

手機操控可攜式二氧化氮氣體感測器

Smart Phone Operated Portable Nitrogen Dioxide Gas Sensor

施宣如、高宇翔、張庭維、沈煒翔、林儀豪、林奕成、廖泰杉、
蕭文澤、林鶴南

Hsuan-Ju Shih, Yu-Hsiang Kao, Ting-Wei Chang, Wei-Hsiang Shen, Yi-Hao Lin, Yi-Cheng Lin, Tai-shan Liao, Wen-Tse Hsiao, Heh-Nan Lin

本論文報導高靈敏度半導體式二氧化氮氣體感測晶片製作，及手機操控可攜式氣體感測器建構。感測材料為氧化銅／金／氧化鋅三元奈米複合材料，以低溫化學製程製作，可於四吋矽晶圓上批量生產。感測器由手機操控，結合人工神經網路智慧運算程式，可即時偵測環境二氧化氮濃度，並可上傳雲端。感測器最低偵測濃度為 5 ppb，範圍為 5 至 1000 ppb，已在環保署監測站完成場域測試及數據比對，可在高溫高濕環境工作，符合環境空氣品質監測要求。

This paper reports on the fabrication of highly sensitive semiconductor-type nitrogen dioxide gas sensing chips, and the construction of a smart phone operated portable gas sensor. The sensing material is a copper oxide/gold/zinc oxide nanocomposite and it is synthesized by low temperature chemical processes on a 4 inch silicon wafer. The sensor is operated by a cell phone with an artificial neural network algorithm for obtaining real-time environmental nitrogen dioxide concentration, and this data can be uploaded to a cloud database. The sensor has a lowest detection limit of 5 ppb and a sensing range between 5 and 1000 ppb. It has been installed in Environmental Protection Administration air quality monitoring station for field test and data comparison. The sensor functions normally in a high temperature and high humidity environment and is suitable for environmental air quality monitoring.

一、簡介

隨著經濟日益發展，許多環境污染問題漸趨嚴重，其中空氣汙染是近年人們關心的重大議題之一。空氣汙染除了危害人體身心健康外，也降低人們外出意願，導致區域活動率下降，進而影響經濟發展。在人為產生的污染氣體中，二氧化氮 (NO_2) 是危害人體健康及環境的主要氣體之一⁽¹⁾，其產生是由於高溫燃燒過程中，空氣中氮 (N) 與氧 (O) 反應形成一氧

化氮 (NO)，然後再與氧反應形成二氧化氮。研究指出，長時間暴露於 20 ppb 以上的二氧化氮，便會對人體呼吸系統造成危害⁽²⁾。此外二氧化氮也會造成酸雨，或是形成硝酸鹽粒子，增加 PM_{2.5} 微粒污染。

常見的氣體感測器分為光學式、電化學式及半導體式⁽³⁾，前者有極高準確度，後兩者準確度較低，但體積小價格便宜。目前環保署於各個縣市及重點區域設有空氣品質監測站，所使用之氣體感測器屬於光學式化學分析儀器，能準確測量各種污染氣體濃度，但體積龐大且價格不菲，並需置放在具溫控之室內空間。而電化學式氣體感測器，在高濕度環境下無法正常工作，不適合在台灣戶外環境，因此小型半導體式氣體感測器是戶外空氣品質監測最佳選擇，不過目前商用半導體式氣體感測器靈敏度、準確度及戶外穩定性仍須提升。此外，國內並無生產氣體感測元件廠商，若能在國內發展自有感測材料及技術，生產低成本半導體式氣體感測器，便能大量佈建，形成環境空氣品質監測物聯網。

半導體式氣體感測器又稱為化學電阻式 (chemiresistive) 氣體感測器，基本原理是當氣體分子吸附在半導體感測材料表面時，材料電阻產生變化，而變化率與氣體濃度有線性關係，因此可由電阻變化率得知氣體濃度。最早的半導體式氣體感測器由 T. Seiyama 等人於 1962 年發表⁽⁴⁾，使用材料為氧化鋅薄膜，而後有不同金屬氧化物薄膜被使用。由於金屬氧化物薄膜有良好化學穩定性，且容易製備，直到目前，商用半導體式氣體感測器仍是使用金屬氧化物薄膜。

近二十多年來，奈米材料相關研究蓬勃發展，金屬氧化物奈米材料，如氧化鋅 (ZnO)、氧化錫 (SnO₂)、氧化銦 (In₂O₃) 及氧化鎢 (WO₃) 等等，有很高的表面體積比，良好化學穩定性，且由於結構缺陷，具有半導體特性，因此金屬氧化物奈米材料非常適合用於氣體感測⁽⁵⁻⁸⁾。此外，若在金屬氧化物奈米材料成長貴金屬或是另一種金屬氧化物，形成奈米複合材料，更可大幅提升靈敏度。

本文介紹本實驗室以低溫化學製程，成長對二氧化氮具高靈敏度的氧化銅/金/氧化鋅三元奈米複合材料，最低偵測濃度為 5 ppb，可在四吋矽晶圓上批量生產感測晶片。也介紹手機操控可攜式氣體感測器建構，所使用的人工神經網路智慧運算程式，以及在環保署監測站場域測試的數據比對結果。

