

光學式二氧化氮氣體感測系統

The Optical Gas Detection System for Nitrogen Dioxide

鄭杰晰、王俊凱、邱裕中

Jie-Si Zheng, Chun-Kai Wang, Yu-Zung Chiou

基於因應在 NO₂ 氣體感測之「廣布建置」與「簡單維護」之需求上，本團隊開發光學式 NO₂ 氣體感測系統，感測晶片從磊晶結構設計、磊晶成長、晶粒製作、晶粒封裝、光路系統開發整合到最後實測與修正皆為國產製造，成本較傳統高階儀器便宜許多，並且在感測元件上已進入小量產階段。感測晶片透過磊晶結構的光學設計，特別針對 NO₂ 氣體光吸收頻譜進行設計，因此該晶片只會對特定區域範圍之光能量進行反應，並產生相應電流值，如此可以排除環境其他光線之影響。系統預設置於嚴苛環境，因此在設計上採高規格，通過 IPX3 防水認證，並於環保署台南測站上方裸落環境中連續測試長達 2 年。在特色上具有不需耗材、容易維護、瞬間反應、解析度達 2 ppb 等特點，在與環保署台南測站數據比較，決定係數高達 0.786。

Our team develops an optical NO₂ gas sensing system based on the demand of “wide deployment” and “simple maintenance” in NO₂ gas sensors. The gas sensors are made in our country from structure design, epitaxial growth, chip fabrication, chip packaging, optical path development, and system integration. The cost of our development system is much cheaper than traditional precision instruments, and the gas sensing chips have entered the stage of pilot run. These sensing chips are designed with an epitaxial structure, especially for the light absorption spectrum of NO₂ gas. Therefore, the chips can only detect light wavelengths in a specific range and generate corresponding photocurrents, which can exclude the influence of ambient light. Our system is placed in a harsh environment, so it is designed with high specifications and has passed the IPX3 waterproof certification. And our system has been continuously tested at the Tainan station of the Environmental Protection Agency for two years. It has the characteristics of no consumables, easy maintenance, instant response, and a resolution of 2 ppb. Compared with the data from the Tainan station of the Environmental Protection Agency, the coefficient of determination is as high as 0.786.

一、NO₂ 氣體感測重要性與感測

1. NO₂ 氣體偵測重要性

世界自 1870 年工業革命以來，許多產品開始進入大量製造的時代，因「量產化製造」讓人類生活擁有充足的物資，卻也伴隨著對環境的污染、譬如廢水排放、廢氣排放、噪音污染等。由於居住環境越來越糟，嚴重到影響健康，而引起人們對環保議題的重視，尤其

近幾年來在空氣品質這領域，被討論的最為熱絡。 $\text{PM}_{2.5}$ 是指粒徑小於 $2.5\ \mu\text{m}$ 之微塵其直徑約為毛髮的 $1/28$ ，成分包含各種物質，大致上可分為硝酸鹽類、硫酸鹽類、銨鹽類等幾種類別，或含有更複雜的複合成分。因為粒徑過小，這些化學成分有機會夠過微血管進入人體，引發各種健康問題，對於腦部的影響可能會引發中風、智力降低、中樞神經系統疾病，對於心臟之影響可能會引發心臟病、心律不整、心肌梗塞，對於肺部之影響可能會引發肺癌、哮喘、肺功能受損，對於生殖系統可能會引發早產、嬰兒體重不足、生殖功能異常，對於末梢可能會引發末梢發炎、凝血功能異常、高血壓等症狀。如圖 1 所示，根據環保署公告 $\text{PM}_{2.5}$ 的生成原因可分為原生性及衍生性，而在台灣會對人體造成危害的幾乎是衍生性型的 $\text{PM}_{2.5}$ ⁽¹⁾。環保署之 AQI 指標是用來評定空氣品質之重要指標，其中除了 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 以外還包含了 O_3 、 CO 、 NO 、 SO_2 、 NO_2 等氣體。如圖 2，環境中氮氧化物 (NO_x) 的污染原可以分成移動源、固定源以及面源，佔最大宗的是移動源，包含大貨車、自用小客車、港區船舶、機車等，其次是固定源，包含電力業、化學材料製造業、水泥及預拌混凝土、其他工廠工業污染⁽²⁾。氮氧化物的污染涵蓋了一氧化氮 (NO) 及二氧化氮 (NO_2)。直接由人體吸入可能會引發肺部疾病、腎臟病、心血管疾病，而飄散至空氣中隨著雨水降下形成酸雨對於植物來說會引起土壤礦物質流失、枯萎、重機屬殘留問題，也會使建築物結構鏽蝕、鋼筋裸露、橋墩鏽蝕。可以說 NO_x 除了對人體的危害以外還會造成嚴重的環境危害問題，因此對其排放進行偵測與限制非常重要。

