

低耗能氣體感測器設計與製作方法

Design and Fabrication of Low Power Consumption Gas Sensor

蕭育仁、林威志、劉建惟、蕭文澤

Yu-Jen Hsiao, Wei-Zhi Lin, Chien-Wei Liu, Wen-Tse Hsiao

金屬氧化物半導體式氣體感測器具有成本低、壽命長、可微小化、可大量生產、易整合於 Si 製程等特色與優點，故受到相當多的注目。常見的金屬氧化物半導體式氣體感測器形式為二維感測器由微加熱器所提供熱能，因加熱與感測電極同一道製程設計，造成中間較低溫外圍較高溫狀況，進而溫度分佈不均產生，所消耗功率也大。而這次製作的三維結構是將加熱與感測電極分開，且優化加熱電極的圖形，這樣有助於加熱的均勻與功率的提升。

Metal oxide semiconductor gas sensors have attracted a lot of attention because of their low cost, long life, miniaturization, mass production, and easy integration into Si processes. A common metal oxide semiconductor gas sensor is in the form of a two-dimensional sensor provided by a micro-heater. The heating and sensing electrodes are designed in the same process, resulting in a relatively low temperature peripheral temperature and a temperature distribution. Both are generated and consume a lot of power. The three-dimensional structure produced this time is to separate the heating from the sensing electrode and optimize the pattern of the heating electrode, which contributes to the uniformity of heating and the improvement of power.

一、前言

隨著科技迅速的發展，人民對於生活品質也相對提高，使得環境污染愈趨嚴重，在維護環境品質以及兼具生命安全保障的考量之下，使氣體感測器在日常生活中是不可或缺的。氣體感測器可應用於許多地方，包含環境標準偵測、工業生產排放偵測、醫療診斷偵測、酒駕臨檢及空氣品質監測等。氣體感測器影響的範圍遠超過日常生活中的需求，而感測的氣體種類非常繁多，包含一氧化碳、二氧化碳、硫化氫、氫氣、氧氣、臭氧、醇類氣體、氮氧化物、可燃性氣體、揮發性氣體等等。

圖 1 戶外空氣污染中各種來源可見室外空氣污染多數的來源非個人能控制的，因此需要個城市、交通運輸、能源廢棄物管理、建築及農業等各部门及政府甚至國際組織採取行動，首要的工作則是清楚了解室外空氣品質的變化，以了解其問題來源，以便找合適的方法做防護工作，也讓民眾知道如何保護自己，以製造一個安全的環境。

當氣體濃度已經達到危害人體及環境時，這些氣體感測器裝置必須有快速的反應時間，及偵測低濃度標準的目標氣體，可以即時給予警告來預防事件發生，而對於理想的氣體感測器必須符合下列幾點要素：(1) 低成本 (2) 選擇比 (3) 微型化

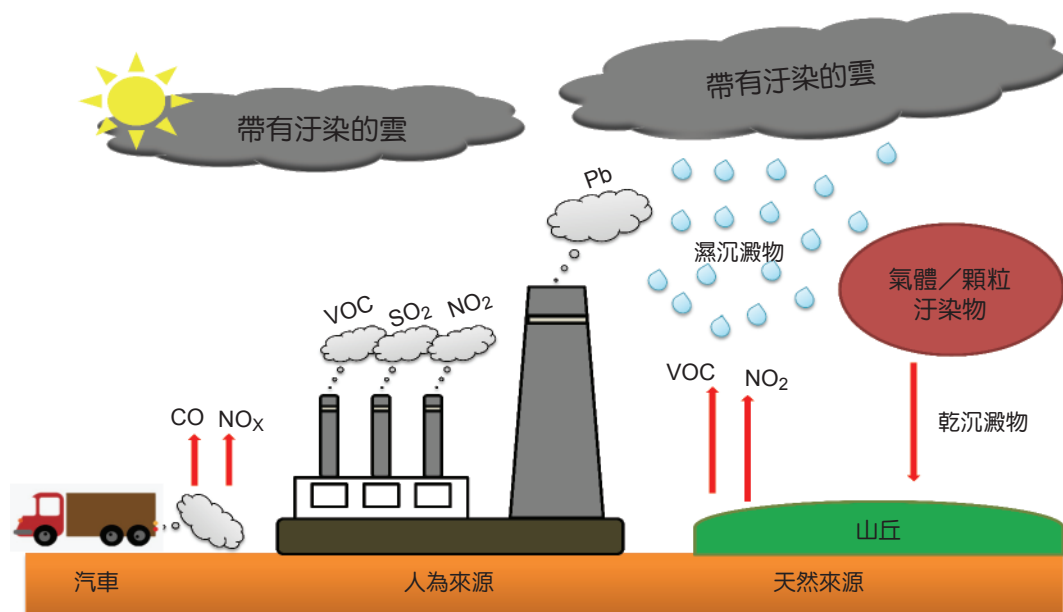


圖 1. 戶外空氣污染生成途徑。

(4) 低消耗功率 (5) 快速的反應時間 (6) 良好再現性與高穩定性。隨著使用者對於環境安全與個人健康意識的抬頭，日益嚴重的空氣品質亦是目前許多國家所棘手的問題。IHS 的感測器市場分析師 Jeremy Bouchaud 表示，該機構預期將率先在手機產品中採用 MEMS 技術的空氣品質感測器。