二、奈米材料應用於氣體感測

1. 氧化鋅一維奈米材料

氧化鋅一維奈米材料可以化學製程成長，不具毒性，且具有高靈敏度，是常見的氣體感測材料⁽⁹⁾。在常溫常壓下，纖鋅礦 (wurtzite) 結構為最穩定也是最常見的晶格結構，由於化學法成長之氧化鋅具有結構缺陷，以鋅間隙 (Zn_i⁺) 與氧空缺 (V_O[•]) 兩種為主要缺陷，這兩種缺陷會釋放電子使得氧化鋅形成以電子為多數載子的 n 型半導體⁽¹⁰⁾。

2. 氣體感測反應機制

以氧化鋅奈米柱為例，當氧化性氣體如氧氣或二氧化氮吸附於氧化鋅表面時，氣體分子從氧化鋅表面抓取電子形成化學吸附，使得氧化鋅的自由電子減少、導電度下降 (電阻上升)。反之，若還原性氣體如氨氣 (NH₃) 吸附於氧化鋅表面時，則會使導電度上升 (電阻下降)。氣體分子在材料表面除了吸附，同時也會進行脫附，氣體感測響應值，基本上是在平

衡時量到的數值。由於常溫下氣體脫附速率很慢，需要施加適當外力加速脫附，縮短反應時間。常見的脫附方式有兩種，一是提高溫度使氣體分子脫附，高溫提供氣體分子足夠的能量，使化學鍵斷鍵機率上升，進而提升脫附速率。二是利用紫外光照射，當紫外光的能量高於材料能隙 (band gap)，電子可從價帶躍遷至導帶，並於價帶留下電洞，電洞會因內電場而移動到材料表面，與帶負電氣體分子結合使其脫附，此稱為紫外光活化模式 (UV-activation)^(6, 8)。

3. 奈米貴金屬及金屬氧化物修飾

在金屬氧化物奈米材料表面成長奈米貴金屬或是另一種金屬氧化物，形成奈米複合材料，所產生的異質界面 (heterojunction) 具有內電場，有助於氣體分子吸附，可提升靈敏度⁽⁵⁻⁸⁾。而奈米貴金屬具有高導電性，內部具有大量自由電子，可以扮演觸酶角色促進氣體分子吸附。對紫外光活化模式，產生的電子電洞在奈米材料內容易再結合，添加奈米貴金屬或金屬氧化物後，可促進電子與電洞分離至異質材料兩端，降低再結合率，進而提升靈敏度。

三、實驗步驟

1. 感測晶片製程

為了批量生產感測晶片，我們製作適合四吋晶圓之光罩，利用黃光微影在四吋晶圓上定義出電極圖形，再使用電子束蒸鍍鍍上金及鈦薄膜，形成微電極，一次可製作約 300 對電極。材料成長之晶種液為乙醇加入氫氧化鈉 (3 mM) 與醋酸鋅 (10 mM) 在 72 °C 的烘箱加熱 3 小時後獲得，並利用噴塗機將晶種液均勻噴灑於四吋晶圓表面。接著使用水熱法成長氧化鋅奈米柱，將佈有晶種層之四吋晶圓放入六亞甲基四胺 (50 mM) 與硝酸鋅 (65 mM) 的水溶液中，並放置於 95 °C 的烘箱 7 小時後即成長出氧化鋅奈米柱。

完成氧化鋅奈米柱成長後，我們利用波長 254 nm 之紫外光燈將金及氧化銅還原至氧化鋅奈米柱表面。首先將完成氧化鋅奈米柱成長之四吋晶圓放置於 10^{-4} M 的四氯金酸溶液中，以紫外光照射 30 秒，接著再將四吋晶圓泡入 10^{-4} M 的硫酸銅溶液，以紫外光照射 4 小時，最後形成由氧化銅奈米粒子、金奈米粒子及氧化鋅奈米柱所組成之三元複合奈米材料，詳細步驟可參考我們所發表論文^(11, 12)。

2. 氣體感測

完成感測材料成長後，感測晶片由四吋晶圓破片取下，並將感測晶片固定於印刷電路板上，使用超音波焊線機將晶片電極與印刷電路板電極以鋁線連接。氣體感測實驗採用紫外光活化模式，將感測晶片放入含紫外光二極體 (UV LED) 的感測模組中，以多功能電源電錶 (Keithley 2400) 於感測晶片電極兩端提供 5 V 的電壓，在背景為一大氣壓大氣之密閉 8 升腔體，相對溼度 55% 的環境下進行電阻量測。由濃度 500 ppm 的二氧化氮鋼瓶提供測試之活性氣體，並已透過氮氧化物分析儀 (Teledyne Api T200) 確認鋼瓶濃度，我們使用質量流量控制器維持固定流速 8 sccm，例如，進氣一分鐘會通入 8 c.c. 氣體，因此腔體內濃度即為 500 ppb 二氧化氮，因此可以藉由通入氣體的時間來控制腔體內之二氧化氮濃度。

