

# 一氧化氮氣體感測器與其電路模組之應用

## Application of NO Gas Sensor with Circuit Module

邱俊瑋、洪瑞華

Chun-Wei Chiu, Ray-Hua Horng

因物聯網 (IOT) 之發展，各式感測器有大量需求，其中氣體感測器也為其中的一種。本實驗室所開發之一氧化氮氣體感測器為半導體式之氣體感測器，其優勢有響應高、反應快、成本低和體積較小，而一氧化氮多用於環境監測，主要來源為汽機車和工廠所排放廢氣，此外，低濃度之一氧化氮也能偵測氣喘，若能測量低濃度則可應用於醫療，對於生醫之影響也將重大。而一般半導體製程所製作之感測器，需要使用半導體量測儀器去量測其電性變化，本實驗室則有開發一感測電路模組，大幅縮小量測機台之體積且成本低廉，使其可以放置於不同的場地，不受空間限制來做實際環境的測試，除了縮小體積，感測電路模組在量測的結果上也佔據優勢。

Due to the development of Internet of Things (IoT), there is a large demand for various types of sensors, among which gas sensors are also one of them. The nitric oxide gas sensor developed in our lab is a semiconductor gas sensor, which has the advantages of high response, fast response, low cost and small size. Nitric oxide is mostly used in environmental monitoring, mainly from the emissions of automobiles and factories, and low concentration of nitric oxide can also detect asthma, and if it can be measured at low concentration, it can be used in medical applications, which will have a significant impact on the healthcare industry. The general semiconductor process for the production of the sensor, you need to use semiconductor measurement equipment to measure the electrical changes, the laboratory has developed a sensing circuit module, greatly reducing the size of the measurement machine and low cost, so that it can be placed in different venues, without space constraints to the actual environment of the test, in addition to reducing the size of the measurement results also have an advantage.

### 一、氣體感測器

在 COVID-19 肆虐下，病毒之散播無所不在，然日常生活中，除了病毒外，空氣中亦常常充斥著影響我們健康之氣體，因此空氣品質監控有其必要性。另一方面，在疫情發展

下，2020 年洲際甚至區域之移動受到限制，人類的生活已完全邁向網路鏈結世代，伴隨著網路迅速的發展，從 4G 通訊技術發展到新世代 5G 通訊技術，衍生而來的是所有感測裝置其訊號將邁向雲端化與智慧化，若所有的感測裝置皆可以透過網路上傳收集到資訊，可藉由後端系統收集資訊，最後藉由大數據分析判斷使用者情境與進行需求回饋，如圖 1，此一應用情境已逐漸驗證在不同領域。此外，氣體感測器也能應用於醫療方面，研究指出，從人體呼出的氣體種類以及濃度，就能夠初步得知病患身體狀況，若是呼出丙酮 (Acetone)，則可能和糖尿病心血管疾病有關<sup>(1)</sup>；若是呼出氨氣 (NH<sub>3</sub>)，則可能是腎臟病所引起<sup>(2)</sup>；若是人體呼出氣體含有超過 35 ppb 的一氧化氮 (NO)，則有極高可能已經罹患氣喘<sup>(3-6)</sup>。上述不同氣體中，又以一氧化氮 (NO) 受到較多關注，根據 2018 年全球氣喘報告 (The Global Asthma Report 2018) 統計，全球約有 3.4 億人患有氣喘疾病，若能利用 NO 氣體感測器對人類呼氣進行精準、非侵入式且可重複的檢測，將能大大改變現今生醫檢測生態，因此能夠檢測低 ppb 濃度的 NO 氣體感測器具有相當大的研究價值。本研究計畫秉持著正在發生中的雲端智慧化的發展，將採用先進的薄膜製造技術與分析能力，研製高感度與適用於環境監控之氣體感測器與穿戴式醫療用之非侵入式檢測呼吸成分氣體感測器，透過模擬，不僅優化氣體感測器，也將微加熱器最佳化，最後結合人工智慧化系統與雲端服務，將此氣體感測器應用在城市的氣體監控，預測有毒之氣體，以達到即時危險氣體之監測，與達到先端智慧製造的需求。

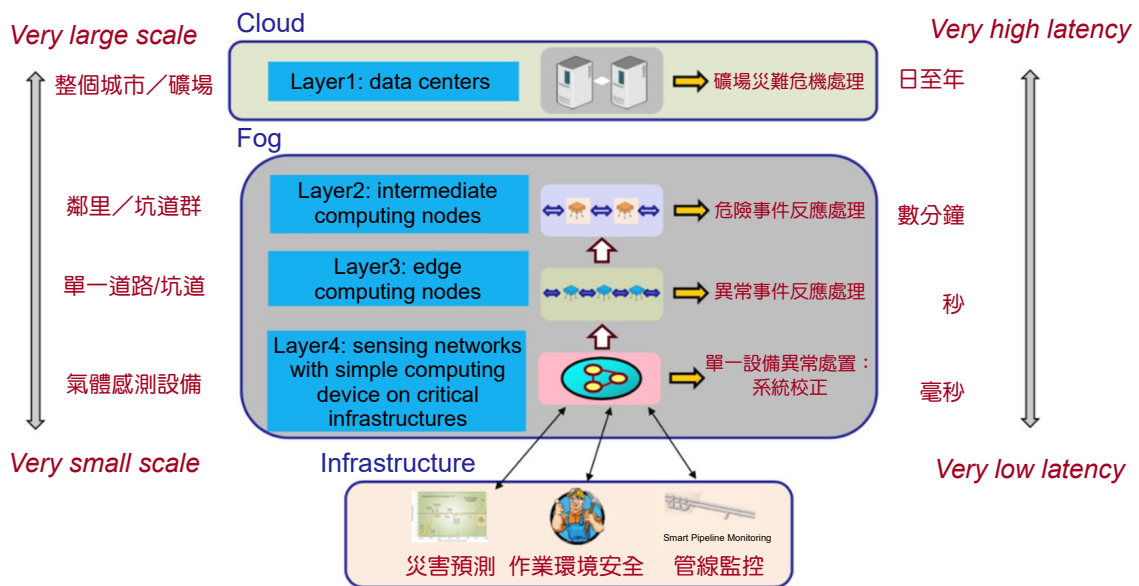


圖 1. 智慧化感測系統層級圖。

氣體感測器最早來自 1932 年由 Hersch<sup>(7)</sup> 等人提出隔膜源 (galvanic) 電池型氣體感測器，之後陸續有學者發表不同型態的氣體感測器，如：1961 年 Weissburt 及 Ruka<sup>(8)</sup> 提出固態電解質氣體感測器，1953 年 P.B.Weisz<sup>(7)</sup> 發現半導體材料吸附氣體會發生電阻變化，然後 1962 年 Seiyama<sup>(8)</sup> 利用半導體阻值改變方式偵測氣體，而 1968 年 Figaro<sup>(9)</sup> 率先將半導體型可燃式氣體感測器商業化，1974<sup>(10)</sup> 年電化學式氣體感測器商業化，1971 年光學式氣體感測器商業化<sup>(11)</sup>，然後眾多種類感測氣體的方式，皆各有其優缺點以及應用於不同領域。近年