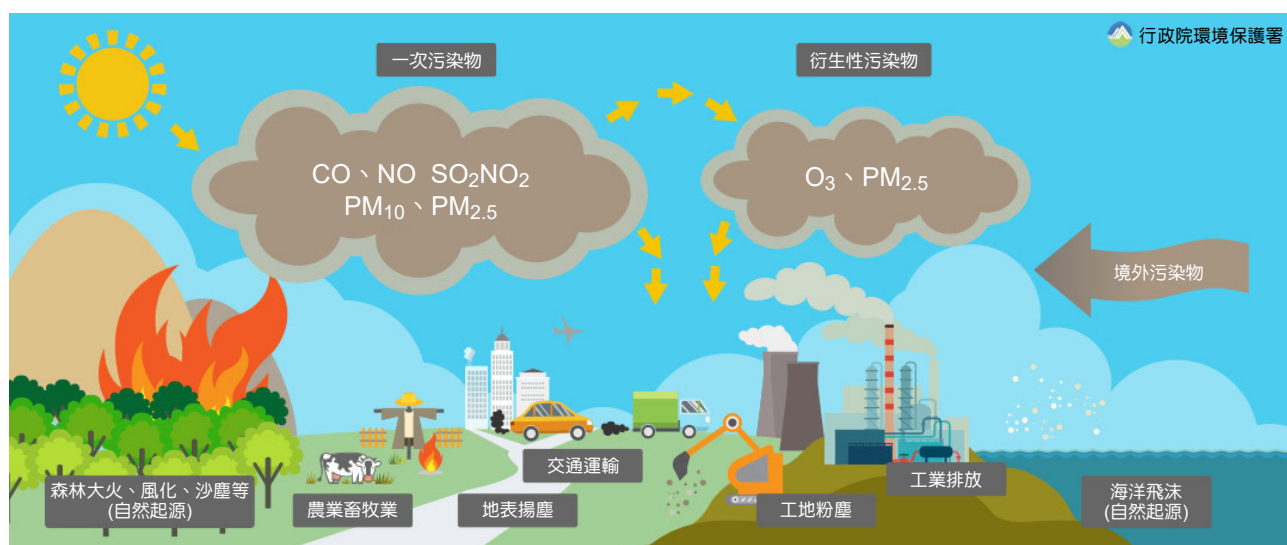


圖 1. 環保署公告之 $\text{PM}_{2.5}$ 來源⁽¹⁾。

2. 目前 NO_2 氣體偵測原理

以精準度來說目前環保署所採用之檢測方法是最準確的，其偵測原理是讓環境 NO_2 氣體通過轉換器形成 NO ，再通入 O_3 與其進行反應產生螢光，透過偵測反應後產生螢光的強度來推估 NO 的濃度，再間接回推 NO_2 的濃度。其次市售之標竿 NO_2 氣體感測器接是採用電化學原理來進行 NO_2 的檢測。半導體薄膜會在薄膜表面吸附 NO_2 氣體，進而改變薄膜阻抗，只要透過偵測薄膜阻抗之變化即可回推環境 NO_2 氣體之濃度。一般市售標竿 NO_2 氣體感測器最低偵測濃度約為 20 ppb。

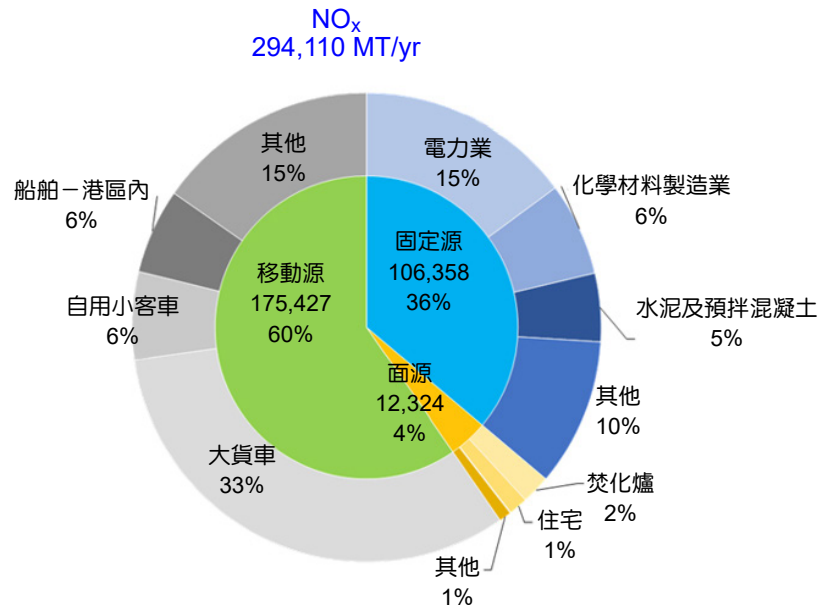


圖 2. 環保署公告之環境 NO_x 來源⁽²⁾。

3. 國內外二氧化氮氣體感測器發展

目前許多關於 NO_2 氣體感測的文獻分別是用奈米碳管、石墨烯、二硒化鉬、氧化亞銅、氧化鎳、氧化鋅摻錫、氧化鋅奈米柱等材料來製作⁽³⁻¹⁰⁾，這些文獻全部都是以電化學的方式來偵測二氧化氮，採用之基本原理是利用薄膜表面之氧化還原反應來改變感測元件的阻抗，藉此推估環境中二氧化氮的氣體濃度。在國內外的論文文獻中，並無其他人發表以光學式方式進行 NO_2 氣體感測的元件之相關文獻。而本團隊製作之光學式 NO_2 氣體感測系統是第一個以光學方式來對 NO_2 氣體進行感測之系統

二、光學式 NO_2 氣體感測系統研發動機

NO_2 除直接吸入會對人體健康造成影響以外，間接形成酸雨也會對環境造成危害，因此限制 NO_2 排放數量是最直接能夠降低其對環境危害的手段，而台灣除了科學園區以及各大工業區以外，也會有許多的中小企業的工廠藏在郊區的巷弄裡，若以目前地方環保局及環保署所布置的 NO_2 感測站密度來看，想從感測數值對其稽核是否有違規排放是非常困難的。而政府單位所建立之測站日度不夠的主要原因未達精準量測需求，測站儀器都會採用高階儀器，然後高階儀器的價格昂貴，難以進行廣布建置。在傳統的 NO_2 氣體感測方法中，採用電化學的原理來感測 NO_2 氣體濃度，是最便宜的方式。然而，以電化學的原理來感測 NO_2 氣體濃度會有反應速率慢與感測器鈍化之問題。其感測原理是，當 NO_2 在半導體表面進行吸附時，會改變半導體之阻抗，在給予感測元件固定電壓就能因為阻抗變化而得到相應的電流變化，該電流變化與 NO_2 之氣體濃度相關，依此就能夠推估出相應的 NO_2 氣體濃度。當環境沒有 NO_2 或氣體吸附一段時間後，薄膜表面的 NO_2 會脫附，使半導體恢復未反應前之阻抗值，因此元件之電流也會隨 NO_2 氣體濃度降低而變化。通常會透過加熱來加速這個脫附的過程，來達到持續測試的效果。然而反覆的加熱過程，卻會使半導體吸附與脫附的效率變差，導致 NO_2 氣體感測鈍化，甚至失效。這使採用電化學原理之 NO_2 氣體感測

器，在實際應用上，需要每隔一段時間將感測頭進行替換，且準確度產生浮動變化，等同必須安排專員固定時間對電化學式的 NO_2 感測系統進行維護，當布建密度提高到一定程度時，就會出現維護困難的問題。因此基於在「廣布建置」、「簡單維護」這兩個需求上，我們團隊萌生開發以光學方式偵測 NO_2 氣體感測之想法，國產自主開發的系統可以將價格大量降低，能夠相對於環保署之高階儀器便宜許多，而以光學方式偵測的優點就是不需要耗材，且系統穩定，在外部防護足夠的前提之下，幾乎不需要對該系統進行維護，除了系統建置成本以外，也能夠降低後續維護的人事成本。

三、光學式 NO_2 感測偵測原理與感測晶片開發

1. 光學式 NO_2 氣體感測原理

根據參考文獻如圖 3⁽¹¹⁾， NO_2 氣體的吸收波長的最大值位置大約落在 410 nm，我們假設光學路徑為一個固定長度之腔體，根據 Beer-Lambert law 如下式：

$$A = -\log_{10} \frac{I_t}{I_o}$$

其中 A 為 NO_2 的吸光度， I_t 為終端光源強度， I_o 為初始光源強度。在光學腔體長度固定的狀態下，吸光度與 NO_2 氣體濃度呈正相關，當 NO_2 氣體濃度越濃就能夠吸收越多光線。所以終端光源強度與 NO_2 氣體濃度成反比；也就是說，當腔體內之 NO_2 氣體濃度越高，終端光源接收到的光源強度越弱。透過這個關係式我們可以從終端光源強度的變化來推估光學腔體內 NO_2 之氣體濃度。初始光源與終端光源的光源強度我們採用光學感測晶片來偵測，半導體材料具有能隙，當光能量足夠大，變能將價帶電子激發至導帶，形成電子電洞對，而隨著電場推移至兩側電極形成電流。元件本身就會有固定的漏電流，不需照光就會存在，因此我們也將其稱為暗電流，而照光之後所激發出的電子電洞對產生之電流我們稱其為光電流，只要偵測這個電流變化，我們就能夠推估元件對光的響應值 (A/W)，剛響應值也對應到我們初始光源與終端光源的光源強度。而在結構方面，一般光檢測器則有 p-i-n、MSM (Metal-Semiconductor-Metal)、Schottky diode 三種分類，各自有其優缺點。