通入活性氣體後，感測晶片電阻對時間的變化將被記錄，等待電阻值趨於穩定後，開啟腔體閥門並利用幫浦將氣體抽走，同時引入大氣以維持腔體內部壓力，等待晶片電阻值回復至通氣前之初始值，即完成一次氣體感測之循環。氣體感測響應 (response) 定義為通入活性氣體前後的電阻變化率 $(R_g - R_0)/R_0$ ，其中 R_g 為活性氣體中電阻值， R_0 為大氣中電阻值。

四、結果與討論

1. 材料分析與氣體感測

圖 1(a) 為氧化鋅奈米柱的掃描電子顯微鏡影像，我們可以看到氧化鋅呈現六角柱形結構且互相交錯，直徑約為 50–100 奈米。圖 1(b) 為氧化銅／金／氧化鋅三元奈米複合材料的掃描電子顯微鏡影像，在左下角的縮圖中可以觀察到有氧化銅粒子在氧化鋅奈米柱頂端，大小約為 300 奈米。圖 1(c) 為氧化銅／金／氧化鋅的大面積影像，顯示了大面積成長之均勻性，圖 1(d) 為氧化銅／金／氧化鋅成長於具對電極四吋晶圓之照片。

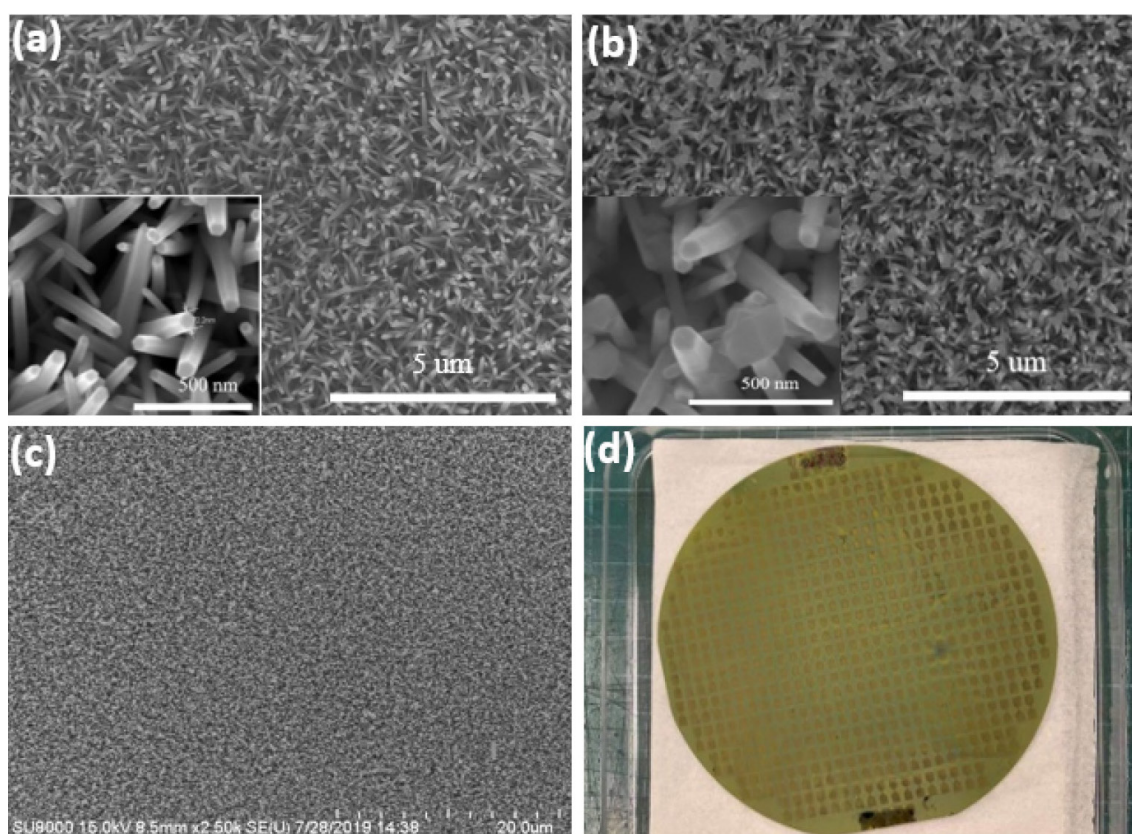


圖 1. (a) 氧化鋅奈米柱之掃描電子顯微鏡影像；(b) 氧化銅／金／氧化鋅三元奈米複合材料之掃描電子顯微鏡影像；(c) 大面積影像；(d) 成長於具對電極四吋晶圓上之照片。

對氧化銅／金／氧化鋅三元奈米複合材料感測晶片進行不同濃度二氧化氮感測，其電阻對時間變化圖如圖 2(a) 所示，在 25、125、300、600、850、1000、1500 及 3000 ppb 的濃度下，得到 3.3%、17%、50%、130%、200%、270%、360% 及 460% 的響應。將響應對濃度做圖，如圖 2(b) 所示，在小於 1000 ppb 低濃度範圍，響應對濃度呈現線性關係，其靈敏度 S 為 2.58 ppm^{-1} ，在 5 ppb 時響應約為 1.3%。由於訊號雜訊為 0.8%，以二倍雜訊對應之濃度作為最低偵測極限 (lowest detection limit)，因此極限約為 5 ppb，符合環保署對二氧化氮最低感測濃度 5 ppb 的要求。