來由於智慧裝置急速發展，網路發達，傳輸速度亦越來越快，透過無線傳輸，氣體感測器之應用不僅只讓現場人知悉，亦可透過無線傳輸，讓各個災難救助單位及時得到訊息，防止災難發生。因此，氣體感測器市場預估至 2021 年可達 900 億美元商機且年複合成長率達 7.3%，如圖 2<sup>(12)</sup>，所以各大廠積極投入智慧型氣體感測器裝置開發，其中以環境感測最為熱門，目前已知各大廠皆在室內空氣品質監測皆有產品推出，如 Bosch 推出的空氣品質監測元件如圖 3，該感測器結合溫度與濕度的偵測且以微機電製程製作 (microelectromechanical system, MEMS)，元件尺寸可以做到極小化，另外就是由日本 Figaro 公司推出的環境偵測晶片如圖 4，其構造以簡單微機電製程完成，元件本身只有單純氣體感測功能，還有英國 CMOS Cambridge 所研發生產空氣品質監測元件如圖<sup>(5)</sup>，該感測器具有簡單微控制器 (MCU)，可針對氣體感測訊號進行處理，眾多室內空氣品質偵測模組主要針對二氧化碳以及有機揮發物 (total volatile organic compound, TVOC) 作為主要偵測氣體，除此之外，酒精感測器也是氣體感測器重要一部份，主要是針對酒駕駕駛做反應式偵測，然而對於一氧化氮偵測這一應用，多以電化學式為主，圖 6 為商規氣體感測器 SGX MiCS-2714 (半導體式) 以及 NGK NO<sub>2</sub>-MD-1000 (電化學式)，表 1 為此兩氣體感測器針對 NO<sub>2</sub> 氣體的感測規格 (由於目前尚未有半導體式之 NO 氣體感測氣，因此以 NO<sub>2</sub> 氣體感測器進行比較，圖中可看見半導體式的 SGX MiCS-2714 感測器具有結構簡單、體積小等特點；另一方面，電化學式的 MEMBRAPOR NO/S-25 氣體感測器針對低濃度有較高的感測靈敏度，最低氣體濃度解析度 0.05 ppm (50 ppb) 以及較短的反應時間 (25 秒)，且輸出訊號與濃度關係線性，因此電化學式氣體感測器主要被應用針對低濃度的生醫感測；然而，其結構較複雜，且使用壽命受到內部電解液限制，成為電化學式氣體感測器最致命之缺點。又近年來商業化規模的製作主要考量為成本控制與實用性，因此，儘管現有的技術顯示半導體式氣體感測器在低濃度感測上較困難，但結構簡單且成本較低之優勢，使其仍然具有相當大發展的潛力，有鑒於此，本研究計畫將開發半導體式氣體感測器，研究此感測器之感應特性、優化，使其能針對低濃度氣體有較高的感測靈敏度並縮短感測時間，以其應用於生醫感測、IoT 物聯網及攜帶式電子化商品。