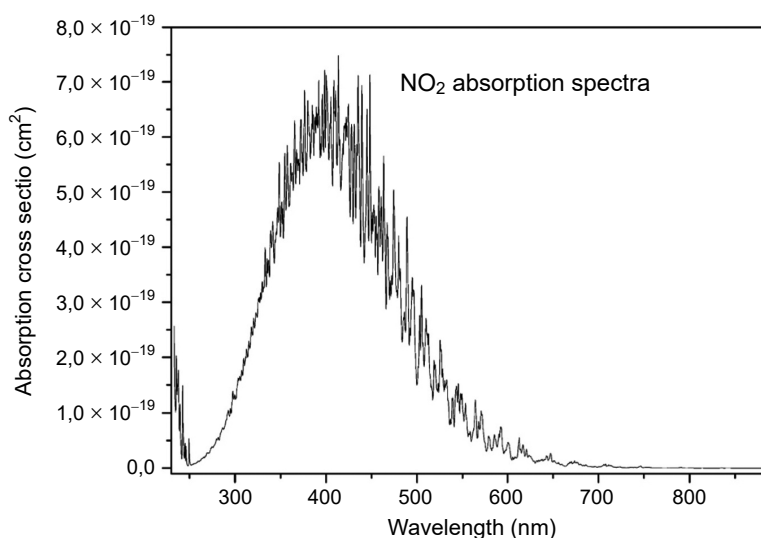


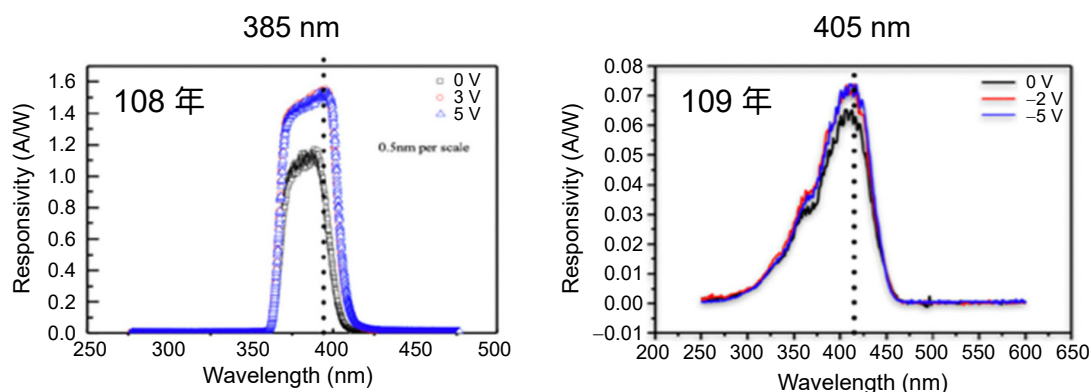
圖 3. NO_2 氣體之吸收頻譜⁽¹¹⁾。

2. 光學式 NO₂ 氣體感測晶片設計

為了排除其他光源的干擾，光學式 NO₂ 氣體感測晶片採用的是帶通型的光學感測晶片設計。帶通型光學式晶片，是指晶片只對某個侷限波長範圍的光能量才會產生反應，晶片被非侷限波長範圍的光能量照射幾乎不會產生光電流。

因此如圖 4 光學式 NO₂ 氣體感測晶片被設計成只針對約 410 nm 波段產生反應之帶通型光檢測器，結構為 p-i-n 之二極體結構，主要吸收層之 i 層，材料採用氮化銦鎵 (InGaN)，透過能帶工程之調整，將能隙調整為約 2.88 eV。主要吸收層能吸收約 430 nm 以下波長之光能量，並產生電子-電洞對。帶通型之結構為在吸收層 i 層上方製作一個高能隙之 p-type 氮化鋁鎵 (AlGaIn) 濾波層，能隙約為 3.54 eV，能吸收約 350 nm 以下波長之光能量。n-type 以氮化鎵 (GaN) 材料製作，能隙為 3.43 eV，能夠吸收波長 361 nm 以下之波長之光能量。在具有 NO₂ 氣體的環境中，光源的能量會先被環境的 NO₂ 給吸收，其餘的光會先經過 p-type 氮化鋁鎵 (AlGaIn) 濾波層，該層不會吸收波長 350 nm 以上波長的光能量，接著進入主要吸收層之 i 層，該層吸收約 90% 的介於 350–430 nm 波長射入該層之光子，最後光再進入 n-type 以氮化鎵 (GaN) 層。p-i-n 結構中在 0 伏特的操作偏壓下，主要依靠半導體內部的 p-n 接面空乏區形成的內建電場將電子-電洞對推至電極兩側。因此空乏區的控制直接影響吸收頻譜的形狀，因 p-i-n 結構中 i 層的濃度為本質濃度，因此幾乎完全被空乏，而 p-type 與 n-type 被刻意製作成高濃度層，因此僅有部分空乏區跨及這兩層。也就是說，空乏區被設計成大部分落在主要吸收層 i 層，因此幾乎只有主要吸收層 i 層所吸收相應之光能量產生之電子-電洞對能被內建電場推至元件兩側電極，產生光電流。在 n-type 及 p-type 受光能量激發之電子電洞對，因無內建電場之作用，因此被激發之後也會再進行複合，光能量並無法產生對應之響應。因此這樣設計的帶通型之光檢測器只會在所設計之波段產生響應值，以此概念設計的光學式 NO₂ 氣體感測晶片能夠只針對 NO₂ 吸收波段進行檢測，藉此排除環境光之影響。

