

# Instruments Today 2022 Q1

# 科儀新知



## 氣體感測器原理與應用

*Principle and Application of Gas Sensor*

【人物專訪】

國立中興大學薛富盛校長

230

ISSN 1019-5440



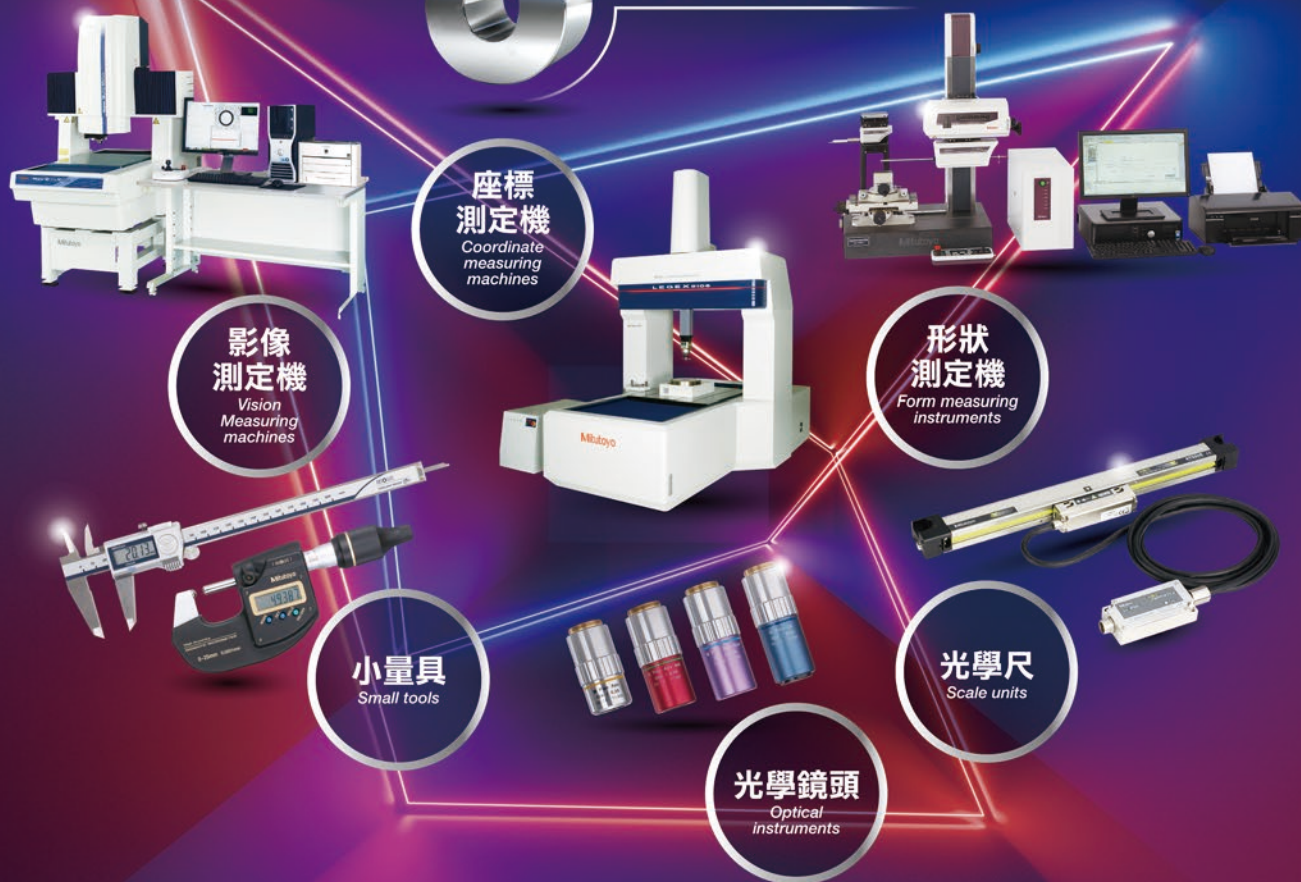
# 以精密量測技術貢獻社會

1987年正式在台成立，除了銷售精密量測儀器的業務，並且建構以技術服務為主軸的量測技術支援中心。提供最好的售前與售後服務體系，為快速提供客戶所需要的服務，台灣三豐分別於台北、台中、高雄設立營業所，包括量測技術支援中心(M3SC)以及技術服務部門，就近迅速提供客戶所需要的量測DEMO、各種量測Solution、與售後服務。



Product Lineup

## 大產品種類



承蒙惠顧，三豐已由測微器、游標卡尺之類的小量具，發展成為一個運用電腦驅動的FA關連機器—三次元座標量測儀、畫像測定機、顯微鏡、投影機、表面粗度、真圓度測定機、輪廓測定機、硬度機、雷射測定機等，已成為世界第一大精密儀器的綜合製造商。

### 服務據點

#### 台北總公司 / 台北量測技術支援中心

114台北市內湖區洲子街71號4樓  
營業部代表號：(02)5573-5900  
技術部代表號：(02)5573-5901  
管理部代表號：(02)5573-5902  
FAX：(02)8752-3267  
營業部：sales@mitutoyo.com.tw  
技術部：technical@mitutoyo.com.tw  
校正實驗室：lab@mitutoyo.com.tw



#### 台中辦事處 / 台中量測技術支援中心

414台中市烏日區高鐵一路299號1樓  
TEL：(04)2338-6822  
FAX：(04)2338-6722

#### 高雄辦事處 / 高雄量測技術支援中心

802高雄市苓雅區海邊路31-1號1樓  
TEL：(07)334-6168  
FAX：(07)334-6160

# GMM 均華精密

## 台灣半導體先進封裝

## 精密取放設備領導品牌

主要新產品 • 多面檢查晶粒挑撿機 6S Inspection Chip Sorter

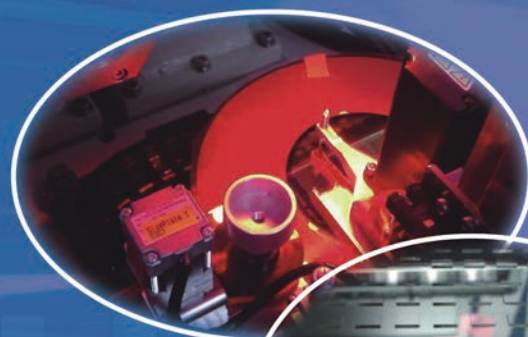
• 扇型封裝高精度黏晶機 Fan Out Die Bonder

• 晶圓級雷射刻印機 Wafer Backside Marking



### KB-9xxx series High Speed Fan Out Die Bonder

- Bonding accuracy <3um
- Available to fan out / PoW / PoP Process
- Switchable flip function for face down/face up application
- Inspection function for die surface AOI
- High bonding force process ready >300N



## 歡迎各界精英加入 共同創造產業未來

**GMM** 均華精密工業股份有限公司  
Gallant Micro. Machining Co., Ltd.

新北市土城區民生街 2-1 號  
No. 2-1, Minsheng St., Tucheng Dist.,  
New Taipei City, 236, Taiwan  
Tel: (02) 2268-2216

新竹縣竹北市台元一街8號7樓-9  
7F-9, No. 8, Taiyuan 1st St., Zhubei City,  
Hsinchu County 302, Taiwan  
Tel: (03) 5601-222

# 東捷 雷射微鑽孔

鑽孔速度快、品質佳、低擊傷底材

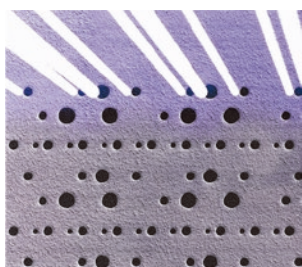
" Innovative solutions  
to move your business forward "



## ULBS光機系統技術

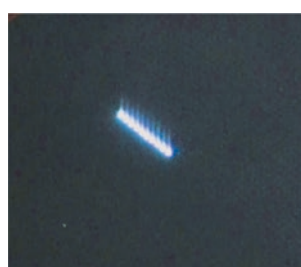
東捷獨創技術 1

✓ 大小孔交錯路徑



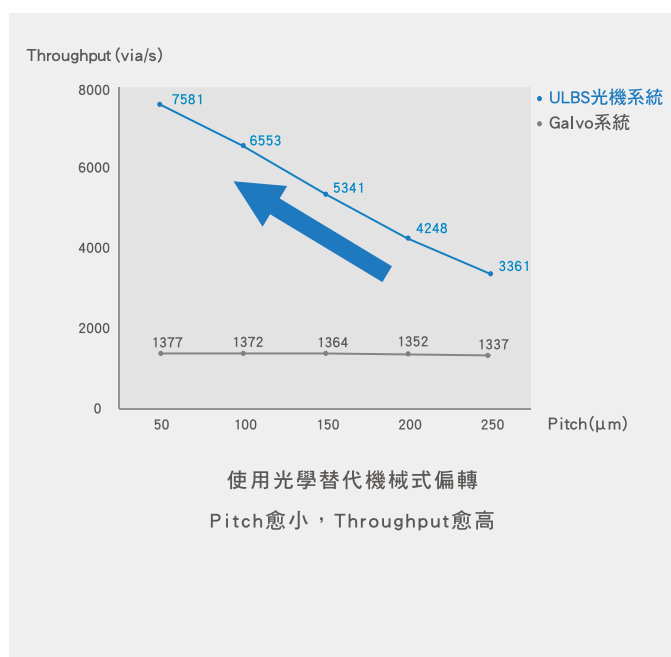
不等間距(無須更換工具)

✓ 鑽孔速度快

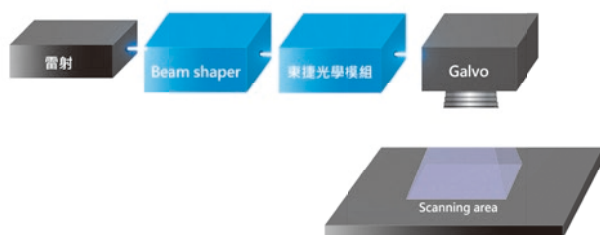


>3000 via/s

✓ 改善傳統架構鑽孔效率不佳



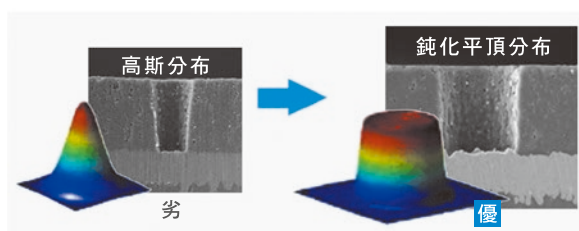
✓ 實現不同Pitch、不同孔徑加工需求



## 場對應整形與細微鑽孔技術

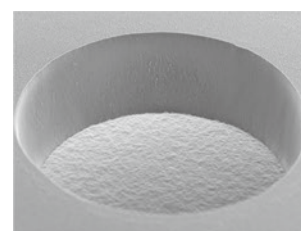
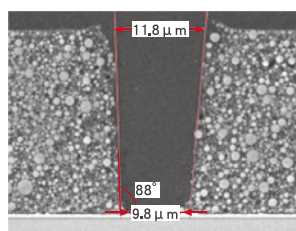
東捷獨創技術 2

✓ 低擊傷底材風險



以Beam Shaper整形雷射模態

✓ 細微鑽孔技術



移除Film，不傷底材、品質佳

# CNC控制器・自動化控制器・ 機械手臂・雲端 整合方案



**ONE FOR ALL  
ALL IN SYNTEC**

最值得信任的電控夥伴

新代科技股份有限公司  
SYNTEC Technology Co., Ltd.

台灣新竹市東區研發二路25號

☎ 886-3-6663553  
☎ 886-3-6663505

✉ [sales@syntecclub.com.tw](mailto:sales@syntecclub.com.tw)



SYNTEC



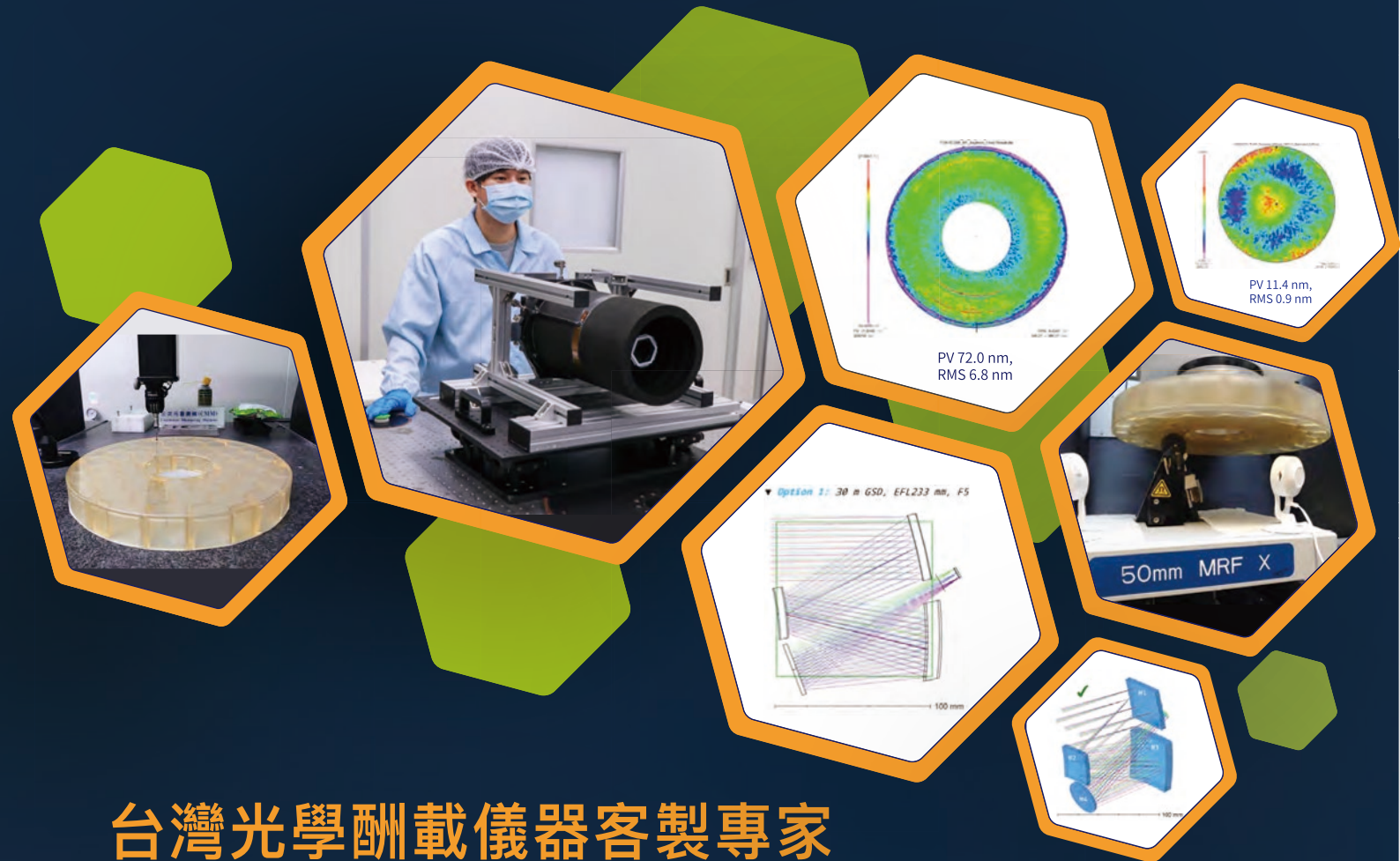
LEANTEC



LINE

# Instrumentation for Aerospace Discovery

Optics Development and Research Collaboration at TIRI



## 台灣光學酬載儀器客製專家



各類光學酬載開發:望遠鏡/多光譜/高光譜/海洋水色照相儀...

R&D of Various Optical Remote Sensing Payloads



航太級鏡片拋光與檢測服務

Fabrication and Inspection for Meter-scale Aspheric Mirrors



航太級光學鍍膜客製開發

Customized Optical Thin Film Coating for Aerospace Application



精密光學鏡頭(元件)客製設計與開發

Customized Design and Fabrication for Optical Lens & Components



<https://www.tiri.narl.org.tw/>



NARLabs 國家實驗研究院

台灣儀器科技研究中心

Taiwan Instrument Research Institute

# 科儀新知

INSTRUMENTS TODAY 季刊

中華民國 111 年 3 月 31 日出版



## 封面說明

全球有十分之九的人生活在空污環境中，吸入空氣中的污染物質，可能導致心、肺、大腦等重要器官損傷，引起癌症、中風、心血管疾病等。因此，開發能夠針對空污進行偵測、即時預防改善的儀器設備，就現代人類社會而言，更形迫切。本期即以「氣體感測器原理與應用」為專題，介紹目前國內各界學者專家依照偵測原理與機制，所發展出各形各色感測氣體的方式。封面照片為王俊凱教授團隊開發之光學式二氧化氮氣體感測系統結合無人機於環保署臺南測站進行移動偵測，其優勢在於反應速度快，且無需耗材，後續不需要太多人力成本來更換感測頭，應用在空氣品質監測上會是比较實惠的選擇。(本圖片由南臺科技大學電子系王俊凱教授提供)

- 發行人：楊耀州
- 諮詢委員：吳文桂、陳力俊、關志達、蔡定平
- 客座主編：李昇憲
- 執行編輯：林麗娥、陳柏荔、魏崇倫
- E-mail：tiri-editor@narlabs.org.tw
- 網址：http://www.tiri.narl.org.tw/Publication/InstTdy

- 中華民國 68 年元月創刊
- 地址：新竹市科學園區研發六路 20 號
- 電話：(03) 5779911 轉 304, 313
- 傳真：(03) 5789343
- 設計排版：宇豐廣告實業社
- 電話：(03) 5306633

國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心出版

## 人物專訪

- 4 國立中興大學薛富盛校長  
與人為善、純粹利他  
傳遞正面價值觀的高教創新教育家  
林麗娥

## 氣體感測器原理與應用

- 9 「氣體感測器原理與應用」專題介紹  
李昇憲

## 10 手機操控可攜式二氧化氮氣體感測器

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

## 21 氮氧化物氣體感測器研製與特性分析

洪瑞華、澹台富國、李維中

## 33 高靈敏度二氧化氮氣體感測晶片

薛丁仁、張宸銘、范書豪

## 43 具陣列結構之表面聲波氣體感測元件

柯雅馨、陳政翰、蕭育仁、吳信賢

## 56 光學式二氧化氮氣體感測系統

鄭杰晰、王俊凱、邱裕中

## 科儀專欄

## 70 提升液態透鏡共焦模組之形貌掃描速度－連續式三角波同步驅動搭配資料擷取裝置

呂國豪、盧柏榕、劉兆峰、鄭壁瑩、翁俊仁

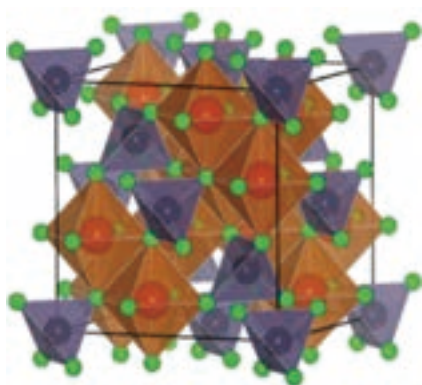
## 科普大觀園

## 83 邁向智慧環境 AIoT 時代的利器－晶圓級氣體感測器高效能點測系統

陳銘福



16



23

# INSTRUMENTS TODAY

March 2022

## People

- 4** **Dr. Fuh-Sheng Shieu, President of National Chung Hsing University, an Innovative Educator Passing Positive Values**  
Claire Lin

## Special Issue: Principle and Application of Gas Sensor

- 9** **Special Issue Introduction of "Principle and Application of Gas Sensor"**  
Sheng-Shian Li

- 10** **Smart Phone Operated Portable Nitrogen Dioxide Gas Sensor**  
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

- 21** **Development and Characteristic Analysis of Nitrogen Oxide Gas Sensor**  
Ray-Hua Horng, Fu-Gow Tarntair, Wei-Chung Lee

- 33** **High Sensitivity Nitrogen Dioxide Gas Sensing Chip**  
Ting-Jen Hsueh, Chen-Ming Chang, Shu-Hao Fan

- 43** **Surface Acoustic Wave Gas Sensing Device with Array Structure**  
Ya-Hsin Ke, Cheng-Han Chen, Yu-Jen Hsiao, Sean Wu

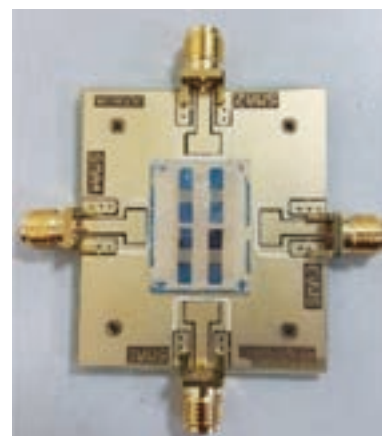
- 56** **The Optical Gas Detection System for Nitrogen Dioxide**  
Jie-Si Jheng, Chun-Kai Wang, Yu-Zung Chiou

## Column

- 70** **Improving the Topography Scanning Speed of the Liquid Lens Confocal Module Based on Continuous Triangular Wave Synchronous Drive with Data Acquisition Device**  
Guo-Hao Lu, Bo-Rong Lu, Chao-Feng Liu, Pi-Ying Cheng, Chun-Jen Weng

## Popular Science

- 83** **High-throughput Wafer-level Probing System for Micro Gas Sensors, the Innovative Driver of AIoT Intelligent Environment**  
Ming-Fu Chen



50



85



國立中興大學

薛富盛 校長

## 與人為善、純粹利他

## 傳遞正面價值觀的高教創新教育家

Be Kind to Others without Asking for Return  
Dr. Fuh-Sheng Shieu, President of National  
Chung Hsing University, an Innovative  
Educator Passing Positive Values

撰文：林麗娥

教育肩負著「百年樹人」的使命，一點一滴的教育工作，無不在培育人才為社會所用而努力，為知識文化的承傳與開創而奮鬥。而教育的功效往往不是立竿見影，而是需要經過時間的洗禮和考驗。因此，校長是一個相當不容易又高壓的職業，工作內容廣泛，任何的決策都與學生、老師、家長，甚至整個國家總體發展都有關。尤其臺灣高等教育面臨許多困境，諸如少子化，造成生源不足、入學門檻降低、學生素質低落、經費不足、產學脫節、國際競爭力下降等問題，如何提出解方、進行校園治理，正考驗著每所大專院校的校長。

我們從國立中興大學薛富盛校長身上觀察到，「與人為善、純粹利他」的人生哲學，正是其創新領導、帶領中興大學成為中部最佳綜合大學龍頭的不二方針。

## 與人為善、積累善果

薛校長表示，他的人生際遇很特別，過去與人為善、熱心助人所累積的善因，也許哪天因緣際會下就會得善果，成為你的貴人。好比他自清華大學材料科學工程學系畢業後，沒有跟著多數同學選擇出國進修與繼續就讀研究所，反而是先選擇當兵。當兵正好抽中上上籤，最艱苦的兵種－海軍陸戰隊。進入部隊時，很幸運地遇到在清大就認識、互動不錯的李吉仁學長 (現任臺灣大學國際企業學系名譽教授)，於是就跟著學長在海軍陸戰隊 66 師師部服務，因此少掉許多師對抗、高難度的操練。

在臺中清泉崗服完海軍陸戰隊預官役後，轉而受聘於高雄中鋼冶金技術處擔任股長及工程師，工作內容主要是處理統計報表、良率品管等業務。中鋼是當年人人稱羨也想搶進的大企業，工作之後，薛校長發現自己最想要的是從事研究工作。於是在中鋼任職一年後開始準備托福和 GRE，在沒有補習的情況下，成功申請到美國康乃爾大學材料科學與工程學系全額獎學金，直攻碩博士。

薛校長也提到在美國念書這段期間，受其博士指導教授 Professor Stephen Louis Sass 影響甚深，Sass 教授是利用穿透式電子顯微鏡 (transmission electron microscope, TEM) 研究金屬和陶瓷原子結構的知名學者，對晶體學的研究深具影響力。作為大師級的教授，指導學生還是非常具有耐心。校長憶起，在就讀博士班期間，投稿的第一篇文章是有關冶金技術。Sass 教授除了傳授專業知識外，會先就文章因果關係、邏輯架構進行指導，待這部分確認後，還會針對英文的修辭技巧進行指導，增加其文字美感與易讀性。如此與指導教授來來回回討論、修改了至少 20 次以上，堆積起來的草稿約莫有 60 多公分高。儘管過程十分辛苦，但收穫進步良多。感念指導教授之前耐心懇切的諄諄指導，薛校長回臺灣任教後總共邀請 Sass 教授來臺灣三次，進行專題講座並遊歷臺灣。Sass 教授思想極其開放，對科學有著感染力的熱情，其嚴謹的治學態度，以及視徒如子女般地關愛與包容的氣度，也深深地影響了薛校長帶領學生的指導方式，沒有預設立場、盡量發揮有教無類的精神，嘉惠無數的莘莘學子。



薛校長與康乃爾指導教授 Professor Stephen Louis Sass 合影。



薛富盛校長伉儷合影於興大新化林場。

## 關注因果脈絡進行創建

儘管薛校長不是中興大學畢業的學生，有感於中興大學提供其職涯發展舞台，因此非常致力於推動中興大學的校務發展。自 1993 年任教於中興大學材料工程研究所後，不僅擔任過所長，更創立材料科學與工程學系，主辦兩次「材料科學學會國際會議暨年會」，之後擔任工學院院長、研發長，行政資歷十分豐富。對於薛校長來說，只要是方向正確的事情就會全力去推動，同時政策的成敗經常並非眼前的結果可以論定。其擔任研發長期間，配合教育部推動國立中興大學與國立臺中教育大學整合發展計畫，希望兩校合併，結合臺中教育大學師培強項、校友力量，以增加學校的競爭力。儘管兩校最終未能成功地合併，但並非全無收穫。在兩校整合發展計畫推動的過程中，獲得教育部經費支持，先就文學大樓而非學校發展主力的理工農領域進行整建，以平衡弱勢科系發展，強化人文社會教育。

除此之外，薛校長對於校務的治理，非常注重在複雜多元的政策脈絡關係中梳理，以及進一步解釋制度與歷史之間的因果關係。薛校長提到 1919 年中興大學的前身「臺灣總督府農林專門學校」成立，校址位於臺北城西門街的舊總督府廳舍 (現址為臺北中山堂)，1928 年臺北帝國大學成立，被併入改制為「臺北帝國大學附屬農林專門部」，校址即在現今的臺灣大學。1928 至 1943 年間興大與臺大原為一家，具有相當深的歷史淵源。直至 1943 年，附屬農林專門部從臺北帝國大學分出，改制為「臺灣總督府臺中高等農林學校」並遷址至臺中現今校址，興大才正式與臺大分家。直到 1945 年，日本宣布無條件投降後，舉行閉校儀式，才結束臺中農專時代。並在隔年，改制升格為「臺灣省立農學院」，成立農藝系、森林系、農業化學系。國民政府接管後，1954 年首次大專聯招，參與的只有臺大、師大、興大和成大，也就是日據時代所留下最早的高等學校。

就興大與成大發展過程相比，興大選擇先成立獸醫系，成大則設立醫學院暨附設醫院，並列為國家十四項重大經建計劃，帶動整個校務、醫療品質、地方經濟的發展，自此拉大了兩校間的發展差距。薛校長信心充足地表示，中興大學是有足夠的能量成立醫學系的。薛校長深知離島偏鄉的醫療人力嚴重不足，加上衛福部「原住民族及離島地區醫事人員養成計畫」推動，將增加公費生名額。經過四年的努力，中興大學學士後醫學於今 (2022) 年獲教育部同意成立，衛福部正式來函，核給 23 名公費生招生名額。今 (2022) 年 8 月興大將招收首屆後醫系學生。



國立中興大學於今 (2022) 年 3 月 11 日舉辦學士後醫學系招生記者會，是中部唯一的國立後醫系，也是國內唯一與 2 所醫學中心合作的醫學系。

## 建立雙語國際化環境因應人才荒

目前全球尚在疫情的壟罩中，而美中兩強於科技領域互相爭霸的態勢，短時間內亦不易扭轉，美國力促全球供應鏈從中國撤出，中國亦積極進行去美國化，使全球意識到必須分散半導體製造業據點，積極發展半導體自主化的重要性。臺灣如何持續維持全球半導體生產重鎮的要角，除了技術，高素質的人才供給，是攸關未來十年臺灣半導體產業能否持續壯大的關鍵因素。薛校長表示，美國源源不斷的世界精英人才供應是美國能在世界科技產業長期一枝獨秀的主要原因，而背後開放的教育政策、移民政策、優渥的薪資與生活條件，提供了一個連貫又得以持續創新的環境。目前臺灣高教深受少子化所苦，此趨勢短期難以逆轉，未來人力短缺恐成必然。因此，在國內高教和產業界有限資源的限制下，建立完整的雙語國家，改善海外優秀人才來臺就學、就業、設廠的環境，策略性目標招募海外留臺意願較高的人才，是臺灣目前可以做的。

## 純粹利他凝聚合作

面對高等教育不僅僅是要發展，還要創新，才能因應世界快速發展。薛校長每每針對臺灣高教問題提出觀察洞見與改善方案。像是成立 11 校「臺灣國立大學系統」(NUST) 為臺灣高等教育史上最大規模的跨界跨平台；8 校的臺灣國際產學中心 (TGC)，並與歐洲在台商務協會 (ECCT) 簽署 MOU，進行產學交流，寫下跨校國際產學合作新頁。薛校長表示，之所以會出任「臺灣國立大學系統」總校長，是因為中興大學作為中部頂尖研究型綜合大學，領頭登高一呼進行號召，是可以結合許多各具特色、辦學認真的學校，在有限的條件下共享資源、整合能量，發揮最大效益，共同面對生源不足與退場的壓力。

除了建立大學聯合系統，薛校長也觀察到美國學術界裡的華人師資來自臺灣的愈來愈少，臺灣養成的高教人才不設法升級，培育出足以前進歐美一流大學任教的人才，不利於臺灣的第二軌外交，將成為新國安危機。無論就政府資源、大學學費收入及產業建教合作的角度來看，確實無法跟國外相比，但透過學校的國際化網絡連結國外一流大學的資源做為己用，借助歐美高教資源共同培育人才，是可以讓臺灣高教更具競爭力並與國際接軌。中興大學即首開高教先例，與美國堪薩斯州立大學、愛荷華州立大學簽訂獸醫學士跨國雙聯學位，不僅成為亞洲區唯一與兩大獸醫名校簽訂雙聯學位的學府，更可縮短臺灣學生前往美國取得學士後獸醫學位的時間，為跨國獸醫人才養成帶來更多優勢。

薛校長從小成長於澎湖，離島學習資源相對短缺。做為澎湖的異鄉遊子，成長環境、求學過程等生命經驗的啟發，薛校長對於社會整體發展、環境改變，有特別敏銳的洞察力，也造就其日後深具人文關懷、教育熱誠以及扶助弱勢「純粹利他、與人為善」的人生哲學。而這樣的人生哲學，也充分體現在其高教政策規劃、整合資源合作、串聯社會網絡以擴大影響力之上。

# 「氣體感測器原理與應用」專題介紹

## Special Issue Introduction of “Principle and Application of Gas Sensor”

客座主編－李昇憲教授

國立清華大學奈微所所長暨動機系副系主任

氣體感測器是將特定氣體以適當的傳感機制轉換為電訊號，用於探測在一定區域範圍內是否存在特定氣體或能連續測量氣體成分濃度的元件，相當於動物的嗅覺器官。日常生活中的氣體大多無色無味，就人類的嗅覺而言，要辨別氣體的種類是有相當的難度，然而在這些氣體中，卻存在著許多對人體有害的氣體，例如一氧化碳 (CO)、一氧化氮 (NO) 等，或像是二氧化碳 (CO<sub>2</sub>)、二氧化硫 (SO<sub>2</sub>) 等空氣污染氣體。

隨著全球空氣污染越趨嚴重，世界衛生組織 (WHO) 於 2019 年將「空氣污染與氣候變遷」列為十大健康威脅的首位。全球有十分之九的人生活在空污環境中，每分鐘可奪走 13 條人命，吸入空氣中的污染物質，可能導致心、肺、大腦等重要器官損傷，每年有 700 萬人因空污引起相關疾病致死，如癌症、中風、心血管疾病等。因此，開發能夠針對空污進行偵測、即時預防改善的儀器設備，就現代人類社會而言，更形迫切。

過去會以高精度的空品量測儀器，輔以專業技工採樣及分析，相關投資動輒數百萬元，也需要較大的監測空間，以致於傳統環保偵測站難以廣泛布建，社會大眾亦難掌握生活周遭空品狀況。隨著新興科技的持續進步，如物聯網 (IoT)、大數據分析、演算法及人工智慧等，帶動微型感測器的發展，價格也相對下降許多，不僅可攜式，還能夠即時監控，大量布建，發展多元化應用，如消費性產品、暖通空調、車用進氣系統及動力系統、無塵室、環境及工業安全、國防及工業用途、醫療等，也帶出空品物聯網的新契機。