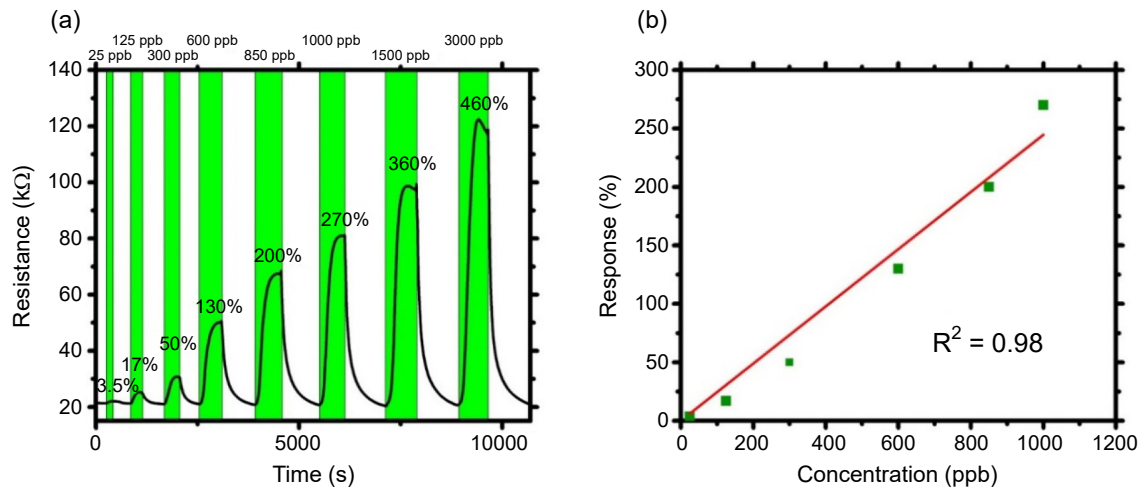


圖 2. (a) 感測晶片在通入 25 至 3000 ppb 二氧化氮之電阻對時間變化圖；(b) 在 25 至 1000 ppb 之響應對濃度之線性擬合圖。

2. 晶圓級點測

一般感測晶片的測試由晶圓破片取得晶片，接著逐一打線固定在電路板上，然後進行氣體感測。此人工挑選晶片方式極為耗時，不利於商業化應用，因此利用台灣儀器科技研究中心 (以下簡稱儀科中心) 現有之晶圓級點測系統進行改裝，其實體圖如圖 3 所示⁽¹³⁾。此晶圓點測系統具影像辨識，可精確移動探針卡至四吋晶圓上之電極陣列，探針卡一次可以點測 5 個感測晶片，完成四吋晶圓共 302 個感測晶片的氣體感測約需花費 4 小時，平均一個感測晶片不到 1 分鐘。



圖 3. 儀科中心架設之晶圓級點測系統設備圖。

將四吋晶圓放入點測設備後，需先利用四吋晶圓上的十字圖形進行 X 軸與 Y 軸對位，便可開始進行氣體感測。由於目前設備無法提供 UV LED 來激發材料，因此只針對氧化鋅奈米柱進行晶圓級氣體感測。首先量測氧化鋅奈米柱在空氣中的電阻值 R_0 ，圖 4(a) 及 4(b) 顯示氧化鋅奈米柱於四吋晶圓上電阻值 R_0 的分層設色圖及分布直方圖，可見大部分晶片電阻值落於 110 至 170 $k\Omega$ 間，具有良好之均勻性。接著通入 500 ppb 之二氧化氮，等待 20 分鐘讓氣體均勻擴散至設備之腔體內部，再進行晶片的點測，此時在二氧化氮氣體環境下量測到的電阻值 R_g ，經由計算電阻變化率即可得到響應。圖 4(c) 為氧化鋅奈米柱感測晶片於四吋晶圓上響應的分層設色圖，圖 4(d) 氧化鋅奈米柱於四吋晶圓響應數值分布直方圖，平均響應值約為 492%，標準差為 217%，由於這是無照光模式，所以響應比在實驗室以相同氣體濃度測試下高。由圖 4(c) 的響應分布圖可見，晶片均勻性仍有改善空間，但透過此批量點測設備可以挑選電阻值 R_0 與響應值皆相似的晶片，以便放置於戶外場域測試。

