

CMOS MEMS 氣體感測器

CMOS MEMS Gas Sensors

戴慶良、劉茂誠

Ching-Liang Dai, Mao-Chen Liu

各種工業上的應用和環境監控之所需，促使氣體感測器技術快速發展。本文將介紹氣體感測器的發展與原理，並呈現本研究團隊以 CMOS MEMS 技術所製作之濕度感測器與一氧化碳感測器晶片。這兩種感測器皆為電阻式感測器，其構造包含感測器薄膜、感測器電阻、微加熱器和積體電路。利用凝膠溶膠法製備感測薄膜，並將之被覆於感測器電阻上，當感測薄膜吸附感測氣體時，間接使得感測電阻產生改變，晶片中的積體電路則將感測電阻的變化轉換為電壓輸出。實驗結果顯示濕度計的靈敏度為 4.5 mV/% RH；一氧化碳感測器靈敏度為 1 mV/ppm。

Various industrial applications and environmental monitoring require gas sensors so that they develop rapidly. In this paper, the development and principle of gas sensors will be introduced, and the CMOS MEMS humidity sensor and carbon monoxide (CO) sensor developed by my research term will be presented. Both of the gas sensors, which are resistive type, consist of a sensing film, a sensing resistor, a micro heater and readout circuits. The sensing film that is prepared by sol-gel method is coated on the sensing resistor. When the sensing film absorbs or desorbs sensing gas, the sensing resistor changes in resistance. The readout circuits are employed to convert the resistance variation of the sensing resistor into the output voltage. Experiments show that the humidity sensor has a sensitivity of 4.5 mV/% RH at 60 °C and the CO sensor has a sensitivity of 1 mV/ppm.

一、前言

隨著生活品質的提升與科技發展，人們對於週遭環境越來越重視，造就氣體感測市場蓬勃發展，且隨著製作技術的進步，氣體感測器由傳統的陶瓷、液態電化學逐漸發展成為厚膜、薄膜與半導體技術，目前更以微機電技術^(1,3) 製作氣體感測器。氣體感測器在工業與環境之用途甚廣，對於災害防治、工作人員安全與健康之維護、污染防治等方面皆具有相當之重要性。由於各工廠製程中經常會產

生或排放 H₂、CO、SO_x、NO_x 及 NH₃ 等污染性與危險性之氣體，未來隨著工業自動化時代之來臨，氣體感測器之運用將會更加普遍，感測技術也愈趨進步。

目前市面上之氣體感測器多利用陶瓷作為基材，結合網印與燒結方式製作而成。雖然有不錯的靈敏度，但採用單件生產方式 (single-unit production)，不能大量製造，故價格昂貴⁽⁴⁾，且不論熱響應時間或氣體響應時間都略長，降低了實用性。因此，我們將氣體感測器的製作方式與現今的

半導體產業結合，嘗試利用標準 CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) 製程製作氣體感測器，並以發展低價格、低溫、高靈敏度、快速熱響應及氣體響應的氣體感測器為目標。微機電系統的尺寸，不論製作致動器或感測器元件，凡落於 $0.1\ \mu\text{m}$ — $1000\ \mu\text{m}$ 此範圍中，皆可視為微機電系統。而 CMOS MEMS 即為利用 CMOS 標準製程製作微機電結構，其優點為可批次化製造、且輕薄短小，成為 CMOS MEMS 的基本條件，而此條件不僅符合所有消費者所期待，且滿足工程師的創造慾望，同時符合環保、節省能源、空間與材料。而 CMOS MEMS 與 IC (integrated circuits) 兩者間完全融合，故無需使用打線方式連結，如此不論結構與 IC 整合時之阻抗匹配都將得以準確預估，使得生活中使用此晶片時，更安全且具可靠性。

本文將介紹筆者實驗室所研製的兩種 CMOS MEMS 氣體感測器。一者為濕度感測器，另一者為一氧化碳感測器，其製造過程是利用溶膠凝膠法 (sol-gel method) 製作具半導體特性之氣體感測薄膜，而被覆此氣體感測薄膜於 CMOS 中之多晶矽材料，當氣體感測薄膜與空氣或待測氣體接觸時產生能帶變化，間接造成多晶矽電阻變化，以此作為氣體讀出機制。研究團隊利用此機制製作濕度感測器與一氧化碳感測器，並成功地與 IC 整合。

二、微機電製程技術與 CMOS MEMS

MEMS 製程技術方法主要分為面型微加工技術 (surface micro machining)、體型微加工技術 (bulk micro machining) 與 LIGA (lithography electroforming micro molding) 技術，而亦有將兩塊晶片整合技術，例如晶片黏合，以上稱為 MEMS 製程技術，使設計者自由發揮創意，進行結構之設計。而 CMOS MEMS 即利用 CMOS 標準製程製作微機電結構，接著再以面型或體型製程技術，完成後製程 (post-processing)，藉以去除犧牲層 (sacrificial layer)，而犧牲層定義為非結構區之金屬或氧化物結構，需透過 MEMS 製程技術去除。後製程決定了製作元件成功與否，故必須由結構設計確定後，於繪製光罩圖時，即決定犧牲層為何種材