本期即以「氣體感測器原理與應用」為專題，介紹目前國內各界學者專家依照偵測原理與機制，所發展出各形各色感測氣體的方式，包含半導體式 (metal oxide semiconductor gas sensor, MOS type)、電化學式 (electrochemical gas sensor)、觸媒燃燒式 (catalytic combustion gas sensor) 以及光學式 (optical gas sensor)、紅外線式 (infrared gas sensor)、超聲波式 (ultrasonic gas sensor) 等，各有其優缺點，以及適合的應用領域。期望讀者在作者群深入淺出的介紹下，進一步認識氣體感測器原理與應用，以及這類型的新興技術，激發讀者新的研究想法與方向，進而提升國家整體科學研究實力。

# 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 ( $\text{NO}_2$ ) 是危害人體健康及環境的主要氣體之一<sup>(1)</sup>，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<sup>(2)</sup>。此外二氧化氮也會造成酸雨，或是形成硝酸鹽粒子，增加 PM<sub>2.5</sub> 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<sup>(3)</sup>，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<sup>(4)</sup>，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 (SnO<sub>2</sub>)、氧化銦 (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 及氧化鎢 (WO<sub>3</sub>) 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<sup>(5-8)</sup>。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<sup>(9)</sup>。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<sub>i</sub><sup>+</sup>) 與氧空缺 (V<sub>O</sub><sup>•</sup>) 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<sup>(10)</sup>。

### 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 (NH<sub>3</sub>) 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)<sup>(6, 8)</sup>。

### 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<sup>(5-8)</sup>。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<sup>(11, 12)</sup>。

### 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) 為氧化鋅奈米柱之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。

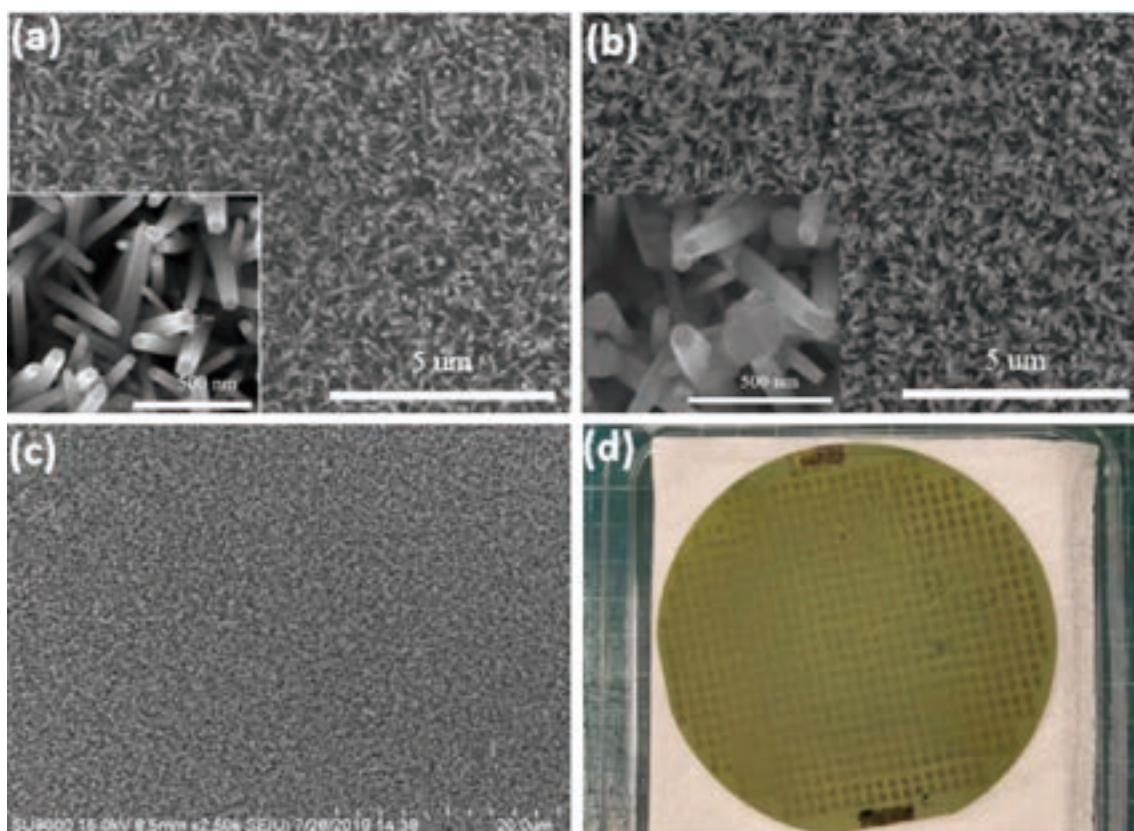


圖 1. (a) 氧化鋅奈米柱之掃描電子顯微鏡影像；(b) 氧化銅／金／氧化鋅三元奈米複合材料之掃描電子顯微鏡影像；(c) 大面積影像；(d) 成長於具對電極四吋晶圓上之照片。

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  $2.58 \text{ ppm}^{-1}$ ，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。

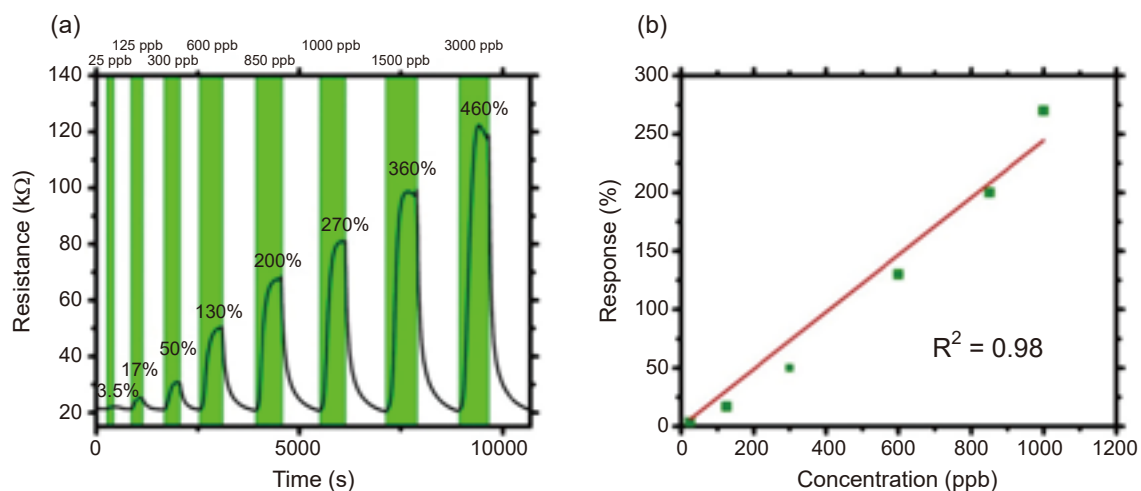


圖 2. (a) 感測晶片在通入 25 至 3000 ppb 二氧化氮之電阻對時間變化圖；(b) 在 25 至 1000 ppb 之響應對濃度之線性擬合圖。

## 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<sup>(13)</sup>。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。

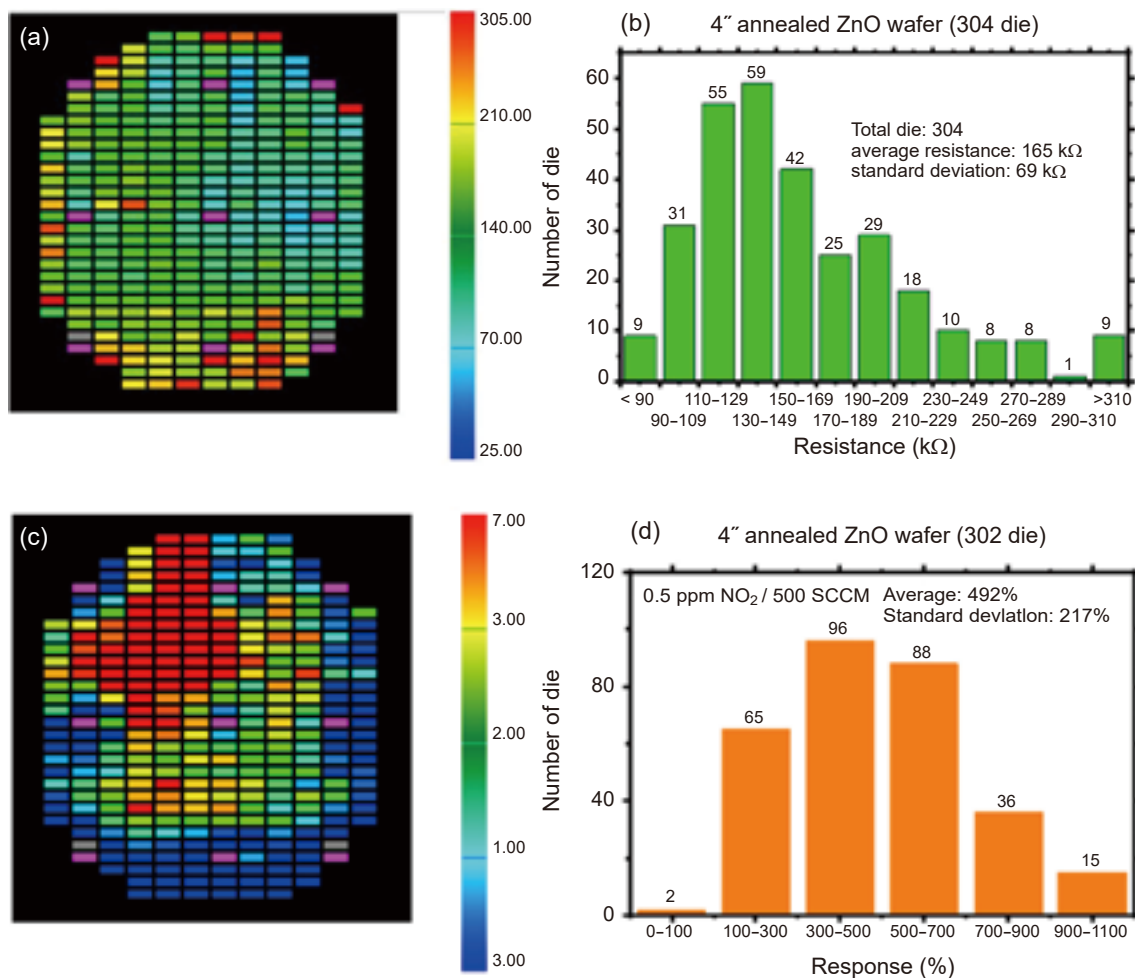


圖 4. 氧化鋅奈米柱於四吋晶圓上電阻值  $R_0$  的(a)分層設色圖及 (b) 分布直方圖；氧化鋅奈米柱於四吋晶圓上響應的 (c) 分層設色圖及 (d) 分布直方圖。

### 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。

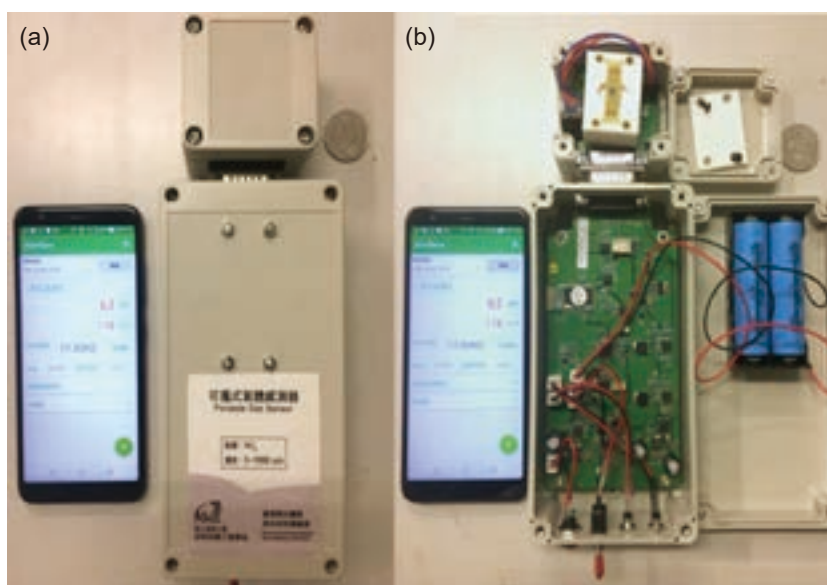


圖 5. (a) 手機操控可攜式氣體感測器之外觀；(b) 上方為感測模組，內有感測晶片及 UV LED，下方為控制電路及藍芽通訊模組。

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  $8.46 \text{ ppm}^{-1}$ ，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。

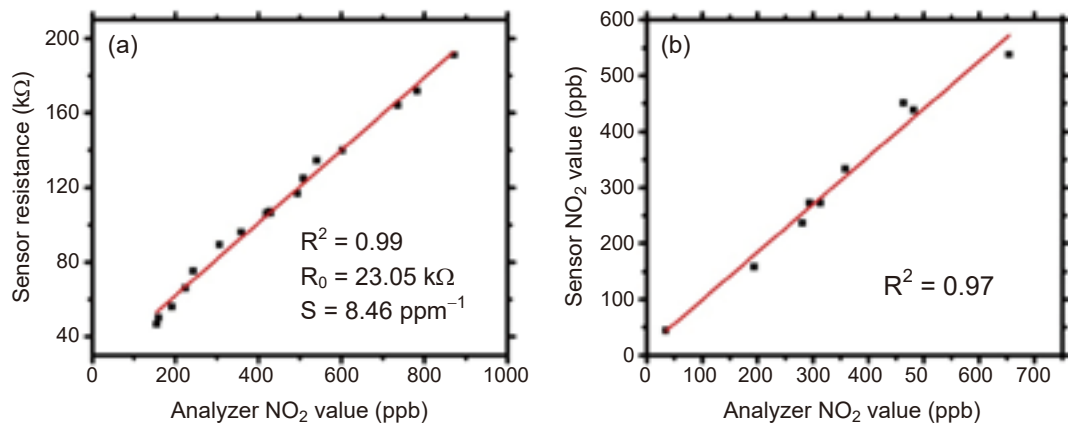


圖 6. (a) 感測晶片電阻值  $R_g$  對標準濃度之線性擬合；(b) 氣體感測器所得之氣體濃度對標準濃度之線性擬合。

#### 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。

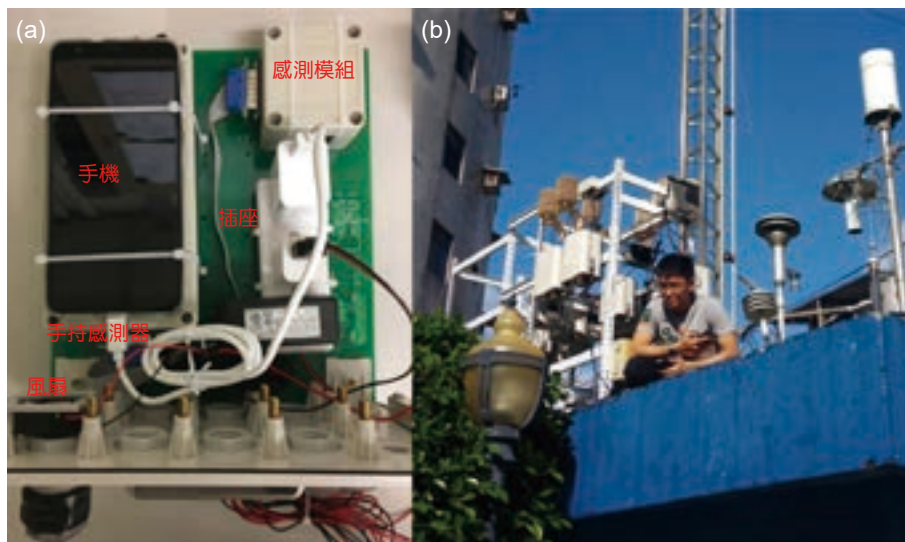


圖 7. (a) 感測器置放於空氣盒子，用於戶外場域測試；(b) 在環保署新北市永和空氣品質監測站上方進行場域測試。

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。

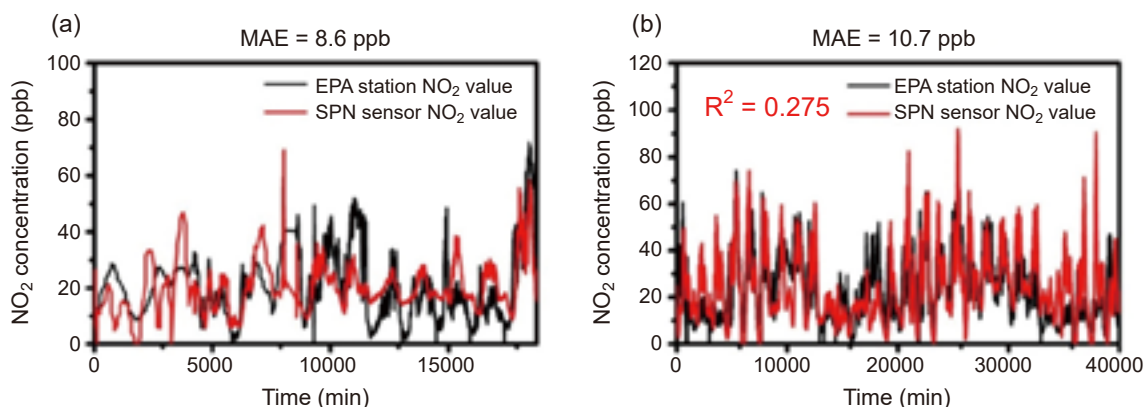


圖 8. (a) 利用感測器數據及測站真實濃度之訓練結果；(b) 一個月測試期間的感測器計算濃度與測站真實濃度比較。

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.

# 氮氧化物氣體感測器研製與特性分析

## Development and Characteristic Analysis of Nitrogen Oxide Gas Sensor

洪瑞華、澹台富國、李維中

Ray-Hua Horng, Fu-Gow Tarntair, Wei-Chung Lee

利用有機金屬化學氣相沉積系統生長氧化鎵鋅 (ZnGaO, ZGO) 單晶薄膜在藍寶石基板上，並將此薄膜應用於氣體感測器。由於此三元氧化物半導體具有較寬的能隙 (~5.2 eV) 且表面上具有較多的氧空缺，故製作成元件後在可見光範圍操作較為穩定，而表面上的氧空缺會使氧氣吸附，在感測氣體時與待測氣體產生交互作用。相較於相同濃度之其他氣體，ZGO 薄膜對於氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 氣體的響應度較高，故以一氧化氮 (NO) 作為測量氣體。本文同時也分析氣體感測的機制，我們分別探討了薄膜含鎵量不同對於氣體響應度的影響並探討氣感反應之特性與機制。

Zinc gallium oxide (ZnGaO, ZGO) single crystal epilayers were grown on sapphire substrates by metalorganic chemical vapor deposition system and applied to gas sensors. Since this ternary oxide semiconductor has a wide energy gap (~5.2 eV) and more oxygen vacancies on the surface. It is more stable in the visible light range after fabrication. Furthermore, the surface will absorb the oxygen due to the the oxygen vacancies. It will interact with the gas as injecting sensing the gas. Compared with other gases with the same concentration, the ZGO film has higher responsivity to nitrogen oxide ( $\text{NO}_x$ ) gas, so nitrogen monoxide (NO) is used as the measurement gas. This paper also analyzes the mechanism of gas sensing. The influence of different gallium content of the ZGO on the gas responsivity will be discussed. Moreover, the characteristics and mechanism of the gas sensing reaction will also be studied in details.

### 一、背景介紹

衛生福利部統計處最公布的「2020 年台灣十大死因統計結果」，氣管、支氣管、肺癌仍然蟬聯第一。其中惡性腫瘤 (癌症)、心臟疾病、肺炎為前 3 名，癌症之中肺癌與肝癌已連續 41 年排名前 2。特別是台灣的肺癌發生率亞洲排名第 2、全球第 15<sup>(1)</sup>，還有半數罹患肺癌者是不吸菸的。日常生活中除了病毒外，空氣中亦常充斥著影響我們健康之有害氣體，因此空氣品質監控有其必要性。世界衛生組織稱每年有 420 萬例死亡與污染問題和暴露於有

毒或危險氣體相關。Yole Développement (Yole) 的傳感與致動團隊首席分析師 Jérôme Mouly 稱，污染的成本對經濟也會產生顯著影響，據世界銀行估算為全球 GDP 的 4.8%<sup>(2)</sup>。但戶外污染並不是目前的唯一問題。新冠疫情讓人們對室內空氣監測更加關注。人們呼出的氣溶膠顆粒在空氣中的存量與氣溶膠所攜帶病毒的可能傳播之間存在相關性。這就需要對教室、辦公室和公共場所等封閉空間進行管控。氣體和顆粒傳感器的總市場價值預期將從 2020 年的 12 億美元增至 2026 年的 22 億美元，這期間的複合成長率 CAGR 為 10.9%。

氣體感測器為將特定氣體 (待測氣體) 以適當的電訊號 (電壓、電阻、電流) 轉換，使其可以被監測或計量的元件，相當於動物的嗅覺。日常生活中的氣體大多無色無味，就人類的嗅覺而言，要辨別氣體的種類是相當有難度的，在這些氣體中，存在著許多對人體有害的氣體，例如一氧化碳 (CO)、一氧化氮 (NO) 等等，或像是二氧化碳 (CO<sub>2</sub>)、二氧化硫 (SO<sub>2</sub>) 等等空氣污染氣體，其中又以 NO 受到較多關注。根據 2018 年全球氣喘報告 (The Global Asthma Report 2018) 的統計，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，可以確保人體健康和提高生活品質。

氣體感測器最早來自 1932 年由 Hersch<sup>(3)</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>(4)</sup> 提出固態電解質氣體感測器，1953 年 P.B.Weisz<sup>(3)</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>(4)</sup> 利用半導體阻值改變方式偵測氣體，而 1968 年 Figaro<sup>(5)</sup> 率先將半導體型可燃式氣體感測器商業化，1974<sup>(6)</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>(7)</sup>，氣體感測器種類五花八門，若依偵測原理與機制分類，大致上可以分成：半導體式 (metal oxide semiconductor gas sensor, MOS type)<sup>(8)</sup>、電化學式 (electrochemical gas sensor)<sup>(9)</sup>、觸媒燃燒式 (catalytic combustion gas sensor)<sup>(10)</sup> 以及光學式 (optical Ggas sensor)、紅外線式 (infrared gas sensor)、超聲波式 (ultrasonic gas sensor)<sup>(11-13)</sup> 等等，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。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，其感測器結合溫度與濕度的偵測且以微機電製程製作 (micro electro mechanical systems, MEMS)，元件尺寸可以做到極小化，還有英國 CMOS Cambridge 所研發生產空氣品質監測元件，該感測器具有簡單微控制器 (microcontroller unit, 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。

目前已有許多半導體材料應用在半導體式氣體感測器，其中又以寬能隙半導體材料擁有耐高溫、耐高壓、電阻小、電流大與低耗電等特性而受到重視，例如以 ZnO 為材料製成之氣體感測器。ZnO 形式多變，除了薄膜以外，許多文獻也提及利用 ZnO 製成的奈米管 (nanotube)<sup>(14)</sup>、奈米片 (nanoplate)<sup>(15)</sup>、奈米花 (nanoflower)<sup>(16)</sup> 等奈米結構之氣體感測器，感測氣體眾多，包括氫氣 (H<sub>2</sub>)<sup>(17)</sup>、氨氣 (NH<sub>3</sub>)<sup>(18)</sup>、乙醇 (ethanol)<sup>(19)</sup>、二氧化氮 (NO<sub>2</sub>)<sup>(20)</sup>，因具有相當大的面積體積比 (surface area to volume ratios) 而能有相當優異的氣體響應<sup>(21-23)</sup>，但奈

米結構再現性較差不易控制且氣體選擇比不夠好，因此離實際應用仍有差距。

為了改善 ZnO 材料對多種氣體皆有良好的反應性，氣體選擇性較差，以及鮮少有論文提出 ZnO 材料對於 NO 氣體有反應性。本研究嘗試在 ZnO 中，摻入 Ga 元素，以提高對於 NO 氣體的吸附能力，有許多文獻已經指出摻雜金屬後的 ZnO 對於感測特定氣體的能力有所增加，有在 ZnO 中摻雜 Al、Cr 以提高對 CO 氣體的響應<sup>(24-25)</sup>，有在 ZnO 中摻雜 In 以提高對乙醇的響應<sup>(26)</sup>；有在 ZnO 中摻雜 Ag 以提高對 NO 氣體的響應<sup>(27)</sup>；有在 ZnO 中摻雜 Au 以提高對 NO<sub>2</sub> 氣體的響應<sup>(28)</sup>；有的則是在 ZnO 中摻雜 Al 以提高對 CO<sub>2</sub> 氣體的響應<sup>(29)</sup>；但卻沒有對於 ZnO 摻入 Ga 材料做為氣體感測器的先例。

本技術開發一特殊之尖晶石圖 1 薄膜，以提供特殊之表面懸浮鍵，且此一薄膜由於表面鍵結能特性，僅對 NO 氣體有所反應，現今之金屬氧化物皆無與之相似的量測能力。當吸附 NO 氣體時，此薄膜之電阻即產生增加之變化，藉此一特性可用於感測 NO 氣體，靈敏度達 ppb 等級之 NO 氣體也能被感測到。此為目前商用之金屬氧化物薄膜無法達到之規格，且此些金屬氧化物僅可用以感測 NO<sub>2</sub>，然而本感測器藉由可量產之 MOCVD 系統磊晶成長之 Ga 摻雜 ZnO 尖晶石薄膜，表面存在 Zn、Ga 懸浮鍵，其對 NO 具有極佳吸附能力，進而改變此薄膜之導電能力，而可用於 NO 氣體感測器使用。

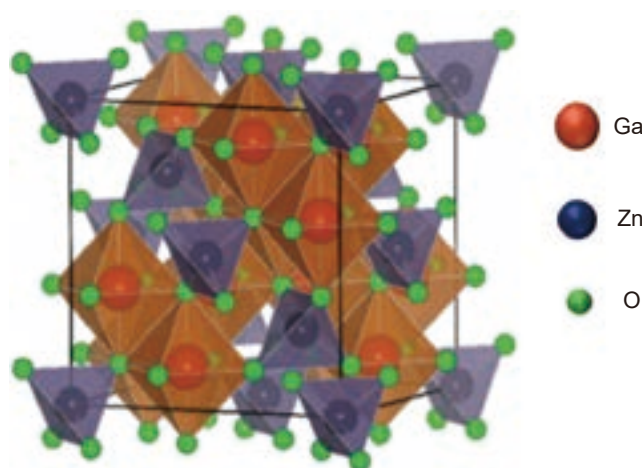


圖 1. 尖晶石結構示意圖。

## 二、實驗方法

本研究將使用有機金屬化學氣相沉積系統 (metal organic chemical vapor deposition, MOCVD) 成長 ZnGO 薄膜。選用的基板為 c-plane (0001) 面的藍寶石 (sapphire) 基板。三乙基鎵 (TEGa) 及氧氣 (O<sub>2</sub>) 為鎵及氧的來源，二乙基鋅 (DEZn) 為鋅的來源。氬氣 (Ar) 為載流氣體，三乙基鎵的流量為 30 sccm、二乙基鋅為 70 sccm、氬氣流量為 1500 sccm、氧氣的流量為 200 sccm，腔體壓力為 15 torr，成長溫度為 650 °C，試片轉速為 300 rpm。在比較薄膜厚度對於氣體感測器響應度之影響的實驗中，薄膜成長時間為 60 分鐘，所對應之薄膜厚度約為 313.66 nm；在比較薄膜鎵含量對於氣體感測器響應度之影響的實驗中，鎵流量分別為 30、20、15 及 23 sccm。

薄膜成長完後將試片放入高溫氧化爐管進行熱退火處理，其目的是為了將薄膜表面的不好的缺陷 (dangling bond) 去除，使薄膜內原子可以重新排列並提高其結晶性，故在製作氣體感測器時，將熱退火溫度設定在  $700^{\circ}\text{C}$ ，退火時間為 30 分鐘，通入氮氣之流量為 9 sccm。

接著要開始進行氣感元件製程：使用旋轉塗佈機將光阻均勻的塗布在試片上，放置於烤盤上軟烤  $90^{\circ}\text{C}$  持續 90 秒，接著將試片置於曝光對準機定義出乾式蝕刻的區域，再將試片至於烤盤上進行曝後烤  $110^{\circ}\text{C}$  持續 20 秒，曝後烤的目的是消除駐波效應以及加強曝光及未曝光光阻間的溶解度和差異度。取出試片，用顯影液顯影 60 秒，用 DI water 將表面殘餘的去光阻液洗淨，在光學顯微鏡底下觀察圖形是否顯影完整。隨後將試片放入感應耦合電漿離子蝕刻系統中 (inductively coupled plasma reactive ion etching, ICP-RIE) 進行乾式蝕刻，其目的是為了將元件結構獨立區別出來，彼此不相互導通。在蝕刻的過程中所選用的氣體為氮氣，三氯化硼與 Ar，流量分別為 15、15、4 sccm。機台內交流功率與直流功率分別為 250、50 W，蝕刻壓力為 15 mtorr，蝕刻時間為 300 秒。因為必須將薄膜完全蝕刻至基板才能有將元件隔絕之效果，因此蝕刻深度根據不同的薄膜厚度而有不同的選擇。

接著定義微結構範圍在結束乾式蝕刻後，去除試片上殘餘光阻，將微結構範圍定義在元件的主動區上，ICP-RIE 進行乾式蝕刻，氣體種類、流量、機台功率及蝕刻壓力皆相同，唯獨蝕刻時間為 100 秒，由於微結構的目的是增加表面積，不須將主動區薄膜蝕刻至基板，故蝕刻時間減短至 100 秒。微結構的目的為增加氣體響應度，若除去此步驟，感測器元件仍然可以使用，因此可以視情況選擇性地使用微結構。最後進行源極與汲極之金屬沉積。

上述步驟皆完成後，進行歐姆接觸電極製作，步驟如下：進行試片清潔後將光阻均勻塗布在試片上並製作圖案。將試片放入電子束蒸鍍系統，腔體壓力設定在  $3 \times 10^{-6}$  torr 下，鍍上鈦／鋁／鎳 (Ti/Al/Ni) 作為電極的金屬，厚度分別為 50/100/25 nm。因為金屬需覆蓋主動區，對於元件而言會產生較好的電性，因此針對不同厚度的薄膜須調整而有不同的選擇。此外，Ti 金屬的功用為黏著層；因 Ni 較不易氧化且氧化後也仍然具有導電能力，故選擇 Ni 金屬做為最上層覆蓋金屬以防止下層金屬氧化外。結束金屬沉積之後將試片放入丙酮中進行金屬撥離法 (lift-off) 製程，使蒸鍍在光阻上之金屬剝離，剩下的部分即為定義之圖案。詳細製作流程如圖 2。所做出之感測元件在光學顯微鏡下影像如圖 3 所示。

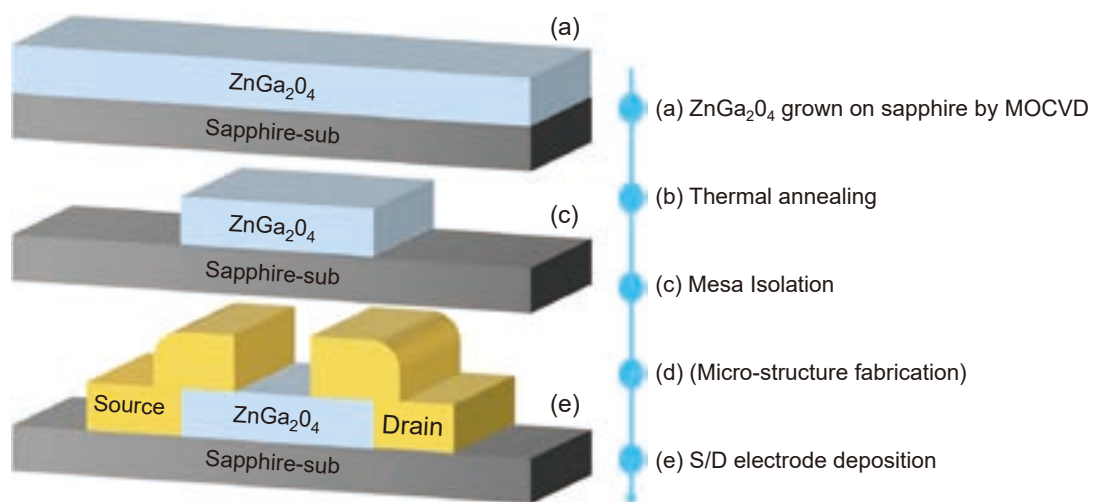


圖 2. 金屬—半導體—金屬 (metal-semiconductor-metal, MSM) 結構氣體感測器製程步驟。

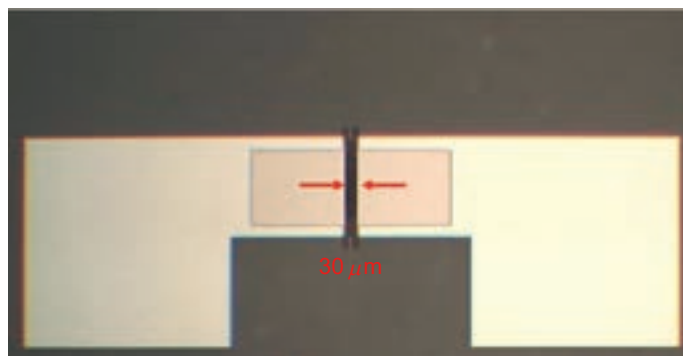


圖 3. ZGO 薄膜 MSM 結構氣體感測器於光學顯微鏡下拍攝圖。

氣體感測測量系統如圖 4 所示，腔體的體積約為 8 公升，內有一加熱載台可調控氣體感測器之操作溫度，注入氣體則使用氣體流量控制器。測量儀器型號為 Agilent-B1505A Semiconductor Parameter Analyzers，儀器解析度：電流操作範圍在  $-100\text{ mA}$  至  $100\text{ mA}$  時，解析度為  $10\text{ fA}$ ；電壓操作範圍在  $-100\text{ V}$  至  $100\text{ V}$  時，解析度為  $0.5\text{ }\mu\text{V}$ ，在低電壓及低電流量測上，具有高準確度與高解析度的優點。