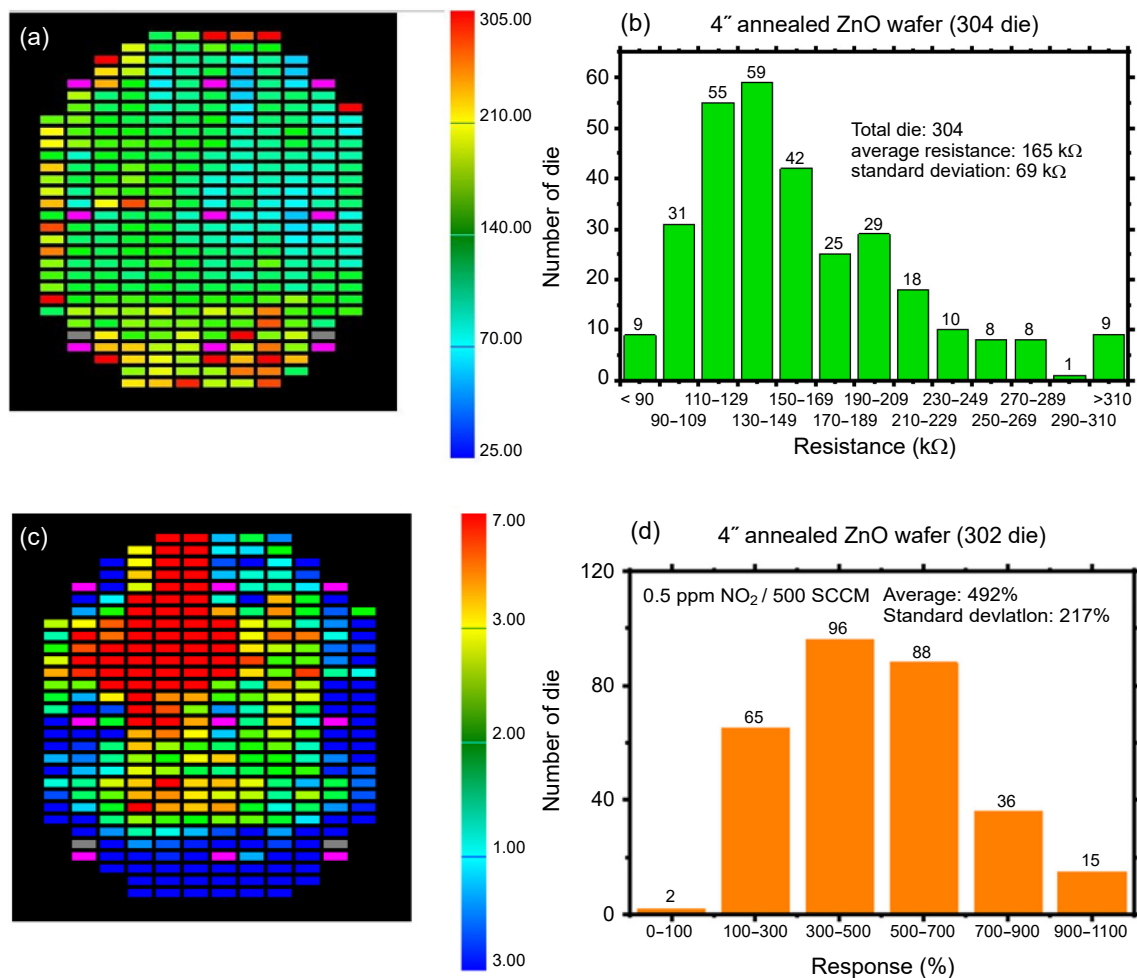


圖 4. 氧化鋅奈米柱於四吋晶圓上電阻值 R_0 的(a)分層設色圖及 (b) 分布直方圖；氧化鋅奈米柱於四吋晶圓上響應的 (c) 分層設色圖及 (d) 分布直方圖。

3. 可攜式氣體感測器製作與校正

我們以類似實驗室的感測架構，由儀科中心設計電路，組裝了一台手機操控可攜式氣體感測器，其長寬高分別為 26、9 及 6 公分，如圖 5(a) 所示。圖 5(b) 上方為感測模組，內有感測晶片及 UV LED，下方為控制電路、藍芽通訊模組。可以利用手機藉由藍芽連接氣體感測器，並透過 APP 軟體程式，記錄感測晶片之電阻值變化，用來比對內建於程式之氣體響應濃度關係曲線，以求得環境之氣體濃度。氣體濃度能顯示於 APP 介面上，也能上傳雲端資料庫。此外，氣體感測器內有溫溼度感測模組，可同時記錄環境溫濕度。由於 LED 光強度隨著溫度上升而降低，因此透過實際量測，將不同溫度驅動電流內建於 APP，使得在不同溫度時 LED 光強度為定值。由於 LED 封裝良好，實測後證實濕度並不會對光強度有影響。