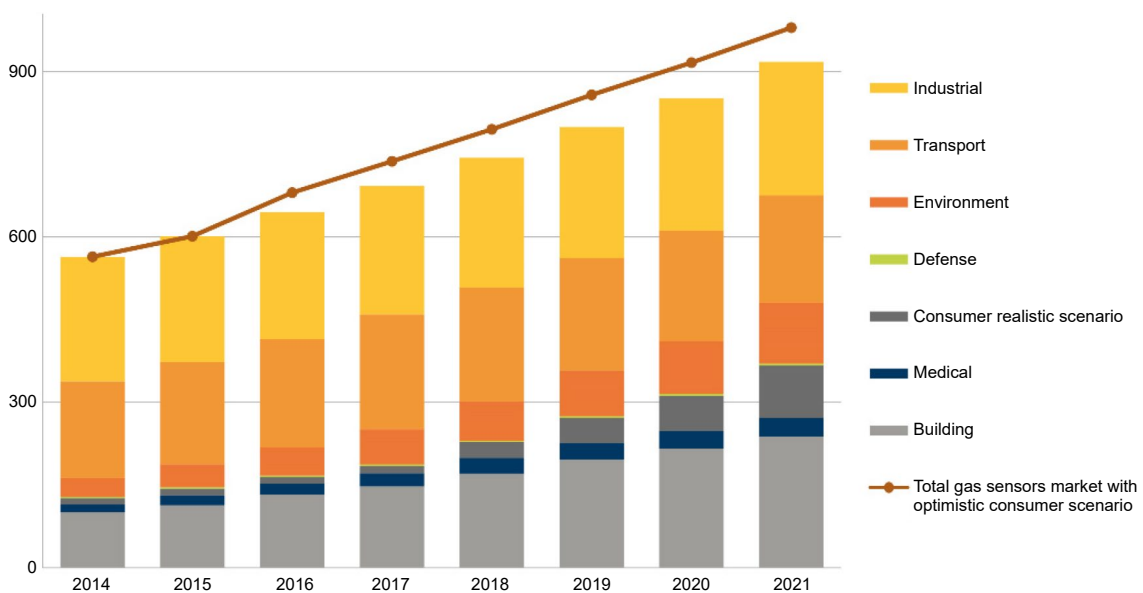


圖 2. 氣體感測器市場應用佔比分佈圖。

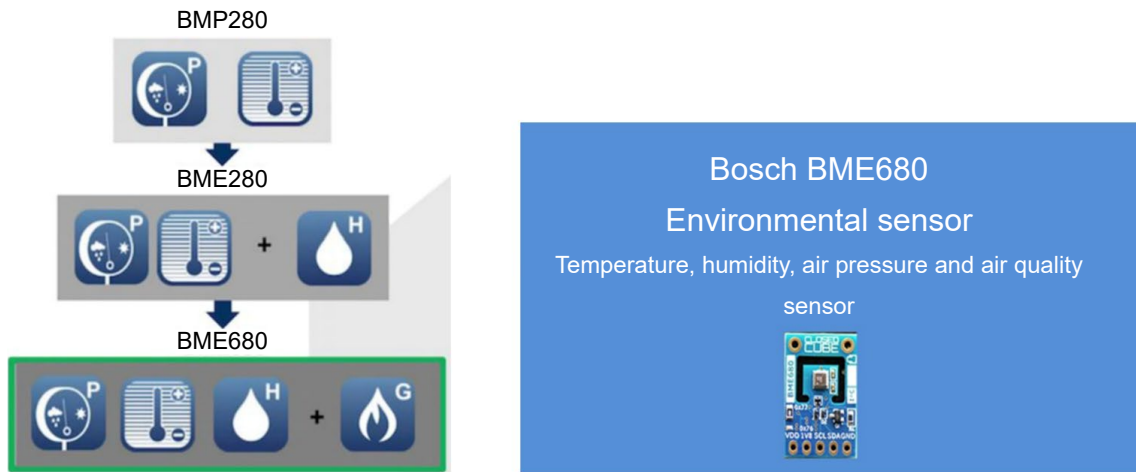


圖 3. Bosch 整合型環境偵測感測器。

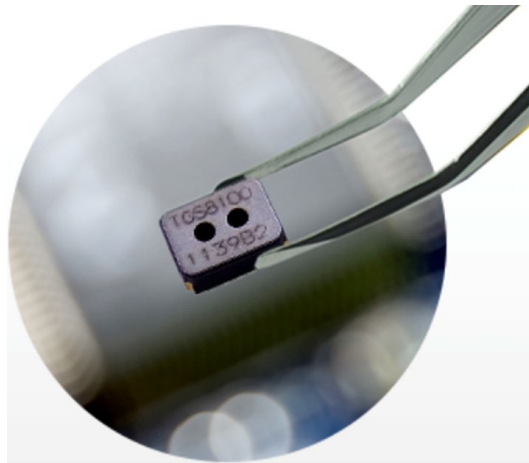


圖 4. Figaro TVOC 環境偵測感測器。

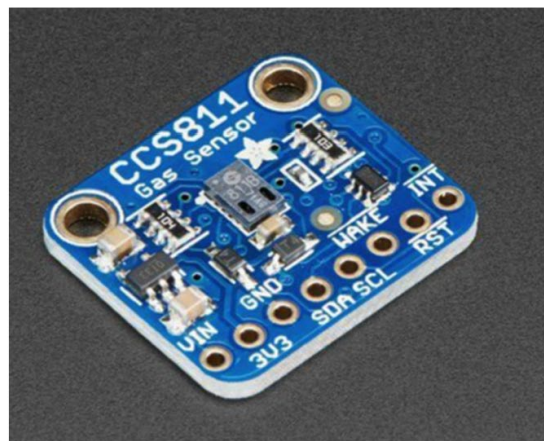


圖 5. CMOS Cambridge 環境偵測感測器。

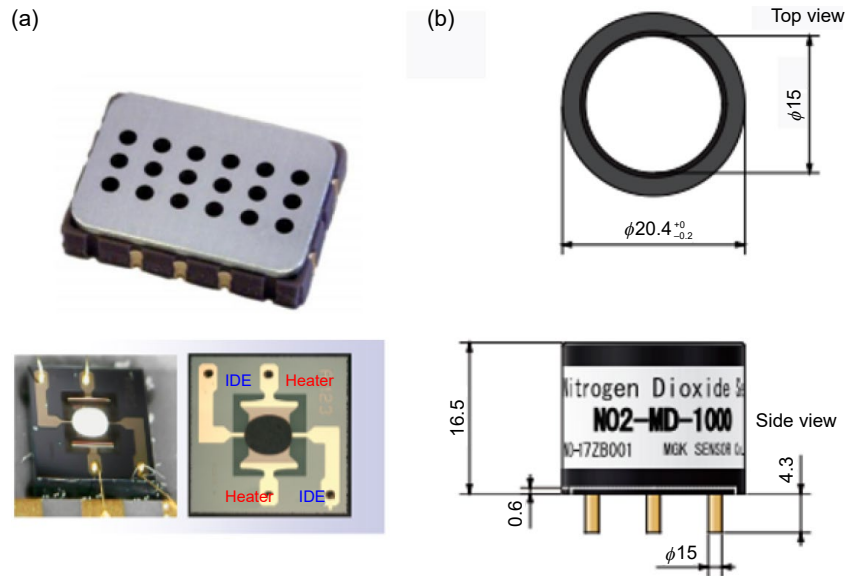


圖 6. (a) 半導體式 FIGARO FECS41-250 以及 (b) 電化學式 MEMBRAPOR NO/S-25 氣體感測器結構圖。

表 1. 商規氣體感測器 SGX MiCS-2714 以及 NGK NO<sub>2</sub>-MD-1000 之感測規格。

	SGX MiCS-2714	NGK NO <sub>2</sub> -MD-1000
Sensor type	MOS type	Electrochemical type
Sensing gas	NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>
Volume (mm <sup>3</sup> )	5 × 7 × 1.88	10.2 × 10.2 × 16.5
Detection range	0.05 – 10 ppm	0 – 10 ppm
Response time (T91)	–	< 25 s
Resolution	0.05 ppm	0.05 ppm

氣體感測器已由單一簡易裝置發展至多種氣體偵測，而市面上目前常見的氣體感測器技術種類眾多如圖 7，最常見的感測方式為電化學式、光學式以及阻值式感測<sup>(12)</sup>，其中以金屬氧化物半導體式偵測涵蓋應用領域最廣，原因為元件製造可以半導體方式製作達到低成本且高靈敏度，另外製程可以相容整合於 CMOS 元件製程，達到整合型電子感測元件，根據 Figaro 發布評估訊息如圖<sup>(8)</sup>，微機電結構半導體阻值式偵測有著低成本、體積小、反應時間快以及高靈敏度等優勢<sup>(13)</sup>，其缺點為氣體選擇性較差，因此各大廠對於氣體選擇性的改善為首要重點，透過圖<sup>(9)</sup>我們可以了解到阻值方式量測的元件經過數十年的發展，尺寸已從原本 1.7 cm 縮小至 4 mm<sup>(13)</sup>，因為半導體技術快速發展，現今氣體感測器已整合微加熱器，透過微機電製程將元件微小化，進一步應用於穿戴式裝置感測，眾多氣體感測技術唯電阻值方式感測易於整合 IC 製程，且具有體積微小化且低成本優勢<sup>(13)</sup>，其訊號進一步可感測至 ppb 等級的感度，如圖 10，對於未來穿戴式裝置以及醫療檢測有極大的效益存在，所以本研究計畫選擇開發利用金屬氧化物電阻式偵測氣體，並且整合後端雲平台的資源，有效開發出一套具智慧化的警示系統，預期可在環境氣體偵測達到極大效益。

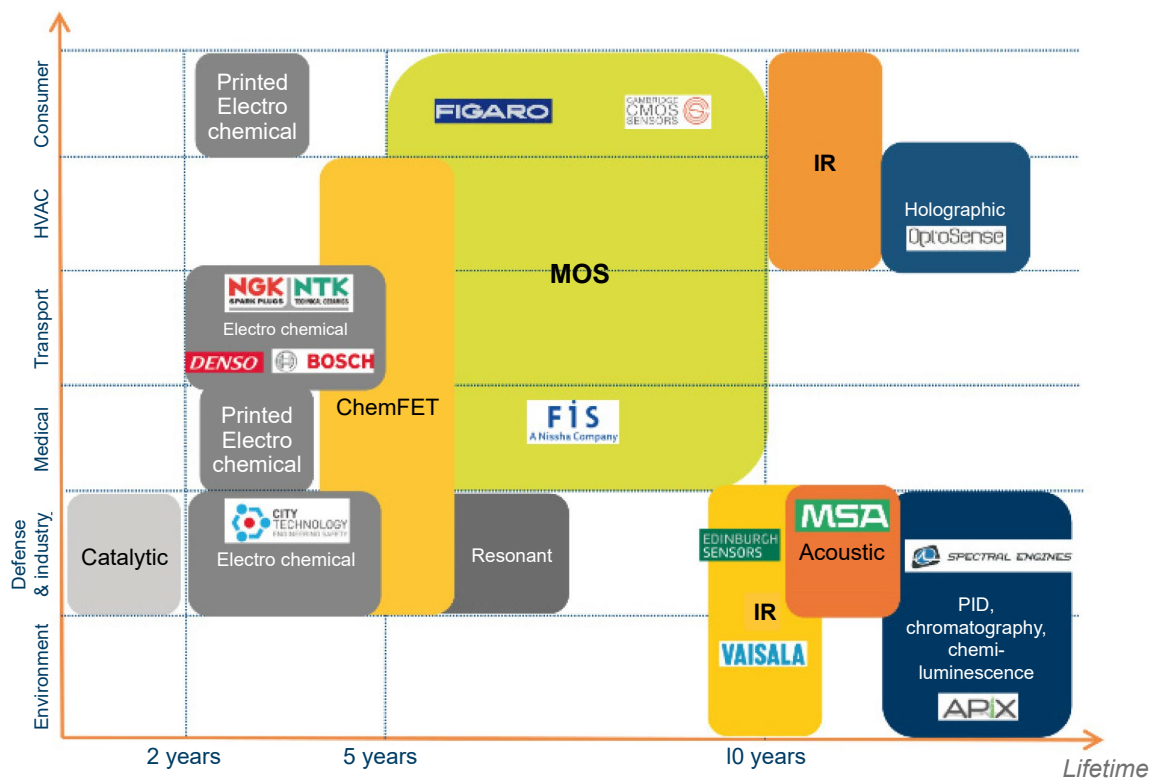


圖 7. 氣體感測器技術應用領域與使用壽命。

Comparison of three gas-sensing technologies.