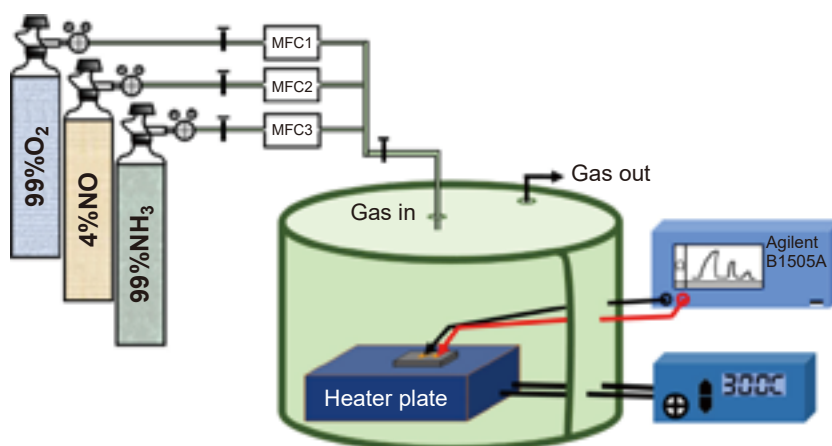


圖 4. 量測電性與氣體響應值系統圖。

### 三、結果與討論

對於氧化物半導體而言，絕大多數的材料皆為  $n$  型半導體，代表在半導體中，主要的載子是電子<sup>(30)</sup>，若將此而半導體製作成電晶體時，會因金屬與半導體之間沒有任何  $p$ - $n$  接面 (junction)，而形成無接面電晶體 (junctionless transistor, JFET)；而若製作成氣體感測器時，除了會影響元件本身的電阻外，也會因為表面的電子數量多寡，影響後續氧氣的吸附、待測氣體的電子交換等，而在響應度、響應時間等感測器特性上造成差異。此章節探討 ZGO 薄膜因成長時間不同而造成薄膜厚度不同，在製作成氣體感測器後，對於 NO 氣體的響應度的差異，並透過物性分析及電性量測，初步了解其成因<sup>(31)</sup>。

為了製作有更高響應度的氣體感測器，並且在成長時間與速率皆固定下，鋅、鎵和氧的比例對於響應度是會有影響的。根據模擬得知，NO 對 Ga 的功函數 (work function,  $\phi$ ) 大於其對 Zn 的功函數<sup>(32)</sup>，又因為對於氧化性氣體而言， $\Delta\phi = \Delta\chi + kT\ln(Ra/Rg)$ ，其中  $\Delta\chi$  為電子親和力 (electron affinity) 的變化，與能帶彎曲有關 (band bending)，在此假設費米能階 (Fermi level, EF) 與導電帶 (conduction band, CB) 的差值不因空氣分子吸附而改變，因此，功函數變化 ( $\Delta\phi$ ) 與響應度的倒數有關，當功函數差值越小，響應度則越大<sup>(33)</sup>。故在此章節中，探討在成長時改變不同鎵流量之薄膜之氣體感測器的響應度變化，比對其是否與模擬之結果相同，並且研究其物性之影響。

ZGO 薄膜利用 MOCVD 製備，成長時通入不同 Ga 流量分成三種薄膜進行探討。Sample A、B、C 分別通入鎵 30、23、15 sccm，皆成長 60 分鐘之後，元件完成後在 300 °C 下注入 NO 氣體進行電性量測，結果如圖 5、圖 6 和圖 7 所示。Sample A 元件的電阻約為 200 k $\Omega$ ，在分別注入 2.5、1、0.5 ppm 的 NO 氣體後，所對應之響應度分別為 4.01、1.86、1.42；Sample B 元件的電阻約為 15 M $\Omega$ ，在分別注入同樣濃度的 NO 氣體後，所對應之響應度分別為 23.65、10.27、5.68；Sample C 元件的電阻約落在 42 M $\Omega$ ，在分別注入 NO 氣體後，所對應之響應度分別為 10.54、3.64、2.43。可從圖 8 透過曲線擬合計算出 Sample A、B、C 斜率分別為 1.32、8.97、4.18，由此可看出 Sample B 氣體響應度在這三種薄膜內是最大的。由圖 8(b) 可看出，元件電阻隨著 Ga 流量降低而變大，而響應度在薄膜均勻時則與電阻有關，過小之電阻將導致響應度降低 (如 Sample A)，而電阻過大對訊號處理有較不好之影響，因此希望元件電阻落在約為 1–10 M $\Omega$  範圍。

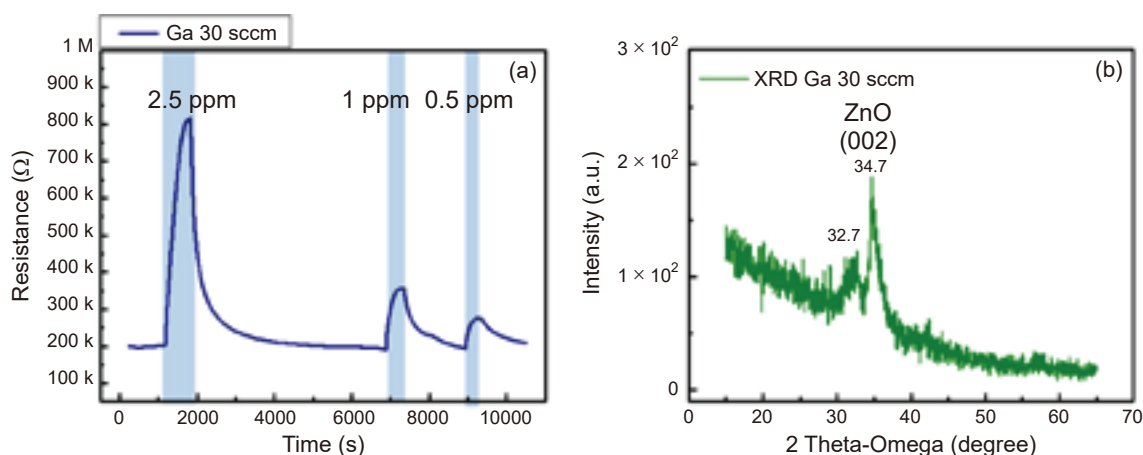


圖 5. (a) 成長時 Ga 流量 30 sccm 薄膜之氣體感測器量測 NO 氣體響應與時間關係圖與 (b) 薄膜 X-ray 繞射分析圖。

由於  $\text{ZnGa}_2\text{O}_4$  為 n-type 的半導體，費米能階較為靠近傳導帶 (EC)，各能帶在氧氣未吸附前時皆為平能帶區 (flat band) 如圖 9(a)，然而，當氧氣吸附薄膜表面後，會吸附在薄膜上並吸收薄膜表面之電子，使得能帶彎曲 (band bending) 而造成一空乏區 (depletion region or space-charge layer) 如圖 9(b)，在表面剩餘電子因離 EC 更遠而越難躍遷至導帶，薄膜導電率降低。若將視角縮小切換至晶粒 (grain) 與晶粒之間，上述之表面即為晶粒之表面，在晶粒之間會因氧氣吸附而造成位障變高使得電阻緩慢上升如圖 10(a)，直到達平衡。在待測氣

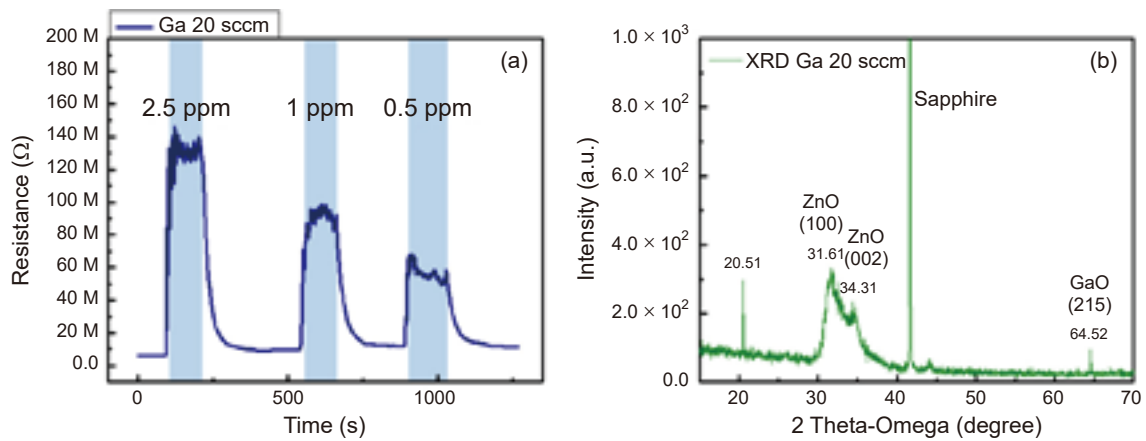


圖 6. (a) 成長時 Ga 流量 20 sccm 薄膜之氣體感測器量測 NO 氣體響應與時間關係圖與 (b) 薄膜 X-ray 繞射分析圖。

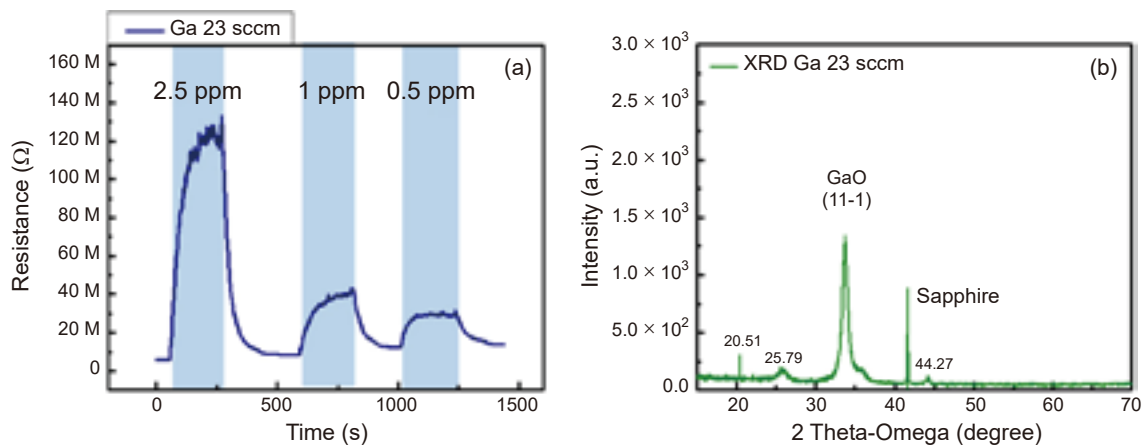


圖 7. 成長時鎵濃度 23 sccm 薄膜之氣體感測器量測 NO 氣體響應與時間關係圖與 (b) 薄膜 X-ray 繞射分析圖。

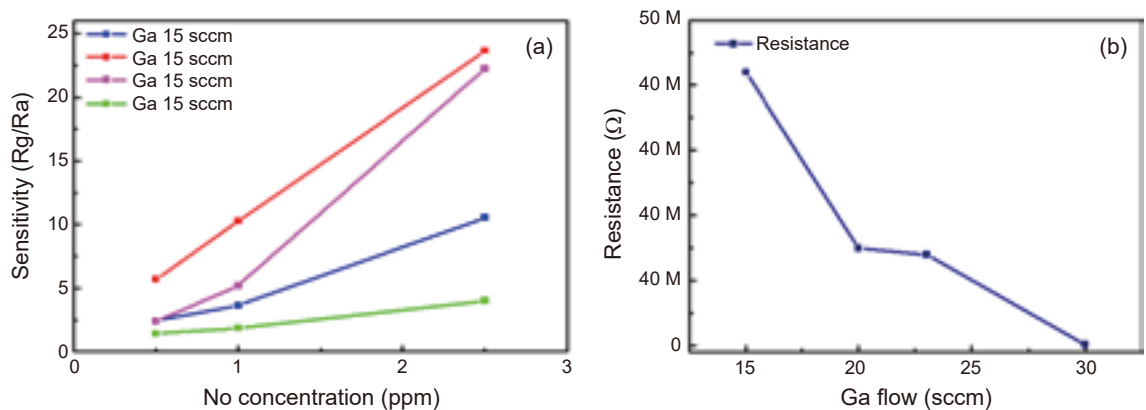


圖 8. 不同鎵濃度薄膜之 (a) 氣體感測器量測 NO 氣體濃度與響應度關係圖 (b) 元件電阻與 Ga 流量關係圖。

體注入後，會針對其氧化還原性之不同，而造成能帶的變動使得導電率上升。還原性氣體 (reducing gas) 如氨氣 (NH<sub>3</sub>) 或一氧化碳 (CO) 可與吸附之氧離子反應，讓氧離子放出電子至薄膜內使電阻下降如圖 10(b)；而氧化性氣體 (oxidizing gas) 如 NO 或臭氧 (O<sub>3</sub>) 則會與薄膜更多的電子反應，使薄膜的導電率下降、電阻值上升，在本實驗中所量測之氣體即為 NO。NO 氣體注入後與薄膜表面之交互作用如式 1 至式 3。由式子可看出，NO 不僅會自行與薄膜的電子作用，也會在氧離子的作用下被氧化成 NO<sub>(ads)</sub> 或 O<sub>2(ads)</sub>，而還原的氧氣又會吸附在薄膜上成氧離子，如此不斷循環直達平衡。

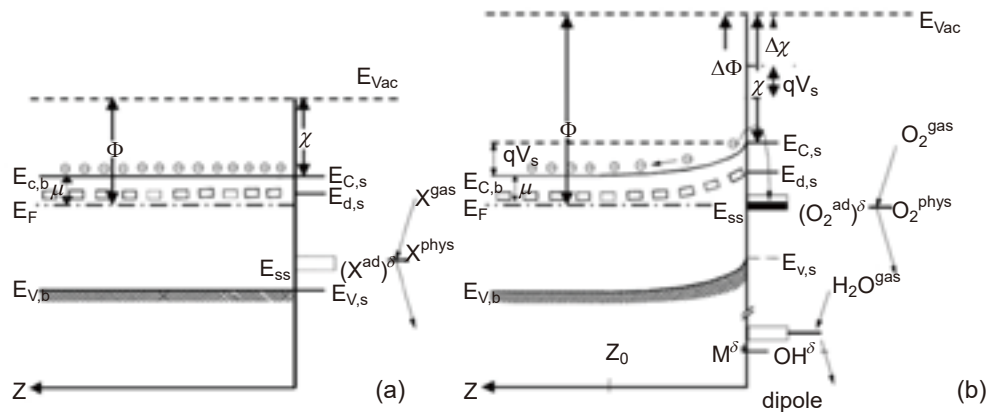


圖 9. 薄膜之 (a) Flat band (b) Band bending 示意圖<sup>(34)</sup>。χ 為電子親和力 (Electron affinity)、φ 為功函數 (Work function)。

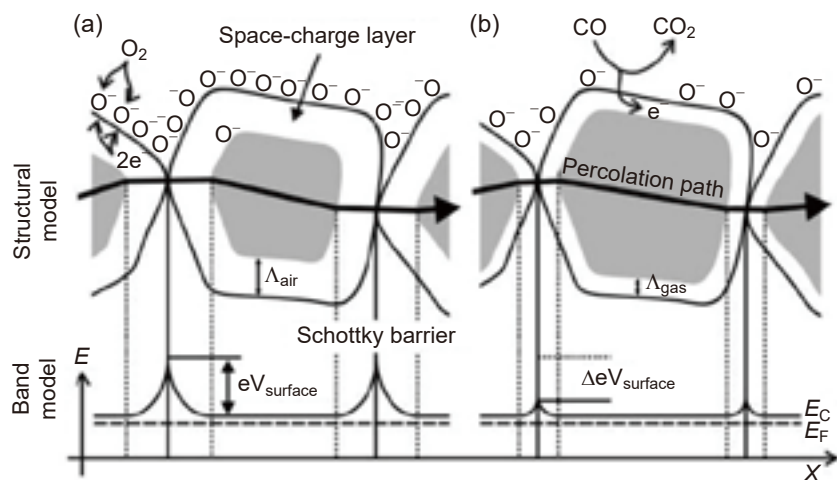


圖 10. (a) 吸附氧氣後 (b) 注入待測氣體後 晶粒之間能帶示意圖<sup>(35)</sup>。

圖 11 和圖 12 為 Sample A 薄膜的上半部分在高解析度 TEM 下觀察之結果 (high resolution TEM, HRTEM)，可以直接觀察到晶格排列情形，接著用擇區電子繞射 (selected area electron diffraction, SAED) 分析選擇區域中的晶格排列為何種晶體。由圖 11 中計算沿著薄膜成長方向 (111) 的晶面間距 (d-spacing) 為  $4.606 \text{ \AA}$ ，而 ZGO 中 (111) 晶格排列方向的 d-spacing 標準值為  $4.808 \text{ \AA}$ <sup>(36)</sup>，低於標準值的原因可由圖 12 解釋。圖 12(a) 為 Sample A 另一處的表面之 HRTEM 形貌圖，利用傅立葉分析轉換分析紅色框內，可以發現此區域存在兩種繞射點的排列情形，利用選取工具將兩種繞射點分開如圖 12(c) 與 (d)，分析後得知分別為 ZnO 的六方晶結構和 ZGO 的立方尖晶石結構，由於其 ZnO 之 d-spacing 較短 (約  $2.81 \text{ \AA}$ )，影響了 ZGO 薄膜之 d-spacing 使其小於標準值，存在 ZnO 的結果也與 XRD 之結果相互呼應。圖 13 為 sample A 薄膜下半部分與藍寶石 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 基板交界處 (interface) 之 TEM 形貌圖，使用傅立葉轉換和選取工具可將紅色框區域之繞射點分開，發現只有存在兩種繞射圖案，分別為 ZGO 與  $\text{Al}_2\text{O}_3$  並無 ZnO，萃取出 ZGO 之 (111) 方向的 d-spacing 和 sapphire (0001) 方向的 d-spacing，分別為  $4.752 \text{ \AA}$  與  $2.126 \text{ \AA}$ ，sapphire (0001) 方向的 d-spacing 標準值為  $2.165 \text{ \AA}$ 。在此處成長之 ZGO 非常接近標準值，且分析其他交界區域後也無任何 ZnO 的繞射反應，故可推測 ZnO 只出現於表面區域，其可能原因為在成長薄膜時在最後的 Ga 流量不足所導致。

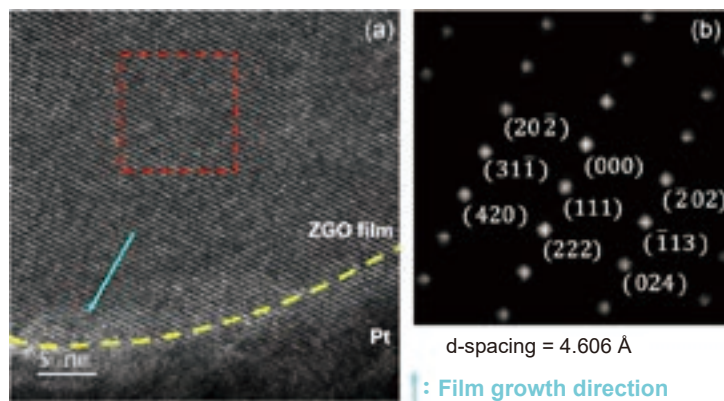


圖 11. Ga 流量為 30 sccm 之薄膜上半部分 (a) HRTEM 形貌圖與 (b) SAED 繞射圖。

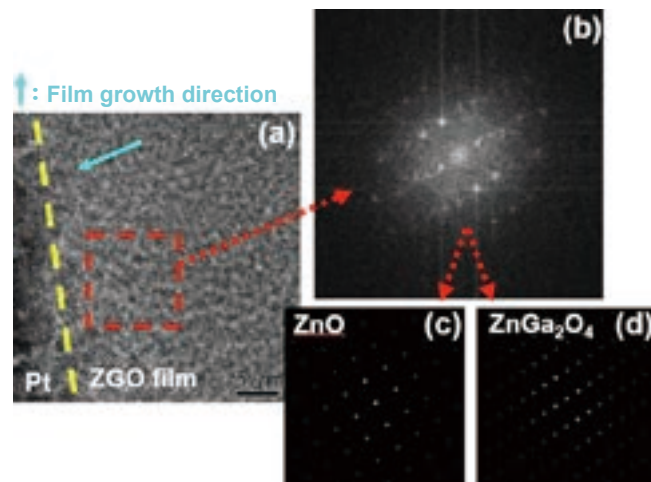


圖 12. Ga 流量為 30 sccm 之薄膜上半部分 晶格排列交錯區之 (a) HRTEM 形貌圖 (b) SAED 繞射圖 (c) ZnO 晶格繞射圖 (d) ZGO 晶格繞射圖。

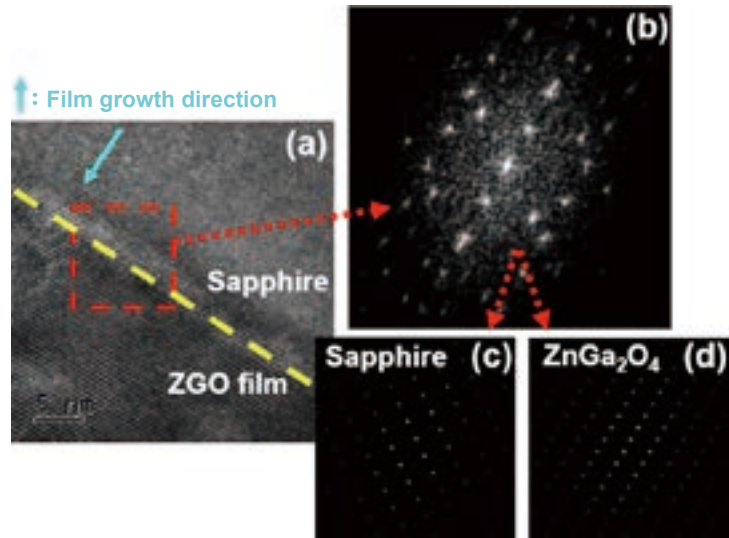


圖 13. Ga 流量為 30 sccm 之薄膜下半部分與藍寶石基板交界處 (a) HRTEM 形貌圖 (b) SAED 繞射圖 (c) Sapphire 晶格繞射圖 (d) ZGO 晶格繞射圖。

圖 14 為 Sample B 薄膜的上半部分在 HRTEM 下觀察之結果，可清楚看到分成兩區種不同的區塊如圖 14(b) 和 (d)，分別做傅立葉分析後為兩種不同排列之繞射圖型，由繞射圖型和計算沿著成長方向之晶面間距推測其為 ZGO 與  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，其 d-spacing 分別為 4.827 Å 和 4.816 Å<sup>(37-38)</sup>，此薄膜之 d-spacing 比起 Sample A 的較為接近標準值 4.808 Å，推測在此區域因為有  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 使其 d-spacing 沒有變小。在另一處則有找到 ZGO 與 ZnO 交錯區域如圖 15，此部分之 ZGO 的 d-spacing 為 4.66 Å，小於標準值，故可證實推測為正確且與 XRD 結果相符。在圖 15 可看到 sample B 薄膜下半部分與藍寶石基板交界處的 HRTEM 圖，如同前一個分析，在交界處也可以看到清晰的 ZGO 與 sapphire 的繞射排列點，在進一步分析基板向上 5–10 nm 處如同圖 15(a) 紅色框部分，可發現已有部分的 ZnO 產生，因此造成在薄膜表面有  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 與 ZnO 生成。此一部分因同時有 Zn 與 Ga 懸浮建。因此有助於氣體響應度之提升。

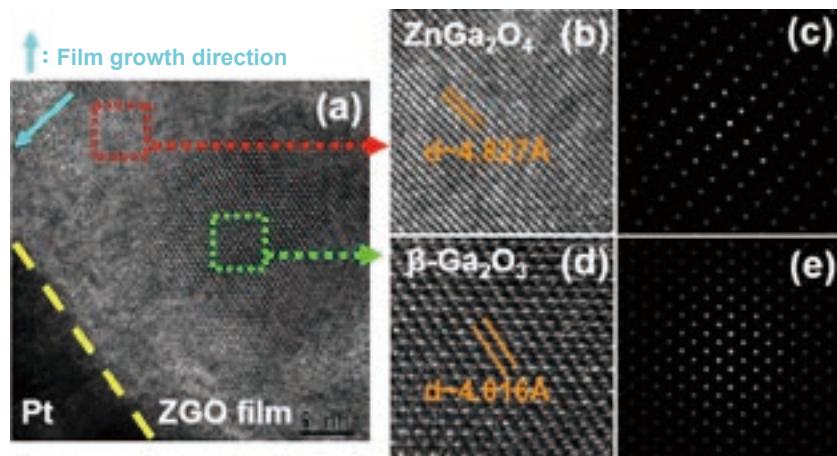


圖 14. (a) Ga 流量為 20 sccm 之薄膜上半部分 晶格排列交錯區 HRTEM 形貌圖 (b) ZGO 晶格圖 (c) ZGO 晶格繞射圖 (d)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶格圖 (e)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶格繞射圖。

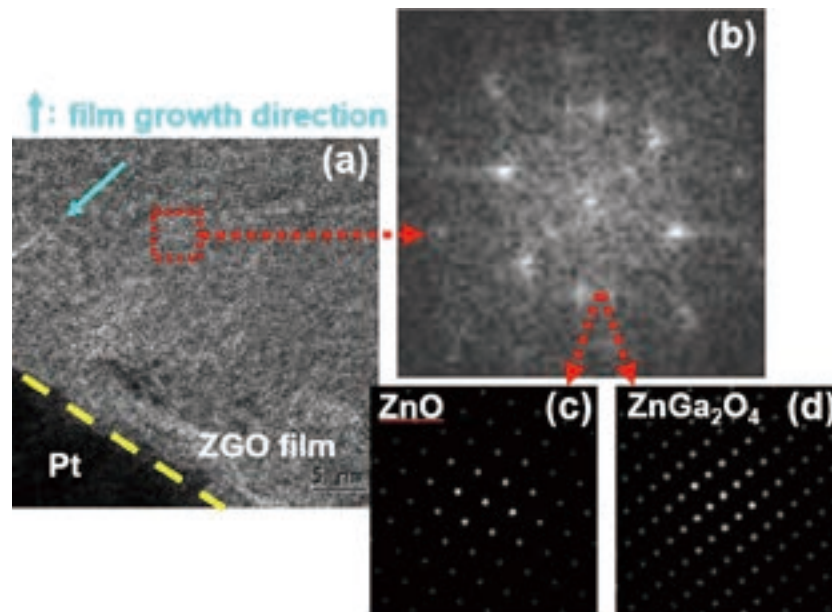


圖 15. Ga 流量為 20 sccm 之薄膜下半部分 晶格排列交錯區之 (a) HRTEM 形貌圖 (b) SAED 繞射圖 (c) ZnO 晶格繞射圖 (d) ZGO 晶格繞射圖。

## 四、結論

本論文利用 MOCVD 系統在藍寶石基板上成長 ZGO 薄膜，並探討在不同薄膜 Ga 的含量，並透過 STEM 做深入之探討，包括晶格缺陷、表面成分探討和微觀結構分析，推論薄膜在含鎵較多的情形下，在製成氣體感測器後元件的電阻較低，且表面晶格缺陷和懸浮鍵較少，因此在感測氣體時響應度較低，反之薄膜在 Ga 含量較少時，其元件電阻較大，同時表面晶格缺陷及懸浮鍵皆多於含 Ga 量較多之薄膜，故其響應度相對較大，然而在含 Ga 量低於一定程度時，反而電阻會上升過多，因此響應度下降。

## 參考文獻

1. Please refer to the website: [http://www.yole.fr/Gas\\_Particle\\_Sensors\\_Technology\\_Market\\_Trends\\_2021.aspx](http://www.yole.fr/Gas_Particle_Sensors_Technology_Market_Trends_2021.aspx)
2. Please refer to the website: <https://www.bella.tw/articles/novelty/29921>
3. Takashi Takeuchi, *Sensors and Actuators B*, **14**, 109 (1988).
4. Hans Pink, Ludwig Treitinger and Lutz Vité, *Japanese Journal of Applied Physics*, **19** (3), 513 (1980).
5. R.S. Popovic, H.P. Baltes, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, **18** (4), 426 (1983)
6. Wolfgang Göpe, Klaus Dieter Schierbaum, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **26** (1-3), 1 (1995).
7. Please refer to the website: <http://www.figaro.co.jp/en/technicalinfo/miniaturization.html>
8. N. Yamazoe, G. Sakai, and K. Shimanoe, *Catalysis Surveys from Asia*, **7** (1), 63 (2003).
9. J. R. Stetter, W. R. Penrose, and S. Yao, *Journal of The Electrochemical Society*, **150** (2), S11 (2003).
10. C.-H. Han, D.-W. Hong, S.-D. Han, J. Gwak, and K. C. Singh, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **125** (1), 224 (2007).
11. S. Capone, A. Forleo, L. Francioso, R. Rella, P. Siciliano, J. Spadavecchia, D. S. Presicce, A. M. Taurino, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **5** (5), 1335 (2003).
12. Z. Awang, *Sens. Transducers*, **168**, 61 (2014).
13. A. Azad, S. Akbar, S. Mhaisalkar, L. Birkefeld, and K. Goto, *Journal of the Electrochemical Society*, **139** (12), 3690 (1992).

14. Rajaa Abdul Alameer Madlol, *Results in Physics*, **7**, 1498 (2017).
15. Kavita Sahoo, Sini kuriakose, Jaspal Singh, Biswarup Satpati, Satyabrata Mohapatra, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **121**, 186 (2018).
16. Yan Xu, Jingjie Jin, Xianliang Li, Yide Han, Hao Meng, Tianyu Wang, Xia Zhang, *Materials Research Bulletin*, **76**, 235 (2015).
17. Thye Foo Choo, Nur Ubaidah Saidin, and Kuan Ying Kok, *Royal Society Open Science*, **5** (5), (2018).
18. Srinivasulu Kanaparthi and ShivGovind Singh, *Materials Science for Energy Technologies*, **3**, 91 (2019).
19. T. Tharsika1, M. Thanihaichelvan, A. S. M. A. Haseeb and S. A. Akbar, *Frontiers in Materials*, **6**, (2019).
20. Faying Fan, Yongjun Feng, Shouli Bai, Juntong Feng, Aifan Chen, Dianqing Li, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **185**, 377 (2013).
21. S. B. Jagadale, V. L. Patil, S. A. Vanalakar, P. S. Patil, and H. P. Deshmukh, *Ceramics International*, **44** (3), 3333 (2018).
22. L. Zhu and W. Zeng, *Sensors and Actuators A: Physical*, **267**, 242 (2017).
23. R. S. Ganesh et al., *Applied Surface Science*, **449**, 314 (2018).
24. M.HjiriaL., El Mir, S.G.Leonardi, A.Pistone, L.Mavilia, G.Neri., *Sensors and Actuators B: Chemical*, **196**, 413 (2014).
25. I. Y. Habib, Aimi Asilah Tajuddin, Hafiz Armi Noor, Chee Ming Lim, Abdul Hanif Mahadi and N. T. R. N. Kumara, *Scientific Reports*, **9** (1), 9207 (2019).
26. Junjie Qi, Hong Zhang, Shengnan Lu, Xin Li, Minxuan Xu, and Yue Zhang, *Journal of Nanomaterials*, **2015**, (2015).
27. You-Ting Tsai, Shouu-Jinn Chang, Liang-Wen Ji, Yu-Jen Hsiao, I-Tseng Tang, Hao-Ying Lu, and Yen-Lin Chu, *ACS Omega*, **3** (10), 13798 (2018).
28. Dilonardo, E., Penza, M., Alvisi, M., Di Franco, C., Palmisano, F., Torsi, L., and Cioffi, N., *Beilstein Journal of Nanotechnology*, **7**, 22 (2016).
29. Hassan, H. S., Kashyout, A. B., Morsi, I., Nasser, A. A. A., and Raafat, A., *AIP Conference Proceedings*, **1653**, (2015).
30. C.-W. Lee, A. Afzal, N. D. Akhavan, R. Yan, I. Ferain, and J.-P. Colinge, *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 053511 (2009).
31. L.-C. Cheng, C.-Y. Huang, and R.-H. Horng, *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, **6**, 432 (2018).
32. M.-R. Wu et al., *Scientific reports*, **9** (1), 7459 (2019).
33. T. Sahm, A. Gurlo, N. Barsan, and U. Weimar, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **118** (1-2), 78 (2006).
34. Z. Awang, *Sens. Transducers*, **168**, 61 (2014).
35. C. Wang, L. Yin, L. Zhang, D. Xiang, and R. Gao, *Sensors*, **10** (3), 2088 (2010).
36. Y.-S. Shen, W.-K. Wang, and R.-H. Horng, *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, **5** (2), 112 (2017).
37. T. Oshima, T. Okuno, and S. Fujita, *Japanese Journal of Applied Physics*, **46** (11R), 7217 (2007).
38. S. Nakagomi and Y. Kokubun, *Physica Status Solidi (A)*, **210** (9), 1738 (2013).