料與如何去除。

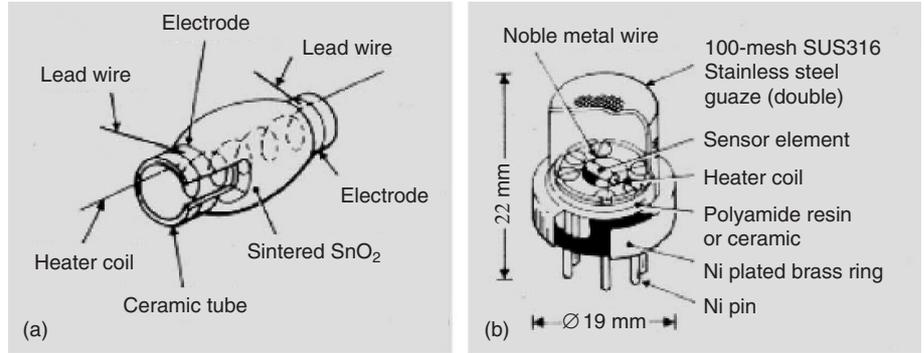
目前著名之表面微加工技術於國外有 MUMPs 和美國聖地牙哥國家實驗室 (Sandia National Laboratory) 之多層複晶矽之微機電製程技術，即屬此類。國內廠商有探微科技的 SMART 製程，此類製程的結構層使用複晶矽、氧化矽或磷矽玻璃 (PSG)、氮化矽及各種金屬，如鋁、金、銅等。而晶片系統設計中心 (CIC) 所推廣之 CMOS MEMS 與上述公司之製程有所不同，雖然皆為標準製程，但以 MUMPs 製程為例，其主要結構為複晶矽，而目前台灣 CMOS MEMS 主要結構由 CMOS 標準製程所決定。例如若以 TSMC $0.35\ \mu\text{m}$ 2P4M 製程製作 MEMS，此製程之金屬層為鋁和鎢插銷，故 CMOS MEMS 結構主要成分亦為鋁和鎢。對於由晶圓廠得到製作完成後之晶片，可利用面型與體型微加工技術去除犧牲層。此外，若須自行沉積金屬於 CMOS MEMS 結構上，則必須考慮構成此標準製程之金屬其最低沉積溫度為何。以鋁為例，其熔點溫度約在 $450\ ^\circ\text{C}$ ，故必須考量後續製程沉積時所需溫度，同時考慮選擇適宜設備。

三、氣體感測器之種類

氣體感測器目前約分成四類。(1) 電化學式氣體感測器 (electrochemical gas sensors)⁽⁵⁾：用雙電極或三電極式電化學感測器製造技術，此技術可應用於量測任何一種氣體，只要能在適當的電極上產生電化學的氧化還原反應即可。其原理乃是在電晶體的閘極之上被覆一層絕緣物質，再外加電場於半導體，造成其電子之堆積或空乏，當氣體吸附於絕緣層時，電子通路之電子吸附現象發生變化，在適當之電路設計下，若能維持電流不變，則其電壓與氣體濃度成一函數關係，可用於氣體濃度之測定。此型感測器之優點為穩定性高、耐高溫與強酸，缺點為靈敏度較低。(2) 紅外光氣體感測器 (IR gas sensors)^(6,7)：不同氣體對於紅外光有不同的吸收特性，利用此特性量測不同氣體的濃度。(3) 觸媒燃燒式氣體感測器 (combustion gas sensors)⁽⁸⁾：使用觸媒燃燒的方法，燃燒碳氫化合物產生熱，量測溫度升高多寡，以定量碳氫化合物氣體濃度，此方式是一

圖 1.

(a) Figaro 公司一氧化碳產品之架構圖，(b) 實際產品之包裝圖⁽¹¹⁾。



種最簡單的氣體感測器，能偵測爆炸點以下高濃度的可燃性氣體。被測的氣體與感測元件接觸，進行氧化反應放熱，導致感測元件溫度上升與電阻變大，使得元件電橋之輸出端電壓上升。利用電壓與感測氣體濃度成正比之關係，達到感測的目的。優點為訊號輸出與濃度成線性，且不受溫度、濕度影響。缺點為選擇性差，易受其他可燃性氣體干擾，電極易受污染。(4) 固態半導體型 (semiconductor sensor)：當待測氣體被金屬氧化物吸附時，會造成感測元件輸出電阻訊號的改變，電阻的變化為氣體濃度的函數，利用此一關係來偵測氣體濃度。優點為反應速率快，對低濃度氣體之輸出訊號變化大、感度高，使用壽命長。缺點為選擇性不佳。