1. 金屬氧化物半導體式氣體感測器

「氣體感測器」一般是指大氣中所含有的特定氣體以適當的電訊號轉換成可以監測或計量的元件，又被稱為「電子鼻」。依偵測原理與機制分類來說，市面上氣體感測器可分為以下幾種：金屬氧化物半導體氣體感測器、觸媒燃燒式氣體感測器、固態電氣體感測器、電化學氣體感測器。金屬氧化物半導體式氣體感測器：金屬氧化物半導體式氣體感測器是利用在一定溫度下，被測氣體的吸附作用改變半導體的導電率，其變化率與氣體成分、濃度相關。透過檢測電阻的變化，檢測待測氣體，如圖二所示金屬氧化物半導體式氣體感測器。半導體式氣體感測器的主要特點包括靈敏度高、回應快、壽命長、成本低、對濕度敏感度低，但須要高溫加熱，氣體的選擇性差，受環境因素影響大，輸出穩定性差，且功耗高。

隨著 IoT 的來臨，發展中的半導體式微氣體感測器易於整合在微電子元件高密度積體電路的封裝，並且持續朝向小型化、高效能、高整合、低功耗及低成本方向發展。現有成熟的 2D 封裝技術可以將個別元件整合在一個晶片上 (system on chip, SoC)，大部分之 chip on chip 的構裝都是採用這樣技術，其連接導線的方式較構裝來得短，可以預期其電性較佳，構裝完成後可以得到更薄之微氣體感測器元件。

2. 低耗能氣體感測器專利檢索

感測器主要是將氣體感測器與介面電路晶片整合製作，並使其能夠量測多種氣體。此整合型低耗能氣體感測器，將發揮其低雜訊、低功耗、可攜式及低面積的優點，適合應用於電子儀器、環境監控系統、和生醫設備等各種情況。電子鼻系統晶片整合為電阻式，當感測薄膜吸附多種不同類型之氣體時，感測器的電阻產生變化，再經由所設計的感測電路，將感測器的電阻變化量轉換為電壓輸出，如表 1。(EP：歐盟；US：美國；CA：加拿大；CN：中國)

文獻中其專利主要佈局在「可攜式」及「加熱器、整合系統或材料」分別有 3 篇。其專利主要佈

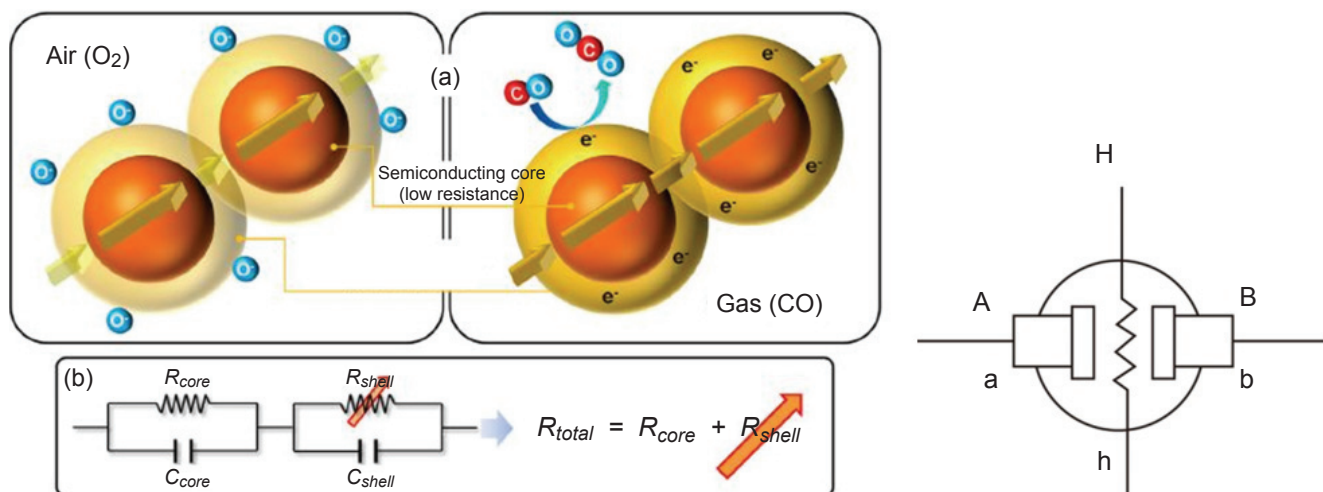


圖 2. 半導體式氣體感測器⁽¹⁾。

局在「製造方法」、「量測多種氣體」及「封裝結構」分別有 11 篇、3 篇及 5 篇。除了可先避開已有的專利(加熱器、材料或整合系統)，未來將在無專利佈局的技術上(如「低功耗」、「多種氣體」)進行本學研團隊之專利佈局。

而近年更開啟氣體感測器研究風潮，其中 2016 年更是環境感測器起飛的一年，主要推動因素，不管是中國大陸令人伸手不見五指的全球霾害，還是健康話題的興起，都是因空氣污染而掀起全球的話題，因此可監測空氣品質的氣體感測器可滿足該應用之需求。由市場研究機構 Yole Developpement 最新報告指出如圖 3 所示⁽²⁾，2014 年氣體感測器 (gas sensor) 在消費性電子應用市場的出貨量僅約一百二十萬顆，然而在未來智慧型手機與穿戴式裝置大量採用下，可望於 2018 年突破一億顆大關，並在 2021 年躍增至三億五千萬顆，預估最大成長源來自於可攜式智慧型機。

二、加熱器的設計與分析

微型加熱器已被廣泛的應用於氣體感測器上，並且藉由 MEMS 的製造技術，將其加熱器應用於低能耗氣體感測器，目前全球微機電氣體感測元件的產品比較如表 2 所示⁽³⁻⁴⁾，皆採用微加熱器方式提供氣體感測器的必要操作條件。面型微加工則將薄膜藉由蒸鍍、濺鍍等製程技術，將薄膜沉積於矽基板上。微型加熱器原理係利用金屬材料本身受到一電流施加時，由於其內部具有一電阻，而電流想流過須克服其電阻便會產生功，而能量與功具有關係，故流經其金屬的電流做多少功，其電能就會產生多少熱能，焦耳熱之公式如下：

$$P = V^2 / R \quad (1)$$

其中， P 為焦耳熱， V 為電壓值， R 為電阻值。一

表 1. 可攜式 低功耗氣體感測器專利檢索。

	低功耗	可攜式	加熱器	整合系統	材料
製造方法	—	US20140216129 US20140223995 EP2763468	US20140216129 US 50973695 US 37714279	US20080277586 US20050092065	CA2374987 C
多種氣體	—	—	—	CN204882512	US 48222117 US 42077702
封裝結構	US20140216129 US20140223995	US 20050092065 EP276346	CN203849252	—	—