Characteristic	Electrochemical	Optical	Chemoresistive
Cost	low	high	low
Lifetime	short	long	long
Sensitivity	high	high	high
Selectivity	good	excellent	poor
Response time	fast	fast	fast
Size	medium	large	small



圖 8. Figaro 氣體感測器技術分析。

氣體感測器是偵測環境氣體中是否含有特定的氣體，以電訊號 (電壓、電流、電阻) 的方式轉換為可量化數值，藉此得知特定氣體濃度以及組成成分。氣體感測器主要分成兩大類，基於材料電子變化，如電化學氣體感測器、金屬氧化物半導體氣體感測器；基於氣體特性變化，如熱導式氣體感測器、觸媒燃燒式氣體感測器、紅外線吸收式氣體感測器。其優勢分別整理於表 2，可以發現半導體式氣體感測器之成本與攜帶性具備一定優勢，也是未來較具有潛力大量生產並運用於許多地方。

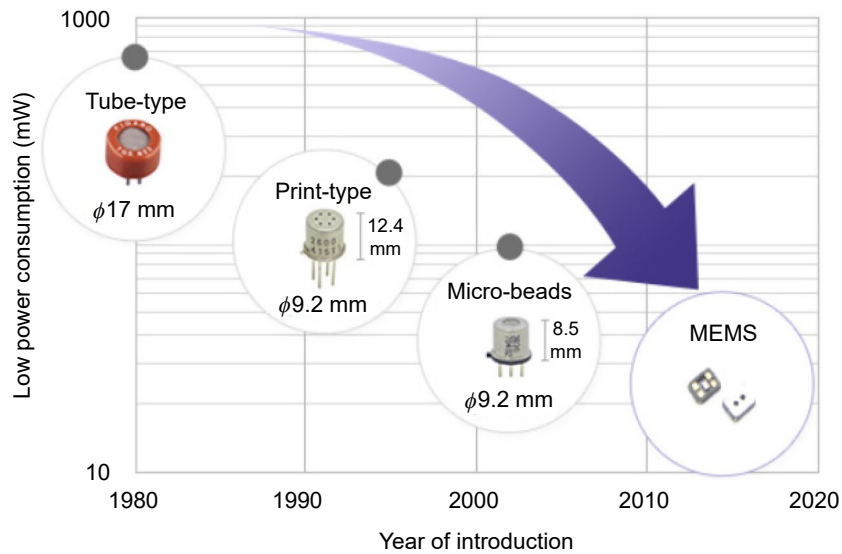


圖 9. 電阻式氣體感測器元件發展現況。

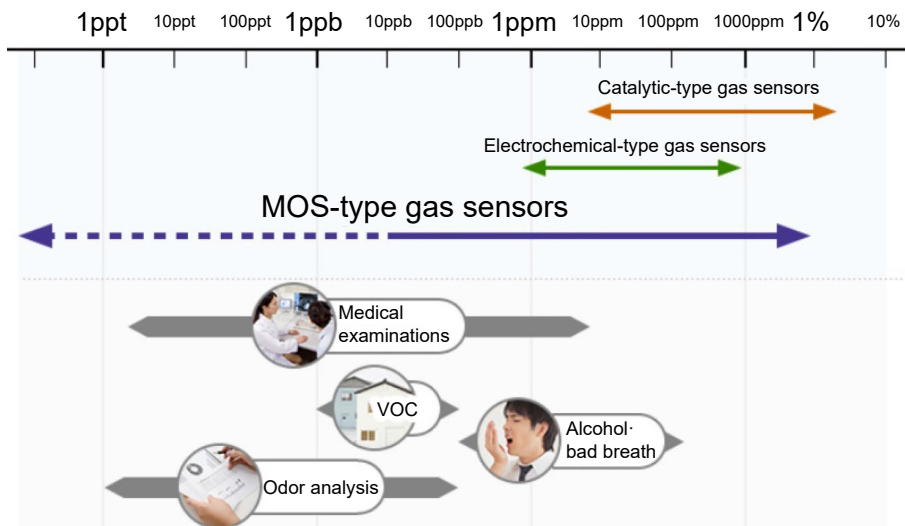


圖 10. 氣體感測器技術感測範圍應用。

表 2. 常見氣體感測器種類之特性比較<sup>(1)</sup>。

	Electro chemical	MOS	Thermal conductivity	Catalytic combustion	Infrared absorption
Response	Good	Excellent	Poor	Good	Excellent
Response time	Fair	Excellent	Good	Good	Fair
Selectivity	Good	Fair	Poor	Poor	Excellent
Stability	Poor	Good	Good	Good	Good
Cost	Good	Excellent	Good	Excellent	Poor
Portability	Fair	Excellent	Good	Good	Poor

## 二、氣體感測器特性評估

### 1. 氣體響應度與靈敏度 (response and sensitivity)

關於氣體感測器評估之特性如下：氣體響應度 (response)、氣體靈敏度 (sensitivity)、氣體反應時間與回復時間 (response time and recovery time)、氣體選擇比 (selectivity)、線性度 (linearity)、穩定度 (stability)。氣體響應度之定義為感測器在未通入待測氣體前與通入目標氣體後之電阻值變化之比，主要取決於感測器薄膜與特定氣體的反應程度，其氣體響應度越高則代表其對特定氣體的反應越強烈。

如果通入的目標氣體為氧化性氣體 (如 NO 及 NO<sub>2</sub>)，氣體會捕獲薄膜表面的電子形成氧負離子吸附於表面，增加薄膜的空乏區 (depletion region)，導致電阻值上升，因此氣體響應度的定義為

$$S_{res} = \frac{(R_g - R_a)}{R_a} \times 100\%$$

$S_{res}$ ：氣體響應度 (response)，單位為任意單位 (arbitrary unit, a.u.)。

$R_a$ ：感測器在大氣環境中薄膜電阻值達穩定後的電阻值，通常稱為基礎電阻值 (basic resistance)，單位為歐姆 (Ohm,  $\Omega$ )。

$R_g$ ：感測器在通入目標氣體後薄膜電阻值達穩定後的電阻值，通常稱為反應電阻值 (reaction resistance)，單位為歐姆 (Ohm,  $\Omega$ )。

如果通入的目標氣體為還原性氣體 (如 NH<sub>3</sub> 及 SO<sub>2</sub>)，則氣體形成氧負離子吸附於薄膜表面後會將電子釋放回薄膜之中，減少薄膜的空乏區，導致電阻值下降，為了使氣體響應度恆大於一，因此氣體響應度的定義為

$$S_{res} = \frac{(R_a - R_g)}{R_g} \times 100\%$$

氣體靈敏度 (sensitivity) 定義為每單位目標氣體濃度下氣體響應度的變化，可以做為固定濃度下目標氣體對感測器造成多大變化的指標，主要由響應度與氣體濃度關係圖之斜率取得，其關係式如下

$$S_{sen} = \frac{\Delta S_{res}}{\Delta C}$$

$S_{Sen}$ ：氣體靈敏度 (sensitivity)，單位為 ppm<sup>-1</sup> 或是 ppb<sup>-1</sup>。

$\Delta S_{Res}$ ：氣體響應度 (response) 變化，單位為任意單位 (arbitrary unit, a.u.)。

$\Delta C$ ：目標氣體濃度 (concentration) 變化，單位為 ppm<sup>-1</sup> 或是 ppb<sup>-1</sup>。



## 2. 反應時間與回復時間(response time and recovery time)

反應時間與回復時間指目標氣體通入與抽出後電阻達到動態平衡的時間，時間越短代表能更快偵測到目標氣體之濃度，日後應用不管在空氣品質、醫療生理數值等氣體偵測都相當重要。

此一部分根據九一法則來計算反應時間與回復時間，圖 11 與圖 12 所示，反應時間定義為目標氣體通入時間與整體電阻變化之 90% 的時間之差，即為氣體反應時間；回復時間定義為目標氣體抽出時間與整體電阻變化之 90% 的時間之差，即為氣體回復時間。此外，氣體感測器的回復特性為感測器可重複利用的重要條件之一，氣體感測時目標氣體會吸附於感測器表面上，導致電阻值變化；當目標氣體抽離後，感測器表面上所吸附的氣體能夠順利脫附，才能夠進行下一次量測。