## 作者簡介

洪瑞華教授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 at National Sun Yat-Sen University. She is currently a Distinguished Professor in the Institute of Electronics at National Yang Ming Chiao Tung University.

澹台富國為國立陽明交通大學電子工程博士，現為國立陽明交通大學電子研究所博士後研究員。

Fu-Gow Tarntair received his Ph.D in the Institute of Electronics at National Yang Ming Chiao Tung University. He is currently a Postdoctoral in the Institute of Electronics, National Yang Ming Chiao Tung University.

李維中現為國立陽明交通大學電子研究所碩士生。

Wei-Chung Lee is currently a M.S. student in the Institute of Electronics at National Yang Ming Chiao Tung University.

# 高靈敏度二氧化氮氣體感測晶片

## High Sensitivity Nitrogen Dioxide Gas Sensing Chip

薛丁仁、張宸銘、范書豪

Ting-Jen Hsueh, Chen-Ming Chang, Shu-Hao Fan

全球電子工業迅速的發展，進而帶動城市快速進步，人們在生活環境越便利的同時也帶來其他影響。由於高發展地區人口密度逐漸上升，隨之帶來汽機車及工業廢氣的排放，導致居住環境空氣品質受到嚴重影響。在這些空氣污染中，二氧化氮 ( $\text{NO}_2$ ) 是一種具有刺激臭味的赤褐色氣體，易溶於水反應成一氧化氮 ( $\text{NO}$ ) 和硝酸 ( $\text{HNO}_3$ )，成為酸雨的主要物質，也是  $\text{PM}_{2.5}$  生成源之一。此外，吸入  $\text{NO}_2$  會造成呼吸系統損害，長時間生活在此環境下，容易造成不可逆之呼吸器官傷害。氣體感測器的技術開發，有益於預防及發現污染的源頭。本團隊依據戶外環境開放空間的各種條件，開發具選擇性且高靈敏度之  $\text{NO}_2$  氣體感測器來監控空氣污染品質。目前研究結果之  $\text{NO}_2$  感測器模組已可測得濃度  $< 120$  ppb、精準度  $\pm 30\%$  且與環保署測站比對，決定係數 ( $R^2$ ) 最高達 0.569。

The development of global electronics industry drives the progress of industries and cities. It is advanced technology that makes human life more and more convenient, but it also brings other impacts. Due to population density in high development area is rising, the air quality of the living environment is seriously affected by the exhaust gas of vehicle and locomotives and the air pollution of industrial emissions. In these air pollution,  $\text{NO}_2$  is a red-brown gas with a pungent smell. It dissolves in water and reacts to form  $\text{NO}$  and  $\text{HNO}_3$ , which is the main substance causing acid rain and one of the sources of  $\text{PM}_{2.5}$ . In addition, inhaling  $\text{NO}_2$  will cause damage to the respiratory system. Living in this environment for a long time will easily cause irreversible respiratory damage. Research on sensor technology is beneficial to prevent and discover pollution sources. Due to the various conditions of open spaces in outdoor, high-sensitivity gas sensors that selectively target  $\text{NO}_2$  are developed to monitor air pollution quality. The  $\text{NO}_2$  sensor module of the current research results can measure the concentration of  $< 120$  ppb, the accuracy is  $\pm 30\%$ , and compared with the EPA station, the determination coefficient ( $R^2$ ) is up to 0.569.

### 一、前言

伴隨著科技日新月異帶給人們便利生活的同時，也帶來其他負面影響。工業與城市的高開發地區造就許多就業機會，但該地區的人口密度也逐漸攀升，隨之帶來汽機車及工業排

放廢氣的問題就此產生。依據行政院環保署於 109 年對台灣地區空氣污染 (air quality index, AQI) 監測當天空氣中的氣體資料 (如圖 1 所示)，分別測得細懸浮微粒 (PM<sub>2.5</sub>)、懸浮微粒 (PM<sub>10</sub>)、二氧化氮 (NO<sub>2</sub>)、一氧化碳 (CO)、二氧化硫 (SO<sub>2</sub>) 及臭氧 (O<sub>3</sub>) 等氣體濃度<sup>(1)</sup>，針對影響人體健康程度，分別量化出不同污染物的副指標值，再整理監測當天副指標的最大值定義當日之空氣品質指標值 (AQI)。其中 NO<sub>x</sub> 也是 PM<sub>2.5</sub> 原生成物之一，根據 PM<sub>2.5</sub> 的成分結構分為一次組分和二次組分。一次組分排放方式是直接顆粒型態，二次組分則是氣態污染物型態，與環境空氣中其他的組分產生化學反應後進而產出的細懸浮微粒<sup>(2)</sup>。NO<sub>2</sub> 一般是在燃燒過程中產生，燃燒過程高溫情況下，氧氣與氮氣反應形成 NO<sub>2</sub> 大多數污染源是來自火力發電廠、內燃發動機 (汽機車引擎)、各類型高溫燃燒工業廠以及大氣核試驗等，上述污染源都會產生大量的 NO<sub>2</sub>。

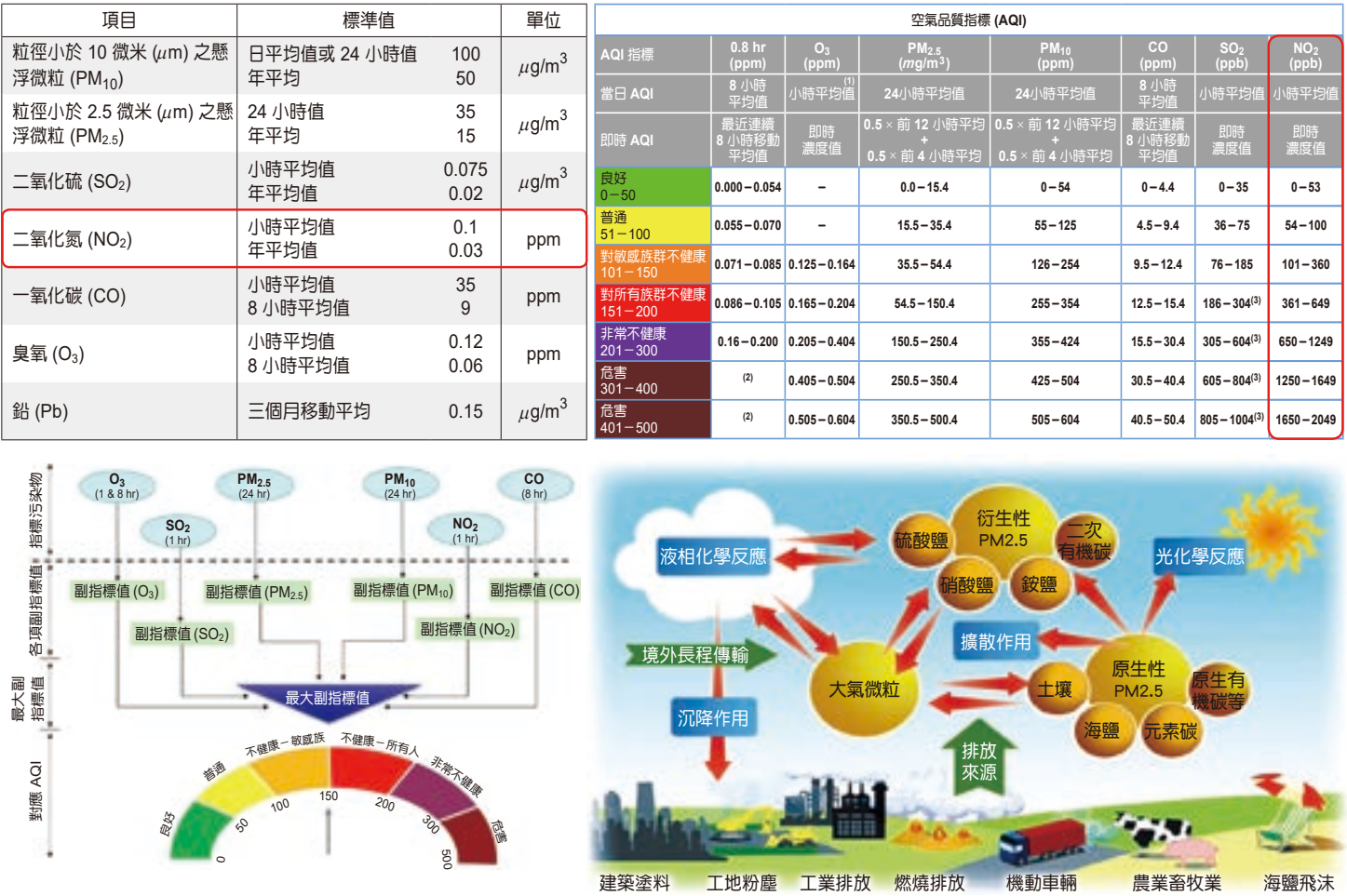


圖 1. 行政院環保署於 109 年對台灣地區空氣污染與產生的危害物質做分析<sup>(2-4)</sup>。

NO<sub>2</sub> 本身具有一定毒性，人體吸入少量容易引起呼吸急促、咳嗽、雙目痠痛、噁心嘔吐等症狀，長期暴露可能罹患氣喘、黃斑部病變、糖尿病及胎兒心臟病等慢性病。因此，人們需要氣體感測器來時時地幫人們監控環境 NO<sub>2</sub> 濃度的變化，以確保我們的健康。

## 二、氣體感測器種類比較

### 1. 氣體感測器種類

目前市售氣體感測器種類眾多，依據偵測機制與原理的不同，大致上可分為以下幾種：電化學氣體感測器、觸媒燃燒氣體感測器、光學氣體感測器，金屬氧化物半導體 (metal-oxide-semiconductor, MOS) 氣體感測器及 MOS 晶片型氣體感測器 (半導體氣體感測晶片)<sup>(2)</sup>。這些種類的感測器中，電化學式氣體感測又分為固態電解質 (solid electrolyte, SE) 及液態電解質 (如圖 2)。各種類之氣體感測器各有優缺點。



圖 2. 目前市售上大部分的氣體感測器型式<sup>(5-8)</sup>。

### 2. 國際目前市售之 NO<sub>2</sub> 氣體感測器規格

表 1 為國際市售 NO<sub>2</sub> 氣體感測器產品，多數為電化學式氣體感測器。在 NO<sub>2</sub> 氣體感測器方面，大致上感測範圍為 0–20 ppm，解析度為 100 ppb，以 SPEC Sensor 公司所銷售的編號 DGS-NO<sub>2</sub> 968-043 產品解析度 50 ppb 為較佳。然而，這些市售電化學式氣體感測器要達到行政院環保署空氣品質的年平均 30 ppb 之規定 (如圖 1 紅色框框所示)，實為困難。半導體系列的氣體感測器，由於感測材料對環境有毒氣體具有氧化和還原之特性，已被許多研究機構證實，是可以達到 ppb 等級 (NO<sub>2</sub> 50 ppb 以下) 之感測。其感測原理如下。

## 三、半導體系列氣體感測器之原理

金屬氧化物材料，因為結構上有所缺陷，導致元件出現 n 型 (n-type) 或 p 型 (p-type) 半導體特性。在一般情況單純的空氣環境下，氧氣分子 (O<sub>2</sub>) 分布正常不易變動，若量測環境沒有起伏變動時，少許 O<sub>2</sub> 一般會吸附在金屬氧化物材料的表面電子形成 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 離子狀態，而此時 n 型半導體因多數載子是帶電子 (e<sup>-</sup>)，當表面電子與 O<sub>2</sub> 形成 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 離子狀態時，n 型半導體表面造成載子空乏區 (depletion layer)，導致 n 型半導體之元件電阻值升高。相反著，p 型半導體因多數載子為帶電洞 (h<sup>+</sup>)，相同地當表面電子與 O<sub>2</sub> 形成 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 離子狀態時，相對電洞之載子數目是增加的，因此 p 型半導體之元件電阻值是降低的，如圖 3 Gas in 以前的阻抗變化所示。此種感測的模式稱之為氧化反應。此外，對半導體材料施加溫度也會改變吸附氧離子型態。一般而言，在材料溫度約 < 150 °C 以前為 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 型態，當溫度 > 150 °C 而約 < 250 °C 時為 O<sup>-</sup> 型態，而 O<sup>2-</sup> 型態是當溫度約 > 250 °C 時。當加入有毒之特殊氣體，如一氧化碳 (CO) 至感測環境中時，以 n 型半導體之 SnO<sub>2</sub> 材料為例，CO 將和 O<sup>-</sup> 氧氣離子為進行還原反應，而形成 CO<sub>2</sub> 及電子 (e<sup>-</sup>)，而電子則轉移回去元件中，此時元件因增加電子而電阻降

表 1. 國際市售 NO<sub>2</sub> 氣體感測器產品。

|           | NO <sub>2</sub> 氣體感測器         |                 |                       |                       |                |
|-----------|-------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
|           | 本團隊                           | 市售國際領導產品 A      | 市售國際領導產品 B            | 市售國際領導產品 C            | 市售國際領導產品 D     |
| 品牌名稱      | NKUST                         | SPEC Sensor     | EURO-GAS              | ALPHASENSE            | IDT            |
| 型號        | NO <sub>2</sub> -1            | DGS-NO2 968-043 | 4-NO <sub>2</sub> -20 | NO <sub>2</sub> -A43F | ZMOD4510       |
| (1) 技術創新性 | MEMS                          | electrochemica  | electrochemica        | electrochemica        | mems           |
| (2) 技術成熟度 | 高                             | 低               | 低                     | 低                     | 低              |
| (3) 成本優勢  | 便宜                            | 昂貴              | 昂貴                    | 昂貴                    | 昂貴             |
| (4) 功能比較  | 多合一整合                         | 單一模組            | 單一模組                  | 單一模組                  | 單一模組           |
| (5) 使用期限  | ≥ 2 years in air <sup>2</sup> | > 5years        | 2 years in air        | > 36 months           | 2 years in air |
| (6) 規格    |                               |                 |                       |                       |                |
| 1. 測量濃度範圍 | 0 – 100 ppb                   | 0 – 5 ppm       | 0 – 20 ppm            | 0 – 20 ppm            | 20 – 500 ppb   |
| 2. 偵測底限濃度 | MAX: 120 ppb<br>MIN: 6 ppb    | N/A             | 250 ppm               | 50 ppm                | 500 ppb        |
| 3. 解析度    | 10 ppb                        | 50 ppb          | 0.1ppm                | 50 ppb                | 10 ppb         |
| 4. 重複性    | N/A                           | N/A             | N/A                   | N/A                   | N/A            |
| 5. 反應時間   | < 30 seconds                  | < 30 seconds    | < 45 seconds          | < 60 seconds          | 60 seconds     |
| 6. 起始穩定時間 | N/A                           | N/A             | N/A                   | N/A                   | N/A            |
| 7. 操作電壓   | 0 – 3V                        | N/A             | N/A                   | N/A                   | N/A            |

低。而 p 型半導體，感測動作將相反，如圖 3 Gas in 後的阻抗變化所示。NO<sub>2</sub> 在半導體感測原理中是屬於氧化性氣體。本團隊為了能符合行政院環保署空氣品質對 NO<sub>2</sub> 的標準，以臺灣領先全球的半導體製程之微機電系統 (microelectromechanical systems, MEMS) 整合技術將感測器微小化，再藉由半導體感測原理。開發適合應用於戶外之高靈敏度 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片，規格如表 1 所示。

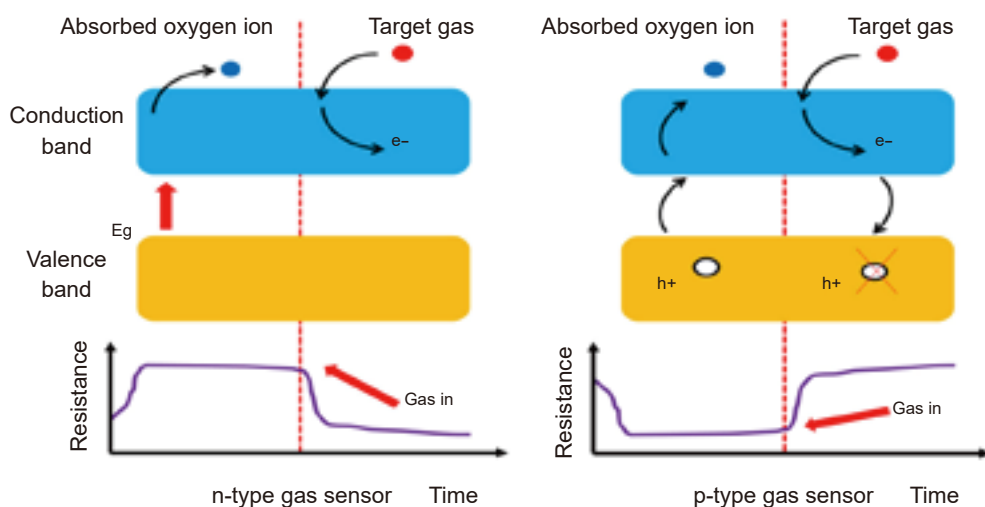


圖 3. 不同型態 (n 型、p 型) 半導體氣體感測器氧化還原反應下其電阻變化。

## 四、高靈敏度 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片與模組設計

### 1. NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片

NO<sub>2</sub> 感測晶片的開發，是使用台灣半導體研究中心 (Taiwan Semiconductor Research Institute, TSRI) 台南基地的 6"–8" MEMS 技術服務平台，研製本團隊之高靈敏度 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片。主要是由 5 道光罩配合大約 36 道連續性製成完成的，其中包含薄膜 (thin film)、黃光 (photo) 及蝕刻 (etch) 等製程。之後再經由晶圓切割技術，於 6" 晶圓的 8 cm × 8 cm 面積裡，切割成 1 萬顆以上的氣體感測晶片，每一顆晶片型氣體感測器的尺寸約為 0.65 mm × 0.65 mm × 0.4 mm，是比一顆芝麻還要小很多，如圖 4 所示。

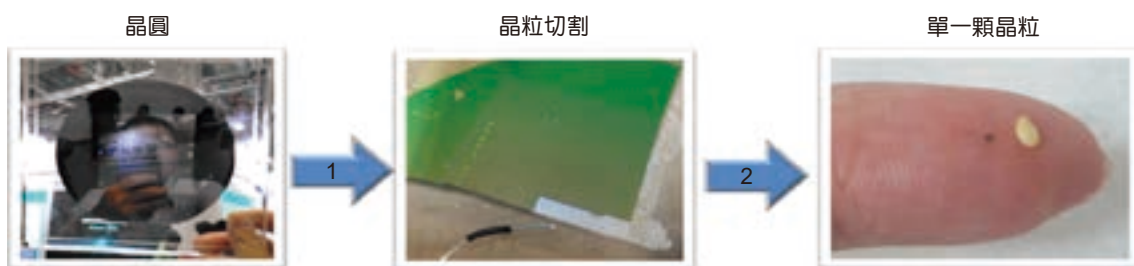


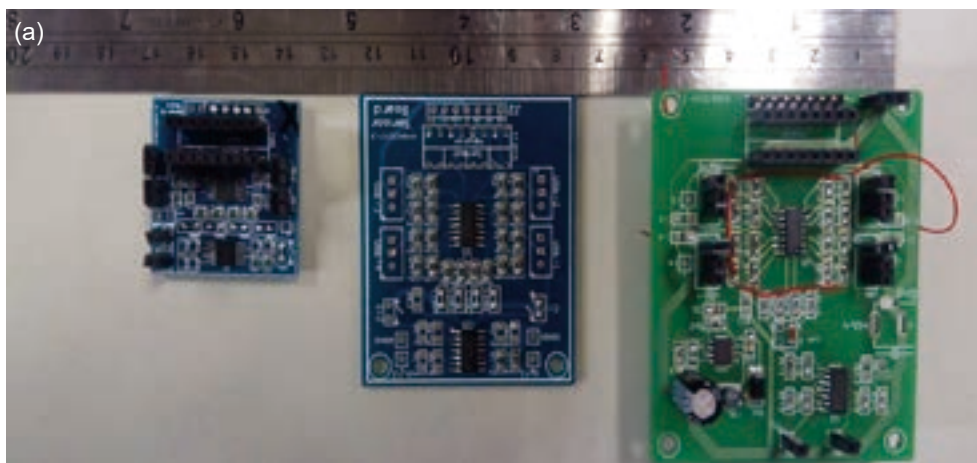
圖 4. 本團隊在半導體氣體感測晶片之製作。

### 2. 感測晶片電路設計

感測晶片電路設計是藉由台灣儀器科技研究中心 (Taiwan Instrument Research Institute, TIRI) 之模組化電路設計平台，設計四顆感測晶片陣列且經由加法器組合，提高輸出之解析度，如圖 5(a)–(b) 所示。首先將感測晶片以差動放大器之原理，配合可變電阻將每一顆差動輸出都匹配至 0 伏特。當感測器感測到目標氣體時，通常會造成阻值線性改變，導致差動放大器之輸出會依據斜率上升或下降，進而達到量測氣體濃度預估目標，再藉由後端設計成一組加法器，能夠將感測器阻值的變動量靈活地去搭配使用。後端的加法器應用除了能夠增加輸出外，也可以將感測器的靈敏度提高。圖 5(a) 為感測電路之從第一代的 6 × 6 cm<sup>2</sup> 修改至第三代的 3 × 3 cm<sup>2</sup>。除此之外，此感測晶片電路板再結合電源供應的設計，形成感測晶片電路模組，如圖 5(b) 所示。

### 3. NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片封裝

在氣體感測晶片封裝方面是採用本校 (國立高雄科技大學) 半導體封測類產線基地所設置的氣體感測晶片封裝技術，如圖 6(a) 所示。首先，氣體感測晶片使用 MEMS 半導體製程技術所研製且晶圓切割後，將可用良好之感測晶片作為優先選擇取出備用，封裝機台是採用 ASM AMICRA Nano 之機型進行封裝，原理是先進行晶片 (chip) 辨識，緊接著再辨認封裝盒後，再來進行固晶。首先使用點膠機將銀膠點在封裝盒預備 bonding 的位置上，再將 chip 使用真空 pick 並轉移至封裝盒上方，對準位置後再進行 bonding 的動作。做完封裝步驟後再將封裝盒放置在 hot plate 上，加熱到 150 °C，烘烤 1 小時將銀膠烤乾，最後再放入 wire bond 打線機，透過 PR 校準與程式設定完成最後的打線步驟，如圖 6(b) 所示。



(b) 晶片模組結合電路設計

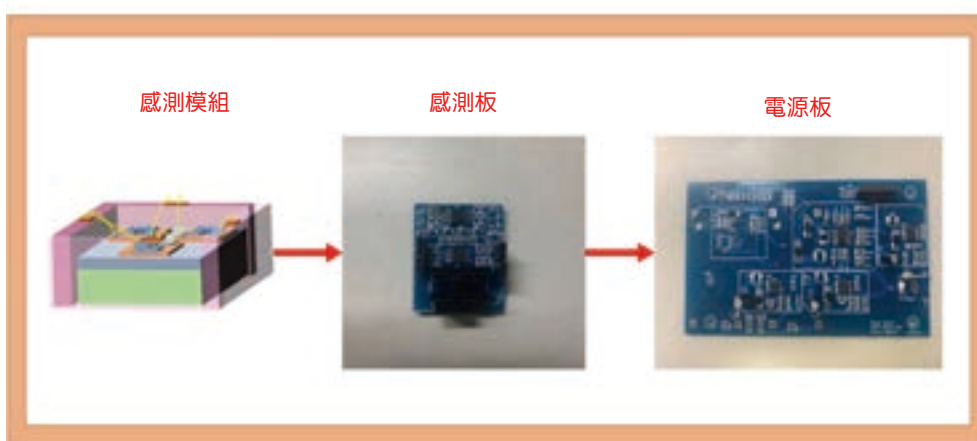


圖 5. (a) 感測器電路設計感測器電路設計。(b)、晶片模組結合電路設計。

## 五、NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片量測與場域實測

### 1. 低濃度 NO<sub>2</sub> 氣體量測

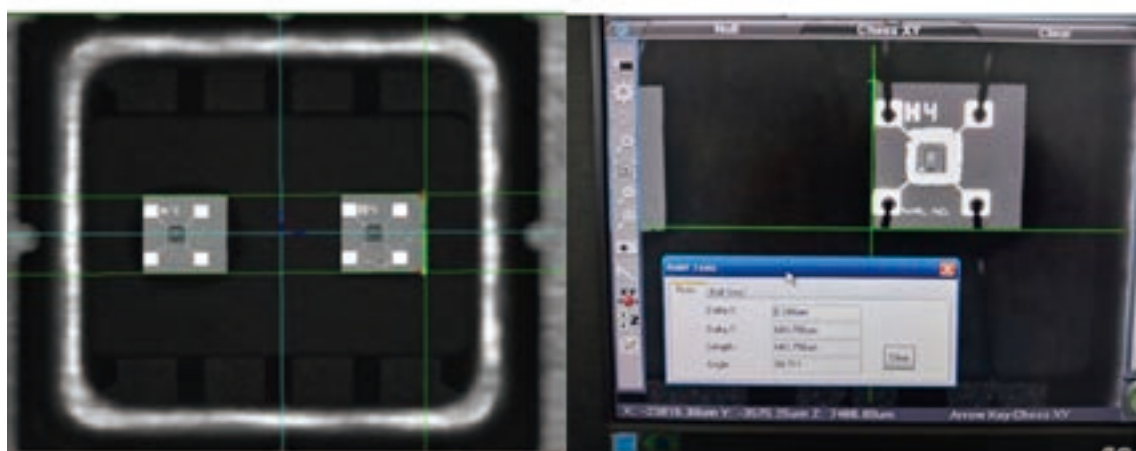
本團隊所製作之 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片為了達到高靈敏度，氣體感測晶片進行 NO<sub>2</sub> 氣體測試，如圖 7 量測結果所示，當量測腔體注入 10 ppb NO<sub>2</sub> 氣體時，感測晶片的電流是從約 8.77  $\mu$ A，經過約 70 秒後，下降至約 8.42  $\mu$ A 後 (換言之，電阻是增加)，呈現穩定狀態。在經過 100 秒後，本團隊進行選擇性測試，可以發現當腔體加入 100 ppb 之 SO<sub>2</sub> 氣體後，並無明顯增加。最後當腔體打開蓋子時，本團隊所製作之 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片具有良好的回覆。因此，歸納這些結果，本團隊所製作之 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片具高解析度、高選擇性極高靈敏度。

### 2. NO<sub>2</sub> 氣體感測模組場域實測

本團隊所開發出具有選擇性之開發高靈敏度 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片結合了台灣儀器科技研究中心的電路板模組後，更進一步與產業界合作，整合銘祥科技公司的感測器訊號系統及雲



(a)



(b)

圖 6. (a) 國立高雄科技大學半導體封測類產線基地。(b) 半導體氣體感測晶片封裝過程。

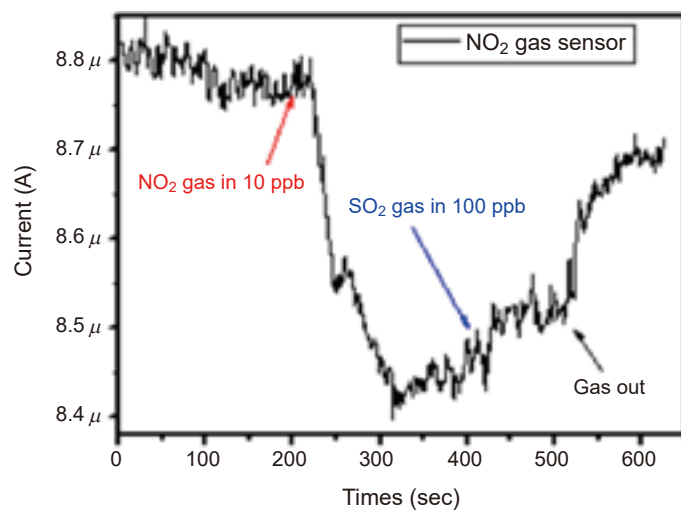


圖 7. NO<sub>2</sub> 氣體感測器選擇性測試。



圖 8. 台南測站布置。

端系統，達到物聯網感測模組化的多點布置。且已於 109 年 6 月 15 日進入台南市中山國中之台南測站與環保署標準儀器進行比對測試 (如圖 8)。經過多次的改進以半密氣室空氣盒子為主。

### 3. NO<sub>2</sub> 氣體感測模組與環保署台南測站比對

圖 9(a)–(d) 為高科大團隊所開發之 NO<sub>2</sub> 氣體感測模組在無任何外加環境因數及方程式下進行和台南測站進比對。從量測結果可以得知，經電路調整及感測器材料更換後，NO<sub>2</sub> 氣體感測感測器，在沒有任何變動之環境下連續性的比對一個月，以每周進行比對，分別為 (1) 在 3/15–3/21,  $R^2 = 0.40733$ 。(2) 3/22–3/28,  $R^2 = 0.44261$ 。(3) 3/29–4/05,  $R^2 = 0.40229$ ，本周天氣有劇烈改變。(4) 4/06–4/11,  $R^2 = 0.56934$ 。在一個月的追蹤下，所開發之感測器與環保署原生資料的比對都還有 0.4 以上，甚至接近 0.57。

## 六、結論

本團隊以台灣領先全球的半導體製程之 MEMS 整合技術將感測器微小化之晶片等級，於 6" 晶圓的 8 cm × 8cm 面積裡，切割成 1 萬顆以上的氣體感測晶片，每一顆晶片型氣體感測器的尺寸約為 0.65 mm × 0.65mm × 0.4mm。所製作之 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片，當量測腔體注入 10 ppb NO<sub>2</sub> 氣體時，感測晶片的電流是從約 8.77 uA，下降至約 8.42 uA，且當腔體加入 100 ppb 之 SO<sub>2</sub> 氣體後，並無明顯增加。因此，本團隊所製作之 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片具高解析度、高選擇性極高靈敏度。於戶外應用，與環保署比對結果發現， $R^2$  值大約 0.4–0.56 之間，這些值是還沒有加入任何演算法技術的，未來將進行溫溼度的補償及基準線的回歸。台灣雖然有很強的半導體製程技術，但在國際市售上並無發現應用在氣體感測晶片上。因此，希望藉由本團隊所開發之高解析度、高選擇性極高靈敏度之 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片，能帶給產業界一個起頭，希望在未來，於氣體感測器之領域，能有台灣品牌出現。

# NO<sub>2</sub> 晶片氣體感測器－場域實測

## NKUST-NO<sub>2</sub>-1

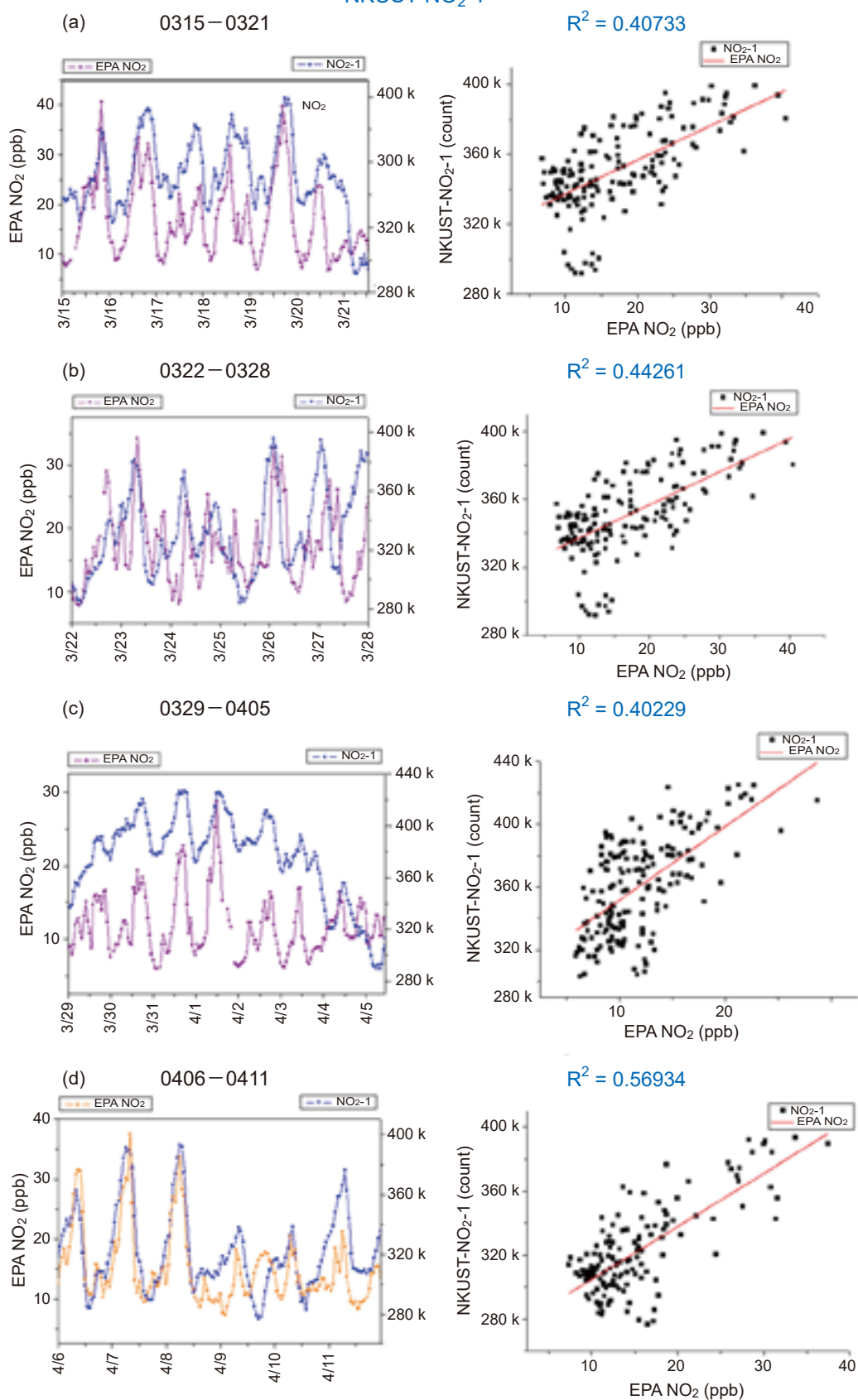


圖 9. (a)－(d) NO<sub>2</sub> 氣體感測模組和台南測站進行各星期比對結果。

## 誌謝

本研究特此致謝財團法人國家實驗研究院提供研究經費 (NARL-AQI-109-005)，及台灣儀器科技研究中心與台灣半導體研究中心提供技術平台與研究上之建議。

## 參考文獻

1. Please refer to the website:  
<https://airtw.epa.gov.tw/cht/Information/Standard/AirQualityIndicator.aspx> (中華民國行政院環保署空氣品質指標)
2. Please refer to the website:  
[https://www.tiri.narl.org.tw/Publication/InstTdy\\_Full/2223?PubId=2](https://www.tiri.narl.org.tw/Publication/InstTdy_Full/2223?PubId=2) (科儀新知第 218 期 智慧氣體感測專題半導體式晶片型氣體感測器研發 Development of Semiconductor Chip-Type Gas Sensor)
3. Please refer to the website:  
<https://tpcjournal.taipower.com.tw/article/1405> (台電月刊 642 期 淺談 PM<sub>2.5</sub>)
4. Please refer to the website:  
<https://www.epa.gov.tw/DisplayFile.aspx?FileID=6BB17C4B4AD72C76> (中華民國行政院環保署空氣品質監測報告 109年)
5. Please refer to the website:  
<https://www.alphasense.com/products/hydrogen-sulfide-safety/> (Alphasense 氣體感測公司之量測 H<sub>2</sub>S 產品說明)
6. Please refer to the website:  
<https://shop.cpu.com.tw/product/52720/info/> (觸媒燃燒式氣體感測器)
7. Please refer to the website:  
<http://m.dyecn.com/products/24475.html> (光學式氣體感測器)

## 作者簡介

薛丁仁先生為國立成功大學微電子所博士，現為國立高雄科技大學電子工程系教授。

Ting-Jen Hsueh received his Ph.D. in the Institute of Microelectronics from National Cheng Kung University. He is currently a Professor in the Department of Electrical Engineering at National Kaohsiung University of Science and Technology.