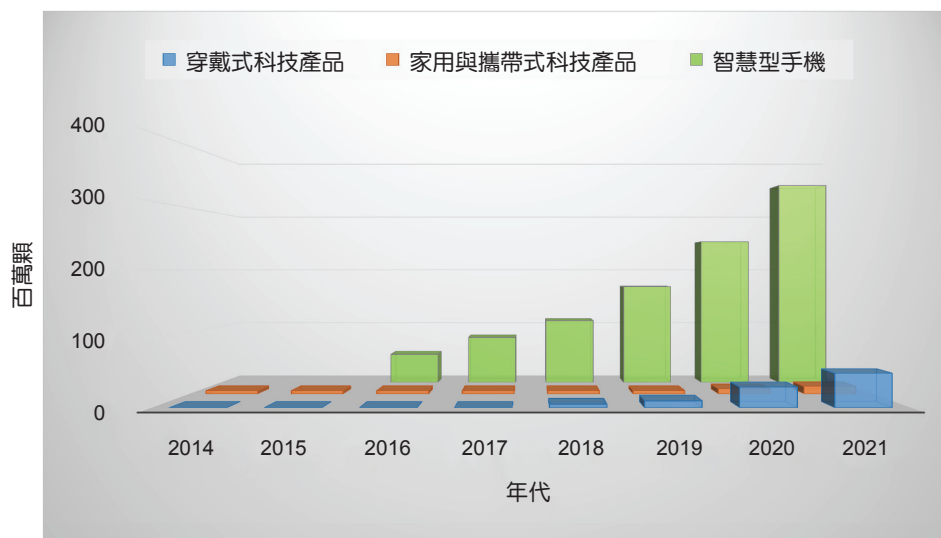
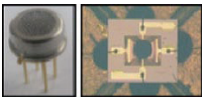
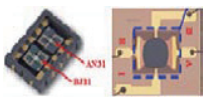
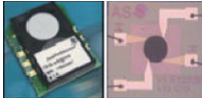
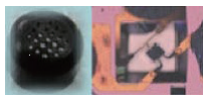
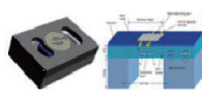
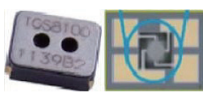


圖 3. 氣體感測器產品市場產量預估⁽²⁾。

表 2. 目前全球微機電氣體感測元件的產品比較⁽³⁻⁴⁾。

外觀圖／ 解析圖						
廠商／型號	Microserise MSG3000i/ MGS2102	SGX Sensortech MICS-4515	AppliedSensor IAQ-engine	Seju Kiss Me Better	Cambridge CMOS Sensors CCS802, CCS803	Figaro TGS8100/ TGS8400
感測氣體	CO/CH ₄ /VOC/ Alcohol	CO/NO ₂	CO/VOC	H ₂ S/LPG	Alcohol/CO	H ₂ , Alcohol
晶片尺寸 (mm)	1.9 × 1.7 × 0.39	1.9 × 1.7 × 0.39	2.0 × 2.0 × 0.45	2.0 × 2.0	1.0 × 1.0	0.55 × 0.78
封裝尺寸 (mm)	—	5.0 × 7.0 × 1.55	15.2 × 17.8	—	2.0 × 3.0 × 1.0	3.2 × 2.5 × 0.99
感測材料	WO ₃	WO ₃	SnO ₂ + 觸媒	SnO ₂ + 觸媒	SnO ₂	Metal Oxide
MEMS 加熱器	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
封裝方式	To-Can (Metal Can)	SMD (Ceramic Carrier)	SMD (Plastic Carrier)	To-Can (Plastic Carrier)	SMD (Plastic Housing)	SMD (Ceramic)
絕熱方式	SiO ₂ Membrane	SiO ₂ Membrane	Si ₃ N ₄ Membrane	Au Suspension	SiO ₂ Membrane	—
Heater 功率 (mW)	76 mW@340°C 43 mW@220°C	76 mW@340°C 43 mW@220°C	225 mW@5V	—	16 mW@DC	15 mW@1.8V DC

個好的微型加熱器又必須具備不易將熱源散失，並且能使其熱源穩定，進而將所需要消耗之功率下降，且溫度可幫助微型氣體感測器達到最好的響應程度。因微型加熱器乃是利用電能產生熱能，估需將矽晶圓進行絕緣之動作，以防在進行加熱時其整塊晶圓導通，常用之絕緣層如氮化矽以及二氧化矽，此低耗能元件將可低到 15 mW。因須避免熱源會因為基板將熱傳導開，故會將以定義好圖形之微型加熱器，進行溼式蝕刻或者乾式蝕刻，蝕刻出一懸空膜，藉以避免熱源散失又可穩定，Mahanth Prasad⁽⁵⁾ 等提出了利用 Pt 材料所製作出雙螺旋型微型加熱器，於 20 mW 狀態下時可以達到 500 °C，並且溫度損耗不高可承受至 611 °C 仍不會有所損傷。研究理論介質的導熱係數通過類比布萊格曼理論，根據 A 和 B 化合物的容積率 f_A 和 f_B 導熱係數 K_A 和 K_B ，我們建立了一個簡單的模型來計算二相 (A 和 B) 混合物體的導熱係數。考慮非均勻介質長度 l 和 S 截面和導熱係數 k ，菲克定律指出：

$$Q = -kS \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

如果我們考慮一種，由兩種不同的 A 和 B 相形成的介質，前方程式給出了總傳導熱：

$$Q = -k_A S_A \frac{dT}{dx} - k_B S_B \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