自行開發之 NO₂ 氣體感測晶片發展



更符合 NO₂ 吸收光譜之設計

圖 4. 本團隊開發之光學式 NO₂ 氣體感測晶片響應數據。

3. 光學式 NO₂ 氣體感測之訊號轉換測試

圖 5 為本團隊開發之光學式 NO₂ 氣體感測晶片響應圖與 NO₂ 氣體吸收波長對應之關係，可以看到本團隊設計之晶片具有相當高之覆蓋率。感測晶片所偵測之光電流會隨 NO₂ 氣體濃度發生變化，再將訊號經由運算放大器 (operational amplifier, OPA) 以及多通道訊號擷取 (data acquisition system, DAQ) 便可用電腦判讀隨 NO₂ 氣體濃度之電壓變化資料。在元件電壓訊號轉換成 NO₂ 濃度訊號方面，我們首先將固定濃度之 NO₂ 氣體導入氣袋中，再將氣袋之氣體同時通入 CGP2000 Series 二氧化氮感測器以及我們所設計之光學式 NO₂ 氣體感測器系統中，這時就可得知本系統之元件壓降與對應氣體濃度之關係，再進行多濃度參數之測試並進行線性回歸就可得知個濃度變化與元件壓降之變化關係。我們將系統於封閉環境進行測試，如圖 6，可看見連續進行重複測試之再現性很高。如圖 7 可看見在通入不同氣體時，元件電壓會有不同程度之衰減，當氣體濃度越濃，感測 NO₂ 感測晶片經過訊號轉換之壓降會變低，代表大部分該波段之光子能量被環境 NO₂ 氣體給吸收。

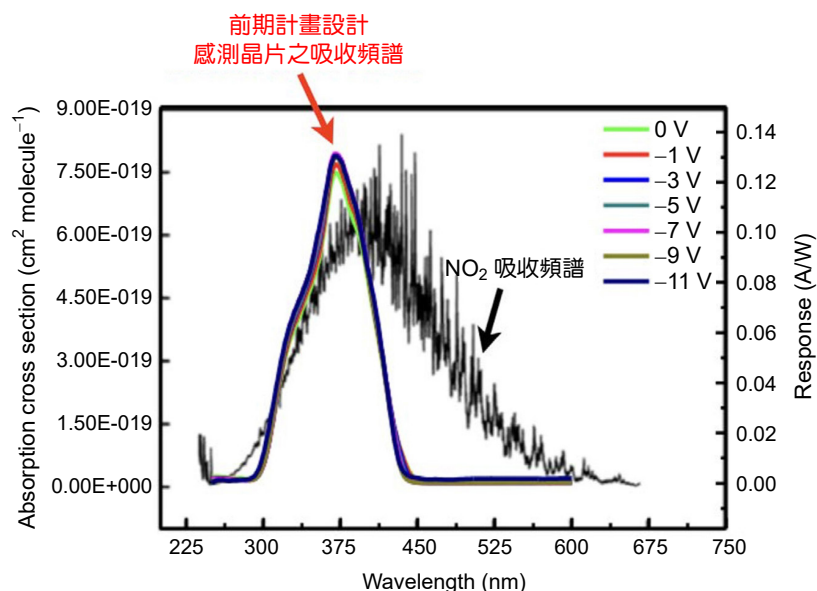


圖 5. 本團隊開發之光學式 NO₂ 氣體感測晶片與 NO₂ 吸收頻譜對應關係。

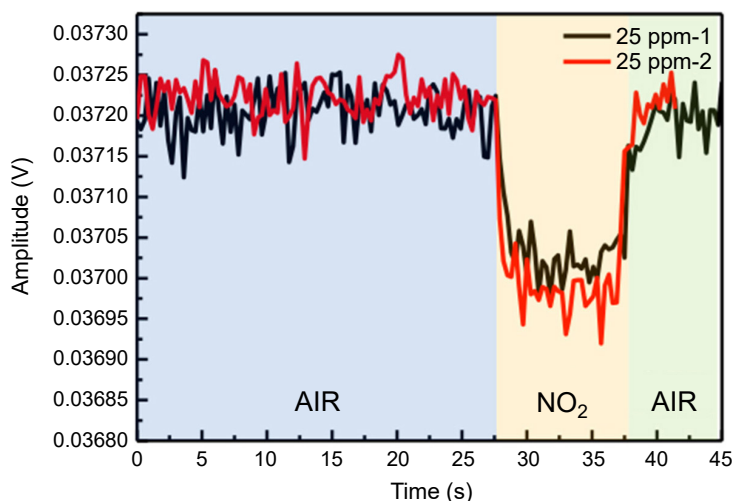


圖 6. 光學式 NO₂ 氣體感測晶片重複性測試。

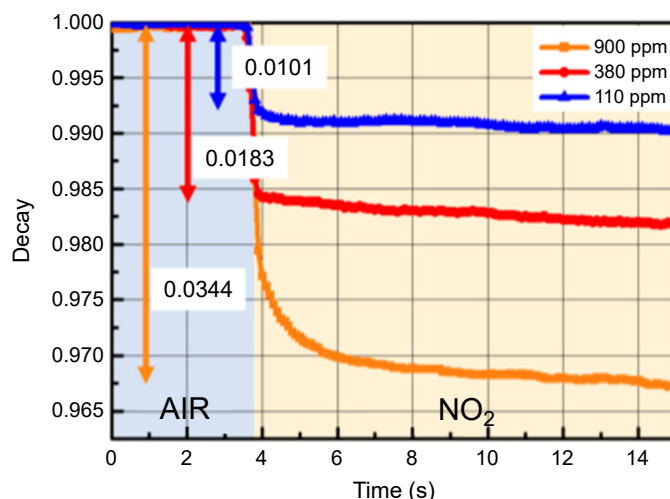


圖 7. 光學式 NO₂ 氣體感測晶片濃度測試。

四、光學式 NO₂ 感測系統設計與環保署測站場域驗證

1. 環保署台南測站場域實測

如圖 8 本團隊所設計之光學式 NO₂ 感測系統在 2019 年有幸參與國研院之研究計畫，曾在環保署台南測站進行光學式 NO₂ 氣體感測系統之實際場域測試長達 2 年，期間需克服屋頂無遮蔽物產生之問題、包含陽光直射、鳥糞、豪大雨、颱風。在系統設計之初，團隊以將系統長時間置於嚴苛環境下進行考量，包含保護外殼之金屬強度、保護外殼設計通過 IPX3 防水測試、電源系統穩定度、網路連線等。系統保護外殼以鋁合金製造，內部配有一個光源、摺疊型光學腔體、2 組帶通型光感測晶片、抽氣幫浦、訊號放大整合電路板、多通道訊號擷取板等配置，如圖 9。抽氣幫浦會不停的將環境中的 NO₂ 流經摺疊型光學腔體內部，使反應腔體內部之 NO₂ 氣體濃度與環境進行同步。帶通型光感測晶片一組會配置在光源源頭，另一組則配置在摺疊型光學腔體終端，用以偵測光源有多少被 NO₂ 氣體給吸收進而推算環境之 NO₂ 氣體濃度。在數值處理部分我們將類神經網路的概念導入，利用人工智慧技術對偵測數據進行優化，來達到更精準的偵測數據。透過導入環境變數，如環境溫度、環境