張宸銘先生現為國立高雄科技大學電子工程系碩士生。

Chen-Ming Chang is currently a M.S. student in the Department of Electrical Engineering at National Kaohsiung University of Science and Technology.

范書豪先生現為國立高雄科技大學電子工程系碩士生。

Shu-Hao Fan is currently a M.S. student in the Department of Electrical Engineering at National Kaohsiung University of Science and Technology.

# 具陣列結構之表面聲波氣體感測元件

## Surface Acoustic Wave Gas Sensing Device with Array Structure

柯雅馨、陳政翰、蕭育仁、吳信賢

Ya-Hsin Ke, Cheng-Han Chen, Yu-Jen Hsiao, Sean Wu

有鑑於對空氣的品質及人體健康，在氣體汙染方面的監測是非常重要的課題。而對於理想的氣體感測器需要符合以下要素：低成本、選擇比、微型化、低消耗功率、反應時間快速、良好再現性、高穩定性。在眾多感測器之中，表面聲波感測器元件由於靈敏度、高可靠度、體積輕巧以及價格低廉等優勢，搭配特定感測薄膜即可檢測不同氣體，因此成為本研究所選之感測器。該感測器使用半導體製程在壓電基板上製備指叉式金屬電極，並覆蓋感測薄膜。薄膜的質量隨著其材料選擇性地從空氣中吸附化學物質而增加，這會導致共振轉移到略低的頻率，從而獲得有關空氣中特定氣體種類的濃度變化。

In view of air quality and human health, monitoring of gas pollution is a very important topic. The ideal gas sensor needs to meet the following elements: low cost, selection ratio, miniaturization, low power consumption, fast response time, good reproducibility, and high stability. Among many sensors, the surface acoustic wave sensor element can detect different gases due to its advantages of sensitivity, high reliability, small size and low price. It can detect different gases when matched with a specific sensing film. The sensor uses a semiconductor manufacturing process to prepare interdigitated metal electrodes on a piezoelectric substrate and cover the sensing film. The mass of the film increases as its material selectively adsorbs chemicals from the air, which causes the resonance to shift to slightly lower frequencies and thus obtain changes in the concentration of specific gas species in the air.

### 一、前言

空氣汙染是目前全球皆非常關注的環保議題，美國健康效應研究所 (Health Effects Institute) 發布了《2019 全球空氣狀況》報告，指出於 2017 年時，全球來自室外及室內空氣汙染，導致人類平均期壽命縮短了20 個月之多，其危害已提升到與吸菸為同一等級。對於空氣汙染防制有句順口溜「唯有解讀，才能解毒」，日益惡化的空氣品質是無形的健康殺手之一，由於工業快速成長，在日常生活中化學物質充斥於環境中，關係到人體健康及人類生

死存亡。因此有害的化合物都必須仰賴敏銳可靠的感測裝置。目前各國政府紛紛制定相關的環境及工安法規，以限制各種毒性氣體及可燃性氣體的排放濃度標準及人員可暴露濃度。因此，氣體感測器就扮演著非常重要的角色<sup>(1)</sup>。實驗室中常以氣相層析－質譜儀 (GC-Mass) 作為檢驗器材，雖然擁有高靈敏度，但由於價格昂貴、體積龐大所以並不適用於工廠或生活環境中的即時監測。因此，具備微型化、成本低廉、再現性高、反應速率快的化學式氣體感測器成為近年來發展重點。微型氣體感測器 (gas sensor) 因具有體積小、質量輕及價格低廉等優點，並可應用於包括環境、化工、工業安全、農業、水質、軍事等許多領域之檢測，微型氣體感測器已被廣泛應用於醫療與居家生活中。微機電系統 (micro electro mechanical systems, MEMS) 感測器應用於可穿戴設備、物聯網等新領域，根據整合性與功率表現規劃相關產品線，分別為應用於感測器節點的高整合／高功率 MEMS 感測器，應用於穿戴式裝置的高整合／低功率型，搭載於物聯網標籤的單一元件／高功率型，以及智慧開關用單一元件／高功率型等。產品包括 MEMS，包括加速度計、陀螺儀、數字羅盤、慣性模組、壓力感測器、濕度感測器和麥克風、智慧感測器、Sensor Hub、溫度感測器和觸摸感測器等，意法半導體 (STMicroelectronics) 統計屬環境感測器中的揮發性或氣體偵測是近 2—3 年的發展主流<sup>(2)</sup>，如圖 1 所示。

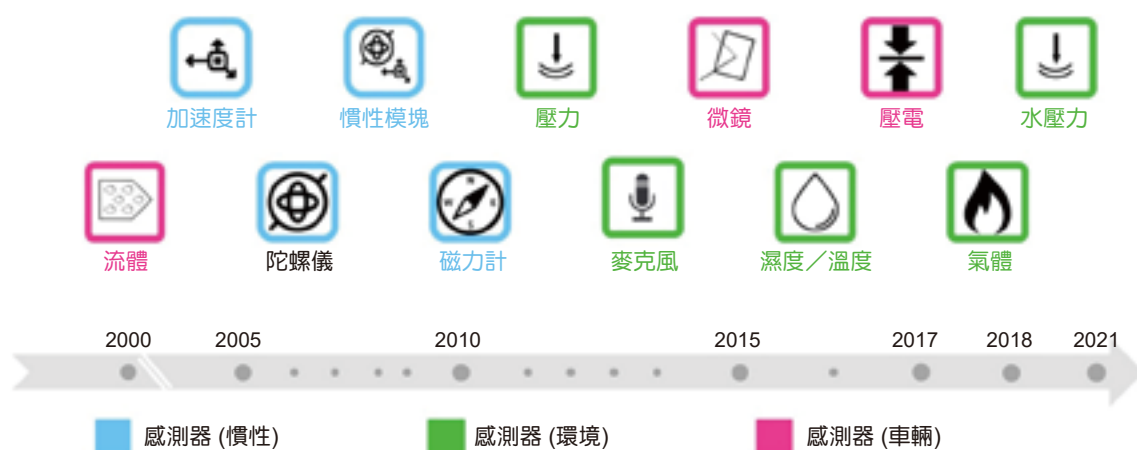


圖 1. 功能性 MEMS 感測器的應用領域。

壓電晶體化學感測器為一種對質量變化非常靈敏之化學感測器，可偵測環境 (空氣及液體) 中非常微量的質量變化及組成成分，可應用在環境污染、生化醫學、工業、食品、家居安全、化學分析及化學反應研究各方面，屬於質量感應式 (mass-sensitive) 化學感測器<sup>(3)</sup>。壓電晶體化學感測器具有小型化、高靈敏度及低成本的發展趨勢，其靈敏度除由化學感測膜之靈敏度決定外，提高壓電共振體的操作頻率也是提升其靈敏度的主要方式，以石英微天平 (quartz microbalance) 為例，若操作頻率在 5 MHz，其質量解析度 (mass resolution) 為 17.7 ng/cm<sup>2</sup>，若能提升至 GHz 範圍其質量解析度更可降至 1 pg/cm<sup>2</sup>。目前國內外研究氣體感測器主要發展 MEMS 為基礎的感測晶片，具有快速反應、高靈敏度與低耗能和批量生產的優點，依據未來結合物聯網和穿戴式電子技術，發展微型壓電晶體感測乃應運而生。我國行政院亦將化學感測器和其他感測器列入為我國八大重點發展科技之一，基於石英、鋁酸鋰、鈮酸鋰 ZnO、AlN、PZT 都被認為是未來壓電元件的聲波技術材料如表 1 所示<sup>(4)</sup>。

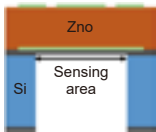
表 1. 各式壓電材料之比較。

| 材料                               | 石英                  | 鉬酸鋰       | 鋁酸鋰       | 氧化鋅            | 鋇鈦酸鉛           | 氮化鋁             |
|----------------------------------|---------------------|-----------|-----------|----------------|----------------|-----------------|
| 密度<br>( $10^3 \text{ kg/m}^3$ )  | 2.65                | 7.45      | 4.64      | 5.61–5.72      | 7.57           | 3.25–3.3        |
| 模量 (GPa)                         | 71.7                | 205       | 130–170   | 110–140        | 61             | 300–350         |
| 蒲松比                              | 0.17–0.2            | 0.17–0.2  | 0.24–0.28 | 0.36           | 0.27–0.3       | 0.22–0.29       |
| 折射率                              | 1.46                | 2.18      | 2.29      | 1.9–2.0        | 2.40           | 1.96            |
| 壓電系數                             | 2.3                 | 12        | 12        | 12             | 117            | 4.5, 6.4        |
| 有效耦合係數<br>$k^2$ (%)              | 0.1–0.2             | 5–6.6     | 5–11.3    | 1.5–1.7        | 20–35          | 3.1–8           |
| 縱向 (橫向) 的<br>聲波速 (m/s)           | 5000–5960<br>(3159) | 4160–4220 | 3680–3980 | 6336<br>(2720) | 4500<br>(3900) | 10150–<br>11050 |
| 介電常數                             | 4.3                 | 54 (43)   | 85 (29)   | 8.66           | 380            | 8.5–10          |
| 低頻率溫度係數<br>(ppm/°C)              | 0                   | –30       | 75        | –40––60        |                | –19––25         |
| 熱膨脹係數<br>(CTE $\times 10^{-6}$ ) | 1.5                 | –16.5     | 15        | 4–6.5          | 1.75–2         | 5.2             |

## 1. 壓電聲波元件

表面聲波為一種沿彈性晶體表面傳播，其振幅隨深入表面深度指數衰減的彈性波。在 1885 年由國物理學家 Lord Rayleigh 於研究中所發現。於其發表的文章中<sup>(5)</sup> 指出，在固體的波動裡除了縱波與剪波之外，彈性晶體的表面上尚存在一種形式的波動，稱為表面聲波。並以波動數學理論證明其現象，故此表面聲波亦稱為 Rayleigh wave。聲波模式主要分成兩大類，一種是體聲波 (bulk acoustic wave, BAW)，另一種則是表面聲波 (surface acoustic wave, SAW) 其中體聲波又分成石英晶體微天秤 (quartz crystal microbalance, QCM)、薄膜體聲波諧振器 (film bulk acoustic resonator, FBAR)、微懸臂樑 (cantilevers) 等種類。表面聲波又分成水平聲波 (shear horizontal surface acoustic wave, SH-SAW)、雷里波 (Rayleigh SAW, R-SAW)……等種類。本文章所使用之聲波方法為表面聲波，列出表 2 與本文章有關之聲波種類並互相比較，表面聲波不僅擁有加工容易、低成本、低功耗、高靈敏度、能在液體環境中操作、材料、電路進行整合……等優點，但也擁有在液體環境下波頻率衰退訊號較大、訊號控制與量測困難、取決於晶體取向、過程中會有能量損失等缺點。這些感測器在適當選擇感測層，壓電基板和指叉式感測器時提供出色的選擇性、快速響應、可逆性、線性度和穩定性，以及穩定性的換能器<sup>(6)</sup>。由於波與表層或附近環境之間的相互作用，所有類型的表面聲波感測器都依賴於表面聲波傳播特性的變化<sup>(7)</sup>。這些波具有倍數波長的穿透深度，因此大部分能量密度被限制在基板表面區域。這使得波浪移動造成的兩端波速變化，對表面上或表面附近的任何物理或化學變化高度敏感。此外，表面聲波元件的工作頻率可以設置在很寬的範圍內 (MHz–GHz)，這有助於調整靈敏度，並為在無線模式下操作這些設備提供了可能性。對於化學或生物感測應用，表面聲波元件塗有一層合適的材料，例如聚合物、金屬和金屬氧化物<sup>(8)</sup>。暴露於外來分子後，該層的質量、機械或電特性的任何變化都會擾亂表面波，從而使元件能夠當作感測器使用<sup>(9)</sup>。預料這些感測器將滿足在各行業，空氣污染和解決燃燒，以及用於檢測和監測各種無機氣體、揮發性有機化學品 (volatile organic compounds, VOCs) 和軍事化學戰劑 (chemical warfare agents, CWAs) 等的其他項目。

表 2. 各式聲波元件種類比較圖。

|                       | 結構                                                                                | 尺寸 | 功率 | 穩定度        | 敏感度       |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|----|------------|-----------|
| 薄膜聲波諧震器<br>(FBAR)     |  | ✓  | ✓  | ✓          | ✓         |
| 微懸臂<br>(u-Cantilever) |  | ✓  | ✓  | ×          | ✓         |
| 石英晶體微天秤<br>(QCM)      |  | ×  | ✓  | ×          | ✓         |
| 表面聲波元件<br>(SAW)       |  | ✓  | ✓  | ✓<br>(低成本) | ✓<br>(極佳) |

## 二、氣體感測吸附與工作原理

奈米材料的「吸附」是指某種氣體、液體或溶解固體的原子、離子、分子附著於某表面上。其原理是物質表面能量的結果，而這一過程使得表面上產生由吸附物構成的膜。吸附與吸收不同，吸收同時作用於表面和內部，而吸附僅限於固體表面。吸附屬於一種傳質過程，物質內部的分子和周圍分子有互相吸引的引力，但物質表面的分子，其中相對物質外部的作用力沒有充分發揮，所以液體或固體物質的表面可以吸附其他的液體或氣體，尤其是表面面積很大的情況下，這種吸附力能產生很大的作用<sup>(10)</sup>。

吸附主要分為物理吸附 (physisorption) 與化學吸附 (chemisorptions)。物理吸附是一種可逆 (reversible) 的過程，其包括了吸附與相反的脫附 (desorption) 行為，其原理是被吸附物間以微弱的作用力，而聚集在吸附物表面的過程，如氮氣吸附於活性碳上。氣體吸附比表面積測定：實際測定出氣體分子在樣品表面平衡飽和吸附量 ( $V$ )，通過不同理論模型計算出單層飽和吸附量 ( $V_m$ )，進而得出分子個數，採用表面密排六方模型計算出氮氣分子等效最大橫截面積 ( $A_m$ )，即可求出被測樣品的比表面積。

計算公式如下：

$$S_g = \frac{V_m \cdot N \cdot A_m}{22,400 \cdot W} \times 10^{-18} \quad (1)$$

$S_g$ ：被測樣品比表面積 ( $m^2/g$ )

$N$ ：阿佛加德羅常數 ( $6.02 \times 10^{23}$ )

$V_m$ ：標準狀態下氮氣分子單層飽和吸附量 (ml)

$W$ ：被測樣品質量 (g)

$A_m$ ：分子等效最大橫截面積 (密排六方理論值  $A_m = 0.162 \text{ nm}^2$ )

當薄膜因凡德瓦爾力吸附造成重量變化導致表面聲波傳遞速度改變，藉此觀察後端頻率變化量判定吸附氣體種類與濃度，表面聲波元件材料的吸附機制示意，如圖 2 所示。

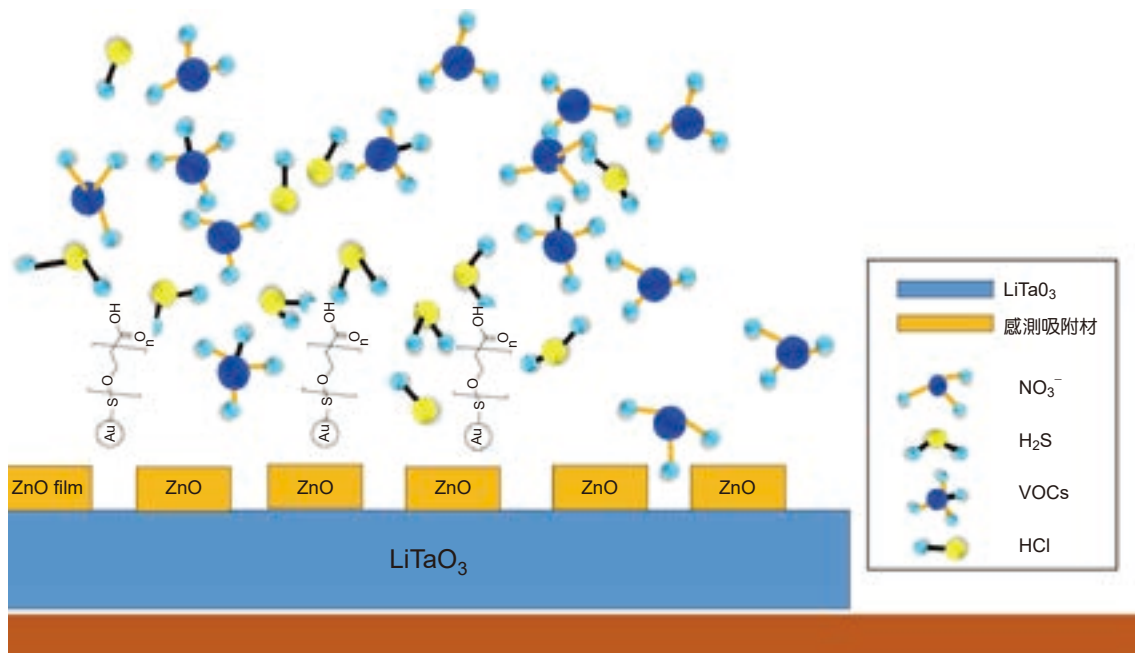


圖 2. 表面聲波元件的氣體吸附機制。

## 1. 質量負載效應 (SAW Mass Loading)

本研究的表面聲波感測器，其主要的感測原理就是質量負載效應 (mass loading)。在表面聲波感測器中，需在壓電晶體上製作一層化學感測薄膜，以吸附微量的感測氣體分子。質量負載效應就是化學感測薄膜於表面質量變化時，基板的相位速度與衰減量產生某程度的漂移量，最後藉由偵測頻率的漂移訊號，達到氣體偵測的目的。從波的能量密度 (wave energy density) 與功率消耗 (power dissipation)，我們可以瞭解波速度之改變與衰減量的大小。當聲波通過一單位體積之立方體，其計算公式如下列式子：

$$\tau = \frac{1}{v} \quad (2)$$

$$U = P\tau = \frac{P}{v} \quad (3)$$

$U$ ：能量密度     $P$ ：功率密度     $v$ ：聲波速度     $\tau$ ：傳輸時間

因此  $P = Uv$ ，。而當聲波於無損失介質中傳遞時，功率  $P$  則為一常數。因此對上列式子微分可得到：

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{\Delta U}{U_0} \quad (4)$$

由上列式子可知當表面聲波的傳遞受外界影響，波速減少量會與能量密度之增加量相等。

## 2. 不同電極及電極厚度形狀對表面聲波元件之影響

在表面聲波元件製程中，指叉換能器是由沉積金屬薄膜所構成的。這些構成指叉換能器圖形及提供電訊號接觸的金屬薄膜，為影響元件特性的重大因素，其中又以 (1) 材料的選擇：為了避免過度抑制表面聲波，所以必須選擇低密度的金屬。(2) 厚度的考量：為了提供良好的電訊號接觸及低電阻，所以金屬厚度一定要在適當範圍內。另外，指叉電極的反射亦是影響元件特性的因素，金屬厚度比  $h/\lambda$  是一項很重要的設計參數。當  $h/\lambda \ll 1\%$  時，此效應在金屬電極之指叉換能器的頻率響應通常被忽略，典型的代表是，當操作頻率在 100 MHz 下。但在 GHz 的頻率，金屬厚度比對濾波器之頻率響應會有顯著的影響，特別是在現行 1.8–1.9 GHz 的無線通信與個人通訊系統上。高金屬厚度比對指叉換能器的頻率響應特性，會有兩方面的影響。首先，在指叉換能器下的平均表面聲波波速，會比無金屬下還要低，而且將會導致中心頻率的降低。此外，從指叉換能器或指叉之間反射的聲波，將會引起輻射導納的改變。為了說明其效應，把指叉換能器之輻射  $G_a(f)$  三種不同的模型，外加在指叉換能器之頻率響應來描述。分別有  $G_{am}(f)$  和  $G_{anf}(f)$ ，其中，

- (a)  $G_a(f)$  是在無任何阻抗或速度干擾，且表面聲波波速為無金屬速度  $V_0$  下的輻射導納。
- (b)  $G_{am}(f)$  和在金屬與非金屬的指叉換能器之平均表面聲波波速  $V_a$  有關，但忽略指叉間的反射。此處的頻率響應，很像是頻率向下飄移的  $G_a(f)$ 。
- (c)  $G_{anf}(f)$  包含了平均速度飄移和指叉間反射的效應，而導致非對稱頻率響應的輻射導納。
- (d) 除此之外，還要考慮金屬的質量負載與金屬加於壓電基板之擾動等因素，此因素會使得表面波波速在金屬下方會比自由表面的波速來得慢，金屬電極下表面聲波波速的偏移量可以表示為：

$$\frac{dv}{v} = \frac{dv}{v} \Big|_p + \frac{dv}{v} \Big|_m + \frac{dv}{v} \Big|_s \quad (5)$$

其中  $\frac{dv}{v} \Big|_m$  項為金屬質量負載的影響，與金屬之厚度有關； $\frac{dv}{v} \Big|_p$  為金屬短路 (shorting) 造成之影響，與壓電基板之機電耦合係數 ( $K^2$ ) 值有關； $\frac{dv}{v} \Big|_s$  為金屬質量負載造成波傳表面剛性 (stiffness) 係數變化之影響，與壓電基板材料及金屬之厚度有關。下式可進一步表示為金屬厚度與波長比的函數：

$$\left[ \frac{dv}{v} \right] = \left[ \frac{dv}{v} \right]_p + \left[ \frac{dv}{v} \right]_m \cdot \left( \frac{h}{\lambda_0} \right) + \left[ \frac{dv}{v} \right]_s \cdot \left( \frac{h}{\lambda_0} \right)^2 \quad (6)$$

定義自耦合係數  $k_{11}$  (self-coupling coefficient)， $k_{11}$  可表為：

$$k_{11} = k_0 \left[ \frac{dv}{v} \right] = |k_{11p} + k_{11m} + k_{11s}| \quad (7)$$

其中  $k_0$  為中心頻率之波數 (wave number)，又因為  $k_{11}$  為聲波波速變化量之函數，故  $k_{11}$  又稱速度偏移係數 (velocity-shift coefficient)。

### 三、表面聲波元件的設計

表面聲波設計理論如圖 3 所示，產生表面聲波最簡單的方式，就是利用指叉換能器 (interdigital transducer, IDT) 來直接激發表面聲波，指叉換能器分為兩個部份：輸入及輸出，鋁電極是一層厚度約 200 nm 至 350 nm 的鋁薄膜，經過光蝕刻 (photolithography) 技術成型在壓電單晶材料之基板表面。當一個訊號電壓外加到輸入換能器的正負電極上時，在每對指叉 (finger) 之間就會建立電場，壓電基板表面受到電場的作用，便產生同步耦合之上下振動，而激發出表面聲波。吸附與吸收不同，吸收同時作用於表面和內部，而吸附僅限於固體表面。吸附屬於一種傳質過程，物質內部的分子和周圍分子有互相吸引的引力，但物質表面的分子，其中相對物質外部的作用力沒有充分發揮，所以液體或固體物質的表面可以吸附其他的液體或氣體，尤其是表面面積很大的情況下，這種吸附力能產生很大的作用。為了吸附待測氣體中的特定氣體分子，在表面聲波感測器中，需在表面成長一層化學薄膜，而其需具有無壓電性、無導電性、等向性的特性。當高分子薄膜吸附氣體分子後，會造成頻率改變稱為頻率飄移效應 (frequency shift)，其特性公式為下：

$$\Delta f = (k_1 + k_2)f_0^2hp - k_2f_0^2h\left[\frac{4u}{v_0^2}\left(\frac{\lambda + u}{\lambda + 2u}\right)\right] \quad (8)$$

$\Delta f$ ：表面聲波振盪頻率改變量       $k_1$  與  $k_2$ ：為壓電介質之物質常數  
 $f_0$ ：原始表面聲波振盪頻率       $h$ ：高分子薄膜厚度  
 $\rho$ ：高分子薄膜密度       $u$ ：高分子薄膜之剪力模數  
 $\lambda$ ：Lame 常數       $v_0$ ：壓電材料之波速

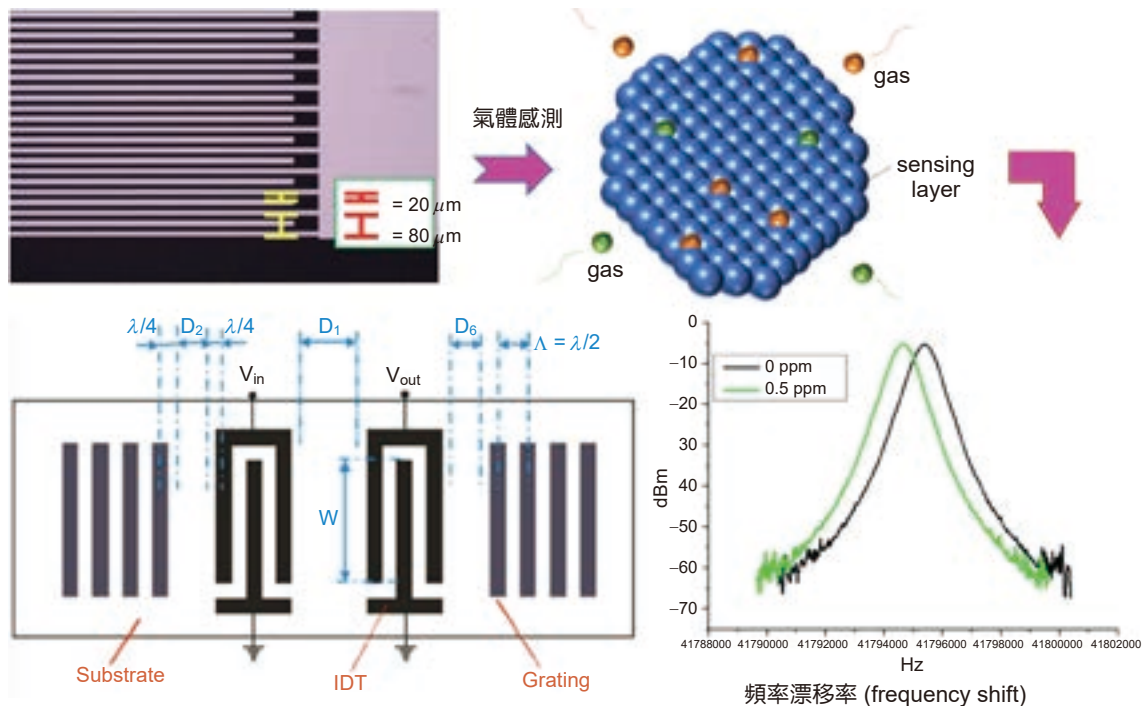


圖 3. 表面聲波頻率飄移設計理論。

在聲波元件相關文獻中，Wen 等<sup>(11)</sup> 製造了一種帶有  $\text{WO}_3$  塗層的雙軌 表面聲波感測器，該感測器對小濃度的  $\text{NO}_2$  氣體表現出良好的響應特性。他們能夠以良好的重現性和穩定性檢測低至 0.5 ppm 的  $\text{NO}_2$  氣體。他們聲稱這種配置可以消除外部擾動與抑制體波傳輸，從而改善感測器響應。然而為了有效地用作化學感測器，需要盡量減少設備對幾個參數的交叉干擾，包括溫度、應變、不需要的化學物質和濕度，因此設計的雙軌表面聲波元件並量測頻譜特性。本實驗室設計採用圖 4(a) 表面聲波氣體感測元件示意圖，實際表面聲波製作圖與表面聲波元件的響應頻譜量測，如圖 4(b)–(c) 所示。