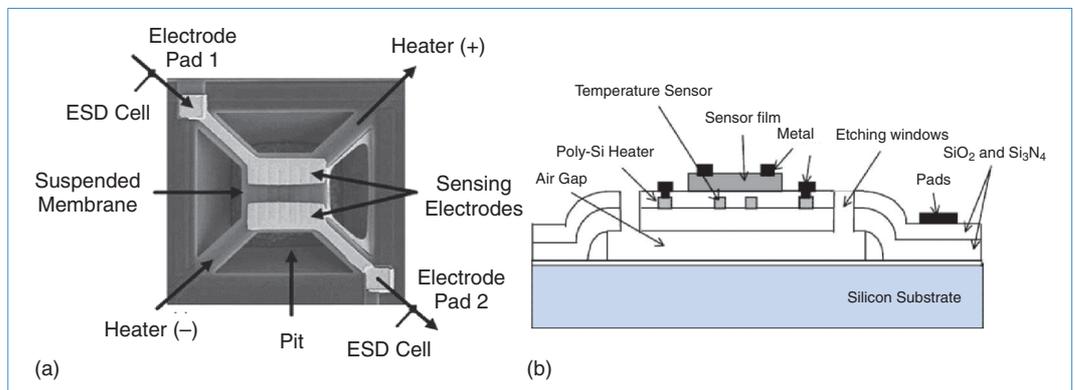
以上四種氣體感測模式中，固態半導體型最適合使用於 CMOS 製程，因為無論使用化學性或物理性製作氣體感測薄膜，其薄膜皆具半導體特性，而 CMOS 標準製程中積體電路亦為利用外加偏壓，使電子或電洞累積成為通道 (channel) 後，以控制 MOS 行為。於氣體感測原理時提及，感測薄膜吸附或釋放氧離子時，感測薄膜表面電位增加或減少，此特性如同外加偏壓般，可控制 MOS 之輸

出電流。故 1970 年 Piet Bergeld 於 IEEE 中發表半導體離子感測器－離子選擇性場效電晶體 (ISFET)⁽⁹⁾，將多晶矽層蝕刻後，用二氧化錫層與待測溶液直接接觸，使二氧化錫表面產生介面電位，進而造成其輸出電流之改變，以達到偵測待測液體之離子濃度。之後 Piet Bergeld 更發表延伸式離子感測場效電晶體 (EGFET)，其為一發展自 ISFET 之元件，保留了 MOSFET 中原來之金屬閘極，將感測膜鍍於金屬閘極延伸之另一端。

另外於 1952 年 Hersch 提出隔膜原電池型 (galvanic) 氣體感測器。1953 年 Weisz 發現氧化物半導體會因為氣體在氧化物半導體的表面作吸附作用或是去吸附作用，而造成電阻的變化。1962 年 Seiyama⁽¹⁰⁾ 首先成功的利用氧化鋅來偵測氣體含量。其主要原理是一氧離子 (O⁻) 在半導體材料表面從事吸附或去吸附反應時，會牽引住材料內部的電子或釋放電子，進而造成材料整體電阻改變。1968 年日本 Figaro 公司首先將半導體型可燃性氣體感測器實用化，如圖 1 所示⁽¹¹⁾。有了前述之研究基礎，之後所發表有關於氣體感測器之研究皆以二氧化錫為基礎，如圖 2 所示。

圖 2.

以二氧化錫為吸附層之感測器表示，(a) 使用體型微加工技術⁽¹²⁾，(b) 使用面型微加工技術製作氣體感測器⁽¹³⁾。



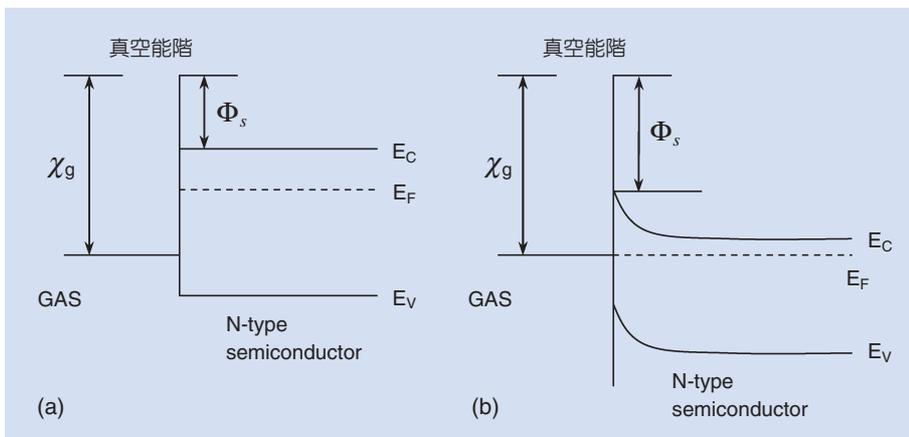


圖 3. N 型半導體蕭特基能障型之能帶圖，(a) 氧化氣體與半導體接觸前的能帶圖，(b) 為氧化氣體與半導體接觸後之能帶圖，其中 χ_g 為氧化氣體之電子親和力值， Φ_s 為半導體的功函數， E_C 為半導體之導電帶， E_V 為半導體之價電帶， E_F 為半導體之費米能階⁽¹⁴⁾。