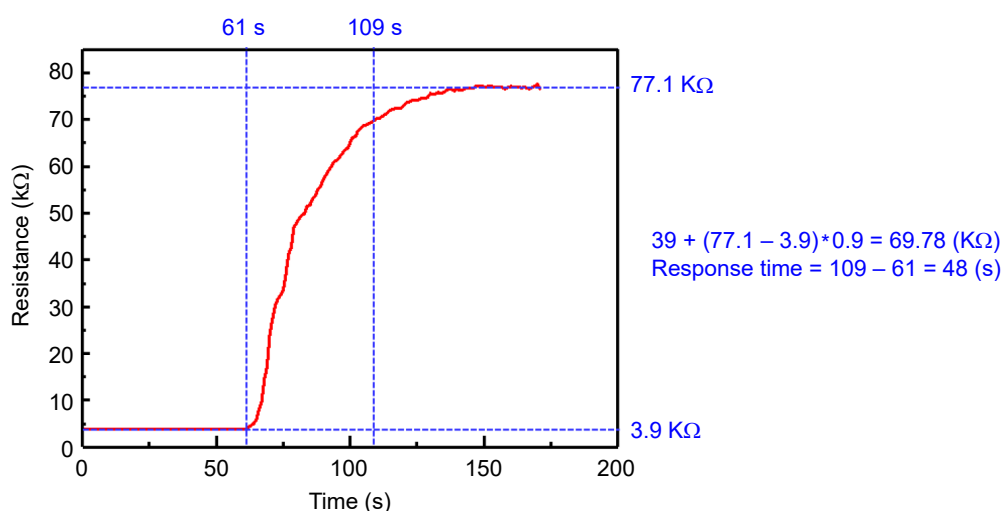


圖 11. 氣體反應時間示意圖。

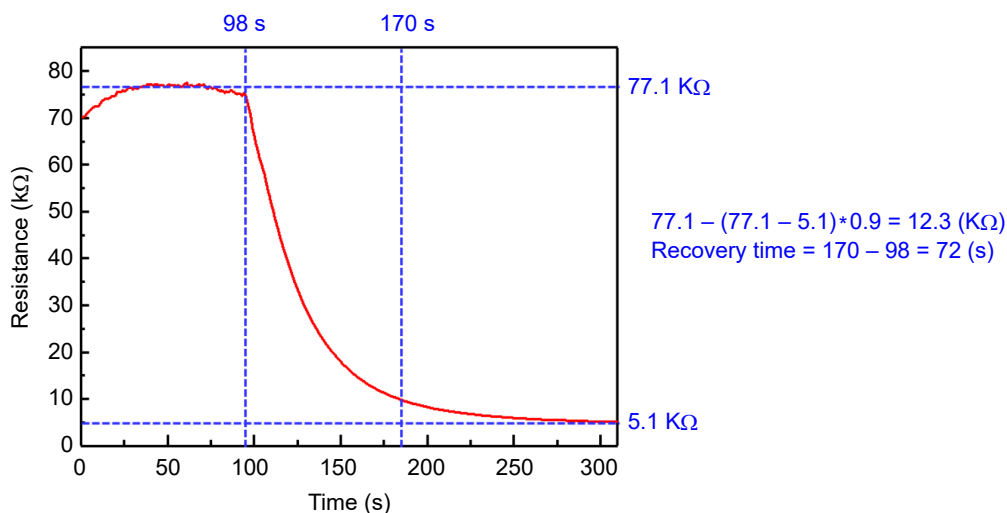


圖 12. 氣體回復時間示意圖。

### 三、半導體式氣體感測器偵測原理

金屬氧化物半導體式的氣體感測器，主要機制是偵測其薄膜電阻值變化，藉以判斷待測氣體的濃度，其中電阻值的變化來自於電子轉移所造成的位能障 (potential barrier) 變化，如圖 13 所示。又因為氧化性氣體 NO 會與材料反應，導致電子轉移至 NO 氣體，使材料空乏區加大也導致晶界 (grain boundary) 的位能障提升，以下將說明其機制。

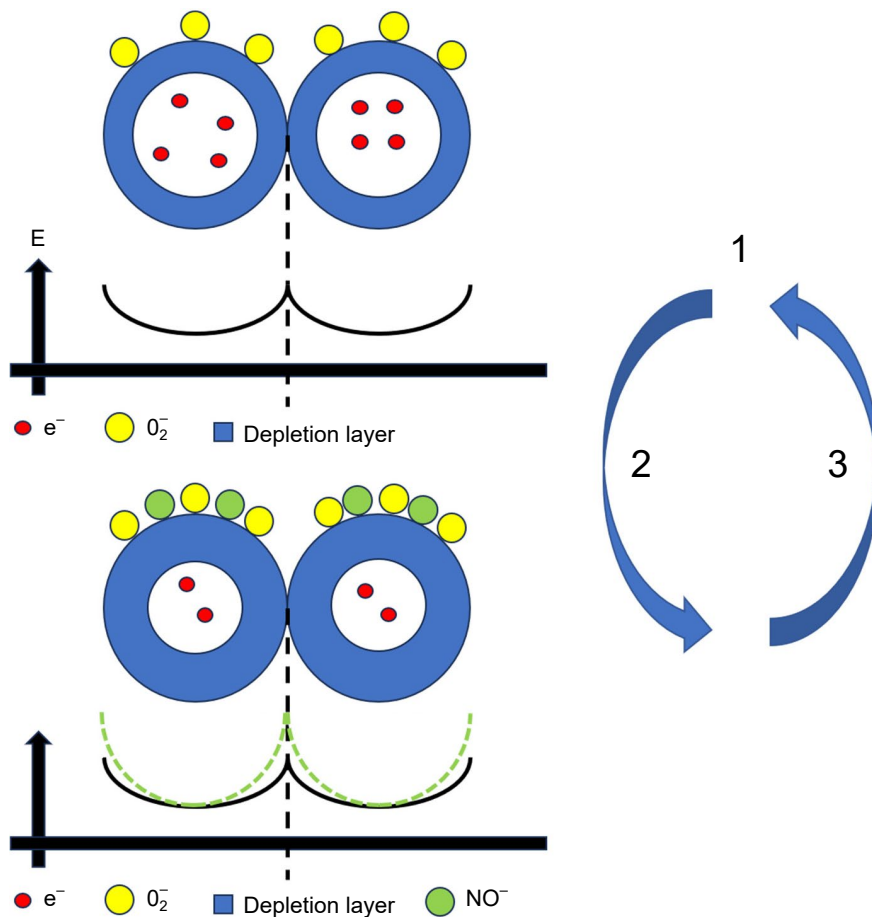


圖 13. 感測機制模型。

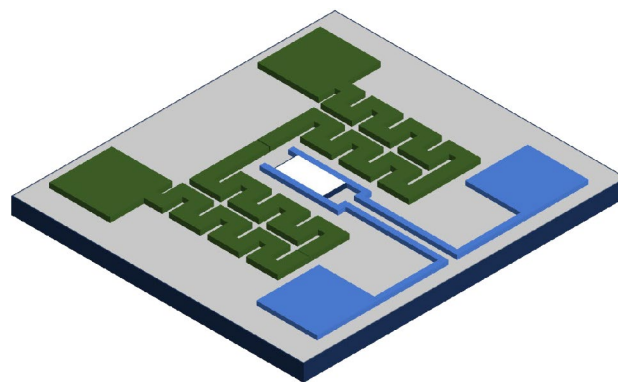
於量測時薄膜會有三段電阻變化分別以 1,2,3 標註，第一段變化：當將氣體感測器放置於大氣環境之下，大氣中的氧氣分子會附著於材料表面<sup>(2-6)</sup>，而氧氣分子會更進一步與材料位於導電帶 (conduction band) 的電子反應，形成化學吸附<sup>(7, 8)</sup>，又因氧氣分子的電子親和能大於材料薄膜的功函數，在化學吸附的情況下會使材料薄膜產生能帶彎曲 (band bending)<sup>(9)</sup>，而也代表著空乏區的產生，空乏區與未空乏區域有著導電性差異，所以產生空乏區後，電阻值會上升。

在第一段趨於平穩後，第二段變化來自於通入 NO 氣體之變化，在通入 NO 氣體後，由於 NO 屬於氧化型氣體<sup>(10, 11)</sup>，會傾向抓取電子，而其反應與氧氣分子類似，也會從導電帶抓

