頻雜訊和偏移電壓 (offset voltage)。此外，因電容感測器的製作易受到製程變異的影響，為了增加 MEMS 感測器對於製程的容忍度以及抑制讀取電路的輸出偏移電壓，在此另外設計校正機制，以一組切換式電容 (switched capacitor) 陣列做為參考電容器，當電路啟動時先切換參考電容器使電容值 C_R 其逼近感測器電容值 C_S ，完成校正。校正原理如下：將第一級放大器輸出送入遲滯比較器 (hysteresis comparator)，產生計數器的控制訊號使其輸出切換參考電容器陣列，直到參考電容值 C_R 逼近感測器電容值 C_S 。讀取電路於感測器動作將兩電容值差值，也就是感測器電容值變化量轉為電壓訊號，放大後輸出。感測電路的操作需要三個相位，在相位 1 時，電路在做重置，此時放大器

輸入端產生的低頻雜訊以及偏移電壓會儲存在電容器 C_{CDS} 上；在相位 2 時，開關 Φ_{RST} 斷開，此時因電荷注入效應 (charge injection) 造成的開關誤差也會儲存在電容器 C_{CDS} 上，由於放大器採全差動架構，輸出端的開關誤差會彼此抵銷；在相位 3 時，會將偵測到的電容變化訊號放大，並且將上述儲存於電容器 C_{CDS} 上的低頻雜訊、直流偏移給扣除，輸出電壓 V_{OUT} 可表示為：

$$V_{OUT} = V_S \left(\frac{C_S - C_R}{C_{f1}} \right) \left(\frac{C_{CDS}}{C_{f2}} \right)$$

由上式可得知：感測器因壓力訊號而產生電變化後 ($C_S - C_R$)，讀取電路會輸出正比於此電容變化量的電壓。

3. 機器人觸覺感測晶片

完成感測器與讀取電路的設計後，透過 CMOS-MEMS 技術可將兩者整合製作於同一晶片上，形成一完整的感測系統，降低因寄生效應導致訊號的衰減與雜訊的產生。圖 15 為機器人觸覺感測晶片布局圖，採用台積電 0.35 μm 2P4M CMOS 製程，面積為 $1.364 \times 1.23 \text{ mm}^2$ ，上方為感測器與測試元件，讀取電路則是擺放在中間。

表 2. 機器人觸覺感測器規格。

機器人觸覺感測系統規格	
解析度	10 位元
壓力範圍	< 400 kPa
輸出電壓範圍	$\pm 0.9 \text{ V}$ (18 mV/fF)
系統頻寬	1 kHz