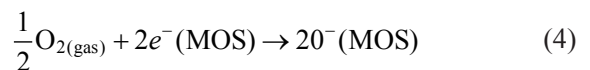
S_A 和 S_B 和分別為 A 和 B 的表面相，所以可根據兩相複合膜的計算，得到整合的導熱係數。M. Graf⁽⁶⁾ 等提出了可控制之三個圓形微加熱器應用於氣體感測器，且該種微型加熱器具有均勻的熱源以及效率。微加熱器利用將電流施加於電極上，使其加熱將溫度升高於懸空膜，常用的材料如 Au/Ti、Pt 等，而微加熱器通常都採用體型微加工方式製作出懸空膜，目的為減少熱傳導來降低熱損失使其熱源為一均勻封閉在感測區外圍的熱點，進而達成所謂低能耗的目標。其中以 Pt 金屬具有較佳的可靠性，該材料可以升溫至 500 °C 才會開始結構上轉換，也可使用其他金屬，唯獨製程上與材料取得與製作相當不容易。發展微小型氣體感測器，應用於微電子元件高密度積體電路，並且朝向小型

化、高效率、低功耗及低成本方向發展。現有的微小型氣體感測器皆須將氣體感測膜披覆於一加熱器上，如能將感測膜、感測用電極與微型加熱器同時整合製作於一晶片上，不僅可以使其更加的微小化，並可將其置放於穿戴式裝置內，使其具有一定的競爭力。

三、氣體感測器的設計與分析

1. 半導體式氣體感測器基本原理

金屬氧化物半導體氣體感測器已被廣泛應用在工業與家庭的氣體監控。一般常使用的感測材料有 SnO_2 、 ZnO_2 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 等金屬氧化物。它的偵測原理為可燃性氣體如 H_2 及 CO 與吸附在半導體氧化物且帶負電荷的氧離子產生反應。吸附在感測器表面的氧離子因溫度而存在有不同的形式，一般半導體氣體感測器的操作溫度大約在 300–500 °C 範圍， O^- 是最有可能參與可燃性氣體反應的形式⁽⁷⁾。在 n 型半導體金屬氧化物中，這些被吸附的氧金屬氧化物晶粒表面形成一空間電荷區域，導致電子的轉移使表面形成一個電子空乏層。其反應如下：



電子空乏層的厚度為覆蓋在晶粒表面的氧及電子濃度的函數。電子從一晶粒至另一晶粒必需穿過空乏層才可導電。在晶界由於能障的關係，n 型半導體氧化物的電阻在空氣中會較高。而當 n 型半導體氧化物於高溫時暴露在含有還原性氣體的氣氛中，被吸附的氧會隨著與還原性氣體反應逐漸被消耗。半導體氧化物表面氧離子的減少使被氧捕獲的電子重回到晶粒，此一過程導致能障高度的降低，亦即導致電阻的降低，此現象可作為半導體氣體感測器的量測參數，因此，n 型半導體氣體感測器之靈敏度 S 可定義為⁽⁸⁾：

$$S = \frac{R_{\text{gas}} - R_{\text{air}}}{R_{\text{air}}} \times 100\% \quad (5)$$

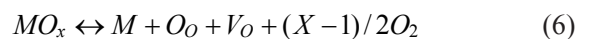
其中 R_{air} 為感測器在空氣中的電阻； R_{gas} 為在可燃

性氣體中的電阻。前述 n 型半導體式氣體感測器裝置於含氧化性氣體的氣氛中，如 O_3 及 NO_2 ，此類氣體以化學吸附在晶粒表面，使移動電子的數目減少，感測器的電阻增加。反之，在氧化性氣體氣氛中，半導體氧化物之電阻下降則稱為 p 型半導體金屬氧化物。因此，決定半導體金屬氧化物為 n 型或 p 型行為完全決定於其所偵測氣體之性質而定。亦即，在還原性氣體中電阻下降為 n 型行為，而在還原性氣體中電阻上升時為 p 型行為。在還原性氣體中為 p 型行為之半導體金屬氧化物，其載子為電洞，吸附在半導體金屬氧化物表面的 O^- 因捕獲電子而增加電洞的濃度，電阻因此降低。將半導體金屬氧化物置於含有可燃性氣體的氣氛中，反應時消耗了吸附在感測器表面的 O^- ，電洞的濃度降低，使電阻增加。然而此 p 型行為之半導體金屬氧化物，在氧化性氣體中顯現電阻下降之行為⁽⁹⁻¹¹⁾。

這幾年來，氣體感測器開始有新發展，將奈米結構之技術應用於氣體感測器中，隨著使用之奈米材料尺寸減小，其靈敏度有明顯的增加。奈米結構由於極為細微，因此具有極大的比表面積，使表面能量佔全能量的比例會大幅增高。正因如此大的表面能量和變化的電子能階，使奈米尺寸之結構具有比塊材更優異的物理化學性質。其中以氧化物材料為重，因氧化物材料對氣體會產生吸附作用使電阻值改變。其中，氧化鎢和二氧化錫常被探討。目前國外已經有許多研究單位有正面的研究成果。2011 年韓國漢陽大學 Nguyen 等人，發表了利用靜電紡絲法所製作出的一維氧化鎢奈米線，它具有在氨氣環境下可量測量測到最低濃度為 10 ppm 且於 300 °C 之工作溫度⁽¹²⁾。2014 年印度索拉普大學 Mane 等人，發表了利用溶膠凝膠法製備氧化鎢薄膜，並將其測試於 200 °C 工作溫度下對於氣體的選擇性，發現到該薄膜於 200 °C 工作溫度下對於二氧化氮具有 24 秒的快速響應，以及可以測得最低濃度為 5 ppm⁽¹³⁾。2014 年越南河內科技大學 Chinh 等人，發表了自加熱之二氧化錫奈米線結構，利用熱蒸鍍方式製作出的一維結構，再使用黃光微影技術將其製作出電極以及自加熱裝置，並不需要在提供外部加熱就可在 150 °C 的環境下測得 10 ppm 之二氧化氮氣體，最低可測得 1 ppm 之二氧化氮氣體，僅需耗費相當低的功率⁽¹⁴⁾。2001 年義大利費拉拉大