圖 8. 本團隊開發之光學式二氧化氮氣體感測系統於環保署台南測站設置狀況。

溼度、一氧化碳濃度、二氧化硫濃度、臭氧濃度、PM_{2.5} 濃度等參數與環保署偵測數據進行機器學習訓練，如圖 10。在重複性的機器學期過程中，系統訓練所得出的值會與環保署檢測之數值越來越接近，最終得到高準確度的光學式 NO₂ 感測系統。圖 11 是本系統檢測數據上傳之網站內容，系統除了每小時會將檢測數據上傳至網站供一般民眾檢視，以及對數據進行說明以外，也具備遠端連線功能，提供工程人員進行遠端軟體維護作業，大幅降低維護成本。

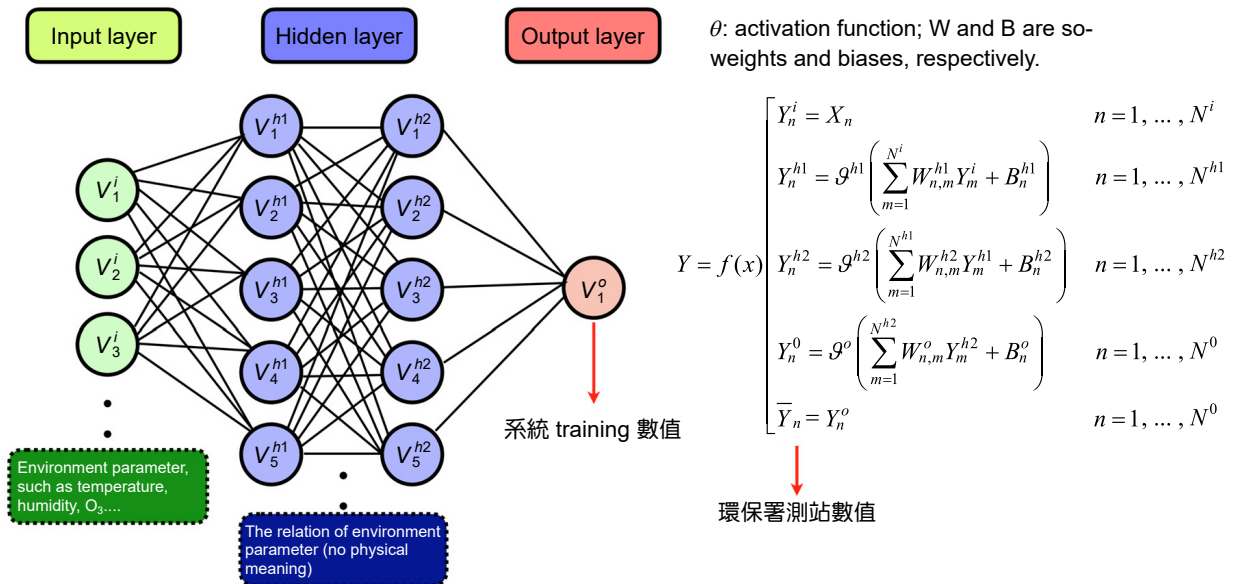


圖 9. 類神經網路與環境參數導入並與環保署數據進行學習。

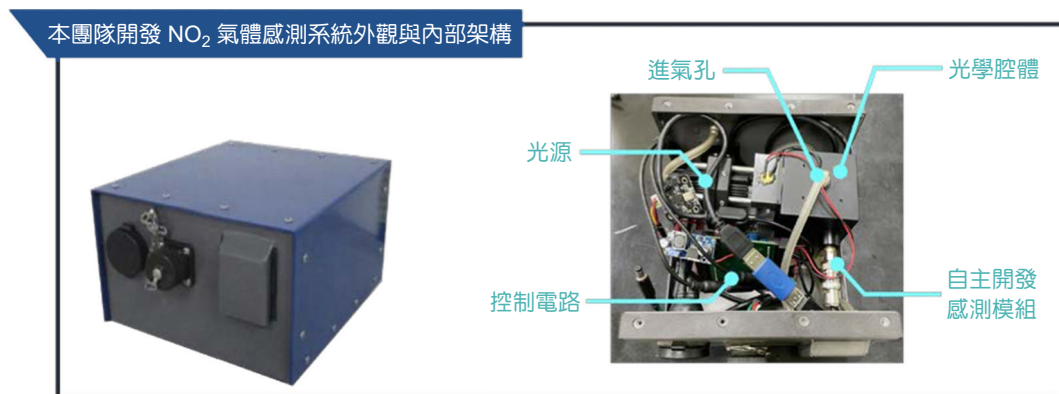


圖 10. 本團隊開發之光學式二氧化氮氣體感測系統之外觀與內部。

2. 搭配無人機進行即時監控情境

為配合未來針對散狀分布工廠惡意排放 NO₂ 氣體之稽查作業，如圖 12，本團隊針對此應用情境開發出無人機版本，作為移動式偵測方式，能夠直接在可疑污染源旁進行採樣，輔助政府單位進行稽核，透過系統輕量化及微縮將重量將至 10 Kg，能夠連續執行稽核作業約 40 分鐘。