圖 2(a) 與 (b) 為使用 Figaro 概念製作而成之 CMOS MEMS 感測器，如圖可見感測薄膜、加熱器、溫度計與 air gap，其中圖 2(a) 使用體型微加工技術，蝕刻矽基材後得到懸浮結構；圖 2(b) 使用面型微加工技術，移除犧牲層後，亦得到懸浮結構，而得到懸浮結構之目的。為防止加熱器溫度造成 MOS 熱漂移電流，故需有空氣層，使感測區與矽基材隔離。此方式雖已使用 CMOS 標準製程製作氣體感測器，但其工作溫度達 300 °C 以上，不僅功率消耗大，而且製程複雜，並不符合實際之應用。其二氧化錫感測層是利用濺鍍方式被覆，被覆完成後再進行熱退火，其特色為感測層本身緻密性高，而表面緻密性高，氣體不易進入，但容易導致氣體只限於感測膜表面做氣體吸附與釋放，而其結果就須將工作溫度提高。

綜觀 Figaro 與 ISFET 模式之氣體感測器，前者為當待測氣體與金屬氧化物接觸時，於晶粒表面產生蕭特基接觸。晶粒中施體電子與氧吸附，其自由載子減少，使能障升高，而當金屬氧化物吸附氣體後減少，釋放自由電子，故能障降低，進而亦降低感測器本身電阻。由於 Figaro 方式為使用感測薄膜直接讀出方式，其電阻值過大，不易與 IC 匹配，難以與 IC 整合。且金屬氧化物若沉積後需進行熱退火，此退火溫度若高於 CMOS 中沉積金屬之溫度，將造成傳輸金屬線融化，進而破壞金屬線。且其工作溫度極高，必須使感測區懸浮，以遠離矽基材。故此方式與 CMOS 製程整合有極高之難度。而 ISFET 模式為移去 MOS 中間極，使通道直接露出於空氣中，再將感測薄膜塗佈於通道，

用感測薄膜與氣體接觸時，間接造成通道中之傳導電子增加，使輸出電流增加。此方式優點為容易與 IC 整合，且反應快速靈敏，缺點為易受溫度及光影響，而造成電流熱漂移，產生不穩定輸出，且 MOS 工作於三級區輸出電流小，後續訊號處理有一定難度，故 ISFET 雖然靈敏，但缺點亦多。

由以上介紹，大致描述了氣體感測器之發展，目前研究幾乎偏重於使用 Figaro 與 ISFET 之模式為氣體讀出模式。

四、固態半導體感測器原理

氣體感測薄膜具半導體特性，故以能帶圖解釋感測薄膜吸附與釋放作動氧離子方式，解釋其作動原理。當氣體分子碰撞到半導體表面時，若氣體分子的電子親和力大於半導體的功函數，為了使兩者的費米能階相同，吸附的氣體分子會從半導體表面捕捉電子，直到平衡為止，此能帶接觸稱為蕭特基能障型 (Schottky barrier type)，如圖 3 所示。由於電子聚集於吸附的氣體表面，累積空間電荷，使半導體表面形成一電子空乏區，進而使電阻上升。圖 3(a) 為氧化氣體與半導體接觸前的能帶圖，由圖中可見，氧化氣體之電子親和力值 (χ_g) 大於半導體功函數 (Φ_s)，故為蕭特基能障。圖 3(b) 為氧化氣體與半導體接觸後之能帶圖，半導體接觸氣體後之功函數增加，造成電阻上升。

圖 4 為二氧化錫之氣體偵測器導電方式模型，表示二氧化錫晶粒間接觸氣體之能帶變化，利用蕭特基能障型作為介紹基礎，主要針對以粉末燒結與

濺鍍方式而成的氣體偵測器為模型的理論基礎，也是感測薄膜尚未添加白金 (Pt) 或鉛 (Pd) 等等催化劑 (catalyst) 時最常被接受的模型。如圖 4 所示為雙蕭特基界面模型的示意圖，圖中顯示三個各別的 N 型半導體 (如二氧化錫) 晶粒。圖 4(a) 中表示以物理的模式，氧吸附晶粒表面，吸附的氧會於晶粒表面附近之區域拔出傳導電子，形成氧離子 (O^-)。電子被拔除的區域形成電子空乏區，空乏區比晶粒內部具有更高的表面能量，形成能障，導致有絕緣的表面層形成。一般將此區域稱為表面空間電荷層 (surface space charge layer)，也稱為空乏層。在晶粒的邊界有雙蕭特基界面模型存在。假設晶粒內部含有大量的電子，然而，若要有導電的情況發生，則電子必須從一個晶粒通過晶界，而進入另一個晶粒，在此過程中，電子必須通過表面的絕緣層。圖 4(b) 所表示的與圖 4(a) 的束縛模型一致，顯示出晶粒的傳導帶，電子從晶粒表面附近的區域，被吸附的氧拔出，而留下正電荷施體離子後，並在正電荷施體離子與表面上的負電荷離子之間，發展出一個電場。圖 4(b) 顯示在晶粒的內部中，傳導帶的電子如何越過一個能障與電子移動到附近的晶粒之電