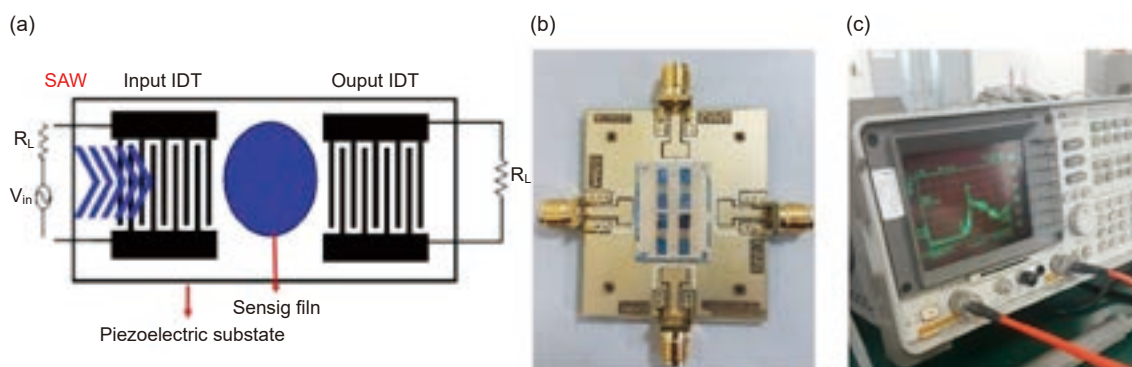


圖 4. (a) SAW 氣體感測元件示意圖和 (b) 實際 SAW 製作圖與 (c) SAW 元件的響應頻譜。

Tang 等人<sup>(12)</sup> 採用表面聲波陣列製作氣體感測器，具有體積小、成本低、靈敏度高、響應速度快等優點。非連續工作振盪器透過多通道混合技術作為開關元件進行控制。感測器的薄膜像智能皮膚一樣工作，負責從分子與薄膜之間的相互作用產生化學信號。在 E-Nose 系統中，感測器陣列形成用於識別氣體的模式。研究中感測器陣列由四個表面聲波感測器設備組成，如圖 5(a) 所示。在研究中實現了一個混合信號接合晶片，包括混頻器、低通濾波器和比較器。模擬級的功能是將來自感測器的信號調製、濾波和轉換為方波。讀出感測器信號 (頻率變化)，從參考感測器  $f_{ref}$  的頻率中減去感測器實驗片的頻率。與  $f_{ref}$  相比，這導致頻率變化  $f_{ref} - f_{in}$  減小，陣列式感測架構示意之氣體辨識概念氣體薄膜吸附各種氣體雷達示意圖，如圖 5(b) 所示。

## 四、表面聲波元件的製作與量測結果

### 1. SAW 製作流程

先將基板清洗，基板表層濺鍍一層金屬鋁 (200 nm)，旋轉塗佈 HMDS、光阻 (AZ1500) (2  $\mu\text{m}$ )，曝光顯影後，浸泡鋁蝕刻液並浸泡丙酮去除光阻；其中本實驗將用到破片光阻旋轉塗佈機 (spin coater)，放置於黃光區內，主要應用於光阻旋塗。並使用加熱平台 (hot plate)，塗佈光阻後進行軟烤及曝光後硬烤；光罩對準曝光系統 (mask aligner) 一樣位於黃光區內，主要應用於圖案化製程，將設計好的圖案從光罩上轉印至晶圓表面上的光阻，來定義出擴散區域或蝕刻區域；金屬濺鍍系統 (sputter) 在高真空環境中，施加直流電壓產生電漿，電漿中的正離子被陰極板的負電壓吸引加速，具有高能量後，轟擊陰極靶材表面，將離子動量轉移給靶材原子，靶材原子獲得動量後逸出靶材表面，附著於基板上；光阻去除及濕蝕刻化學槽 (PR strip & wet etching chemical hood) 應用於 Al 指叉式電極濕式蝕刻。可排放不含金屬之

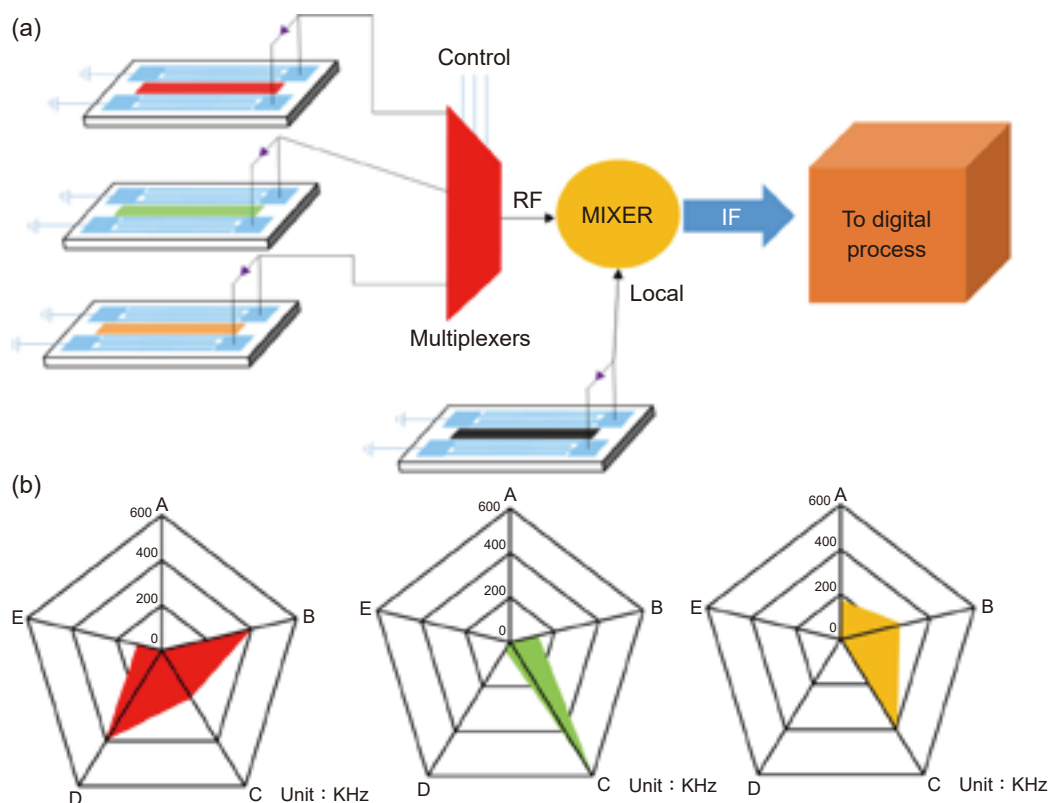


圖 5. 陣列式感測架構示意圖 (a) 表面聲波陣列製作氣體感測器之設計 (b) 氣體薄膜吸附各種氣體雷達示意圖。

廢酸鹼溶液 (Al 除外)；多源濺鍍系統 (RF sputter) 應用於氧化物薄膜製作，有兩種不同濺鍍源，分別為射頻磁控濺鍍與高功率脈衝磁控濺鍍。射頻源所使用之靶材為氧化物靶，有氧化鋅 (ZnO)、二氧化鈦 ( $\text{TiO}_2$ )、氧化銅 (CuO) 等；高功率脈衝磁控濺鍍源所使用之靶材為金屬靶，如鋅靶等，通氧形成氧化物於欲鍍物上；反應式離子蝕刻系統 (reactive ion etching) 應用氧電漿來去除壓電陶瓷基板上的微顆粒。反應式離子蝕刻系統使用氣態化學蝕刻劑與材料產生反應來蝕刻材料並形成可以從基板上移除的揮發性副產品，電漿產生促進化學反應的自由基，自由基能顯著增加化學反應的速率並加強化學蝕刻，圖 6 為陣列結構製程流程圖。

濺鍍製程中兩種鍍膜技術製備之氧化鋅薄膜 XRD 圖譜中圖 7(a)，根據 X 射線衍射圖可以發現，兩種鍍膜技術製備之氧化鋅薄膜皆由 C 軸 (002) 取向優先生長。另外由於 HiPIMS 技術可以提升濺射之顆粒的表面遷移率增加，因此具有最小表面能的緊密堆積的 (002) 平面增大，(103) 峰因為被吸收而降低，並且通過提高顆粒之間的粘附力來提高優選取向度。圖 7(b) 中原子力顯微鏡掃描 (atomic force microscope, AFM) 之薄膜表面粗糙度，可以明顯地觀察到 HiPIMS 製備之氧化鋅薄膜表面粗糙度遠大於 RF 製備之氧化鋅薄膜，HiPIMS 之氧化鋅薄膜平均粗糙度 (Ra) 大約 11.6 nm，其量測結果與 SEM 表面形貌中觀察到的結果符合。圖 7(c) 分別為高功率脈衝磁控射頻濺鍍中室溫下與基板加熱至 200 °C 下之氧化鋅薄膜表面形貌，從兩組 SEM 圖中亦可發現跟射頻濺鍍製作之氧化鋅薄膜有相同的現象產生，基板加熱至 200 °C 下製作之氧化鋅薄膜的晶粒大小亦明顯較小於室溫下製作之氧化鋅薄膜。圖 7(d) 為射頻濺鍍技術與高功率脈衝磁控濺鍍技術製作之氧化鋅薄膜的表面 EDS 分析。

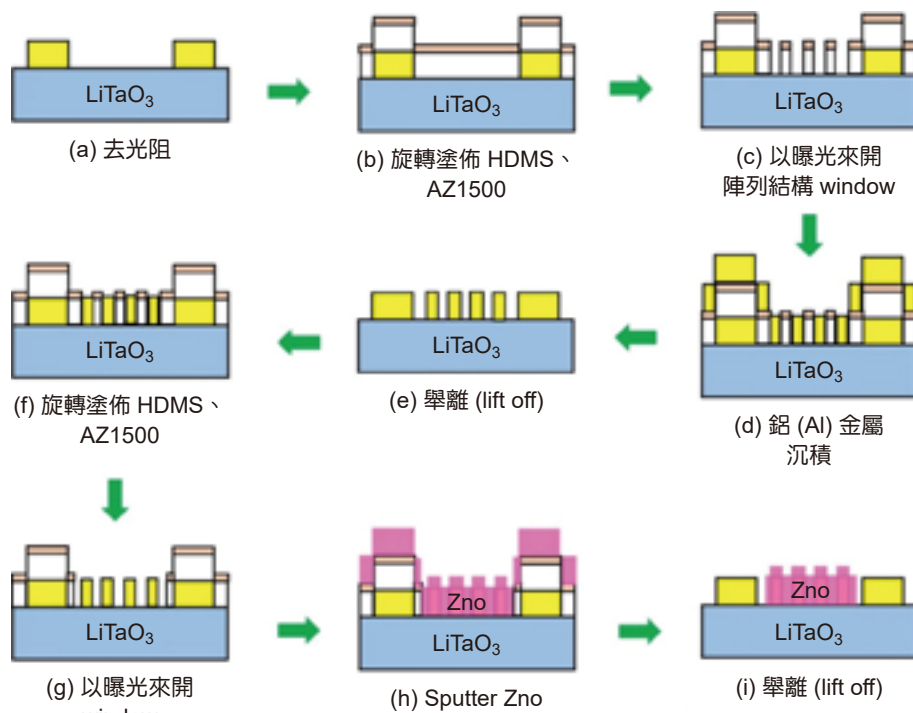


圖 6. 陣列結構製程流程圖。

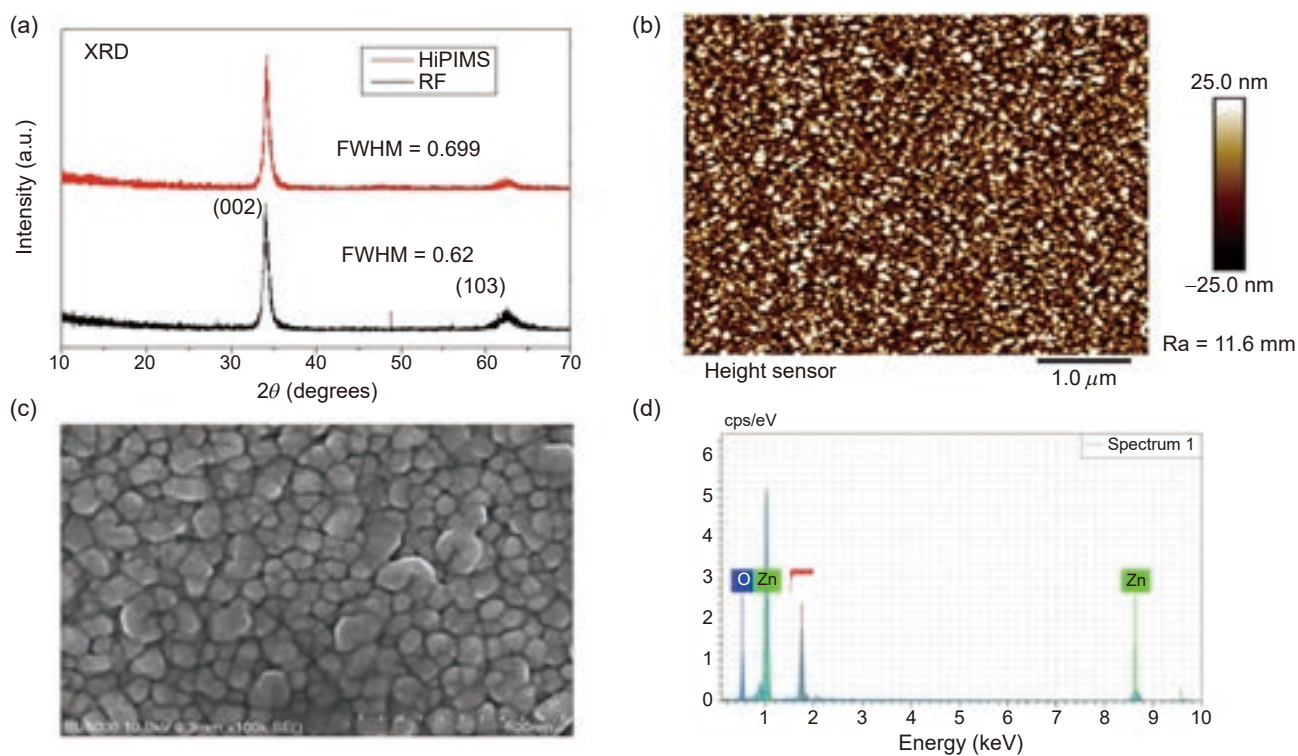


圖 7. (a) 氧化鋅薄膜 XRD 圖譜 (b) 原子力顯微鏡 (c) HiPIMS 製備之不同倍率氧化鋅薄膜表面形貌 (d) 基板加熱 200 °C 下氧化鋅薄膜之表面 EDS 分析。

## 2. 量測結果

指叉狀電極金屬本身之重量會降低表面聲波的波傳速度，進而導致所設計之中心頻率產生偏移。為了降低其影響，通常會選擇密度小、低電阻之鋁作為指叉狀電極材料。指叉電極結構周圍的電場分佈可以通過理論分析以及數值模擬計算得到，計算結果表明指叉電極感測器的電場強度與電極厚度成近似反比關係，電極越厚，電場強度越小。在表面聲波感測器中，感測薄膜的大小，代表了其吸附氣體時的感測面積，然而感測面積越大電極距離也越遠，製作出來的表面聲波元件的體積也越大。因此，本研究設計之表面聲波感測器在不改變感測薄膜長寬的狀況下，於感測薄膜上製作出微米陣列結構，希望可以增加感測薄膜之面積，以提升氣體感測效果。

本實驗中，設計了兩種不同樣貌的陣列結構，並將其兩種不同鍍膜技術下，檢測其氣體響應及靈敏度。如圖 8(a) 所示，在高功率脈衝磁控濺鍍製備之氧化鋅薄膜與同心圓柱陣列結構的表面聲波感測器之感測效果最好。因此，通過優化指叉電極感測器的相關結構參數可以提高生物化學感測器的性能，當應用於不同的傳感檢測領域時，可能需要使用不同結構參數的指叉電極結構，如圖 8(b)。綜合所顯示的飄移量來判斷，表面聲波感測器在感測薄膜表面多了微米陣列結構後，氣體感測效果有不錯的提升，其中同心圓柱因為較圓柱多了中空部分的感測面積，因此同心圓柱微米陣列結構之氧化鋅薄膜感測效果最好。HiPIMS 之 ZnO 薄膜於不同陣列結構中對硫化氫響應，圖 8(c) 實驗結果得知氣體感測靈敏值，同心圓柱微米陣列 > 圓柱微米陣列 > 無結構。

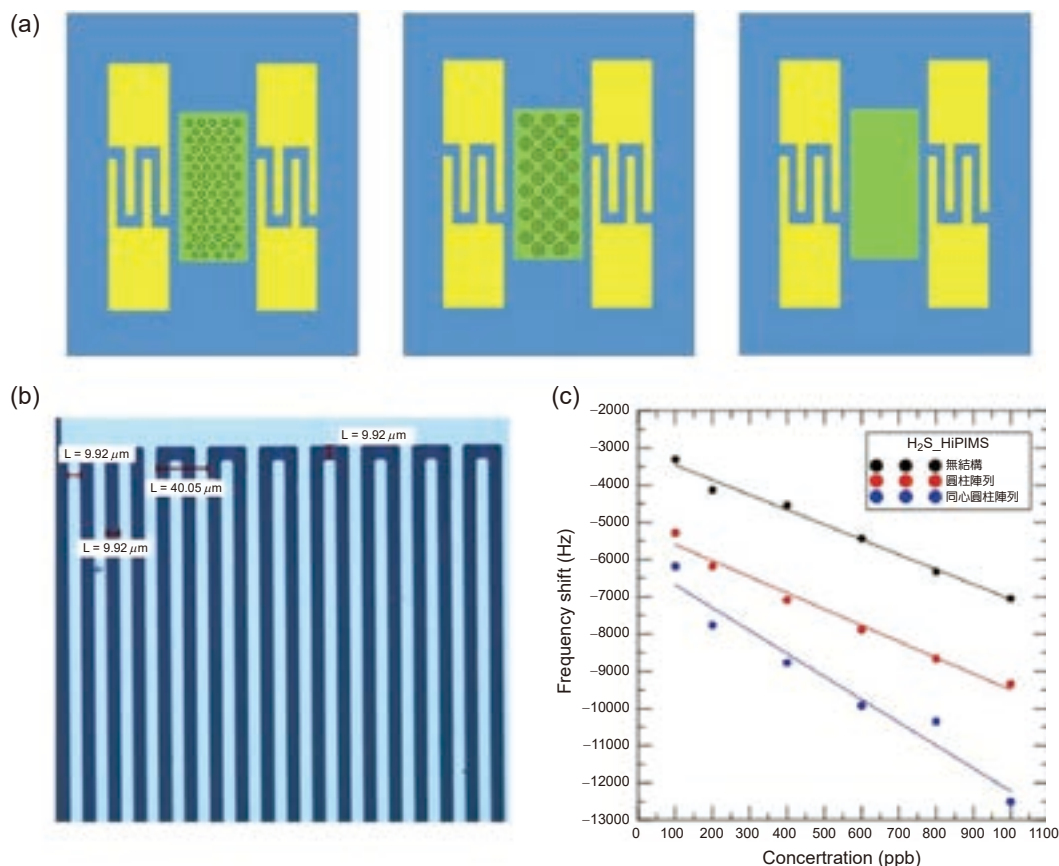


圖 8. (a) 陣列結構示意圖 (b) 設計之指叉狀電極氣體感測器 (c) 針對硫化氫特性量測結果。

微米陣列結構氧化鋅薄膜對氣體感測之結果如圖 9(a)–(b)，此研究設計了圓柱及同心圓柱兩種不同型貌之微米陣列結構，感測薄膜表面積之大小會影響薄膜吸附的氣體量，由實驗結果得知具同心圓柱微米陣列結構於射頻濺鍍及高功率脈衝磁控濺鍍下製備之氧化鋅薄膜，皆比具圓柱微米陣列結構之氧化鋅薄膜有較高的頻率飄移產生，頻率飄移增加了 1 千多 Hz。本實驗主要探討的是，利用表面聲波感測器，針對五種不同類型的非目標性氣體，包括氨 ( $\text{NH}_3$ )、二氧化氮 ( $\text{NO}_2$ )、二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )、一氧化碳 ( $\text{CO}$ ) 和甲烷 ( $\text{CH}_4$ )，各以 1 ppm 的氣體濃度進行測試，並以此來驗證表面聲波氧化鋅薄膜感測器的選擇性。

在氣體感測器中，感測器的靈敏度和選擇性可以說是研究之重點。研究之表面聲波感測器在  $\text{NO}_2$  氣體中的頻率變化量最小，在 30 分鐘內，注入 1 ppm 的  $\text{H}_2$  其頻率變化量最高只有 170 Hz，而其他的氣體  $\text{NH}_3$ 、 $\text{SO}_2$ 、甲烷和  $\text{CO}$  在感測時，雖然其頻率在量測時的變化略有增加，但與感測  $\text{H}_2\text{S}$  時的變化量相比，表面聲波感測器的頻率變化量相差可達 10 倍之多。因此，由圖 9(C) 可以看出表面聲波感測器雖然在非目標氣體中仍然有吸附反應發生，但與目標氣體  $\text{H}_2\text{S}$  相比較為微弱，這顯示本研究之表面聲波感測器對硫化氫有良好的選擇性。本節中所討論的回復曲線，主要代表的是表面聲波氣體感測器的反應時間 (response time) 與回復時間 (recovery time)。表面聲波感測器的中央覆有一層氧化物感測薄膜，感測器便是利用此薄膜與待測氣體之間的物理性吸附作用，來達成感測氣體。吸附作用與脫附作用的轉換，便稱為回復性。當我們提高所注入的氣體濃度時，會增加氧化物薄膜所吸附的氣體量，而吸附的過程時間也會隨著增加。於脫附的過程中，也會隨著氣體濃度增加而導致薄膜脫附氣體的時間增加。表面聲波感測器的反應時間與回復時間與所量測的待測氣體濃度有直接關係。吸附氣體的濃度越高，感測器的反應時間與回復時間也會隨之增加。當反應容器中通入 100 ppb 的硫化氫氣體後，頻率高點之下降速度較為快速，而感測器的吸附作用則隨著反應時間漸緩，而這頻率變化的趨勢，則反應在圖 9(d) 的第一個下降波段中。第二個下降波段為打入 200 ppb 的硫化氫，增加高分子薄膜所吸附的氣體量，其反應時間與回復時間都顯著的增加，這說明了隨著氣體濃度的增加，表面聲波感測器在一定時間所能吸附的氣體分子也會跟著增加。

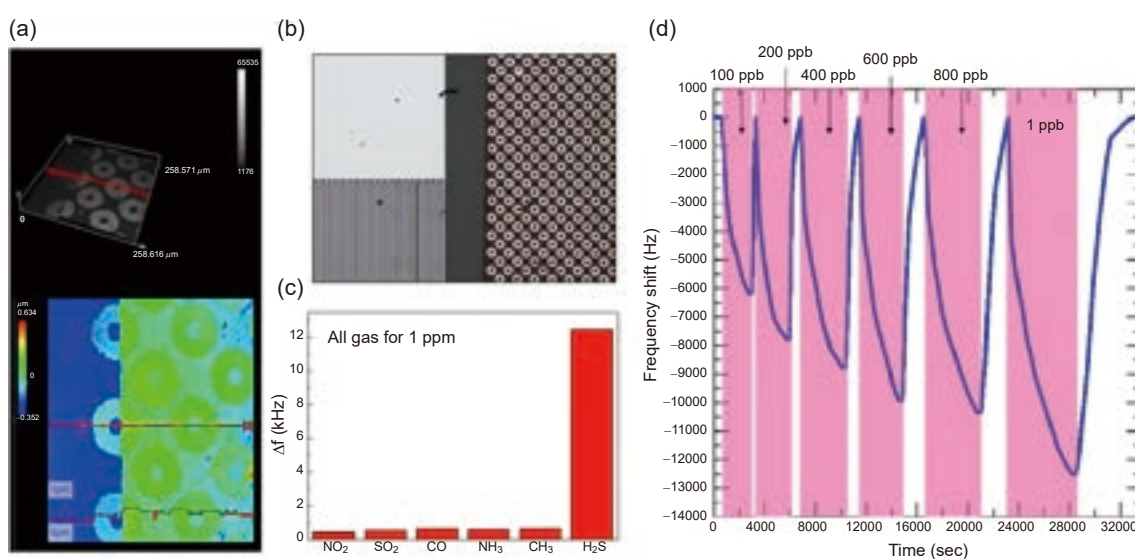


圖 9. (a) 具微米陣列結構之氧化鋅薄膜 (b) 微米結構陣列設計圖 (c) 表面聲波感測器針對不同氣體感測之影響 (d) 表面聲波感測器之回復曲線。

## 五、結論

本研究所開發具微米陣列結構之壓電表面聲波氣體感測器，其核心基礎為表面聲波原理；以奈米吸附原理，吸附物間以微弱的作用力，聚集在吸附物表面。並運用表面聲波元件的感測特性，配合外部線路系統之設計，以實現一微型金屬氧化物的表面聲波氣體感測系統。利用高機電耦合係數的  $36^\circ\text{YX-LiTaO}_3$  之壓電材料作為表面聲波感測器之基板，電極部分則是利用微機電黃光微影技術製作出線徑為  $10\ \mu\text{m}$  的指叉式電極，並在指叉電極中間的感測區域面積  $9.918\ \text{mm}^2$  中，利用微機電黃光微影技術製作高度為  $200\ \text{nm}$  的鋁圓柱陣列結構及同心圓柱陣列結構，再以射頻濺鍍及高功率脈衝磁控濺鍍鍍上厚度約為  $300\ \text{nm}$  的氧化鋅 ( $\text{ZnO}$ ) 薄膜。以此製作出的表面聲波氣體感測器，檢測其對低濃度硫化氫的頻率飄移。表面聲波感測器元件由於靈敏度、高可靠度、體積輕巧以及價格低廉等優勢，搭配特定感測薄膜即可檢測不同氣體，因此成為本研究所選之感測器。

## 參考資料

1. H. J. Kim and J. H. Lee, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **192**, 607 (2014).
2. Please refer to the website:  
<https://www.st.com/en/mems-and-sensors.html#overview>, 意法半導體 (STMicroelectronics) 官方網站.
3. Moussa Hoummady, Andrew Campitelli and Wojtek Wlodarski, *Smart Mater. Struct.*, **6**, 647 (1997).
4. Mariana Amorim Fraga, Humber Furlan, Rodrigo Pessoa and Marcos Massi, *Microsystem Technologies*, **20**, 9 (2013)。
5. Lord Rayleigh, D.C.L., F.R.S., *Proc. London Math. Soc.*, **s1-17** (117), 4 (1885).
6. A. fzal, A. and Dickert, F. L., *Compr. Sens. Technol.*, **3**, 447 (2011).
7. Showko Shiokawa and Jun Kondoh, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (5B), 2799 (2004).
8. Adeel Afzal, Naseer Iqbal, Adnan Mujahid and Romana Schirhagl, *Anal Chim Acta.*, **787**, 36 (2013).
9. J. D. N. Cheeke and Z. Wang, *Sens. Actuators B.*, **59**, 146 (1999).
10. Jiuling Liu, Wen Wang, Shunzhou Li, Minghua Liu and Shitang He, *Sensors*, **11** (12), 11871 (2011).
11. Changbao Wen, Changchun Zhu, Yongfeng Ju, *Sensors and Actuators A: Physical*, **159** (2), 168 (2010).
12. Kea-Tiong Tang, Cheng-Han Li and Shih-Wen Chiu, *Sensors*, **11** (5), 4609 (2011).

## 作者簡介

柯雅馨小姐現為南臺科技大學機械系碩士生。

Ya-Hsin Ke is currently a M.S. Student in the Department of Mechanical Engineering at Southern Taiwan University of Science and Technology.

陳政翰先生為南臺科技大學機械系碩士生。

Cheng-Han Chen received his M.S. in Mechanical Engineering from Southern Taiwan University of Science and Technology.

蕭育仁先生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工程系教授。

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

吳信賢先生為國立成功大學電機工程所博士，現為龍華科技大學化工與材料工程系教授。

Sean Wu received his Ph.D. from the Department of Electrical Engineering from National Cheng Kung University. He is currently a Professor in the Department of Chemical and Materials Engineering & Master at Lunghwa University of Science and Technology.

# 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 NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> gas sensing system based on the demand of “wide deployment” and “simple maintenance” in NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> 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、NO<sub>2</sub> 氣體感測重要性與感測

#### 1. NO<sub>2</sub> 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。 $PM_{2.5}$  是指粒徑小於  $2.5\ \mu m$  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  $PM_{2.5}$  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  $PM_{2.5}$ <sup>(1)</sup>。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  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  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<sup>(2)</sup>。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  $PM_{2.5}$  來源<sup>(1)</sup>。

## 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。

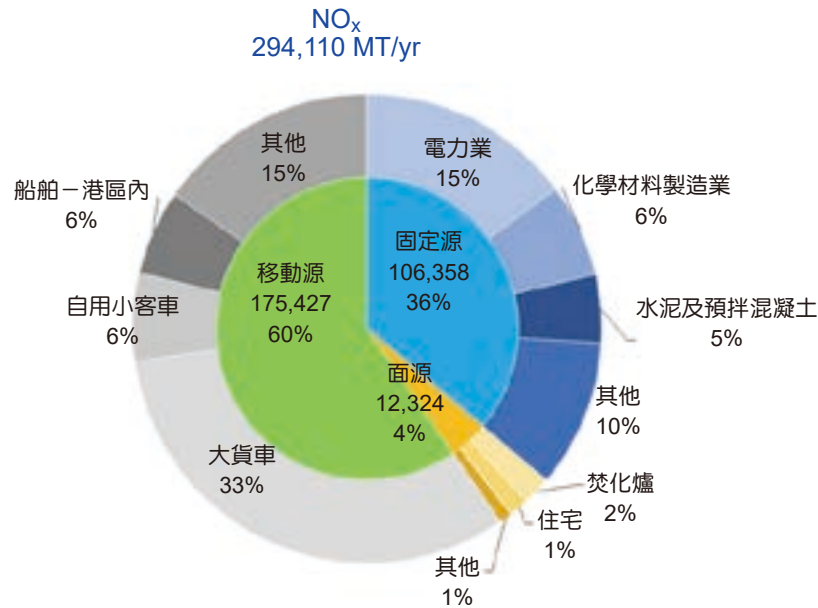


圖 2. 環保署公告之環境  $\text{NO}_x$  來源<sup>(2)</sup>。

### 3. 國內外二氧化氮氣體感測器發展

目前許多關於  $\text{NO}_2$  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<sup>(3-10)</sup>，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  $\text{NO}_2$  氣體感測的元件之相關文獻。而本團隊製作之光學式  $\text{NO}_2$  氣體感測系統是第一個以光學方式來對  $\text{NO}_2$  氣體進行感測之系統

## 二、光學式 $\text{NO}_2$ 氣體感測系統研發動機

$\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  氣體感測方法中，採用電化學的原理來感測  $\text{NO}_2$  氣體濃度，是最便宜的方式。然而，以電化學的原理來感測  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  之氣體濃度相關，依此就能夠推估出相應的  $\text{NO}_2$  氣體濃度。當環境沒有  $\text{NO}_2$  或氣體吸附一段時間後，薄膜表面的  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  氣體感測鈍化，甚至失效。這使採用電化學原理之  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  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 $\text{NO}_2$ 感測偵測原理與感測晶片開發

#### 1. 光學式 $\text{NO}_2$ 氣體感測原理

根據參考文獻如圖 3<sup>(11)</sup>， $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  氣體濃度呈正相關，當  $\text{NO}_2$  氣體濃度越濃就能夠吸收越多光線。所以終端光源強度與  $\text{NO}_2$  氣體濃度成反比；也就是說，當腔體內之  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  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。

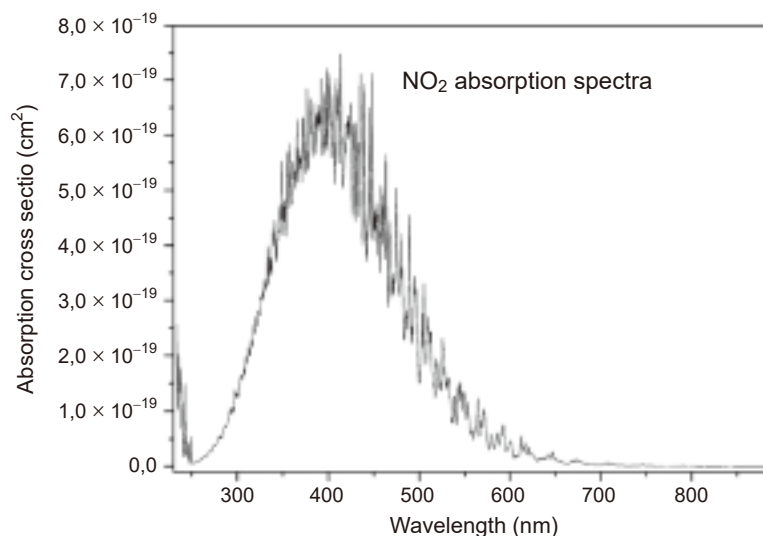


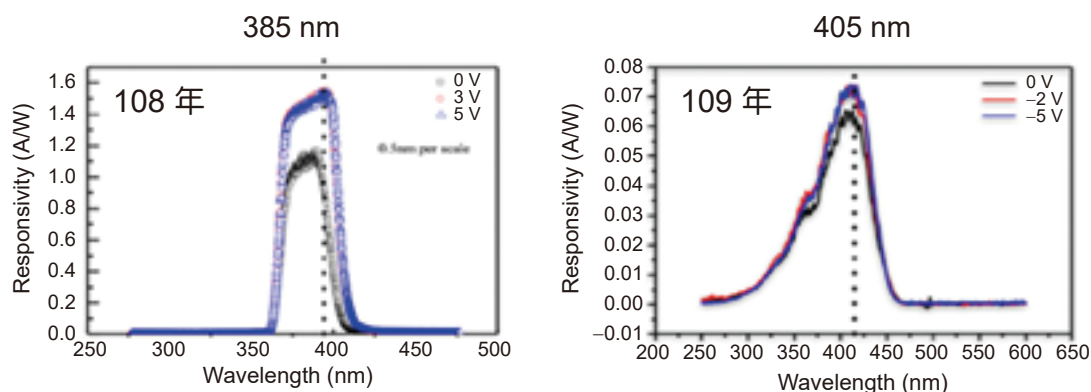
圖 3.  $\text{NO}_2$  氣體之吸收頻譜<sup>(11)</sup>。