取電子，或是抓取原先吸附於表面的氧離子之電子<sup>(12, 13)</sup>。而因其又抓取電子，故空乏區會再變大，電阻值也會因此再度上升，而此電阻變化即為量測氣體響應度的電阻變化值。

第二段趨於平穩後，第三段變化即為抽離氣體之變化，因注入一般空氣，吸附於表面的氣體離子開始脫附，將其抓取之電子釋放回材料中，使空乏區變小，故電阻值因此下降，回到通入 NO 氣體前之電阻值。

半導體式氣體感測器就需要倚靠半導體製程去實現，本實驗室採用先將用來感測的材料成長在絕緣的藍寶石基板上用來當作地基，因為感測材料之薄膜厚度僅 100 nm，再來會將其需要的感測區域部分留下，如圖 14 的白色區域，並蒸鍍上感測電極，圖 14 藍色區域，再蒸鍍上微型加熱器，圖 14 綠色區域，即完成半導體式氣體感測器。本研究之另一優點為無須將矽晶圓掏空製作加熱器，因此元件機械性質較為堅固。



- Heater electrode deposition (Ti/Pt)
- Sensor electrode deposition (Ti/Al/Ni)
- Sensing film isolation

圖 14. 半導體式氣體感測器示意圖。

#### 四、感測電路模組

一般半導體之元件製作完之後就會以半導體量測機台去做量測，來確認是否符合預期，而這種機台都過於龐大，導致無法應用於實際環境測試，如圖 3 所示，我們將感測器本身放置於平板加熱器 (heater) 上，使其能到達工作溫度，而因為需要通氣體，包含加熱器要放置於一不鏽鋼腔體，再用電性分析系統 (Keysight b1505) 點測；為使發展之感測器可以真正實用化，本實驗室發展一相關感測電路模組，其最大目的就是要降低一般量測機台的體積，讓此氣體感測器能夠在不同場域進行測試並收集資料。

圖 15 為量測電路基本架構，可以看到建構此電路主要分為四個部分：感測電路 (sensor circuit)、加熱電路 (heater circuit)、Wi-Fi 模組 (Wi-Fi module) 和感測器 (gas sensor) 本身，可以看到圖 14 中我們有感測與加熱兩種電極，因此會需要兩個電路分別用來接收訊號與提供電源加熱，也就是要將圖 14 放到圖 16 中的 Gas sensor，另外 Wi-Fi 模組的部分，因為感測電路只負責量測出電阻值，還須將其感測之數據上傳至電腦雲端介面，以便收集數據。目前供電的部我們是採取插座供電，更理想之作法為電池供電，若能以電池供電則可以實現攜帶式裝置。

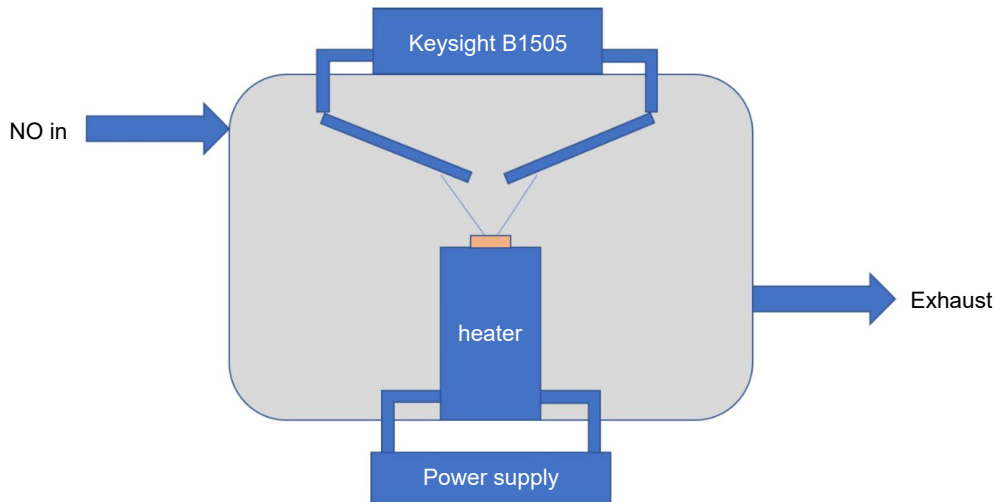


圖 15. 一般半導體量測機台示意圖。

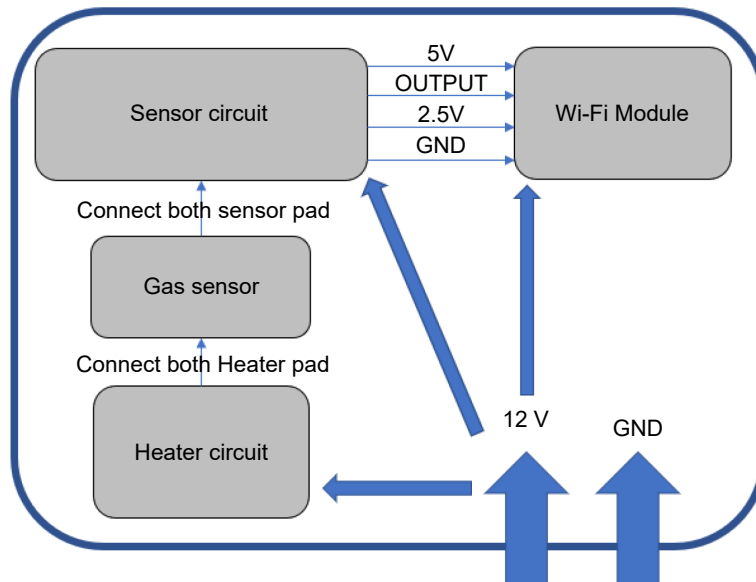


圖 16. 感測電路模組示意圖。

圖 17 為感測電路之簡易模型，可以看到我們進行測量時是量測薄膜電阻 (sensor resistance) 變化，而此感測電路是將 2.5 V 設為參考電壓，將 2.5 V 放大兩倍變成 5 V，並在 5 V 和 2.5 V 之間使用一顆參考電阻 (reference resistance)，用來產生一條參考電流 (reference current)，並讓此條參考電流流過 Sensor 電阻，藉此來獲得一電壓  $V_x$ ，而輸出電壓 (output) 為  $2.5 V - V_x$ 。此電路還能夠依照 Sensor 電阻來挑選不同的參考電阻。

圖 18 為加熱器電路，其由一組電橋、一理想放大器及一功率電晶體所組成。而此電路是藉由電橋上的電阻不平衡產生的電壓差值來控制是否開啟功率電晶體，首先假設電阻 1 (resistance 1) 和電阻 2 (resistance 2) 電阻值相等，先使用實驗得出的  $TCR = 0.00376$  來計算  $300\text{ }^\circ\text{C}$  下的 Heater 電阻值 (heater resistance)，並將可變電阻 (variable resistance) 調整至計