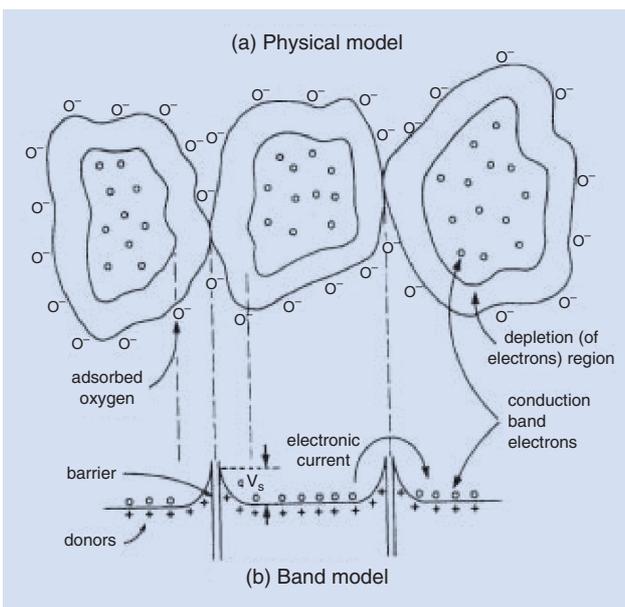


圖 4. 雙蕭特基界面模型⁽¹⁵⁾。(a) 三個被氧吸附的晶粒提供表面的空乏層，(b) 是與 (a) 圖一致的能帶模型。

場有關。必須越過的能障表示為 qV_s ， V_s 隨著 O^- 的濃度增加而增加。有足夠能量越過此一能障的電子密度為 n_s ，利用波茲曼方程式⁽¹⁶⁾ 得到； $n = N_D \exp(-qV_s/kT)$ ，其中 q 代表載子的電量 ($= 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)， qV_s 為表面電位， k 為波茲曼常數 ($= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)， T 代表絕對溫度 (K)。 N_D 代表施體的濃度，通過顆粒的傳導性正比於 n_s ，表面有愈多的氧吸附形成氧離子，就會形成較高的能障，使得較少的電子可以傳輸通過此能障，形成較高的電阻。

如上所述利用蕭特基能障解釋氣體感測薄膜之物理特性，由此得知感測薄膜吸附或釋放氧離子時，感測薄膜表面電位增加或減少，此改變造成電阻上升或降低，故藉以量測薄膜電阻值，以得到環境氣體之狀況。

五、CMOS MEMS 氣體感測器

本節將針對筆者研究團隊所研製的兩種 CMOS MEMS 氣體感測器作實例介紹。

1. 濕度感測器

利用感測薄膜與多晶矽之能帶相互吸引之方式讀出氣體濃度，吾人稱為間接讀出 (indirect readout)。以下介紹以間接讀出與 IC 整合多晶矽於 CMOS 標準製程中為電阻和 MOS 閘極之用，故其位於最下方，選擇多晶矽為間接讀出電阻，使用 HSPICE 設計電壓放大器 (voltage amplifier)，而此電路輸入電壓為定值，多晶矽置於空氣中即於表面產生自然氧化層 (native oxide) 約為 20–45 nm，此氧化層作為隔離層，目的為不使感測膜與多晶矽並聯。

預計測量為濕度，故使用三氧化鎢 (WO_3)。因水蒸氣部分解離成為氫氧根離子與氫原子，其中氫原子與三氧化鎢中之氧離子結合成為氫氧根離子，形成氧空缺，並釋放電子，造成電阻下降，而此機制與第 4 小節中，N 型半導體材料與空氣接觸時產生蕭特基能障產生對比，故利用此方式作為濕氣讀出方式。其三氧化鎢感測薄膜製作方式為，將 $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ 與去離子水均勻攪拌混合，靜置後產生沉澱物，之後再將 H_2SO_4 加入沉澱物中，再

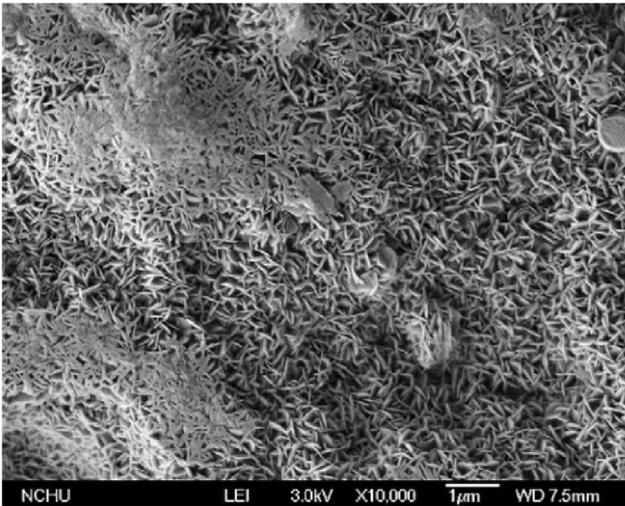


圖 5. 三氧化鎢之電子顯微鏡圖⁽¹⁷⁾。

均勻攪拌後靜置，得到黃色沉澱物，此即為 WO_3 。而將此沉澱物熱烤後，拍攝電子顯微鏡如圖 5 所示。由圖中可知，此三氧化鎢感測薄膜具奈米尺度，感測面積增加，可增加薄膜靈敏度。