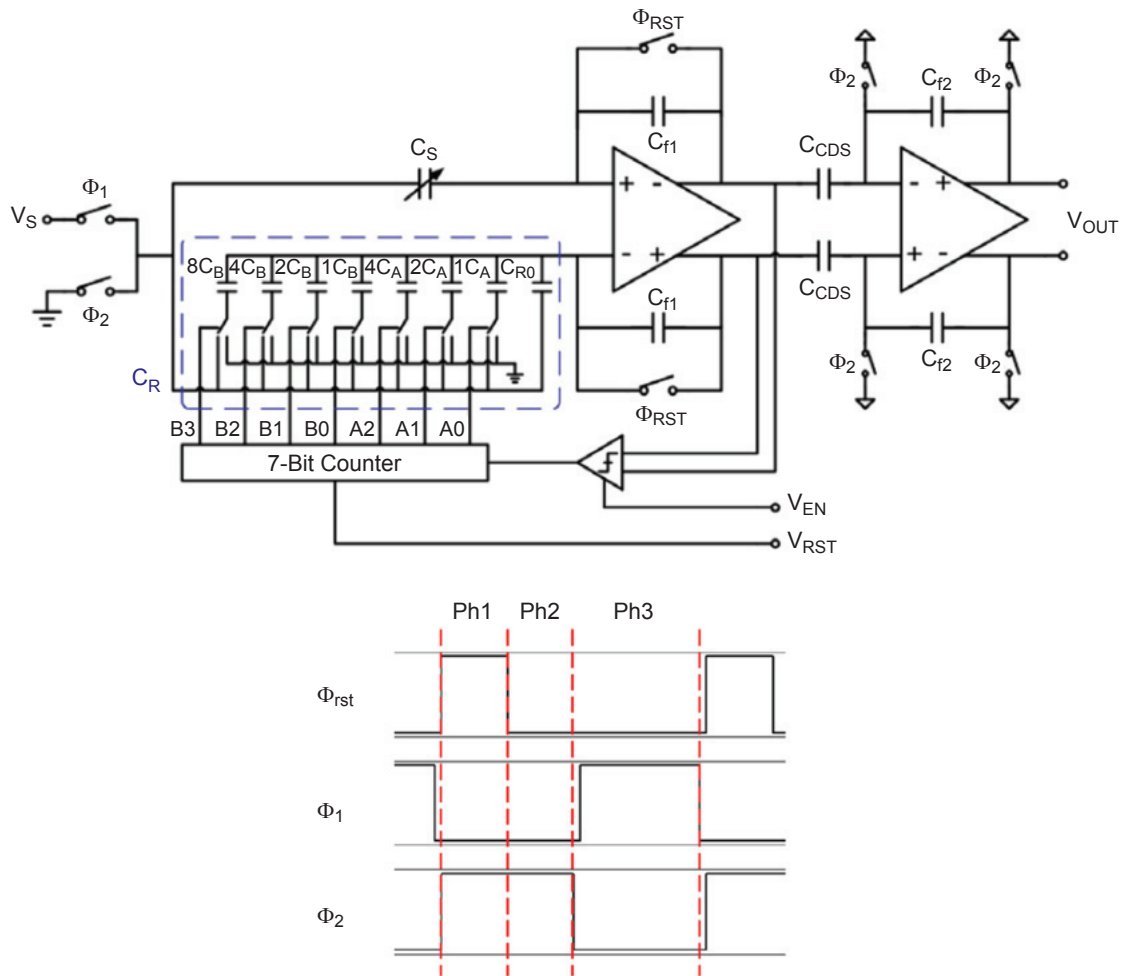


圖 14. 讀取電路架構與時序圖。

當晶片由製程廠製作完成後，接著透過濕蝕刻後製程步驟完成感測器製作，完成後製程後使用電子顯微鏡觀察晶片的蝕刻情形，圖 16 (a)、(b) 分別為蝕刻前、後的晶片照，圖中紅框為測試元件，透過其判斷蝕刻是否成功，可以觀察到在蝕刻前犧牲層的金屬還存在，所以測試元件呈現橘色的金屬光澤；當蝕刻完成後，測試元件由原本的橘色光則轉變為灰色，以此來確定蝕刻完成，懸浮結構已經被釋放。

最後再透過反應式離子蝕刻 (RIE) 的方式將焊墊層上的保護層給去除，使得裸晶能夠進行打線封裝，完成機器人觸覺感測系統設計。進行 RIE 時選用適當大小的矽玻片覆蓋於裸晶上成為 MEMS 感測器和讀取電路的阻擋層，僅讓焊墊層的部分裸

露，使用的 RIE 儀器為 Cello Nasca-20，通入的蝕刻氣體為 CF_4 ，蝕刻參數如表三所示，結束後利用光學顯微鏡觀察蝕刻是否完成，圖 17 的 (a)、(b) 分別為 RIE 前、後的焊墊層照片，完成後可觀察到金屬光澤呈現。