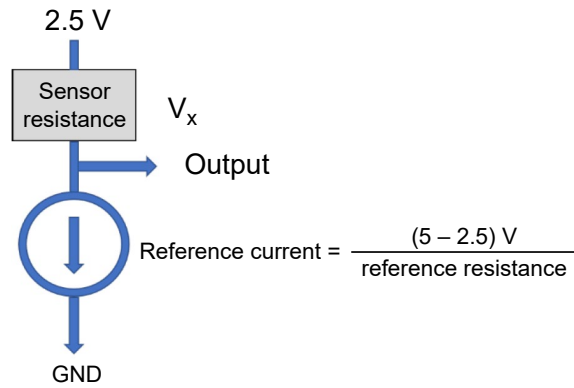


圖 17. 感測電路簡易模型。

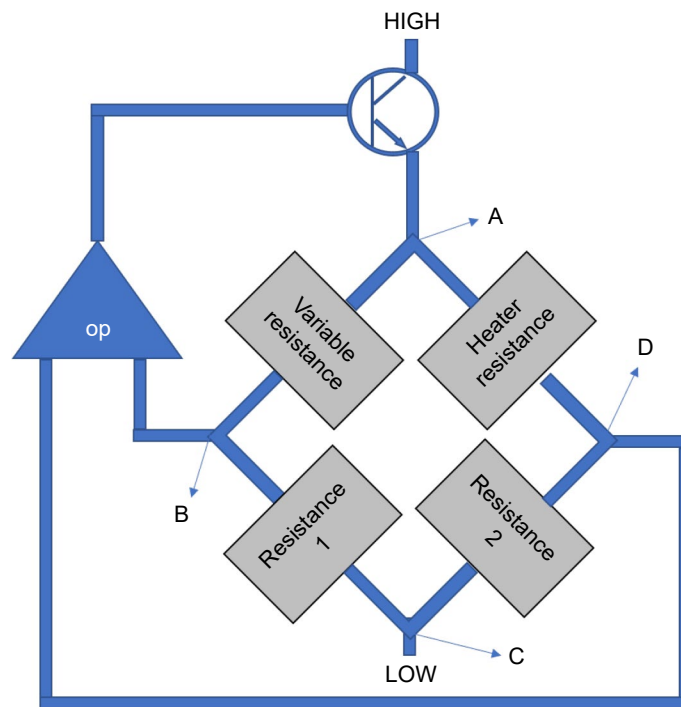


圖 18. 加熱電路。

算出的 Heater 電阻值，並假設點 B 和點 D 電壓相同時溫度保持平衡，所以當接上電源時，Heater 電阻值還是室溫之電阻值，因此依據惠斯同電橋公式可以得點 D 之電壓將會大於點 B 之電壓，因而致使放大器加大電壓使流過電橋之電流，流經 Heater 電阻之電流也會提升，藉此加大功率使 Heater 電阻升溫，當 Heater 電阻升溫至 300 °C 時，電橋達到平衡，點 B 和點 D 電壓也將相等，恢復至溫度保持平衡之情況。而在實際的電橋之中電阻 1 為 68 Ω，電阻 2 為 2.2 Ω，室溫下的 Heater 電阻約為 30 至 50 Ω，故根據惠斯同 (Wheat stone) 之公式：

$$\text{電阻 2 (可變電阻)} = \text{電阻 1 (Heater 電阻 (300 °C))}$$

經由化簡可得一簡單等式：

$$\text{可變電阻} = \frac{68}{2.2} (\text{Heater 電阻 (室溫 } 25^{\circ}\text{C 下)}) \times 2.034$$

故每次只需先量測室溫下 Heater 電阻值即可算出可變電阻應調至多少。而由上述皆為理想上之計算，在實驗時，除了利用計算方法外，還會使用紅外線溫度感測儀器去察看溫度是否有過高或過低之問題。

完成之實際電路與具有無線通訊 Wi-Fi 之電路如圖 19 與圖 20 所示，由於目前為實驗室驗證感測器之功能，未來此一部分將可繼續微型化，將電路製作成可攜帶式之 IC，藉以製作成微型感測器。

註 1：電阻溫度效應造成的電阻溫度係數 (temperature coefficient of resistance, TCR)，電阻溫度效應是指金屬材料會因溫度上升而使電阻上升，不同的金屬材料也會有不同的電阻溫度效應，而本研究使用的鉑金屬，理想之 TCR 為 0.0038，因 Heater 為 50 nm 鈦金屬以及 500 nm 鉑金屬組成，且 0.0038 為理想值，因此我們需要經由實驗測試實際的 TCR 去校正我們的電路，而測試出之 TCR 小於 0.00376。

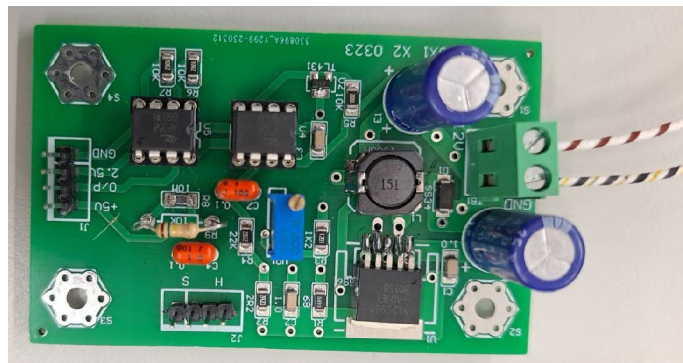


圖 19. 感測電路模組中的加熱電路與感測電路實際圖。

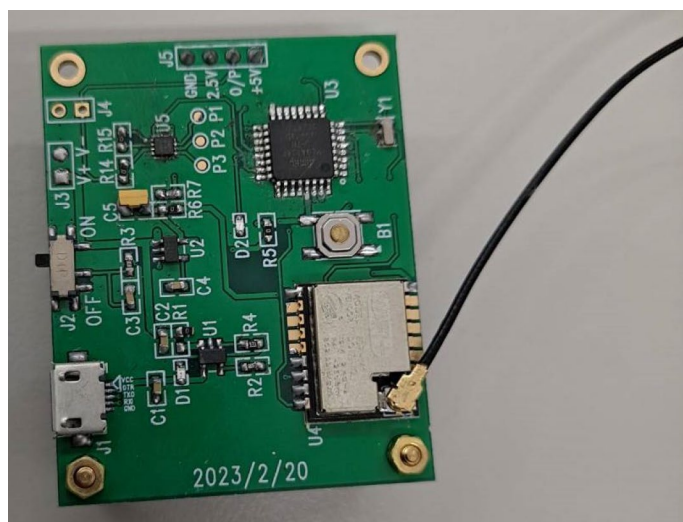


圖 20. 感測電路模組中的 Wi-Fi 模組實際圖。

#### 四、感測電路模組與一般量測系統之分析比較

圖 21(a) 為感測器採用一般半導體量測系統 (Keysight B1505 system) 量測在不同氣體濃度下之電阻對時間變化圖，5、2.5、1 以及 0.5 ppm 分別對應到 105.7%、73%、41%、22.1% 的氣體響應度，圖 21(b) 為實驗室開發之感測電路模組系統 (Wi-Fi system) 之電阻對時間變化圖，5、2.5、1 以及 0.5 ppm 分別對應到 270%、188.08%、93.92%、57.35% 的氣體響應度，可以看到本實驗室之感測電路模組之優勢為其電路架構促使量測到的變化百分比較大，大約為 2.6 倍。

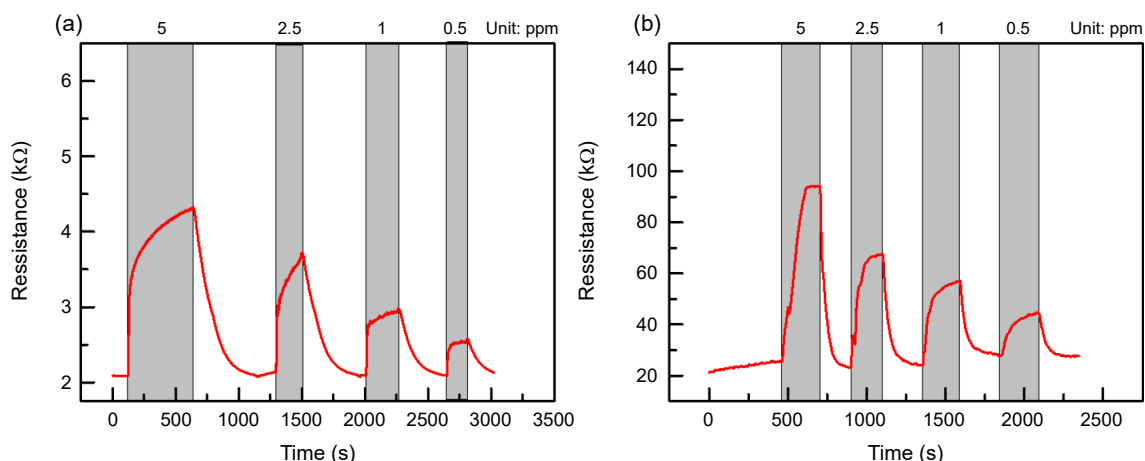


圖 21. 電阻對時間圖；(a) 於半導體量測系統與 (b) 於感測電路模組。

圖 22(a) 及圖 22(b) 中可以看到在感測電路模組量測的反應時間和回復時間也比較短，因為受其精度限制在漸緩區域之數值在感測電路模組上都會判斷不出來，進而使在電路板監測畫面為一直線，(見圖 21) 中灰色所框區域之最大值，在感測電路模組會量測到一直線，但在一般半導體量測系統會是一條漸漸趨緩的線，在計算時間都會因此縮短。