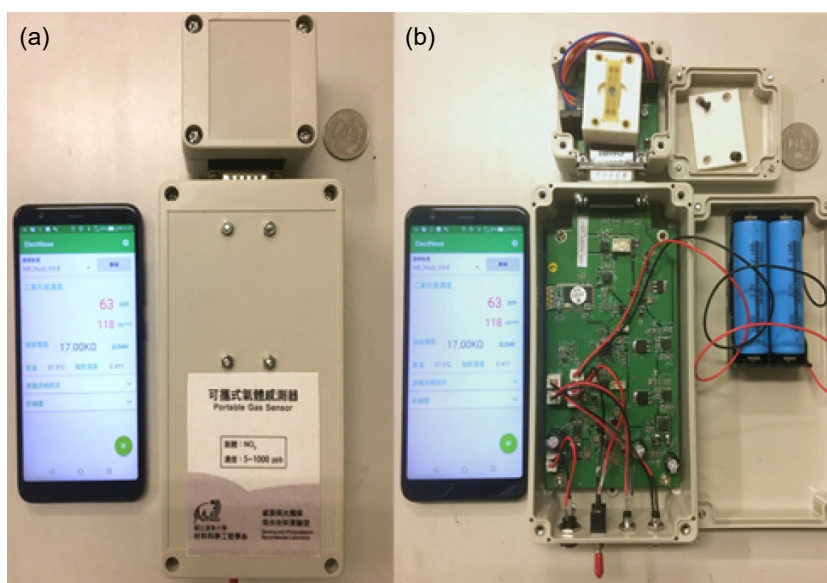


圖 5. (a) 手機操控可攜式氣體感測器之外觀；(b) 上方為感測模組，內有感測晶片及 UV LED，下方為控制電路及藍芽通訊模組。

我們也對氣體感測器進行校正並驗證其與標準值之誤差，利用質量流量控制器控制通入密閉腔體之二氧化氮濃度，於密閉腔體中放入可攜式氣體感測器，透過藍芽連結手機，感測晶片的電阻值由 APP 顯示，接著以氮氧化物分析儀精準量測二氧化氮的濃度。由於感測晶片在 1000 ppb 以下，其響應對濃度呈現線性關係，因此我們通入 150 到 900 ppb 不同濃度二氧化氮，記錄每一次通氣後感測晶片電阻值 R_g 及氮氧化物分析儀所得之氣體濃度 (此為標準濃度)，將電阻值對標準濃度做圖後，如圖 6(a) 所示，可由線性擬合得到靈敏度 S (即斜率) 為 8.46 ppm^{-1} ，及在大氣下電阻值 R_0 (即縱軸截距) 為 $23.05 \text{ k}\Omega$ ，將得到之靈敏度 S 及電阻值 R_0 輸入至 APP 軟體中，如此完成感測器之校正。然後我們在線性範圍內通入不同濃度二氧化氮，得到電阻值 R_g 後，利用先前得到的 S 及 R_0 ，APP 可計算出二氧化氮濃度，將計算之二氧化氮濃度與氮氧化物分析儀所得之標準濃度做圖，如圖 6(b) 所示，所得之決定係數 (coefficient of determination) R^2 值為 0.97，顯示校正後的可攜式氣體感測器可以測得相當準確的二氧化氮濃度值。

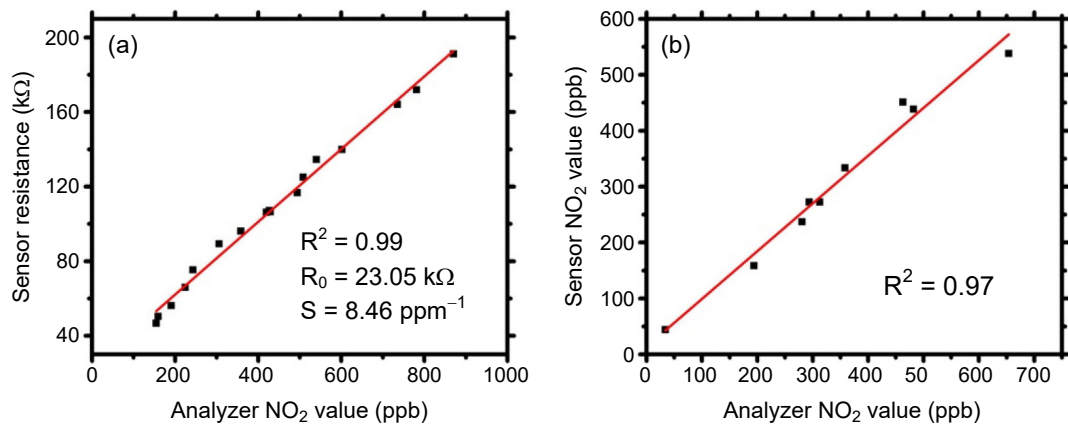


圖 6. (a) 感測晶片電阻值 R_g 對標準濃度之線性擬合；(b) 氣體感測器所得之氣體濃度對標準濃度之線性擬合。

4. 場域測試

我們也對感測器進行場域測試，驗證在戶外環境之準確度及穩定性。將手機及可攜式氣體感測器放入空氣盒子中，各個零件擺放如圖 7(a) 所示，底部的空氣盒子底蓋有三個開孔，一孔連接風扇將環境空氣吹入空氣盒子內，一孔做為排氣孔，最後一孔則做為外接電源的電線通道，提供手機及感測器電源。空氣盒子置放於環保署新北市永和監測站，如圖 7(b) 所示。以上提到藉由簡單比對氣體響應對濃度關係曲線，直接將量測到之電阻轉換成二氧化氮氣體濃度，然而在戶外環境中，感測晶片電阻值會受到溫濕度影響，戶外也存在各種不同干擾氣體，因此我們開發了人工神經網路 (artificial neural network, ANN) 智慧運算程式來計算二氧化氮濃度。