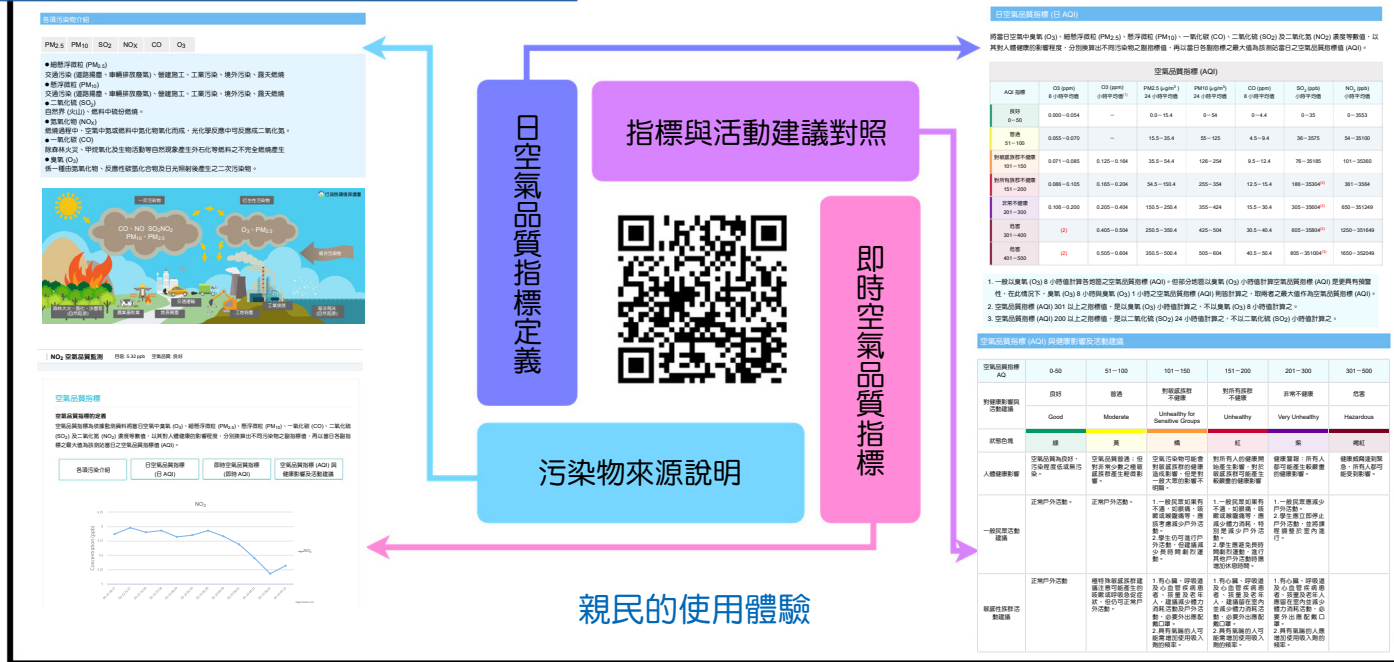


圖 11. 本團隊開發系統之供一般民眾瀏覽之網站數據。

五、開發成果

圖 13 為感測晶片在封閉腔體通入定量 NO₂ 氣體之測試，可以看見感測晶片之反應上升時間僅需 0.05 秒，而當停止通入 NO₂ 氣體後，感測晶片反應的下降時間僅需 0.7 秒，幾乎等同即時反應濃度變化。系統不需暖機時間，感測晶片也不需外掛任何其他加熱裝置即可達到連續測試之效果，且沒有如同電化學式的感測鈍化問題。實際場域測試部分，環保署臺南測站設立在臺南市中心中山國中內，地點位於原臺南市中心地帶，是最熱鬧且繁華的區域，在下班時段車流量較大再加上舊市區道路狹小，因此算是臺南市容易塞車的區域。圖 14 是本團隊之光學式 NO₂ 氣體感測系統偵測結果與環保署比對之數據，可以看到在約晚上 6 點半左右系統偵測到的 NO₂ 數據都是最高峰，隨後隨著午夜的來臨，NO₂ 數值又回復平穩，在該測試地點周遭並無工廠可以排放 NO₂ 氣體，因此可以合理推斷這樣 NO₂ 氣體濃度的變化可能是由於移動式交通污染源的貢獻，在處於上下班的時段或是車流量熱絡的時段，環境 NO₂ 的氣體濃度都會相對較高，反之則會得到較低之 NO₂ 氣體濃度數值。光學式二氧化氮氣體感測系統開發旨在開發一個滿足「廣布建置」、「簡單維護」需求之二氧化氮氣體感測系統，但前提是準確度需滿足一定之標準。因此在測站進行實地場域測試，主要目的除了測試系統是否能夠撐過嚴苛環境的考驗以外，更重要的是能夠與環保署台南設站數據進行比較。因直接設立在設站上方，所以兩者檢測數據應要相符。比對最直接方式，就是將本系統檢測之數據與環保署台南測站進行決定係數分析。當決定係數 (R²) 值越接近 1，代表兩者檢測之數據越吻合。然而環境因素是會影響決定係數高低之關鍵，因此如果目標是一個具有相當準確度的系統，則必定要將環境因素給考量進去。環境的熱能能夠給予氣體分子動能，空氣中的水氣分子會影響到光源的散射，因此光學式 NO₂ 氣體偵測必需考量環境的溫度與濕度變化，並對其進行修正。可以看到如圖 15，在晝夜轉換之間，環境溫度與濕度會相對性的變



圖 12. 本團隊開發之光學式二氧化氮氣體感測系統結合無人機進行移動偵測。

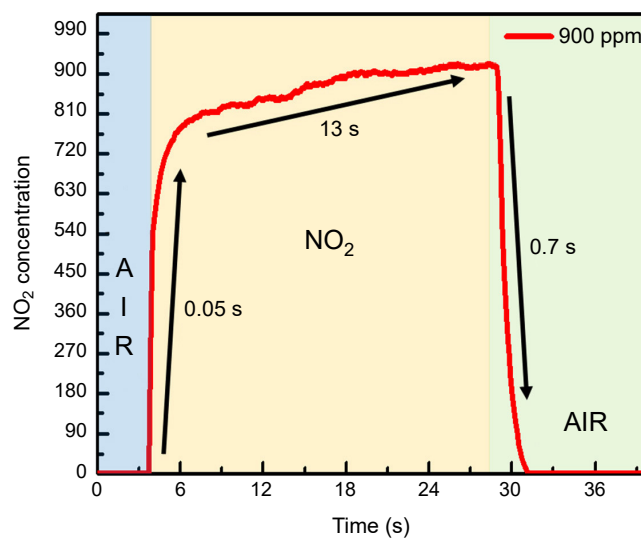


圖 13. 本團隊開發之光學式二氧化氮感測晶片反應時間測試。

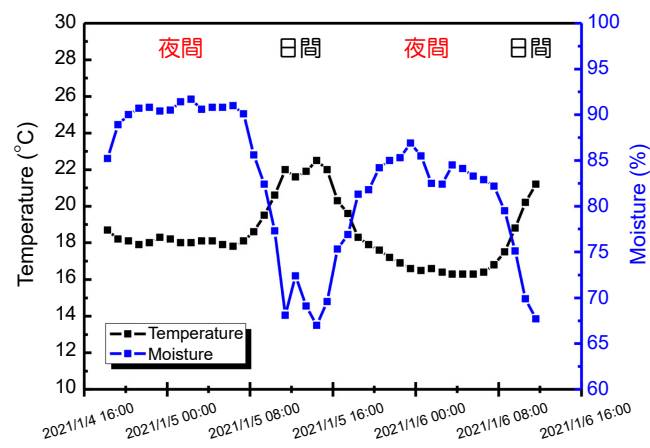


圖 14. 於台南測站實地場域之溫度變化趨勢。

化，在早上因太陽釋放的熱能容易讓環境的水氣蒸散，因此在早上環境的濕度較低，相反的在夜晚環境濕度又會恢復一定水準。如圖 16，在考量溫度與濕度後，本系統與環保署檢測數據的決定係數為 0.37–0.43 間。系統偵測的目標是大氣中的 NO_2 ，因此導入偵測光學腔體是大氣中的空氣，而成分可能涵蓋各種物質。在偵測的過程中，環境中存在許多氣體也可能會吸收激發光源或影響光路中光線之散射，如一氧化碳、二氧化硫、臭氧、 $\text{PM}_{2.5}$ ，因此也必需要將這些環境參數列入考慮。如圖 17，在考量二氧化硫濃度、 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度、臭氧濃度之環境參數後，系統與環保署數據比較之決定係數約為 0.607。而最終如圖 18，在同時考量環境溫度、環境濕度、一氧化碳濃度、二氧化硫濃度、 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度、臭氧濃度後，系統與環保署數據比較之決定係數約為 0.786。本系統最終規格如下，偵測濃度範圍：0.5–500 ppb，偵測底線濃度：0.5 ppb，解析度：2ppb。