學 Vincenzi 等人，利用網印法將二氧化錫參雜鉬元素，並應用於自行製作之微型加熱器上，該微型加熱器達到 400 °C 時僅需輸入低於 30 mW 之能量，並可分辨出一氧化碳、甲烷以其二氧化氮等氣體⁽¹⁵⁾。

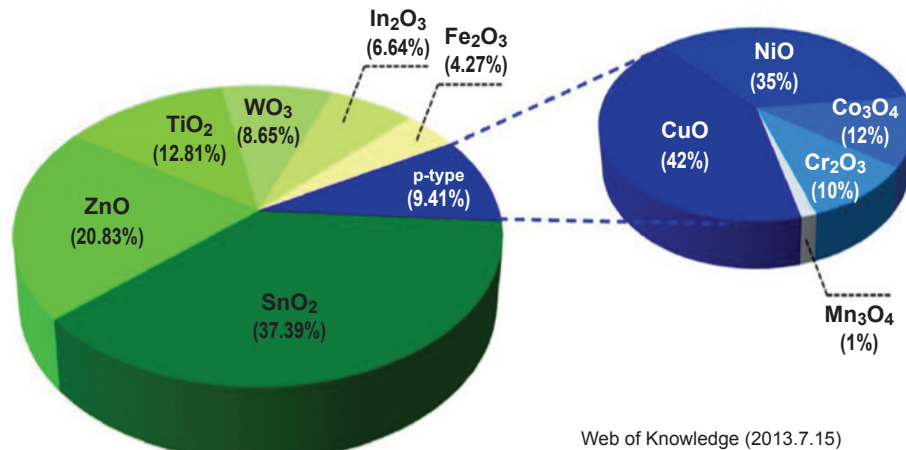
作為感測層的金屬氧化物半導體會因結構不是理想比例配比而存在很多的氧空缺，這些氧空缺在常溫或高溫之下會再形成帶兩個正價的氧空缺及電子，故屬於 N 型半導體。其反應式如下：



其中 M 、 O_o 、 V_o 及 V_o^{++} 分別為晶格位置上金屬離子，氧離子，氧空缺及帶正二價的氧空缺。換句話說，感測層將從原來的 N 型半導體降為 N-型半導體，進而影響導電帶與費米能階的能障差。當元件處於還原氣體環境下，這時導電帶會因 N 型感測層導電性降低 ($n \rightarrow n^-$) 而升高，如此一來能障降低而促使導電帶上的電子可大量傳輸至矽基板進而導致元件電流大量提升。2014 年 Kim 等人在重要感測器期刊回顧整理，金屬氧化物半導體 (MOS) N-type 如 SnO_2 、 ZnO 、 TiO_2 、 WO_3 、 Fe_2O_3 等，P-type 如 NiO 、 CuO 、 Co_3O_4 等⁽¹⁶⁾，如圖 4 所示。未來發展中的微小型氣體感測器應用於微電子元件高密度積體電路的封裝，朝向小型化、高效率、低功耗及低成本方向發展。

四、加熱器與氣體感測器的製作

研究中微型氣體感測器之演進，完成為氣體感測元件系統 3D 整合之技術開發平台之目標，異質元件接合製程技術開發，同時具主動式微加熱元件，為達多功能微小化整合元件之目標，現有的微小型氣體感測器皆須將氣體感測膜披覆於一加熱器上，如能將感測膜、感測用電極與微型加熱器同時整合製作於一晶片上，不僅可以使其更加地微小化，並可將其置放於穿戴式裝置內，使其具有一定的競爭力。圖 5 中版本微型氣體感測器之演進，最新堆疊元件之設計之上視圖。本研究團隊初期發展二維感測器由微加熱器所提供熱能，因加熱與感測



Web of Knowledge (2013.7.15)

圖 4. P 型與 N 型接面氣體感測材料之選擇⁽¹⁵⁾。

電極同一道製程設計，造成中間較低溫外圍較高溫狀況，進而溫度分佈不均產生，所消耗功率也大。三維是將加熱與感測電極分開，二維與三維堆疊比較，目前有影像溫度驗證如圖 6 所示，在外加電壓下厚度為 400 nm 的加熱器 (500 μm $\times$ 500 μm) 其耗能，二維結構大約為 290 mW 而三維結構大約為 55 mW，所能提供的溫度大約為 350 $^{\circ}\text{C}$ ，為提升節能效率，將進一步將圖形優化。理論值須配繞線圖形與厚度計算，目前所測的實際的加熱器功耗如下表所示，計算方式以熱影像儀測的中心點 350 $^{\circ}\text{C}$ ，以 5.5 V 電壓加熱，可測的加熱器電流 10 mA，所以根據歐姆定律 $P = IV$ ，加熱器功耗 $5.5\text{V} \times 10\text{ mA} = 55\text{mW}$ 。本研究採用白金 Pt 當加熱電極，根據文獻 (17) 此材料具有相當高的電阻溫度係，非常適合用在微機電系統元件，數值達 3700

ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 。

常見微型氣體感測器的製程步驟如圖 7，結構尺寸和材料，分別是 500 μm $\times$ 500 μm 二氧化錫感測與加熱電極、保護層 & 感測膜，其感測膜電極為指叉狀形狀，微加熱器為環繞式形狀，保護層材料使用 SiO₂ 薄膜，蓋在微加熱器上方，使熱能不會散失在空氣中有絕熱的作用，感測膜材料使用 SnO₂ 薄膜，設計上最容易出現的問題是加熱不均勻，因為微加熱電極設計環繞式包覆感測電極，只有感測包膜外圍有均勻加熱，而薄膜中心沒有平均加熱，容易造成感測不穩定。而三維結構是將感測電極與加熱電極分開，這樣的改變，讓加熱的方式從環繞式加熱改變成底部加熱，這樣的改變能讓感測薄膜的加熱更加均勻，因加熱電極是完整環繞感設薄膜，不會讓加熱集中在某幾處，能提升整體的

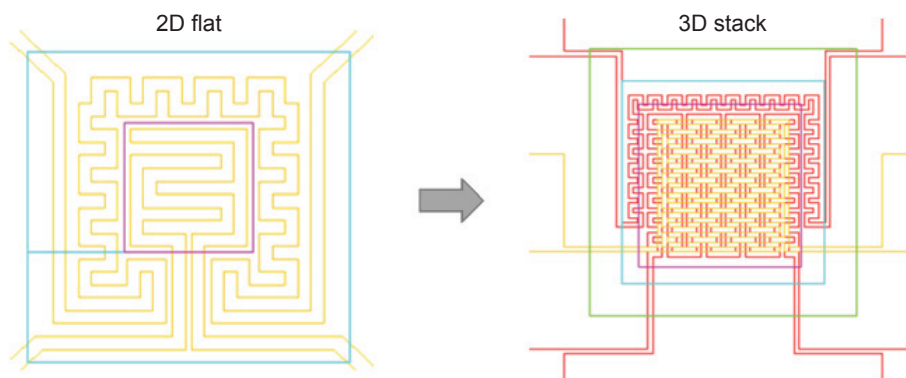


圖 5. 2D&3D 堆疊元件之設計上視圖。

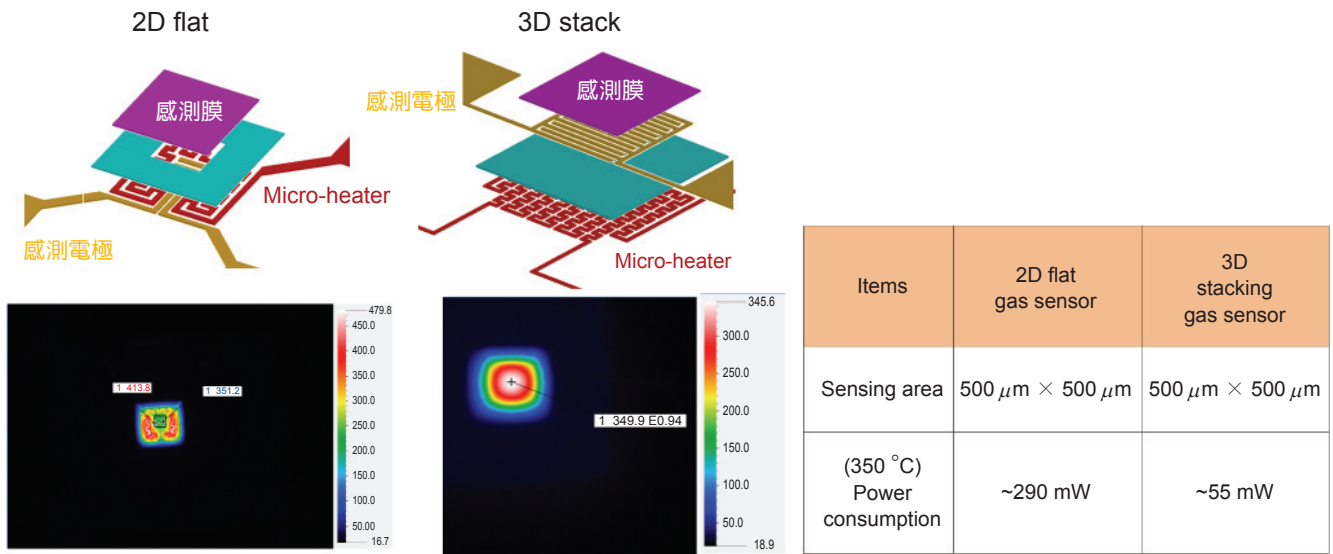


圖 6. 二維與三維的結構比較圖。

感測穩定度，且能大為提升感測器的功率，促成低耗能的氣體感測器發展。低耗能氣體感測器元件製作有四個設計重點 (1) 感測膜電極：使用指叉狀圖案，將感測膜覆蓋上使導通。(2) 微加熱器電極：使用環繞式圖案，使熱均勻加熱。(3) 保護層：使用 SiO_2 蓋在微加熱器電極上，使熱不容易損失。(4) 背後掏空：因 Si 會傳熱，掏空後元件將絕緣。

主要製程步驟詳述如下：

- (1) 清洗矽晶片。
- (2) 高溫及低壓爐管沉積二氧化矽 (SiO_2) $500\ \text{nm}$ 。
- (3) 高溫及低壓爐管沉積氮化矽 (Si_3N_4) $200\ \text{nm}$ 。
- (4) 旋轉塗佈光阻 (AZ1500) $2\ \mu\text{m}$ 。
- (5) 曝光顯影 #mask01 (定義電極)。
- (6) RF 射頻濺鍍黏著層。
- (7) 電子槍蒸鍍 (E-Gun) 白金 (Pt)。
- (8) 浸泡丙酮和異丙醇，去除光阻。
- (9) 電漿輔助式