表 3. RIE 參數。

RIE 參數	
蝕刻氣體	CF_4
流量	40 sccm
APC 壓力	25 mtorr
RF 功率	100 W
時間	35 min

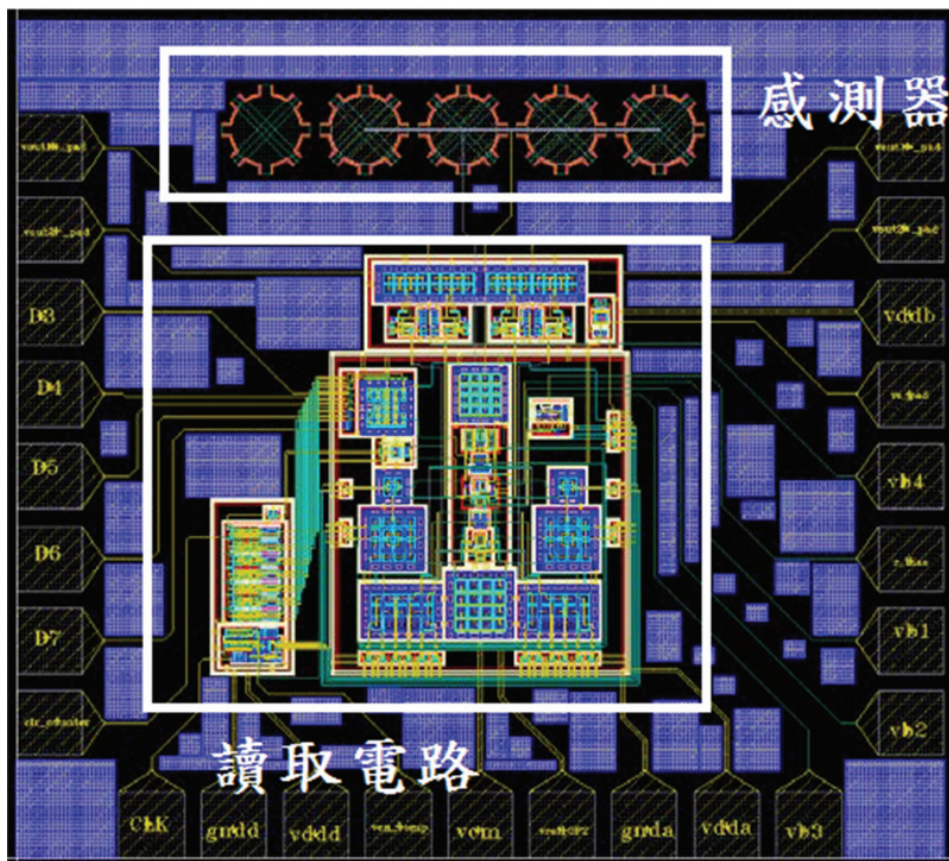


圖 15. 機器人觸覺感測晶片布局圖。

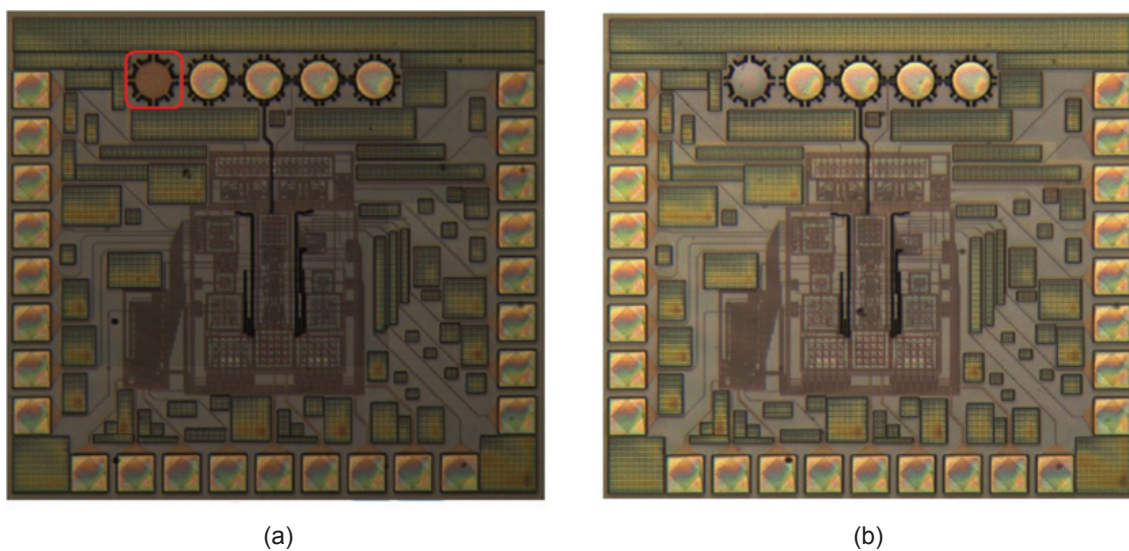
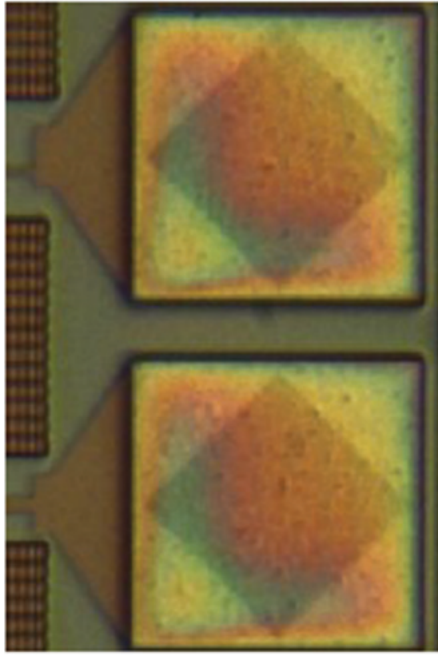
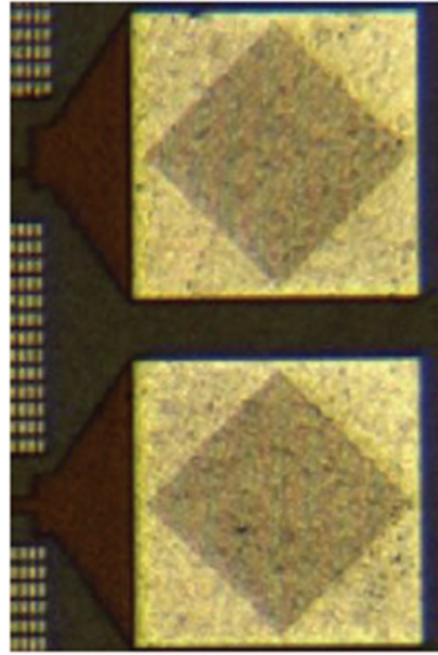


圖 16. 機器人觸覺感測晶片照 (a) 濕蝕刻前 (b) 濕蝕刻後。



(a)



(b)

圖 17. 焊墊層照片 (a) RIE 前 (b) RIE 後。

五、結論

本文介紹了電容式與電阻式感測器運作原理，以及透過 CMOS-MEMS 技術將感測器與讀取電路整合於單一晶片上。並且介紹用於機器人觸覺感測之電容式感測系統單晶片，其中提出的 T 型結構感測器經由模擬驗證可達靈敏度提升的效果，搭配讀取電路完成訊號的放大輸出。透過 CMOS 製程、濕蝕刻以及反應式離子蝕刻後製程完成感測晶片系統設計。

參考文獻

1. 吳典耕 (民 102), 可抵抗製程變異之高靈敏度電容式觸覺感測器 (未出版之博士論文), 國立中正大學, 嘉義縣。
2. 方維倫, 孫志銘, 王傳蔚, 蔡明翰, “CMOS MEMS 微感測器之設計, 製造, 與整合”, 產學合作暨成果發表專刊。
3. CoventorWare, Coventor, Inc., <http://www.coventor.com/>
4. Razavi, *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*. New York: McGraw-Hill, 2005.
5. C. Enz and G. C. Temes, *Proceedings of the IEEE*, **84**, 1584 (1996).



蔡宗亨先生為美國加州大學戴維斯分校電機暨計算機工程博士，現任國立中正大學電機工程學系教授。

Tsung-Heng Tsai received his Ph.D. in electrical and computer engineering from the University of California, Davis, CA, USA. He is currently a professor in the Department of Electrical Engineering at National Chung Cheng University.



曹育齊先生為國立中正大學電機工程研究所碩士班學生。

Yu-Chi Cao is currently a M.S. student in the Department of Electrical Engineering at National Chung Cheng University.