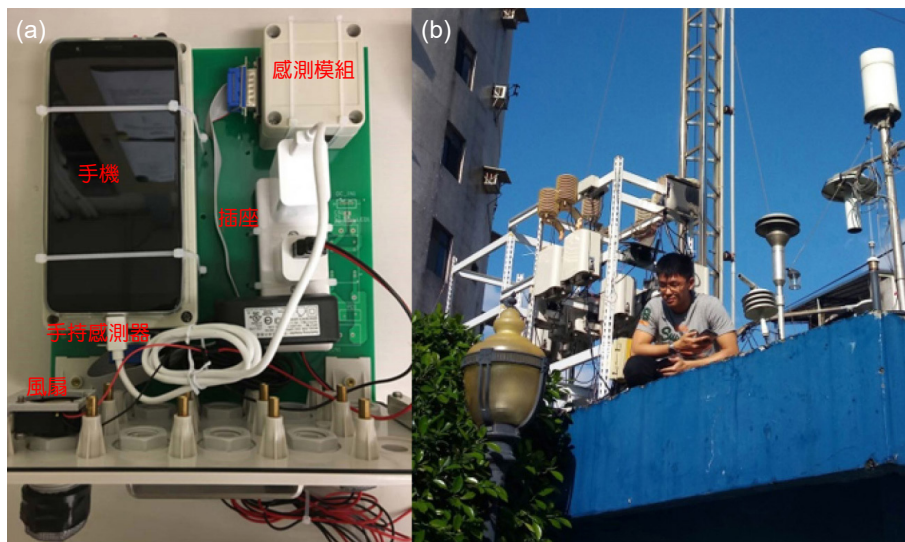


圖 7. (a) 感測器置放於空氣盒子，用於戶外場域測試；(b) 在環保署新北市永和空氣品質監測站上方進行場域測試。

人工神經網路是機器學習的方法之一，二氧化氮濃度與電阻 (R)、溫度 (T) 及濕度 (H) 有關，再加上感測晶片對於環境的改變有遲滯效應，即感測晶片無法顯示當下環境氣體濃度對應的電阻值，故還需考慮感測晶片電阻的延遲 (R_{t-1})。我們利用上述四個變數做為輸入值，來建立人工神經網路之模型 $C_{NO_2} = F(R, T, H, R_{t-1})$ ，並將電阻及溫溼度等原始數據依照時間切成兩段，分別用於訓練 (training) 與測試 (testing)。在訓練的過程中，將函數計算的數值與環保署提供之二氧化氮真實濃度做比對，藉由改變輸入值的權重來優化模型。得到訓練結果最佳運算模型後，將此模型套用於測試部分的原始數據，計算出二氧化氮濃度，再與真實濃度做比較。

經挑選適當感測晶片後，我們把晶片放置於可攜式氣體感測器內並將其送至戶外進行場域測試。圖 8 為感測晶片於新北永和測站之場域測試結果，其中圖 8(a) 為感測器約兩個禮拜的訓練情形，其計算之二氧化氮濃度與環保署二氧化氮濃度的平均絕對誤差 (mean absolute error, MAE) 大約為 8.6 ppb，並將此學習得到的運算模型，對一個月數據做測試，計算濃度與真實濃度如圖 8(b) 所示，其 MAE 為 10.7 ppb，決定係數 R^2 值為 0.275，雖然結果並非理想，但也驗證了感測器可在高溫高濕環境工作，所開發的人工神經網路運算程式具有某種程度實用性。由於金屬氧化物對臭氧也具有極高靈敏度，因此我們判斷在加入臭氧濃度後， R^2 值應可提升，目前實驗正進行中。

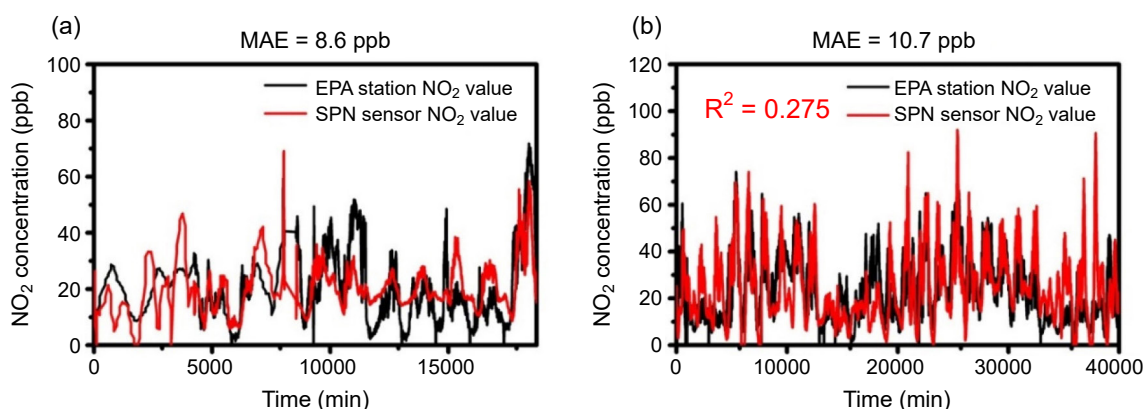


圖 8. (a) 利用感測器數據及測站真實濃度之訓練結果；(b) 一個月測試期間的感測器計算濃度與測站真實濃度比較。

此外，我們將在戶外測試一個月後的感測晶片做分析，在掃描電子顯微鏡下的微觀形貌並無改變，但在 X 射線光電子能譜 (X-ray photoemission spectroscopy, XPS) 中發現氮及硫元素的微量訊號，推測是大氣中之污染物硫酸及硝酸與銅氧化物產生化學反應，形成硫酸銅 ($CuSO_4$) 及硝酸銅 ($Cu(NO_3)_2$)，使得材料表面產生氮及硫之污染，不過依照光譜強度來判定其含量並不多。