## 2. 光學式 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片設計

為了排除其他光源的干擾，光學式 NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> 氣體的環境中，光源的能量會先被環境的 NO<sub>2</sub> 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－電洞對推至電擊兩側。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 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片能夠只針對 NO<sub>2</sub> 吸收波段進行檢測，藉此排除環境光之影響。

### 自行開發之 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片發展



更符合 NO<sub>2</sub> 吸收光譜之設計

圖 4. 本團隊開發之光學式 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片響應數據。

### 3. 光學式 NO<sub>2</sub> 氣體感測之訊號轉換測試

圖 5 為本團隊開發之光學式 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片響應圖與 NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> 氣體濃度之電壓變化資料。在元件電壓訊號轉換成 NO<sub>2</sub> 濃度訊號方面，我們首先將固定濃度之 NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> 氣體給吸收。

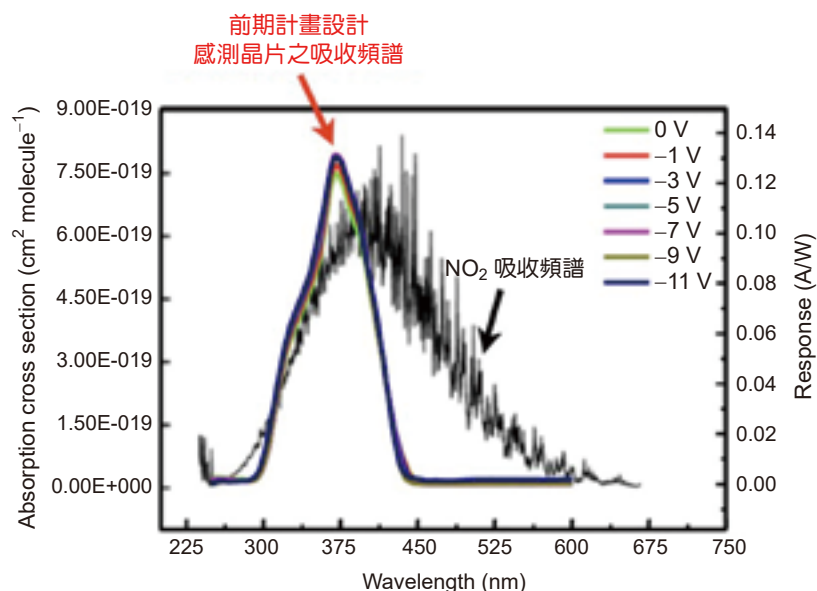


圖 5. 本團隊開發之光學式 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片與 NO<sub>2</sub> 吸收頻譜對應關係。

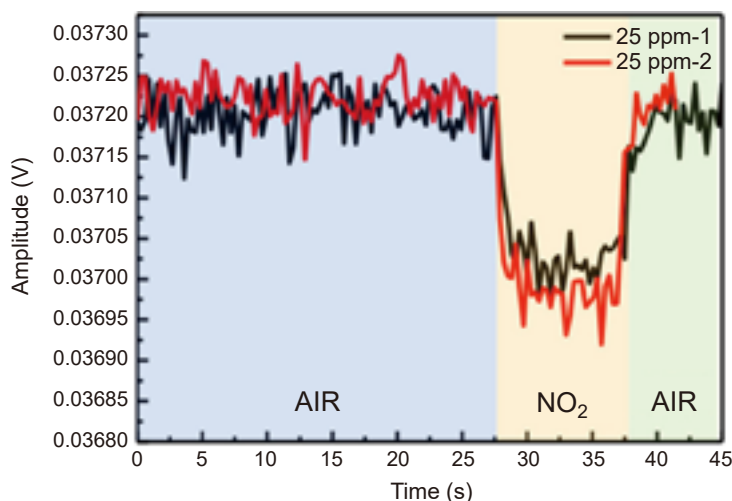


圖 6. 光學式 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片重複性測試。

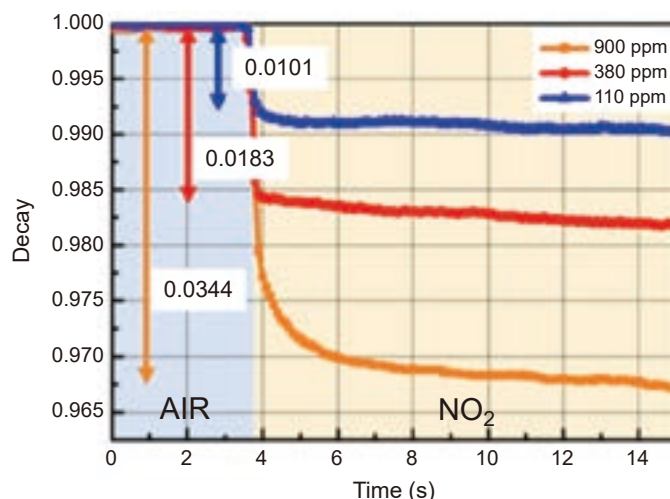


圖 7. 光學式 NO<sub>2</sub> 氣體感測晶片濃度測試。

#### 四、光學式 NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> 流經摺疊型光學腔體內部，使反應腔體內部之 NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> 氣體給吸收進而推算環境之 NO<sub>2</sub> 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

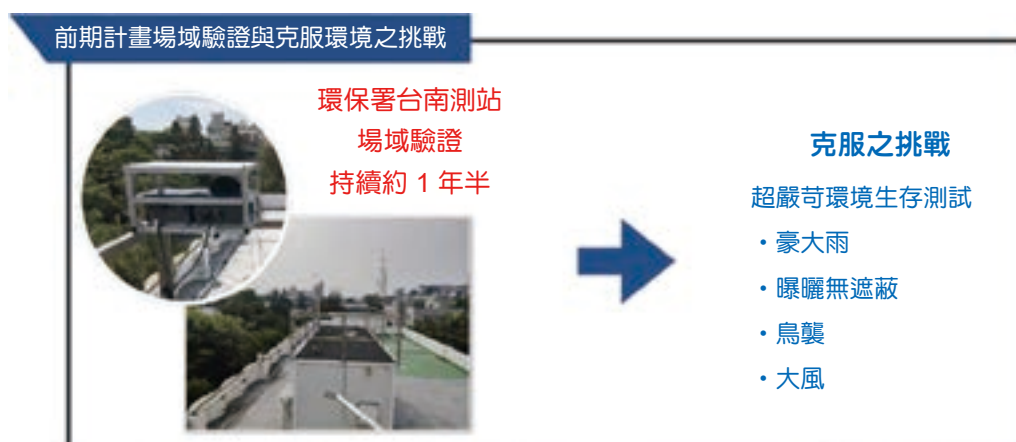


圖 8. 本團隊開發之光學式二氧化氮氣體感測系統於環保署台南測站設置狀況。

溼度、一氧化碳濃度、二氧化硫濃度、臭氧濃度、PM<sub>2.5</sub> 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 NO<sub>2</sub> 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。

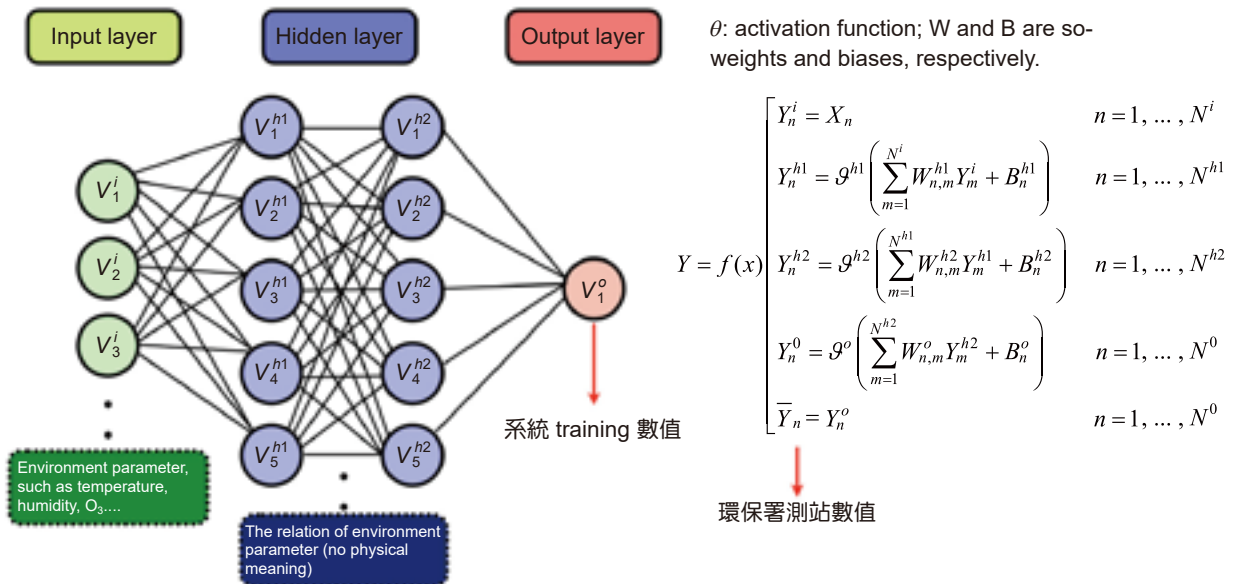


圖 9. 類神經網路與環境參數導入並與環保署數據進行學習。

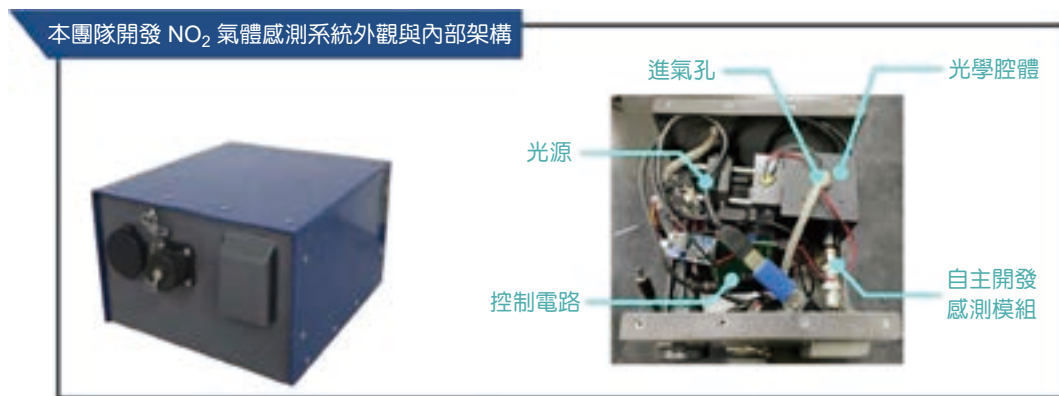


圖 10. 本團隊開發之光學式二氧化氮氣體感測系統之外觀與內部。

## 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 NO<sub>2</sub> 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。

## 前期計畫開發之網頁瀏覽環境與數據呈現



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  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  數據都是最高峰，隨後隨著午夜的來臨， $\text{NO}_2$  數值又回復平穩，在該測試地點周遭並無工廠可以排放  $\text{NO}_2$  氣體，因此可以合理推斷這樣  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  的氣體濃度都會相對較高，反之則會得到較低之  $\text{NO}_2$  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 ( $R^2$ ) 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  $\text{NO}_2$  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。

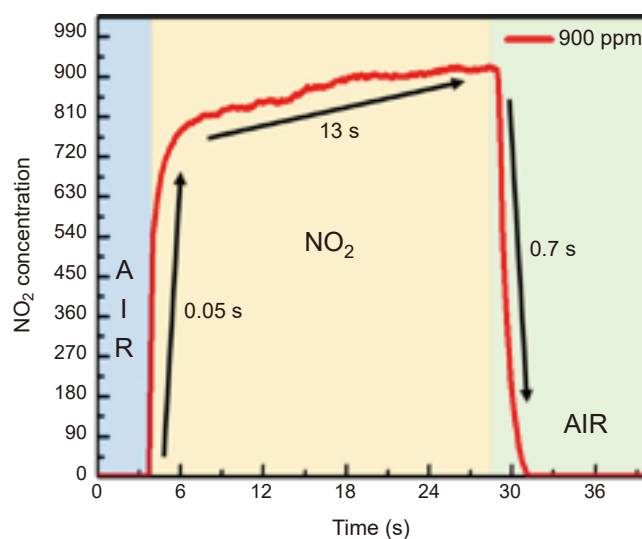


圖 13. 本團隊開發之光學式二氧化氮感測晶片反應時間測試。

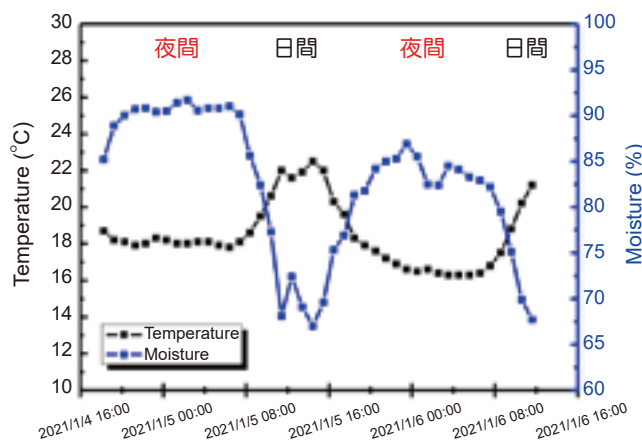


圖 14. 於台南測站實地場域之溫度變化趨勢。

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  $\text{NO}_2$ ，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。

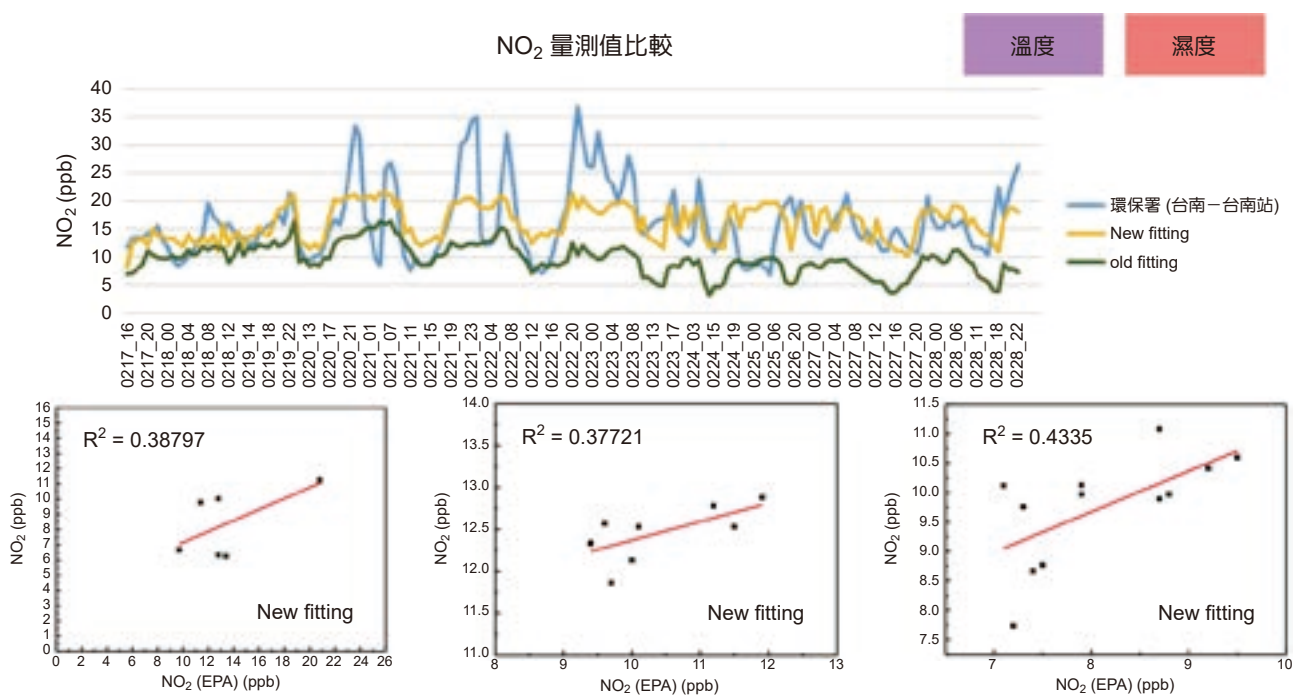


圖 15. 本團隊考量溫度與濕度環境參數後與環保署比對之二氧化氮決定係數分析。

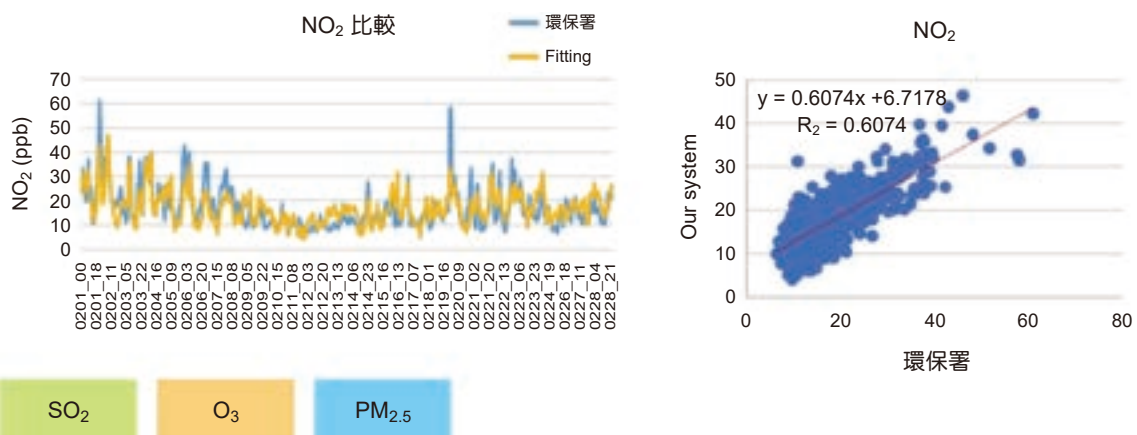


圖 16. 本團隊考量二氧化硫、臭氧、 $\text{PM}_{2.5}$  環境參數後與環保署比對之二氧化氮決定係數分析。

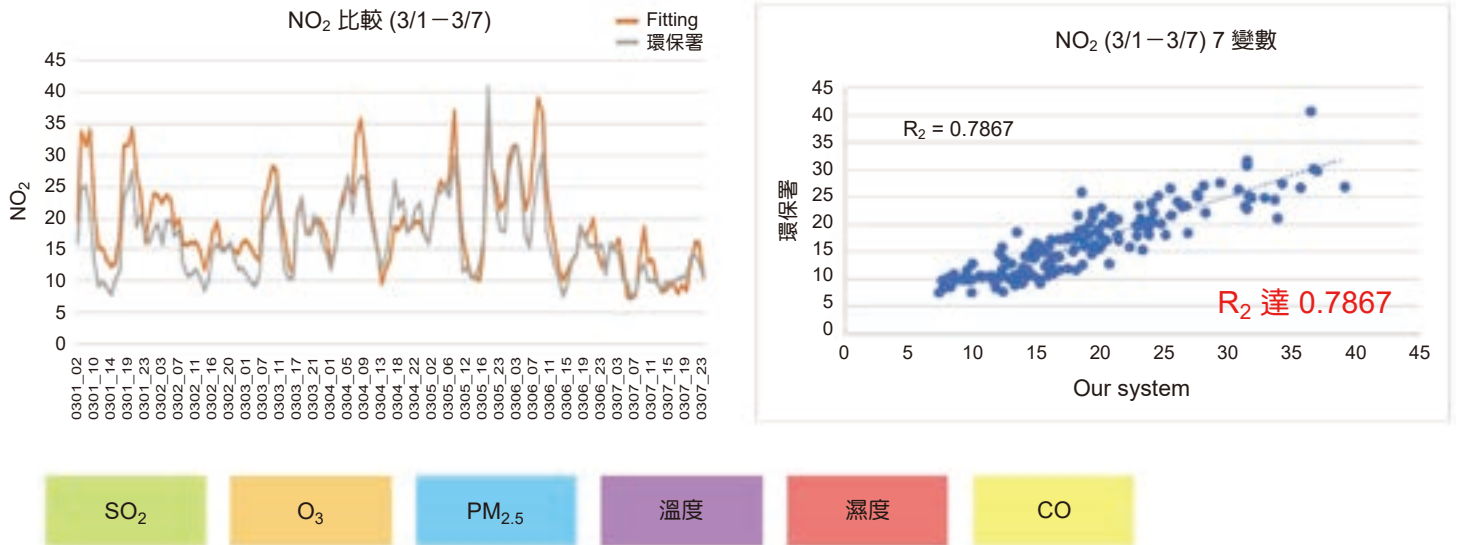


圖 17. 本團隊考量二氧化硫、臭氧、PM<sub>2.5</sub>、溫度、濕度、一氧化碳後與環保署比對之二氧化氮決定係數分析。

## 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](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](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<br>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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 感測器搭配 O <sub>3</sub> 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 $\mu$ W)、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        | < $\pm 1\%$                                                      | < $\pm 3\%$                                                                         | NA                                  | < $\pm 2\%$                        | < $\pm 1\%$                        |
| 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.

# 提升液態透鏡共焦模組之形貌掃描速度

## — 連續式三角波同步驅動搭配資料擷取裝置

### Improving the Topography Scanning Speed of the Liquid Lens Confocal Module Based on Continuous Triangular Wave Synchronous Drive with Data Acquisition Device

呂國豪、盧柏榕、劉兆峰、鄭璧瑩、翁俊仁

Guo-Hao Lu, Bo-Rong Lu, Chao-Feng Liu, Pi-Ying Cheng, Chun-Jen Weng

本研究為將液態透鏡的連續式變焦技術整合於共焦測距系統上，發展待測物曲面形貌量測系統。實驗使用三角波驅動模式搭配 DAQ 連續接收模式用於資料擷取，本研究設計 DAQ 操控程序為自啟動後可以連續掃描擷取一整列的待測點資料，搭配程式的訊號分析演算法來提升連續多點的量測速度。在 20 Hz 的三角波驅動下，可以達到每點 50 ms 的量測速率，此方式達成 5.8 倍速度的提升，未來將三角波頻率提升，液態透鏡變焦頻率能有大幅提升速度。以此量測系統搭配二維移動載物平台對標準階梯鋁塊做形貌掃描。本研究的實驗數據顯示經過量測速率與精度改善後，應用液態透鏡搭配共焦量測系統可明顯提高量測速度。

The study proposed and applied the innovative confocal optical technique with liquid lens on confocal displacement sensor system. The study proposed the continuously scanning method by using analog triangle mode assisted by DAQ system. Measuring the data of multiple points based on LabVIEW improves the scanning speed while using 20 Hz triangle driving current with this method. The scan speed could reach near 50 ms per scan point, which increases 5.8 times in speed compared with former method. Based on the above method, the topography scanning of standard stepped aluminum blocks was carried out with a two-dimensional mobile platform. The evaluated results demonstrate the improved and practical performance of the confocal displacement sensor system with liquid lens.

## 一、前言

一般的共焦位移感測器運作方式為，探測光通過透鏡及物鏡並到達待測物表面，進行共焦量測，但此種方式的焦距是固定的，所以必須透過馬達調整待測物與物鏡相對的 Z 軸距離，才能偵測光通過的強弱數值，並分析待測物表面的相對高度<sup>(1)</sup>，而本研究所使用的系統可以透過液態透鏡取代 Z 軸的馬達，透過輸入至液態透鏡的電流，調整範圍為 0—290 mA，焦距會不斷的改變，其電流增量的最小值為 0.1mA，如圖 1 為液態透鏡不同電流變形示意圖，接著蒐集反射光能量的數值並分析，透過這種方式，只要在量測範圍內，即使不用移動 Z 軸平台也可以達到測量距離的目的<sup>(2-4)</sup>。本系統使用 Optotune 公司的液態透鏡<sup>(5)</sup>，經由驅動電路 USB 介面選擇的電流值來控制液態透鏡的光曲度，工作原理為驅動電流經過電磁驅動器會轉為磁力使磁鐵擠壓內部的液體至透鏡端，以達到不同的驅動電流改變透鏡的曲率及形狀。驅動的電流越大液態透鏡的曲度越大，其焦距越短，驅動電流越小則聚焦的焦距越長。液態透鏡的驅動模式有三種選擇方式，分別為電流、光焦度以及類比電流波形去驅動液態透鏡，在類比電流波型的驅動上可以選擇弦波、三角波與方波，其輸出頻率最大可達到 1000 Hz，內部可同時產生同步輸出的方波信號，藉此訊號可以達成接收端資料擷取的時間與驅動波型的起始點同步。透鏡內部有 SE97B 溫度感測晶片可提供即時的溫度回授，由於溫度是影響液態透鏡曲度的重要因素，本實驗在掃描待測物中會記錄液態透鏡的溫度狀況並盡量使操作過程中溫度控制於恆溫狀態。

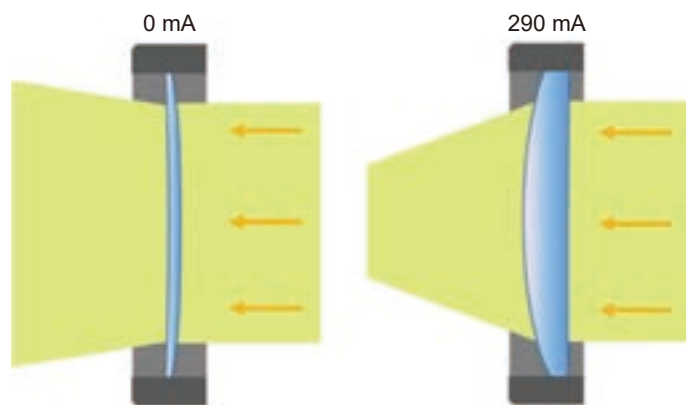


圖 1. 液態透鏡不同電流變形示意圖。

雷射共焦利用雷射光源搭配光學針孔光圈進行空間濾波消除雜訊，過濾掉非焦點上反射回來的光，只有聚焦光能通過，再搭配量測光強度的儀器分析反射光能量的強度，尋找反射能量曲線之峰值位置，藉此就可以判斷位於聚焦平面上的物體距離，即軸向之 Z 軸位置，通常會搭配 XYZ 三軸的移動配合而成為一個非接觸式表面形貌掃描的系統<sup>(6-8)</sup>；光學針孔光圈是此項技術的一個重要元件，光圈或狹縫愈狹窄則系統的精準度愈高。本實驗量測系統使用雷射共焦來進行測距的量測，搭配液態透鏡快速變焦的特性來進行共焦測距的形貌量測。

該研究團隊在前期研究中已有架設雷射共焦掃描測距系統的初步成果<sup>(12)</sup>，本研究增加 DAQ 為資料擷取接收器來提升掃描速度，研究中使用類比三角波電流模式來驅動液態透

鏡，掃描的流程上使用 DAQ 為資料接收器來等待觸發的方波然後開始接收反射能量的訊號，掃描一個量測點便關閉 DAQ，再由移動平台移動至下一個量測點再做下一次的量測，此掃描方法在 20 Hz 三角波驅動掃描下平均單點量測時間為 290 ms，以此方法量測標準微型階梯鋁塊。以原本系統搭配 DAQ 接收觸發做掃描的量測方法以量測 1 千個點為例子需要 2 分鐘多的時間，速度上並不快，因此本研究則希望能在掃描速度上再進一步的提升<sup>(9-10)</sup>。使用 DAQ 同步觸發做量測在以往的方式上掃描一系列的點量測上需要開關 DAQ 程式好幾次，本研究構想加強了硬體與軟體之間的配合提出新的資料擷取方式，藉由改良 DAQ 的控制軟體只需啟動一次就能連續掃描多點的方式來使得量測速率提升，藉此達成多點的共焦反饋訊號的量測。本實驗量測以 DAQ 連續多點量測方法量測一維的標準微型階梯鋁塊並與實際尺寸做比較，再來做二維的量測觀察其整體外形。本研究研發創新的量測方法，以此方法去實際量測待測物，以提升速度的目標為前提下，同時也進行精確度的分析與改善訊號對應偏差的問題。

## 二、系統架設與量測原理

圖 2 為本實驗之連續多點量測系統架構示意圖，實驗架構使用單模分光光纖為光的傳輸元件，實驗中選擇單波長雷射光源導入分光光纖中 Port 1，單波長雷射光會從分光光纖 Port 2 導出並經過液態透鏡和物鏡將光聚焦於待測物表面，聚焦於待測物的單波長雷射光會依原路徑返回分光光纖並從 Port 1 與 Port 3 導出，Port 3 導出的光透過能量量測儀進行偵測，並搭配接收器 DAQ 接收觸發訊號再進行量測，量測的驅動模式選擇類比三角波電流驅動模式。為了提高單點的量測速率，實驗選用同步觸發的方式來使得速度提升，首先在液態透鏡方面它的控制器可以使用類比訊號使得透鏡做出不同電流波形的連續驅動，分別有弦波、三角波的電流波形驅動方式。程式端上可以輸入此驅動波形的種類、頻率以及最大驅動的電流值與最小驅動電流值，接下來就可以由電腦下達命令使其作出不同頻率下不同波型的電流驅動。

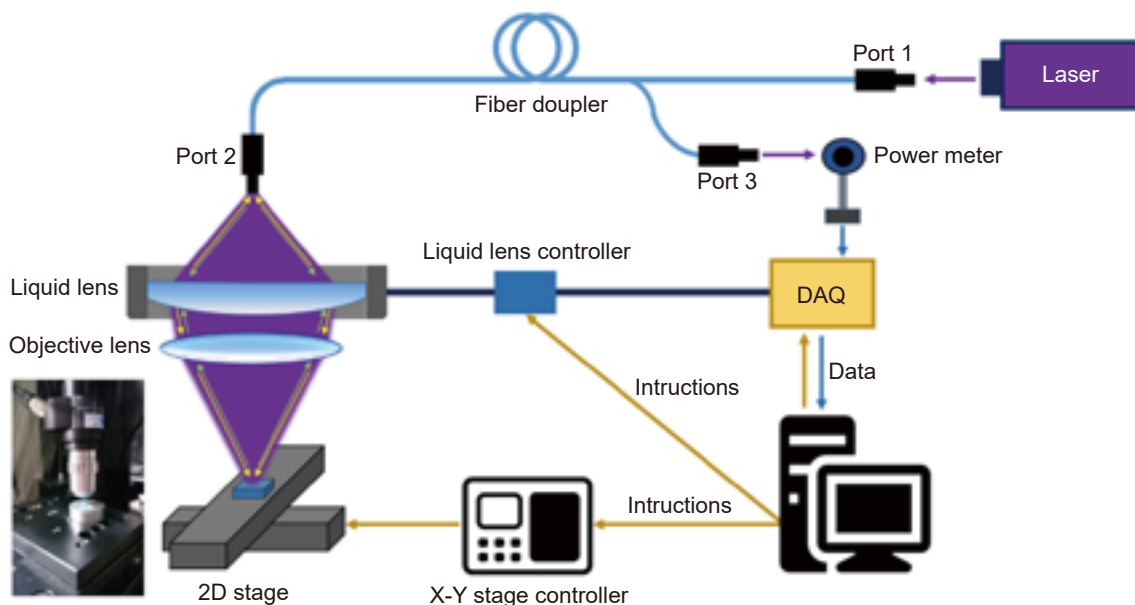


圖 2. 連續多點量測系統架構示意圖。

實驗架構以 DAQ 為接收方，當 DAQ 接收到了同步訊號時 (如下圖 3 所示)，DAQ 才會開始擷取資料。而同步訊號的來源來自液態透鏡的控制器，會同步送出方波信號告知 DAQ 作為觸發時間。如此一來，在 DAQ 的擷取上便可辨別出頻率的週期並進行多週期區間的資料擷取。