因多晶矽位於 CMOS 製程最下方，故需透過面型微加工技術移除多晶矽上方之堆疊金屬。圖 6(a) 為經過完整 CMOS 標準製程後之剖面圖，圖中可見多晶矽上方金屬相互堆疊，圖 6(b) 經由後製程後，移除堆疊金屬層，圖 6(c) 經過後製程，晶片置於空氣中產生 native oxide 後塗佈感測薄膜，於烤箱中烘烤後，因利用溶膠凝膠法製作感測薄膜，而感測薄膜為具 N 型半導體特性之 WO_3 ，其製作完成後為液態，故須經過烘烤過程使之成為薄膜，此溫度亦符合 CMOS 標準製程。塗佈氣體感測薄膜於多晶矽上方後，若感測薄膜與待測氣體產生氧化或還原反應，因感測薄膜表面有電子累積而產生表面電位，利用此表面電位吸引，隔著 native oxide 之多晶矽電洞，間接改變多晶矽能帶，此現象造成電阻改變。間接讀出之方式為透過多晶矽與感測薄膜能帶間相互吸引，造成多晶矽電阻改變以達到感測目的。間接讀出之優點為無需再校正感測器之電阻，因多晶矽本身即為 IC 中電阻，感測薄膜塗佈上方後，即具感測效果，故於製作品片前即可使用 HSPICE 作電路模擬。圖 7 為光學顯微鏡圖，由圖中感測區可見淡綠色，此表示已

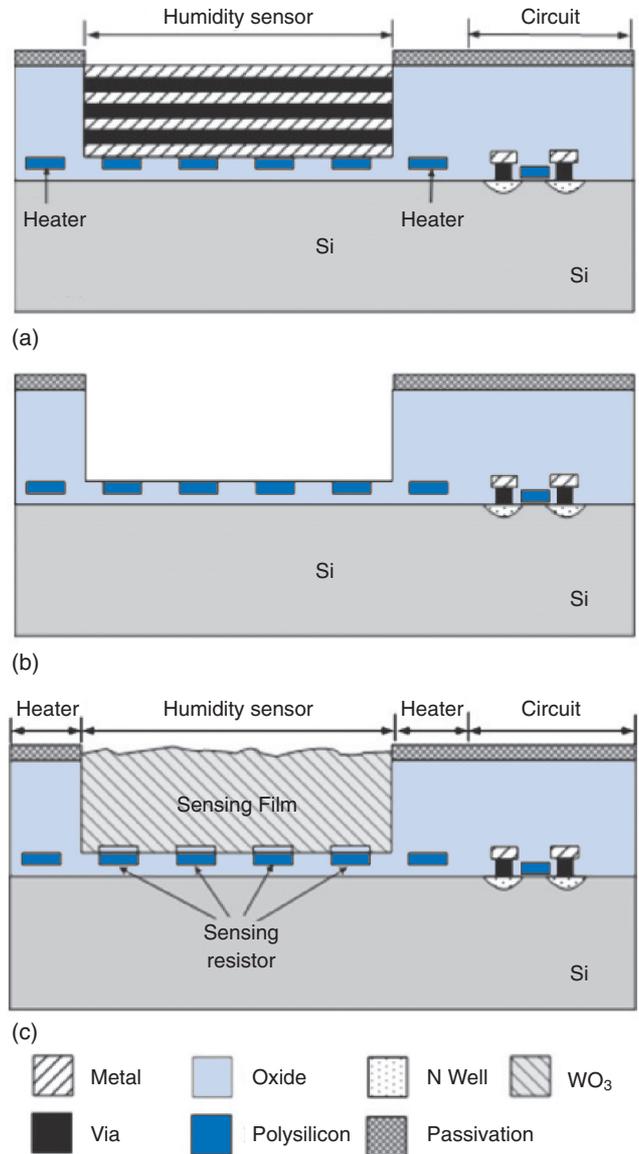


圖 6. CMOS MEMS 感測器後製程流程。(a) 於晶圓廠完成標準流程後之剖面圖，(b) 使用蝕刻液去除多晶矽上方金屬，(c) 產生 native oxide 後塗佈感測薄膜。

於多晶矽上方產生 native oxide。量測 IC 之輸出電壓，置放於恆溫恆濕機中，調整不同濕度即可獲得相對輸出電壓，先測試感測器穩定度，如圖 8 為磁滯曲線測試結果，溫度固定於 $75^\circ C$ ，而濕度由 25 升高至 85 (%RH)，加濕與去濕動作皆為 35 分鐘，由此測試結果呈現線性變化，感測器作動穩定。圖 9 為溫度由 $25^\circ C$ 升高至 $75^\circ C$ 、溼度由 25% RH 升