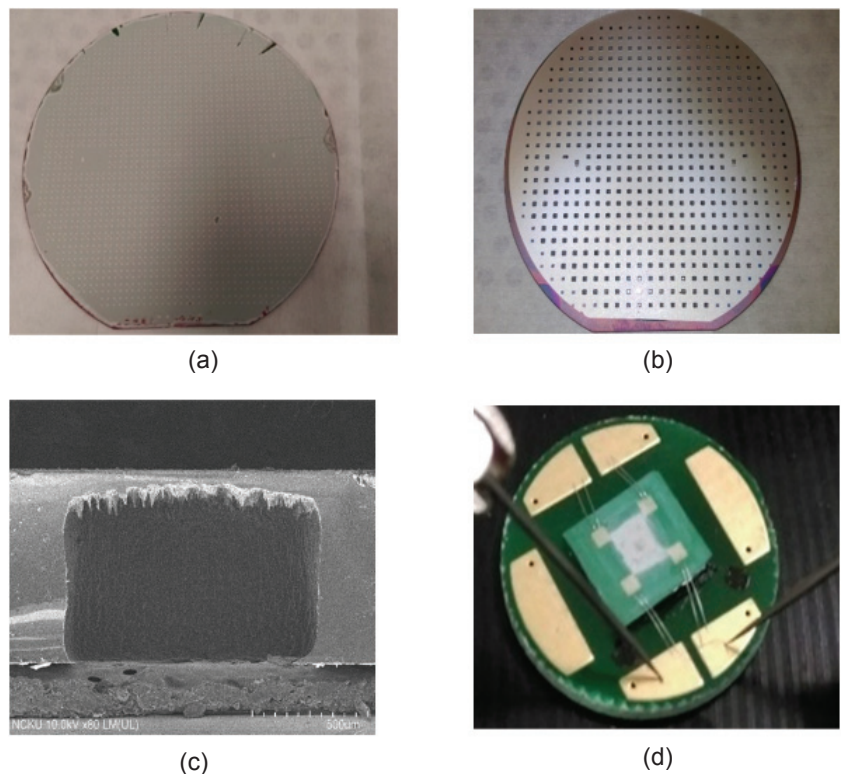


圖 7.

微機電 (MEMS) 製程感測區面積 $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ (a) 堆疊感測材料 (二氧化錫) (b) 背蝕刻完成圖 (c) 背蝕刻側面 (d) 打線至 PCB 板。

化學氣相沈積 (PECVD) 二氧化矽 (SiO_2) 100nm。(10) 旋轉塗佈光阻 (Az1500) $2\ \mu\text{m}$ 。(11) 曝光顯影 #mask02 (定義保護層)。(12) 浸泡二氧化矽蝕刻液 (BOE)。(13) 浸泡丙酮和異丙醇，去除光阻。(14) 旋轉塗佈光阻 (Az1500) $2\ \mu\text{m}$ 。(15) 曝光顯影 #mask03 (定義感測模)。(16) RF 射頻濺鍍二氧化錫(SnO_2)。(17) 浸泡丙酮和異丙醇，去除光阻。(18) DC金屬濺鍍鋁 (Al) 200 nm。(19) 正面、背面旋轉塗佈光阻 (Az1500) $2\ \mu\text{m}$ 。(20) 背面曝光顯影 #mask04 (定義背後開孔)。(21) 浸泡鋁蝕刻液。(22) 浸泡丙酮和異丙醇，去除光阻。(23) 感應耦合式蝕刻 (ICP) Si_3N_4 , SiO_2 。(24) 感應耦合式蝕刻 (ICP)Si。

五、性能測試

新設計之三維加熱器其功耗與升溫之間的關係曲線，如附件圖 8(a) 所示，呈現線性增加趨勢。針對氣體感測器的反覆測試性能如圖 8(b) 所示，重複測過 20 次以上具有相當的可靠度。實驗中通入酒精 133 ppm 下，針對溫度對氣體感測器的靈敏度測試，溫度愈高感測效果最好，但到了 450 度以上會達飽和，在溫度 350 度時靈敏度可達 89% 如圖 8(c) 所示。實驗中在酒精 133 ppm 下，針對溫度 350 度工作對氣體感測器的反應時間和恢復時間進行解析，反應時間大約 10 秒能穩定，恢復時間需較久約 65 秒如圖 8(d) 所示。