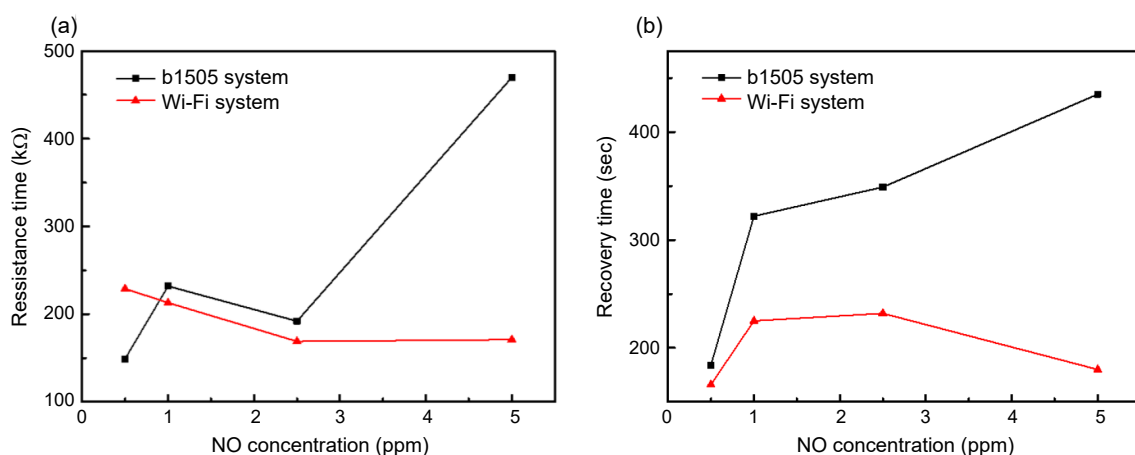


圖 22. 於兩種系統 (a) 反應時間比較 (b) 回復時間比較。

圖 23 為兩種系統量測的線性度分析，也就是線性回歸線之分析，越趨近 1 一表示量測到的數據是十分線性的，可以看到兩種並無太大差異，也顯示出本實驗室開發之模組縮小體積後依然保持線性度之一致，但離環保署規定之 0.995 仍有進步空間。另外可以看到量測結果圖 21 中灰色區域就是圖 13 中的變化 2，在通氣體之前趨於平穩的電阻就是變化 1，而灰色區域結束後其電阻值下降就為變化 3。綜合以上結果可以看出感測電路模組在縮小體積之下，在量測上之表現都保有優勢。

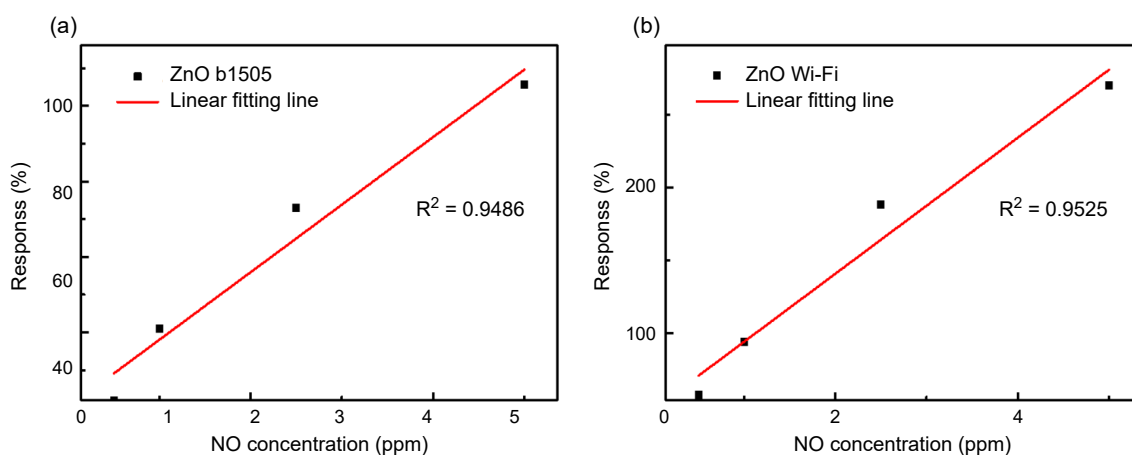


圖 23. 氣體響應度之線性度 (a) 於半導體量測系統 (b) 於感測電路模組。

## 五、結論

本團隊開發之半導體式一氧化氮感測器及其周邊電路縮小了一般量測系統的體積並在氣體響應度、反應與回復時間和線性度上皆具有優勢，目前已於台中之場域進行測試，另外也有跟其他團隊合作後續之人工智慧運算模型，以及積體式電路也正在開發中，也另有合作團隊開發其他種類的氣體感測器，未來期望能夠成功開發出氣體偵測陣列，為環境空汙及生物醫療有所貢獻。

## 參考文獻

1. 張婷喬, “以電漿表面處理優化氧化鋅之一氧化氮氣體感測器特性之研究,” 碩士, 電子研究所, 國立陽明交通大學, 新竹市, 2023. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11296/269kgm>
2. N. Barsan, M. Schweizer-Berberich, and W. Göpel, *Fresenius' journal of analytical chemistry*, **365**, 287 (1999).
3. G. Tournier and C. Pijolat, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **61** (1-3), 43 (1999).
4. B. Adamowicz, W. Izydorczyk, J. Izydorczyk, A. Klimasek, W. Jakubik, and J. Żywicki, *Vacuum*, **82** (10), 966 (2008).
5. A. Oprea, E. Moreton, N. Barsan, W. Becker, J. Wöllenstein, and U. Weimar, *Journal of applied physics*, **100** (3), 033716 (2006).
6. R. Fujimura, R. Zhang, Y. Kitamoto, M. Shimojo, and K. Kajikawa, *Japanese Journal of Applied Physics*, **53** (3), 035201 (2014).
7. X. Wang *et al.*, *The Journal of Physical Chemistry C*, **119** (28), 15963 (2015).
8. Y. Deng and Y. Deng, *Sensing mechanism and evaluation criteria of semiconducting metal oxides gas sensors*. Springer, (2019).
9. A. Gurlo, N. Barsan, A. Oprea, M. Sahn, T. Sahn, and U. Weimar, *Appl. Phys. Lett.*, **85** (12), 2280 (2004).



10. S. R. Morrison, *The chemical physics of surfaces*. Springer Science & Business Media, (2013).
11. M. J. Madou and S. R. Morrison, *Chemical sensing with solid state devices*. Elsevier, (2012).
12. X. Geng, C. Zhang, Y. Luo, and M. Debliquy, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **75**, 280 (2017).
13. A. Afzal, N. Cioffi, L. Sabbatini, and L. Torsi, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **171**, 25 (2012).

## 作者簡介

洪瑞華女士為國立中山大學電機工程研究所博士，現為國立陽明交通大學電子研究所特聘教授。

Ray-Hua Horng received her Ph.D. in the Department of Electrical Engineering from National Sun Yat-Sen University. She is currently a Distinguished Professor in the Institute of Electronics at National Chiao Tung University.

邱俊瑋先生現為國立陽明交通大學資訊科學與工程研究所博士生。

Chun-Wei Chiu is currently a Ph.D. student in the Institute of Computer Science and Engineering at National Chiao Tung University.