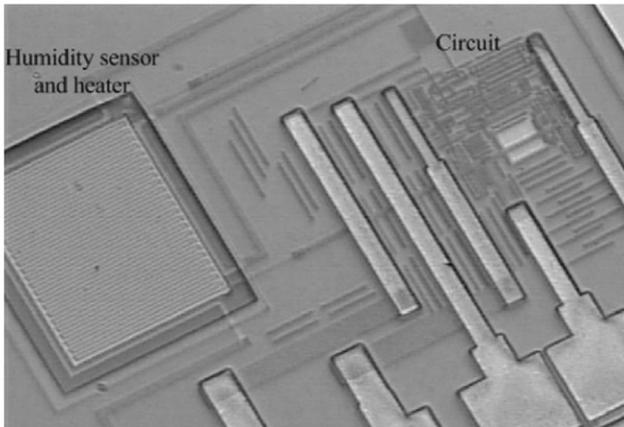


圖 7. 感測器之光學顯微鏡照片⁽¹⁷⁾

高至 85% RH，不同溫度與濕度下，IC 之輸出電壓。此電壓輸出呈現線性變化，故透過此方式可成功地整合感測薄膜與 IC。

2. 一氧化碳感測器

一氧化碳為無色無味氣體，一般為碳氫化合物不完全燃燒而成，環境中無法自然產生。因鐵離子可與氧配位鍵結，同時藉由特定胺基酸官能基的協助，可達儲氧的目的。除了氧之外，一氧化碳也可佔據此鍵結位置，其與肌紅蛋白、血紅素的結合能力比氧強 200 倍以上，且幾乎為不可逆，所以一旦吸入過多一氧化碳，肌紅蛋白與血紅素在優先與一氧化碳結合的情況下，將會大幅降低血液輸送氧的

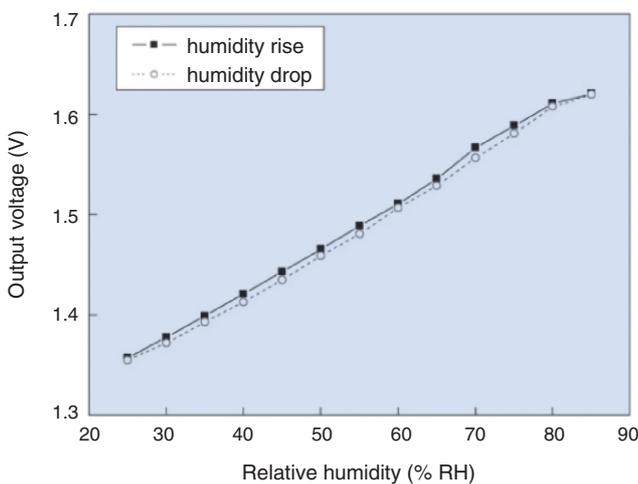


圖 8. 恆溫恆濕機固定 75 °C 時，測量加濕與去濕時的磁滯曲線。

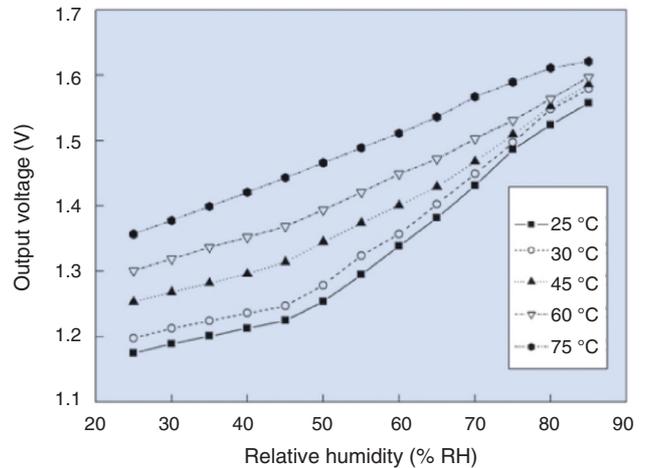


圖 9. 不同溫度與不同濕度下感測器之輸出電壓。

功能，導致心臟和腦組織缺氧而嚴重受創。若處於高濃度下，會使大腦失去正常功能甚至死亡，故一氧化碳對於生活或工業中安全維護非常重要。本研究為得到便宜且適用於家庭之 CO 感測器，故使用凝膠融膠法製作感測薄膜，方法為 $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 加入去離子水配成水溶液，氨水 (NH_3) 促進水解及縮合，產生白色混濁溶液，靜置處理後，溶液會分為上、下兩層，上層為無色透明的 NH_4Cl 水溶液副產物，下層的白色沉澱物即為二氧化錫。熱烤後，使用電子顯微鏡拍攝二氧化錫表面，如圖 10 所示，由圖中可見此薄膜具奈米顆粒，故亦可增加感測面積，增加其靈敏度。此晶片後製程流程與原理

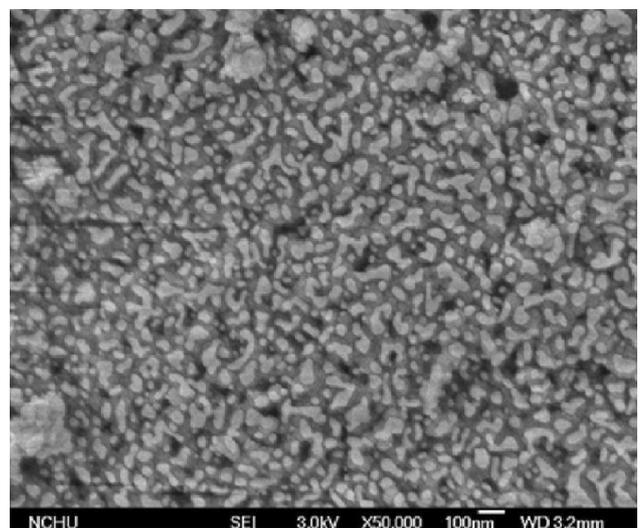


圖 10. 使用凝膠溶膠法製作之二氧化錫表面⁽¹⁸⁾。

皆與濕度感測器相同，故不再贅述。圖 11 為被覆二氧化錫於 CMOS IC 後，置放晶片於腔體中，分別由 0 陸續加入至 157 ppm 之一氧化碳，電路輸出靈敏度為 1 mV/ppm。