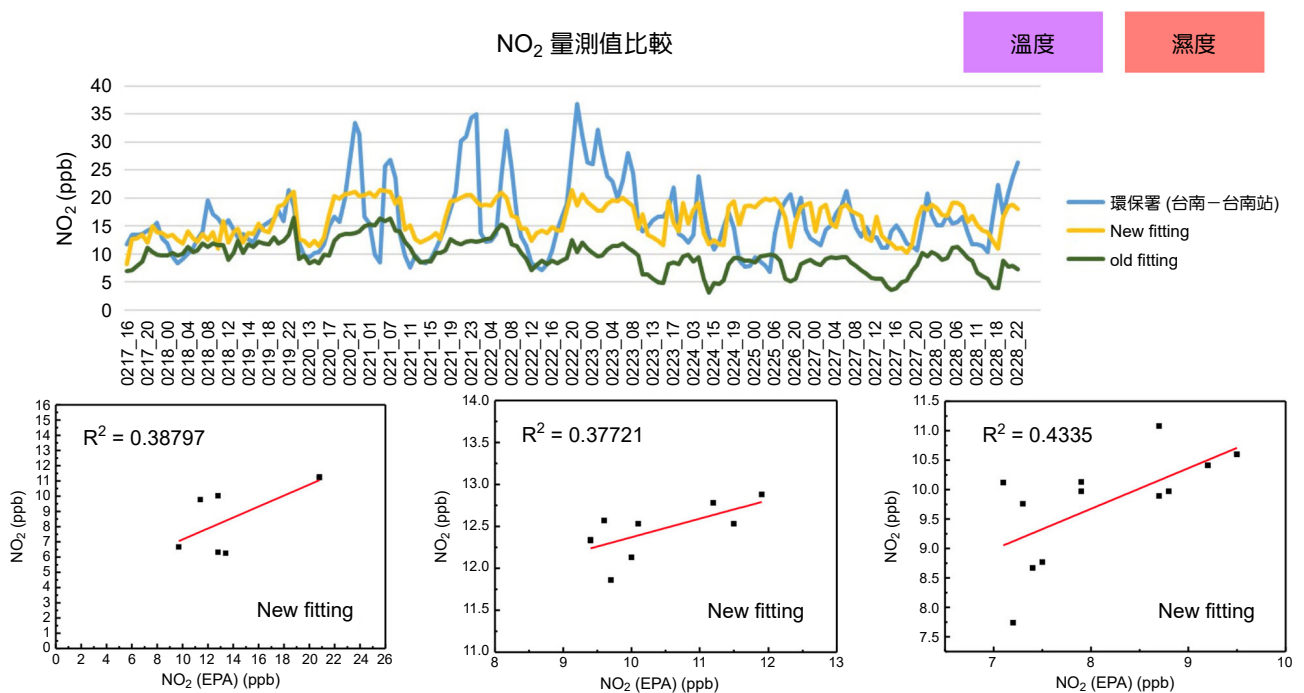


圖 15. 本團隊考量溫度與濕度環境參數後與環保署比對之二氧化氮決定係數分析。

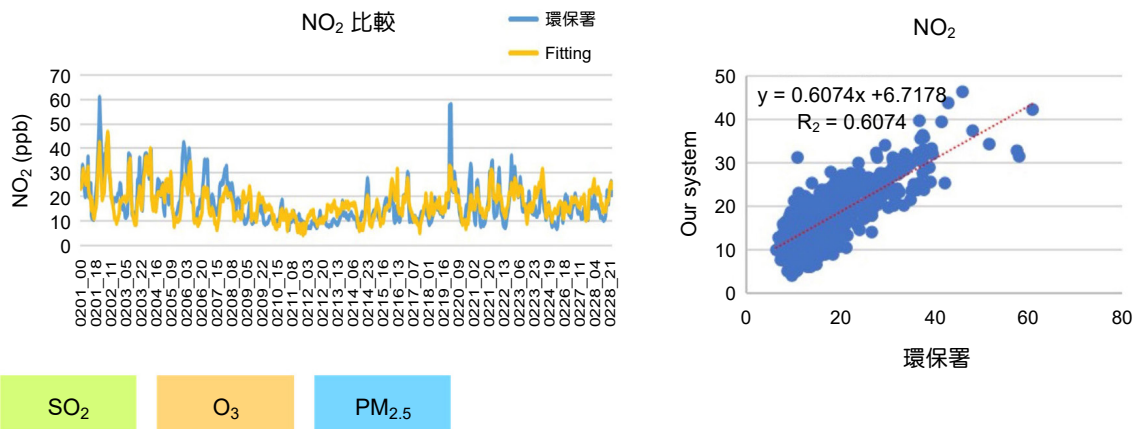


圖 16. 本團隊考量二氧化硫、臭氧、 $\text{PM}_{2.5}$ 環境參數後與環保署比對之二氧化氮決定係數分析。

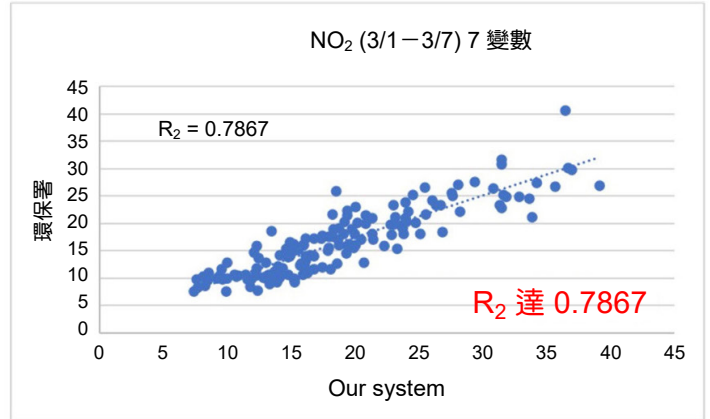
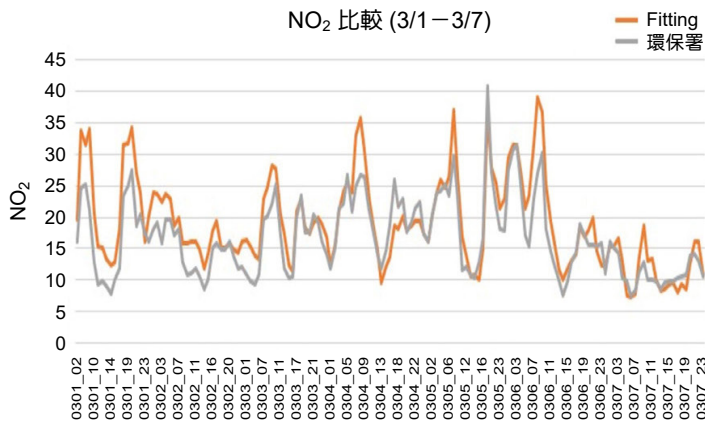