五、結論

我們以低溫化學製程，在四吋晶圓上，製作出氧化銅／金／氧化鋅三元奈米複合材料氣體感測晶片，對二氧化氮具有高靈敏度，最低偵測極限為 5 ppb，濃度範圍為 5－1000 ppb，

符合環境監控二氧化氮的濃度要求。也建立了晶圓級點測系統，可快速篩選晶片，平均每片晶片所需測試時間低於 1 分鐘。同時也建構手機操控可攜式氣體感測器，並開發人工神經網路智慧運算程式。將感測器置放於環保署永和測站進行場域測試，得到決定係數為 0.275，驗證感測器可在高溫高濕環境工作，適用於環境空氣品質監測。

誌謝

作者感謝科技部經費補助 (計畫編號 110-2221-E-007-071 與 110-2218-E-007-056-MBK)，環保署環境監測及資訊處監測站數據提供，及廣域科技公司場域測試協助。

參考文獻

1. M. Kampa and E. Castanas, *Environmental Pollution*, **151**, 362 (2008).
2. P. Achakulwisut, M. Brauer, P. Hystad, and S. C. Anenberg, *Lancet Planet Health*, **3**, e166 (2019).
3. G. Neri, *Chemosensors*, **3**, 1 (2015).
4. T. Seiyama, A. Kato, K. Fujiishi, and M. Nagatani, *Analytical Chemistry*, **34**, 1502 (1962).
5. D. R. Miller, S. A. Akbar, and P. A. Morris, *Sensors and Actuators B*, **204**, 250 (2014).
6. Z. Li et. al, *Materials Horizons*, **6**, 470 (2019).
7. N. Kaur, M. Singh, and E. Comini, *Langmuir*, **36**, 6326 (2020).
8. A. Chizhov, M. Rumyantseva, and A. Gaskov, *Nanomaterials* **11**, 892 (2021).
9. L. Zhu and W. Zeng, *Sensors and Actuators A*, **267**, 242 (2017).
10. L. Schmidt-Mende and J. L. MacManus-Driscoll, *Materials Today*, **10**, 40 (2007).
11. W. C. Lu, S. S. Kumar, Y. C. Chen, C. M. Hsu, and H. N. Lin, *Materials Letters*, **256**, 126657 (2019).
12. R. Gandotra, Y. R. Chen, T. Murugesan, T. W. Chang, H. Y. Chang, and H. N. Lin, *Journal of Alloys and Compounds*, **873**, 159769 (2021).
13. 陳銘福, 林儀豪, 陳志文, 陳柏睿, 林郁欣, 卓文浩, 陳建霖, 柯志忠, 科儀新知, **221**, 88 (2019).

作者簡介

施宣如小姐現為國立清華大學材料科學工程學系碩士班學生。

Hsuan-Ju Shih is currently a M.S. student in the Department of Materials Science and Engineering at National Tsing Hua University.

高宇翔先生現為國立清華大學材料科學工程學系碩士班學生。

Yu-Hsiang Kao is currently a M.S. student in the Department of Materials Science and Engineering at National Tsing Hua University.

張庭維先生為國立清華大學材料科學工程學系碩士，現為台灣先藝公司原子沉積製程工程師。

Ting-Wei Chang received his M.S. in the Department of Materials Science and Engineering from National Tsing Hua University. He is currently a Process Support Engineer of ALD in the Advanced Semiconductor Materials, Taiwan.

沈煒翔先生現為國立清華大學電機工程學系博士班學生。

Wei-Hsiang Shen is currently a Ph.D. student in the Department of Electrical Engineering at National Tsing Hua University.

林儀豪先生為國立中興大學生物產業機電工程學系碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。

Yi-Hao Lin received his M.S. in the Department of Bio-industrial Mechatronics Engineering from National Chung Hsing University. He is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

林奕成先生為國立虎尾科技大學飛機工程學系碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心助理研究員。

Yi-Cheng Lin received his M.S. in the Department of Aeronautical Engineering from National Formosa University. He is currently an Assistant Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

廖泰杉先生為中原大學電子工程博士，現為能資國際股份有限公司資深研究員。

Tai-shan Liao received his Ph.D. in Electronic Engineering from Chung Yuan University. He is currently a Senior Researcher of Energy Resources International Company.

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.

林鶴南先生為美國布朗大學物理博士，現為國立清華大學材料科學工程學系教授。

Heh-Nan Lin received his Ph.D. in Physics from Brown University, USA. He is currently a Professor in the Department of Materials Science and Engineering at National Tsing Hua University.