六、結論

本文已詳細介紹氣體感測器的種類和固態半導體氣體感測器的原理，並且詳細說明本研究團隊所研發的兩種 CMOS MEMS 氣體感測器：濕度與一氧化碳感測器。這兩種氣體感測器皆整合積體感測電路，即將感測器與感測電路結合，製作在同一塊晶片上，使得氣體感測器晶片達成體積小、雜訊干擾小、性能佳、反應快、成本低、容易大量生產等優點。這兩種氣體感測器皆為電阻式感測器，其構造包含感測器薄膜、感測器電阻、微加熱器和積體電路。需要透過後製程處理，製備感測薄膜，並將之被覆於感測器電阻上。本研究是利用凝膠溶膠法製備感測薄膜，其製作成本低，且製程容易。當感測薄膜吸附感測氣體時，使得感測電阻產生改變，晶片中的感測電路則將感測電阻的變化轉換為電壓輸出。實驗結果顯示一氧化碳感測器靈敏度為 1 mV/ppm，濕度計的靈敏度為 4.5 mV/% RH。

參考文獻

1. 蔡嬪嬪, 工業材料, **150**, 82 (1999).
2. 蔡嬪嬪, 電子月刊, **4**, 63 (1996).
3. T. Takashi, *Sensors and Actuators*, **14**, 109 (1994).
4. S. Shamsudin, M. Yahaya, and M. M. Salleh, *Semiconductor Electronics*, 455 (2002).
5. A. Marsal, A. Cornet, and J. R. Morante, *Sensors and Actuators*, **94**, 324 (2003).
6. C. C. Liu and C. H. Mastrangelo, *IEEE Journal of Solid-State Circuit*, **35** (4), 527 (2000).
7. P. D. Floyd, D. W. Treat, and D. P. Bour, *Electronics Letters*, **35** (24), 2120 (1999).
8. 朱俊彥, 環保月刊, 4 (2002).
9. T. Ito, H. Inagaki, and I. Igarashi, *Electron Devices*, **35** (1), 56 (1988).
10. H. Pink, L. Treitinger, and L. Vité, *Japanese Journal of Applied Physics*, **19**, 513 (1980).
11. S. Isolde, B. Nicolae, and B. Michael, *Sensors and Actuators*, 73 (2001).

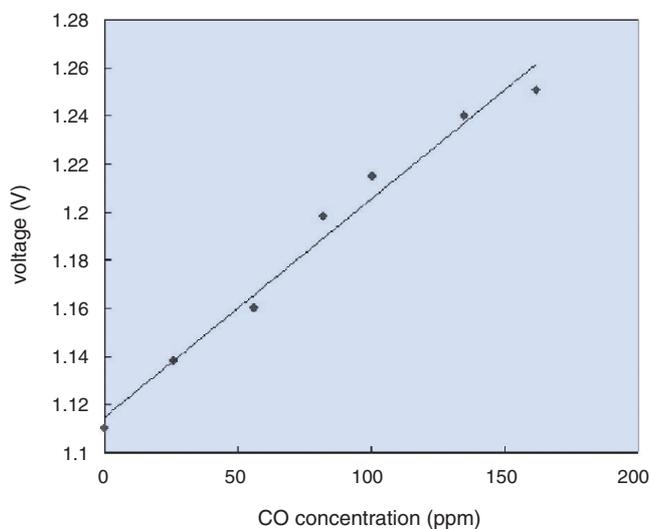


圖 11. 整合二氧化錫與 CMOS IC 之電壓輸出。

12. J. A. Salcedo, J. J. Liou, M. Y. Afridi, and A. R. Hefner, *Microelectronics Reliability*, **46**, 1285, (2006).
13. R. K. Sharma, P. C. H. Chan, Z. Tang, G. Yan, I. M. Hsing, and J. K. O. Sina, *Sensors and Actuators*, **81** (1), 9 (2001).
14. S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons (2006).
15. S. M. Sze, *Semiconductor Sensors*, John Wiley & Sons (1994).
16. D. A. Neamen, *Semiconductor Physics And Devices: Basic Principles*, Mc Graw Hill (2003).
17. C. L. Dai, M. C. Liu, F. S. Chen, C. C. Wu, and M. W. Chang, *Sensors and Actuators*, **123**, 896, (2007).
18. C. L. Dai and M. C. Liu, *IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, **16**, 959 (2007).

- 戴慶良先生為國立台灣大學機械工程博士，現任國立中興大學機械工程學系教授。
- 劉茂誠先生現為國立中興大學機械工程學系博士班學生。
- Ching-Liang Dai received his Ph.D. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently a professor in the Department of Mechanical Engineering at National Chung Hsing University.
- Mao-Chen Liu is currently a Ph.D. student in the Department of Mechanical Engineering at National Chung Hsing University.