圖 17. 本團隊考量二氧化硫、臭氧、PM_{2.5}、溫度、濕度、一氧化碳後與環保署比對之二氧化氮決定係數分析。

六、系統規格與國內外標準二氧化氮氣體感測器比較

如表 1，市售之二氧化氮氣體感測器皆為電化學式之產品，而本系統所採用之方式為光學式方式來偵測二氧化氮氣體。在感測器檢測範圍與解析度皆在伯仲之間，雖然在製造成本與體積上，光學式二氧化氮感測器產品實在無法與電化學式產品比較。但光學式二氧化氮感測的優勢在於反應速度快，且無需耗材，意即後續不需要太多人力成本來更換感測頭，以長遠來看，應用在空氣品質監測上會是比较實惠的選擇。

參考文獻

1. 空氣品質監測網-行政院環境保護署, 空氣品質與日常生活, https://airtw.epa.gov.tw/CHT/Encyclopedia/pedia04/pedia4_1.aspx
2. 空氣品質改善維護資訊網-行政院原敬保護署, 空氣污染排放清冊, https://air.epa.gov.tw/EnvTopics/AirQuality_6.aspx
3. Tung Pham, Guanghui Li, Elena Bekyarova, Mikhail E. Itkis, and Ashok Mulchandani., *ACS Nano*, **13**, 3196 (2019).
4. Sergiu T. Shishiyanu, Teodor S. Shishiyanu, Oleg I. Lupan, *Sensors and Actuators B*, **113**, 468 (2006).
5. I. Hotovya, V. Rehacek, P. Sicilianob, S. Caponec, L. Spiess, *Thin Solid Films*, **418**, 9 (2002).
6. Sergiu T. Shishiyanu, Teodor S. Shishiyanu, Oleg I. Lupan, *Sens. Actuators B*, **107**, 379 (2005).
7. Rajesh Kumar, O. Al-Dossary, Girish Kumar and Ahmad Umar, *Nanomicro Lett.*, **7** (2), 97 (2015).
8. Fang-TsoLiu, Shiang-Fu Gao, Shao-Kai Pei, Shih-Cheng Tseng, Chin-Hsin J.Liu, *J. Taiwan Inst. Chem. E.*, **40** (5), 528(2009).
9. Shu Peng, Kyeongjae Cho, Pengfei Qi, Hongjie Dai, *Chemical Physics Letters*, **387**, 271(2004).
10. Min Gyun Chung et al., *Sensors and Actuators B*, **166**, 172 (2012).
11. K. Bogumil et al., *J. Photochem. Photobiol. A.*, **157** (2-3), 167 (2003).

表 1. 本系統之規格與國內外標準二氧化氮氣體感測器之比較。

感測器種類 比較項目	二氧化氮氣體感測器				
	本系統	市售國際領導產品			
品牌名稱	光學式二氧化氮偵測模組	SPEC SENSORS	SPEC SENSORS	Ventilation Control Products (VCP)	CALIBRATION TECHNOLOGIES INC (CTI)
型號	無	DGS-NO2 968-043 (電化學)	ULPSM-NO ₂ 968-047 (電化學)	Duct Mounting Set DMS 300G (電化學)	GG-NO2-B (電化學)
(1) 技術創新性	自行生產製作前端光學感測元件，磊晶客製化、製程客製化。並採用光學吸收法來偵測有別於電化學偵測法，特別是具有偵測快速且無耗材的優勢	低功耗 (1 mW @ 1 minute)	二氧化氮用高低功耗模擬傳感器模組	300 mm 導管探測器，凸緣處有氯丁橡膠壓條，密封性佳。	二氧化氮專用電化學傳感器技術
(2) 技術成熟度	元件製作技術純熟且獨一無二，對手難以複製	使用 S E P C SENSOR 的110-508 NO ₂ 感測器搭配 O ₃ 過濾器，可提高 low ppb 之表現	以極低功耗且簡易模擬感測器信號輸出方式快速將二氧化氮感測到系統	即使更換感測器，單位校準皆已完成	可適應任何嚴酷環境 -20 °F—+120 °F
(3) 成本優勢	成本比市售產品略微昂貴	\$75.00	\$50.00	NA	\$735.00
(4) 功能比較	本系統的偵測速度極快可以小於 5 秒，且無需更換耗材	外型小巧、輕 (小於 2 oz)、反應時間小於 30 秒、USB 輸出	低功耗 (< 45 μW)、反應快	透過調換感測器單元可易於維護和校準	操作簡便、堅固、可信度高
(5) 使用期限	10 年	10 年	NA	NA	2年
(6) 規格					
1. 測量濃度範圍	0.5—500 ppb	0—5 ppm	0—20 ppm	0—30 ppm	0—10 ppm
2. 偵測底線濃度	0.5 ppb	NA	< 0.1 ppm	NA	NA
3. 解析度	2 ppb	20 ppb	<0.1 ppm	2 ppm	NA
4. 重複性	< ± 1%	< ± 3%	NA	< ± 2%	< ± 1%
5. 反應時間	< 5 seconds	< 30 seconds	< 30 seconds	< 25 seconds	< 120 seconds
6. 起始穩定時間	< 10 minutes (雷射功率穩定時間)	NA	60 minutes	NA	NA
7. 操作電壓	5—12 V	2.6—3.6 V	2.7—3.3 V	16—29 V	24 V

作者簡介

鄭杰晰先生為成功大學微電子所博士，現任南臺科技大學光電暨積體電路故障分析博士級研究員。

Jie-Si Jheng received his Ph.D in the Institute of Microelectronics from National Cheng Kung University. He is currently an Postdoctoral Fellow in Center for Failure Analysis of OE&IC at Southern Taiwan University of Science and Technology.

王俊凱先生為成功大學微電子所博士，現為南臺科技大學電子系教授兼光電暨積體電路故障分析中心副執行長。

Chun-Kai Wang received his Ph.D in the Institute of Microelectronics from National Cheng Kung University. He is currently an Professor in the Department of Electrical Engineering and an Deputy CEO in Center for Failure Analysis of OE&IC in Southern Taiwan University of Science and Technology.

邱裕中先生為成功大學電機工程研究所博士，現為南臺科技大學電子系教授兼光電暨積體電路故障分析中心執行長。

Yu-Zung Chiou received his Ph.D in the Department of Electrical Engineering from National Cheng Kung University. He is currently an Professor in the Department of Electrical Engineering and an CEO in Center for Failure Analysis of OE&IC in Southern Taiwan University of Science and Technology.