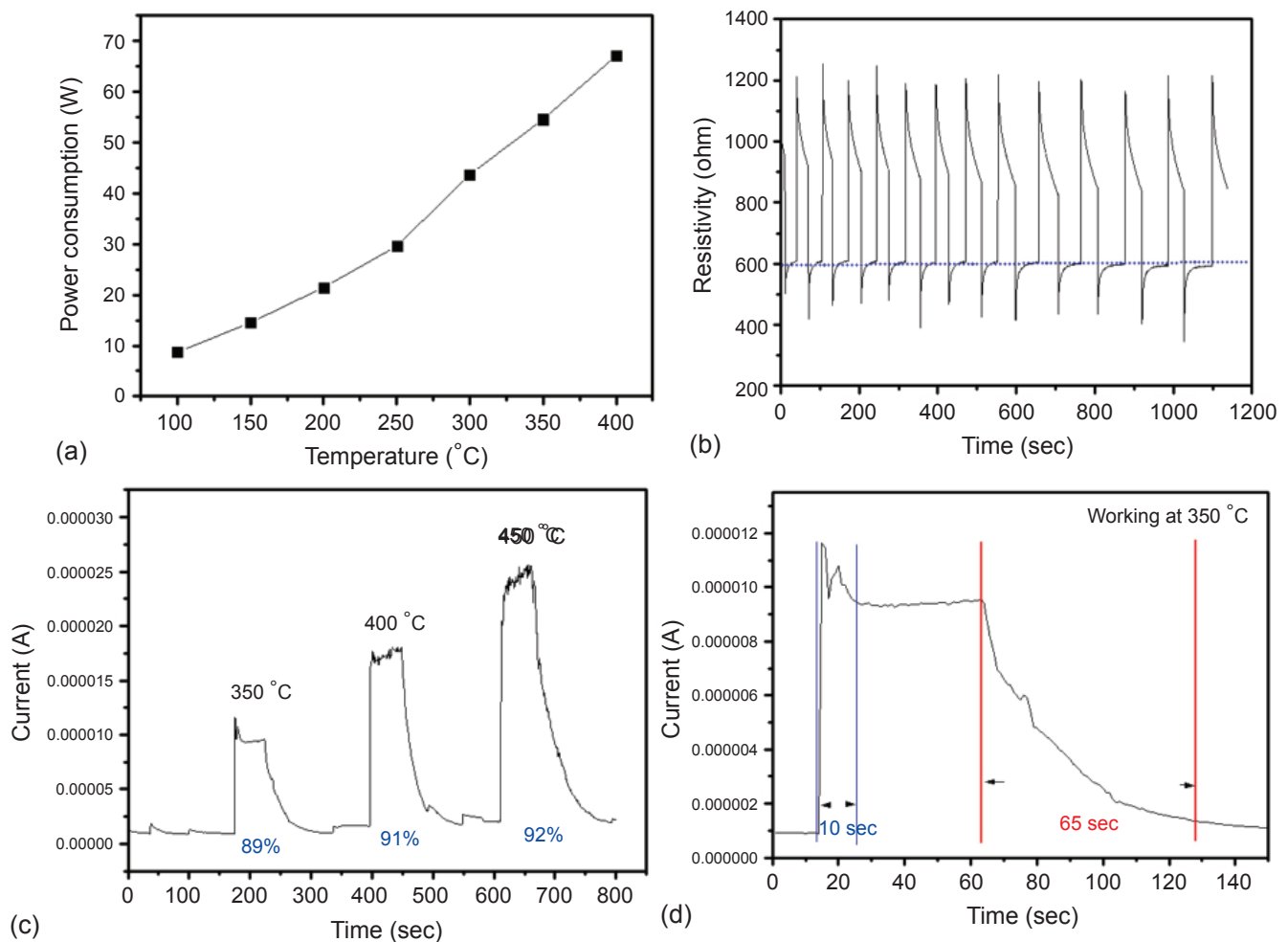


圖 8. 三維微機電 (MEMS) 製程氣體感測器對 (a) 功耗與升溫之間的關係曲線 (b) 反覆測試性能 (c) 溫度對氣體感測器的影響 (d) 反應時間和恢復時間。

六、結論

微型氣體感測器元件製作量產，進行二維與三維堆疊結構比較，目前有影像溫度驗證設計與製作符合低耗能氣體之空氣品質環境感測器，建立智慧訊號讀取電路與系統化晶片之多功能應用需求，可成為一項具有前瞻性的低耗能環境量測系統晶片。

參考文獻

1. H. J. Kim, J.H. Lee, *Sensors and Actuators B*, **192**, 607 (2014).
2. 彭茂榮, 穿戴裝置對半導體的需求, 工研院 IEKITIS 計畫, (2014).
3. 陳榮泰, 葉建南, 張金生, 許仲毅, 工業材料雜誌, **347**, 130 (2015).
4. Please refer to the web:
<http://www.figarosensor.com/products/entry/tgs8100.html>
5. M. Prasad and V.K. Khanna, *Microsystem Technologies*, **21**, 2123 (2015).
6. M. Graf, et al., "Smart single-chip CMOS microhotplate array for metal-oxide-based gas sensors." *IEEE 12th International Conference in Transducers, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 1, 8-12 June (2003).
7. N. Yamazoe, J. Fuchigami, M. Kishikawa, and T. Seiyama, *Surface Science*, **86**, 335 (1979).
8. B. Behera, S. Chandra, *Sensors and Actuators B*, **229**, 414 (2016).
9. 林鴻明, 曾世杰, 工業材料, **157**, 163 (2000).
10. 林鴻明, 工程科技通訊, **59**, 52 (2001).
11. 林鴻明, 化工科技與商情, **38**, 18 (2002).
12. T. A. Nguyen, et al., *Sensors and Actuators B: Chemical*, **16**, 549 (2011).
13. A. T. Mane, et al., *Ceramics International*, **40**, 16495 (2014).
14. N. D. Chinh, et al., *Sensors and Actuators B: Chemical*, **201**, 7 (2014).
15. D. Vincenzi, et al., *Sensors and Actuators B: Chemical*, **77**, 95 (2001).
16. H. J. Kim and J. H. Lee, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **192**, 607 (2014).
17. A. Yamashita, H. Ohji, T. Fukami, K. Tsutsumi, *IEEE Transactions on Sensors and Micromachines*, **124**, 242 (2004).



蕭育仁為國立成功大學材料科學與工程所博士，現為南臺科技大學機械系副教授。

Yu-Jen Hsiao received his Ph.D. in Material Engineering from National National Cheng Kung University. He is currently an associate professor in the Department of Mechanical Engineering at Southern Taiwan University of Science and Technology.



林威志先生現為國立雲林科技大學機械工程所碩士生。

Wei-Zhi Lin is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering at National Yunlin University of Science & Technology.



劉建惟為國立成功大學航太工程所博士，現為國立雲林科技大學機械系副教授。

Chien-Wei Liu received his Ph.D. in Aeronautics and Astronautics Engineering from National Cheng Kung University. He is currently an associate professor in the Department of Mechanical Engineering at National Yunlin University of Science & Technology.



蕭文澤先生為國立彰化師範大學機電工程所博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員。

Wen-Tse Hsiao received his Ph.D. in Mechatronics Engineering from National Changhua University of Education. He is currently a research fellow at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.