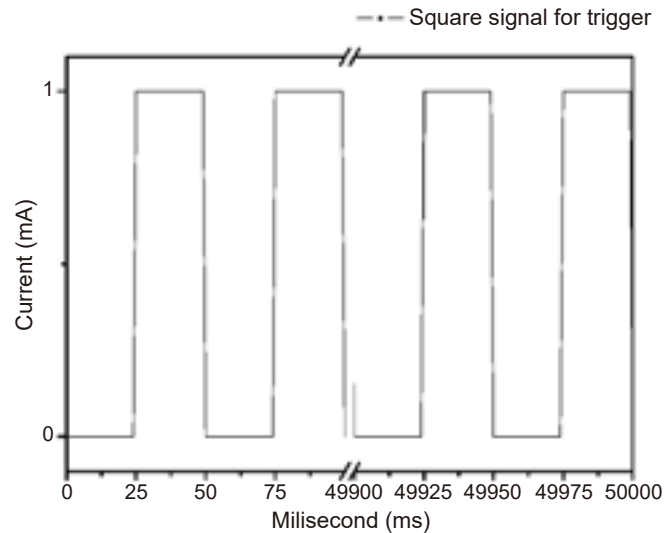


圖 3. 驅動器輸出 20 Hz 同步方波訊號給 DAQ 做觸發開始擷取資料 (程式模擬數據)。

在同步方波的選擇上可以選擇正緣觸發或者負緣觸發做同步訊號。本實驗使用三角波電流驅動搭配負緣觸發作同步訊號，示意圖如圖 3 與圖 4 所示，訊號的一個負緣是指數位訊號從高準位向低準位的轉變，當接入的時脈訊號由高準位向低準位轉變時，正反器電路被觸發，此訊號的意思是驅動器會在類比驅動電流的波峰出現時送出方波的高值 (電流值為「1」) 告知接收器做資料接收。由於負緣觸發做同步訊號的關係，驅動電流是由大驅動到小，因此對應焦距的量測變化是從近到遠。液態透鏡的類比電流控制頻率可達 1000 Hz，然而經由實驗發現當頻率越高的時候，DAQ 擷取資料的共焦訊號其半高弦寬會變寬，波型會變得不對稱。本研究的實驗選用 20 Hz 的類比三角波電流驅動模式來做掃描量測。

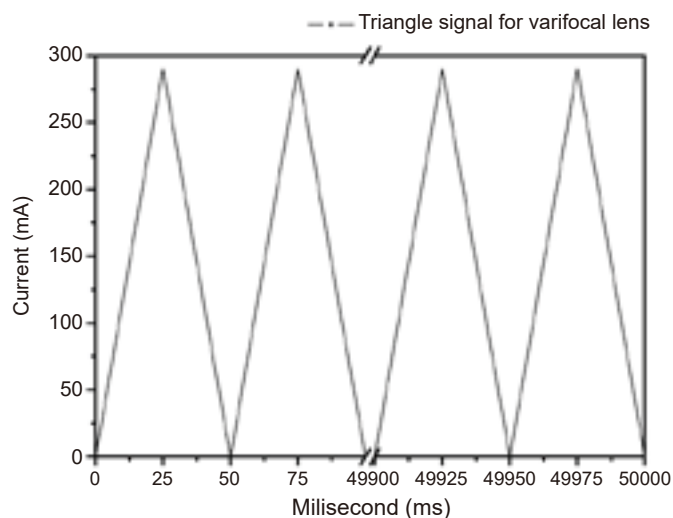


圖 4. 驅動器驅動液態透鏡 20 Hz 三角波類比電流 (程式模擬數據)。

本研究設計了 DAQ 連續多點量測的方法，使用 20 Hz 三角波電流驅動搭配 DAQ 接收方波訊號的觸發來進行量測，圖 3 至圖 7 為此量測方法與 20 Hz 三角波驅動下各個硬體的響應訊號示意圖。圖 3 與圖 4 為液態透鏡的控制器同時輸出同步方波訊號給 DAQ 以及 20 Hz 三角波電流驅動波型給液態透鏡，圖 5 表示 DAQ 接收方波的觸發那一刻便開始接收資料。圖 6 為移動平台的移動情形，本方法藉由資料的分析上只需要每個三角驅動波訊號周期的前半週期訊號 (對應驅動電流 290–0 mA)，因此設計在後半個週期的時間內給移動平台來做移動，藉此來達成速度的提升。實測結果在一列的掃描中以 20 Hz 的三角波電流驅動下每一點的掃描時間平均為 50 多 ms。一系列掃描完成後，待 Y 軸的移動平台移至下一點再重複上述過程進行下一列的掃描。圖 7 表示 DAQ 開啟擷取到的共焦訊號對應示意圖。

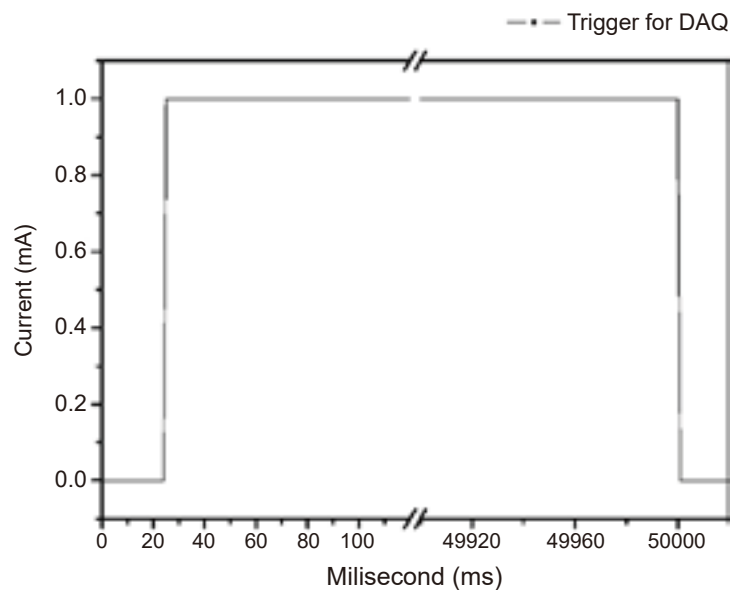


圖 5. DAQ 接收觸發訊號後開始做資料擷取 (程式模擬數據)。

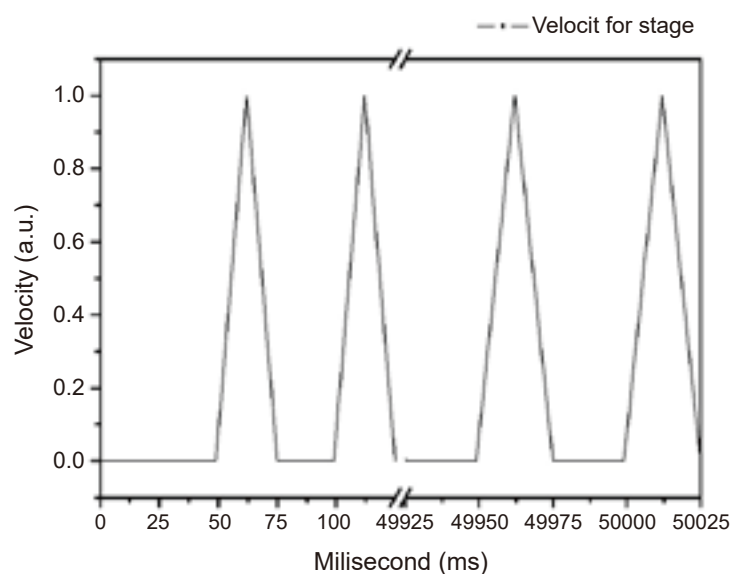


圖 6. 移動平台於對應時間做出移動 (程式模擬數據)。

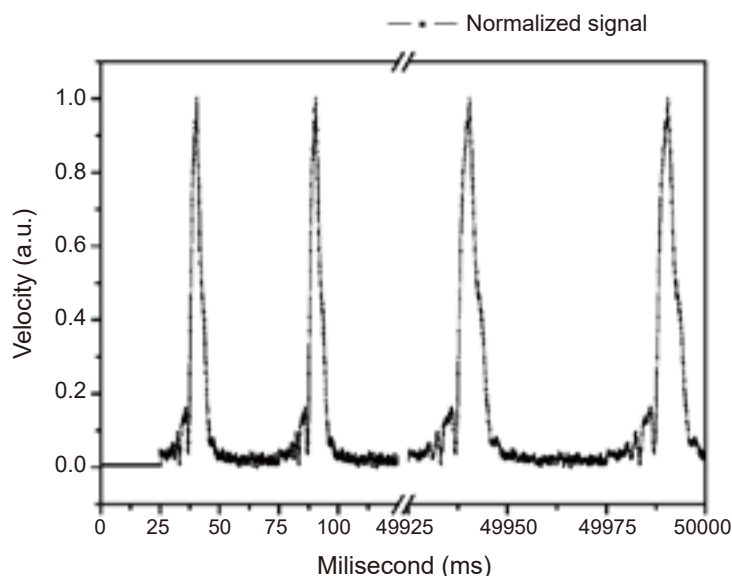


圖 7. DAQ 開啟擷取到的共焦訊號 (程式模擬數據)。

表 1 為 DAQ 連續多點測距系統的輸入參數與說明，在液態透鏡方面，選擇以 20 Hz 三角波電流驅動來做掃描，實驗在 DAQ 選擇上選擇每秒擷取 10 萬筆資料做解析，此代表每 50 ms (三角波的一個週期) DAQ 會以 5,000 筆資料來做解析，DAQ 還有一個參數為輸出資料數其代表 DAQ 擷取多少筆資料後再輸出給電腦，以掃描一列 100 個點為例，在 DAQ 參數上需設定擷取 5,000 筆資料乘以 100 點等於 50 萬筆資料，此方式以 5,000 筆資料來解析每一個量測點，等待一列的數值都擷取完畢後再傳輸資料給電腦進行數值運算找到每一個量測點的共焦對應訊號。由於 DAQ 以 5,000 筆資料來解析一個三角波電流週期 (290 mA – 0 mA – 290 mA)，因此共焦對應訊號的表示法為 0–5,000 index，由於訊號上只要取驅動電流 290 mA 至 0 mA 的這一段，因此只要分析 0–2,500 index 這區間的共焦訊號即可，此段時間的長度為 25 ms。在移動平台的部分，由於我們使用 20 Hz 的驅動波，表示一個周期為 50 ms，搭配 DAQ 使用負緣觸發的方式只要 25 ms 就可以擷取到透鏡的驅動電流為 290 mA 到 0 mA 的量測資料，藉由此條件讓移動平台在每個量測點的前 25 ms 保持靜止讓 DAQ 進

表 1. DAQ 連續多點測距方法的參數輸入。

| 硬體   | 參數輸入                                                                                       |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 液態透鏡 | 1. 選擇類比三角波電流驅動模式<br>2. 選擇驅動頻率為 20 Hz<br>3. 選擇三角波電流驅動最大電流為 290 mA，最小電流為 0 mA                |
| DAQ  | 1. 選擇每秒擷取資料點頻率：選擇每秒取 10 萬點<br>2. 選 總共接收多少筆資料再送給電腦：選擇 5000 筆乘上一列的量測點數<br>3. 選擇負緣觸發做為接收資料的開端 |
| 移動平臺 | 1. 選擇 X 行程要量測幾點<br>2. 選擇 Y 行程要量測幾點<br>3. 選擇 X 行程每步移動距離<br>4. 選擇 Y 行程每步移動距離                 |

行資料上的擷取，在每個量測點的後 25 ms 進行移動至下一個量測點 (圖 6 所示)，以此達成 DAQ 於一系列多點的連續量測，也由於這個方式，可以省去移動平台在原本方式上要花費額外的時間去做移動，因此達成量測速度上的提升。

## 1. LabVIEW 程式之儀器自動化控制

此掃描方法在程式端上使用 Queue (佇列) 的語法改良系統的掃描速度，Queue 可以讓接收到的資料在程式端中以另一個迴圈來做資料處理，可以使得實驗於一邊掃描的當下同時進行資料處理，藉由此特性，程式讓 DAQ 量測完一整列的點資料後，緊接著繼續量取新的一列，原本掃描列上量出來的資料就送進 Queue 以另一個迴圈做運算處理來算出對應點的共焦訊號。因此達成掃描與資料處理的時間不衝突。圖 8 為 DAQ 連續多點量測方法的流程圖，實驗前先設定好相關參數，實驗開始後 DAQ 的量測會以掃描一系列的點為一次的循環，直到掃描的列數滿足條件才會結束程式。

由於此量測方法為 DAQ 開啟一次便開始量測整列點的效果，因此不會有每點掃描都需要開關 DAQ 而有額外時間的問題，設計上把移動平台的移動時間涵蓋於 DAQ 的量測時間內因此不用額外等待移動平台移動的時間，再搭配 Queue 語法做運算，因此改良後的量測速度獲得提升。以 20 Hz 三角波電流驅動做掃描來看，改良前的量測方法每點量測平均需要 290 ms 的時間，改良後的量測的方法平均每點量測時間可達 50 多 ms。

使用 DAQ 連續多點量測方法可讓掃描速度有效提升，但在研發的過程中遇到了以下問題，一為 DAQ 最大擷取資料量有極限因此不可以單列擷取太多筆資料，二為 DAQ 是把整列的資料都做擷取，因此後續的資料處理上如何取得對應的共焦訊號會是程式端上演算法要解決的問題，三為實驗發現此量測方法在共焦訊號的表現上會有對應偏差的問題需要解決。

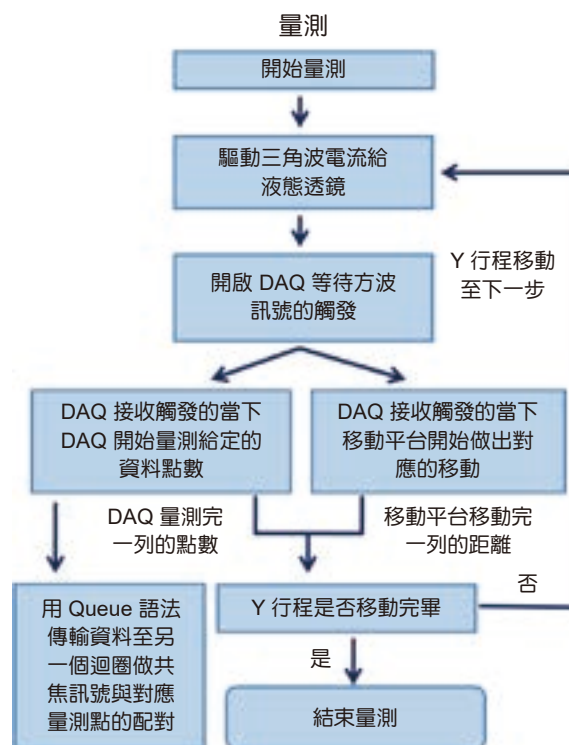


圖 8. 連續多點量測方法的量測流程圖。

## 2. 本系統量測方法的距離曲線

實驗對 DAQ 連續多點量測方法做距離曲線實驗，由於 DAQ 只開啟一次就可以做多個量測點的資料擷取，除了第一個量測點外，其他的量測點會有訊號對應偏差。此距離實驗選用鏡子為待測物在同個位置上使用 DAQ 連續量測的方法一次量測 11 次，代表量測了 11 個週期的資料，把 11 個週期的資料去除第一個周期後把剩下的週期資料做累加，累加的資料為第 2 個周期到第 11 個週期，裡頭的 10 個週期的共焦對應訊號值會有相對於初始的對應偏差值，再把這 10 個對應偏差值扣回去，再做平均，最後得出該位置的共焦對應訊號，對應偏差值的選用上以下圖 9 在控溫下待測物維持同一高度時做重複量測 1,500 次的量測實驗，Sample times 為累積重複的量測次數，得出量測 1,500 點的時候訊號對應偏移會來到 160 index，以此來算每多量測一點，共焦對應訊號會偏移 0.107 index，以此當作 20 Hz 三角波驅動模式下的共焦訊號對應偏差值。確立好實驗方法後，進行同樣的實驗步驟，首先把待測物移至共焦對應訊號為 267 index 的位置 (近端) 由此量測來記錄共焦對應訊號位置後，再移動待測物往遠端移動 20 微米，20 微米為此次量測待測物 XY 軸的解析度，再掃描一次得出下個位置的共焦對應訊號值，以此類推直到共焦訊號的峰值消失為止，過程中共量測了 51 個點，得出 20 倍物鏡與 20 Hz 三角波電流驅動下搭配 DAQ 連續多點量測方法的可量測距離範圍為 1.02 毫米，實驗得出的資料點為下圖 10 的黑色線，紅色線為其 2 次方的擬合線。

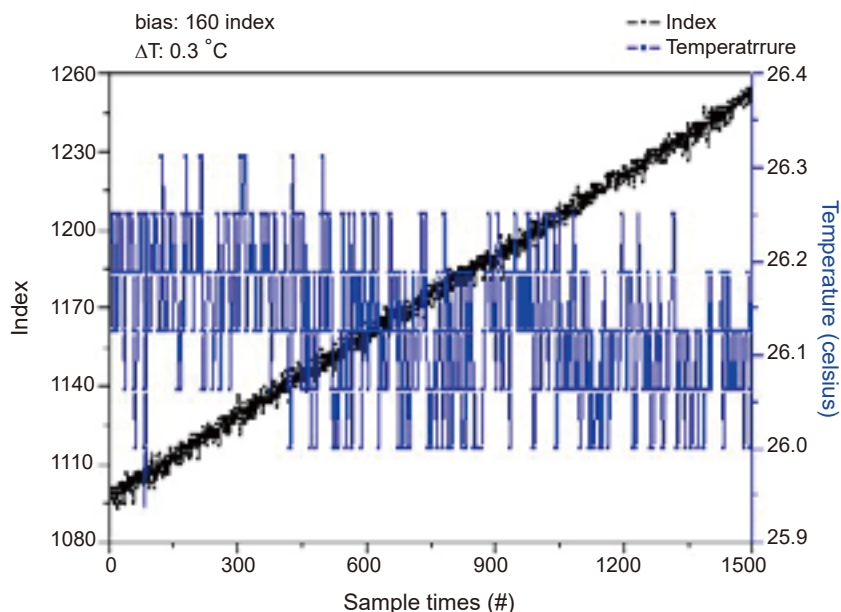


圖 9. 控溫下 DAQ 連續多點量測方法於原點量測下的共焦反饋訊號對應偏差表現情形。

把得出的距離曲線 (圖中黑色線) 做二次的曲線擬合得出其方程式為：

$$y = 0.000046125 x^2 - 0.55217 x + 1116.2$$

$y$  為對應位置，單位為  $\mu\text{m}$ ； $x$  為對應的 index

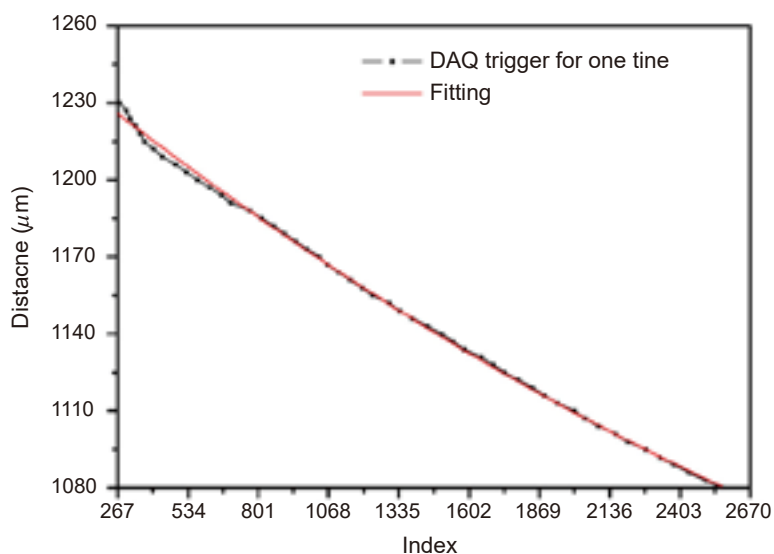


圖 10. DAQ 連續多點量測方法的距離曲線與擬合線。

### 三、實驗結果與討論

#### 1. 標準階梯鋁塊的量測

此實驗所量測的待測物為一個委外製造的標準微型階梯鋁塊，如圖 11 所示，其右半邊的階梯總高度比左半邊的階梯總高度來得高，右半邊總共有 10 階階梯，每階階梯的高度為 100 微米，每階的寬度間隔為 0.5 毫米。左半邊的階梯共有 10 階階梯，其尺寸前五階高度間隔為 80 微米，後五階為 50 微米，每階的寬度間隔為 0.5 毫米。實驗將此階梯鋁塊搭載在一個二維移動平台，藉由移動平台於垂直量測方向進行平面的移動，此量測系統使用 20 倍物鏡以及 20 Hz 的三角波驅動電流搭配 DAQ 連續多點量測方法來進行掃描，並研究量測過程中需要持續改進的地方。

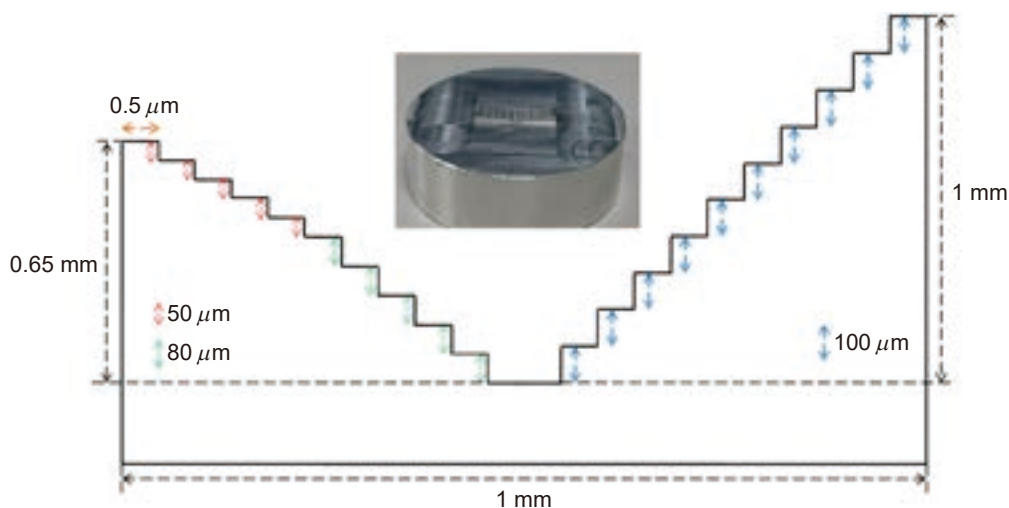


圖 11. 標準微型階梯鋁塊待測物。

量測起始位置由待測物兩種階梯中的最低點開始量測，量測方向朝向高階 100 微米方向移動，實驗掃描使用 DAQ 連續多點量測的方法，因此本身的共焦訊號會隨著量測點數的遞增而產生對應偏差，因此資料需要進行第二部分的資料校正，校正訊號對應偏差的資料以圖 9 顯示來看在定溫的狀況下每量測 1,500 點，其共焦反饋訊號的偏移會遞增 160 個 index，以此偏移值來做補償訊號偏差。下面以掃描階梯鋁塊的矮邊為例子，下圖 12 為掃描結果與沒校正的資料作比較可以看出校正後的共焦訊號值隨著量測點的數量增加有遞減的差值產生，把校正完的資料帶入距離曲線換算成對應距離可以得出圖 13。

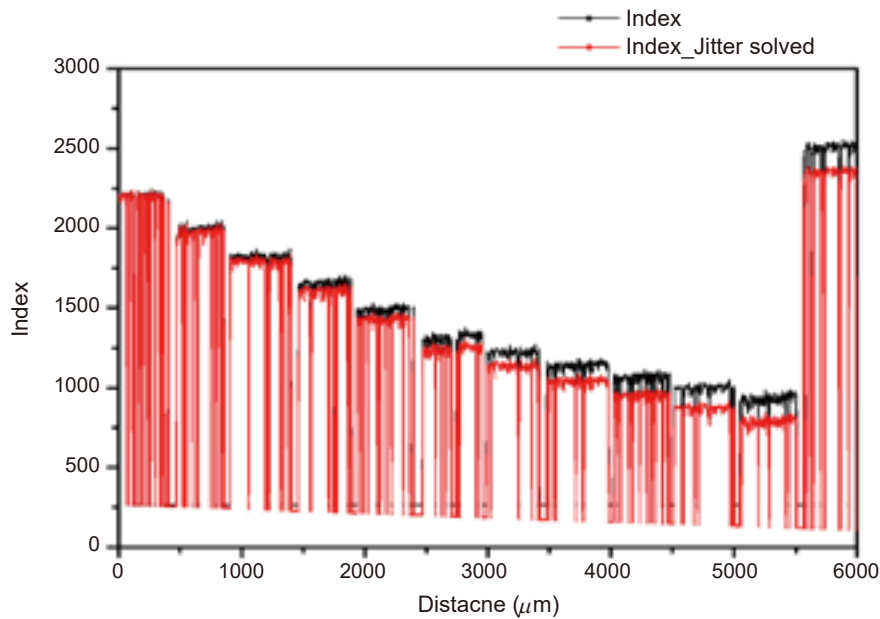


圖 12. 標準微階梯鋁塊的掃描原始共焦反饋訊號(黑色圖)與校正後的資料(紅色圖)比較。

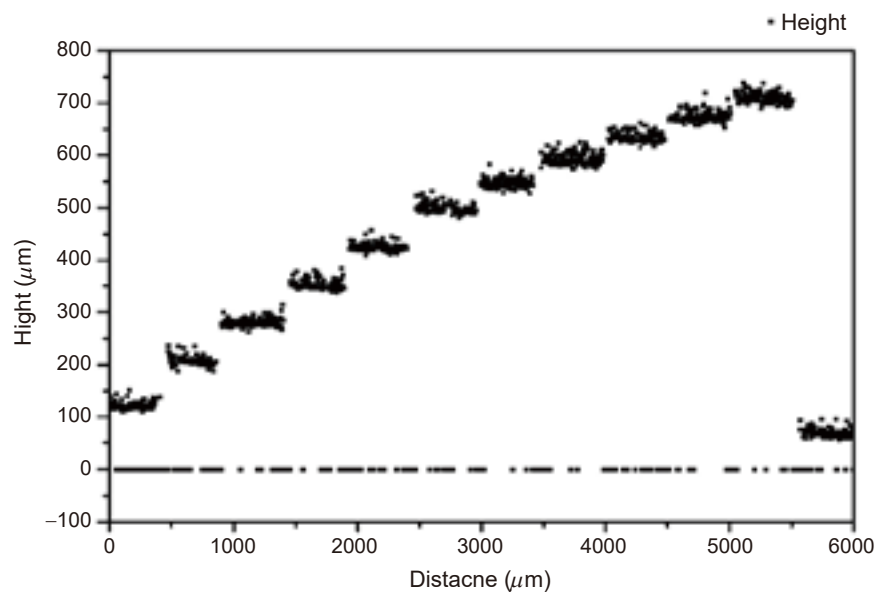


圖 13. 對應距離曲線換算後的掃描結果。

確立好訊號對應偏差值與的補償方法後，實驗正式量測標準階梯鋁塊進行一維掃描，目的為了量測出鋁塊的高度分布圖，並實際與鋁塊的尺寸做比較，觀察 DAQ 連續多點量測方式是否能在提高量測速度下擁有一定的準確度。此次掃描在 X 軸方向掃描 9 段，每一段為 X 軸方向移動平臺每次移動 1 微米，移動 1,500 步，9 段的掃描總共量測 13,500 個量測點，總量測距離為 13.5 微米。掃描後經由校正並帶入距離公式後，再把 9 段的量測數據接合在一起，其結果如圖 14 所示，可以看出量測的資料點與鋁塊的高低 (紅色線) 有明顯重合，代表此量測方式確實能有效解析物體表面形貌的相對高低位置，然而在同個高度水平的階梯上可以量測高度有著將近 50 微米的浮動情形，這部分原因有兩種可能，一為工件本身的表面粗糙度，二為本量測系統的自然誤差範圍。

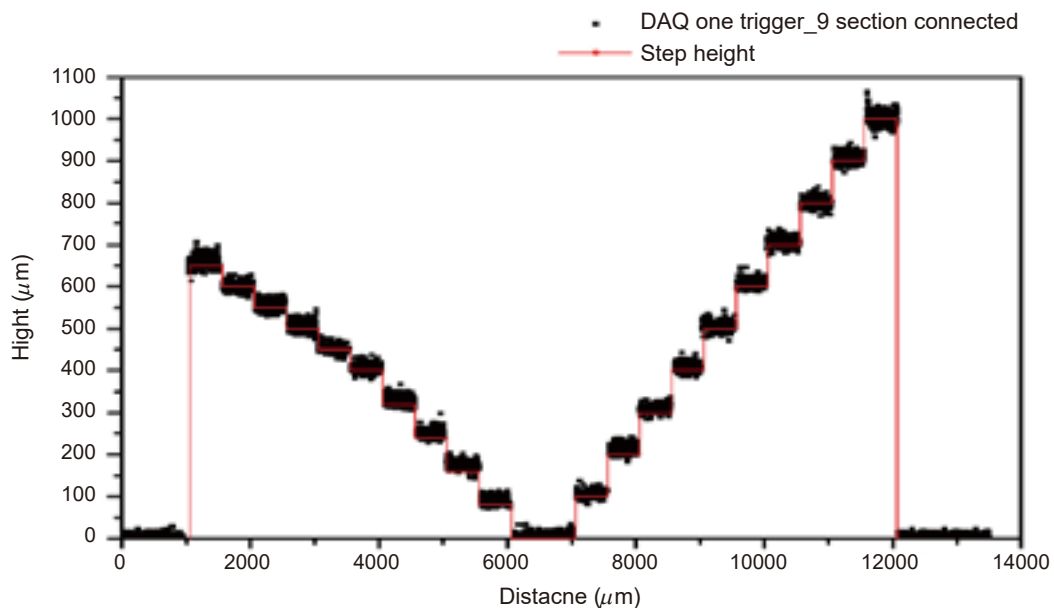


圖 14. 標準微型階梯鋁塊的掃描結果與實際尺寸 (紅色圖) 做比較。

最後實驗以 DAQ 連續多點量測方式來做階梯鋁塊表面的形貌掃描，實驗數據如圖 15 所示，階梯鋁塊的長邊為 11 毫米，短邊為 3.7 毫米，實驗掃描矩形範圍為長邊 15 毫米，短邊為 5 毫米，藉此掃描來掃描出整體的輪廓。參數選擇在 X 軸的掃描上選定量測 3,000 個點，每點的量測距離間隔 5 微米，選擇在 Y 軸的掃描上選定量測 100 列，每列的量測距離間隔為 50 微米。

#### 四、結論

本研究改良了 DAQ 接收觸發後再做訊號接收的量測方法，由原本每個量測點都需要接收觸發再做量測改良為一系列的量測點只要接收一次的觸發做量測掃描，得出的數據再經由 Queue 語法傳遞至另一個迴圈做共焦訊號的運算，藉由軟體與硬體間的搭配來提升量測速度。實驗以 20 Hz 的三角波電流驅動下由原本單點量測時間需要 290 ms 提升至 50 多 ms，此方式達成 5.8 倍速度的提升。本量測方法在量測中存在共焦對應偏差值需要做校正的問

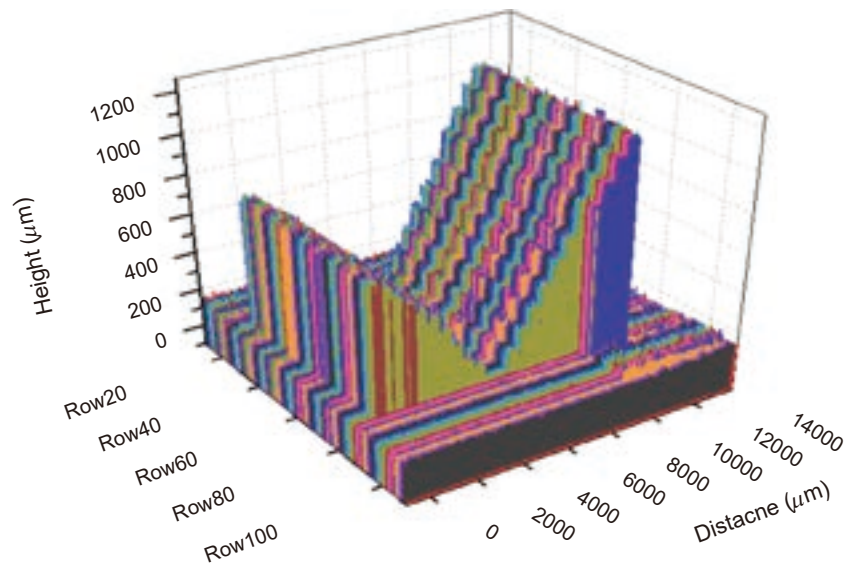


圖 15. 標準微型階梯鋁塊表面形貌的掃描結果。

題，藉由實驗觀察出共焦對應偏差值在 20 Hz 三角波驅動下每多量測一個量測點造成的共焦對應訊號會偏移 0.1067 index，由此得出校正值。最後由此方法掃描標準微型階梯鋁塊的一維高度分佈圖與表面形貌圖得出此量測系統，可有效量測出階梯鋁塊的高度形貌分佈，目前的量測誤差有 50 微米左右，最後對標準微型階梯鋁塊進行二維的表面形貌。

## 誌謝

感謝科技部計畫 MOST 110-2221-E-492-007、106-2622-E-492-004 -CC3 之部分經費補助。作者群感謝葉政傑和范振亮過去提供部分技術幫助。

## 參考文獻

1. Garry Berkovic and Ehud Shafir, *Advances in Optics and Photonics*, **4** (4), 441 (2012).
2. Chang Zhou, Xiaoming Hu and Ya Zhou, *International Journal of Engineering and Technology*, **8** (4), 297 (2016).
3. Yong Zhao, Yanbiao Liao and Shurong Lai, *Optical Engineering*, **42** (3), 670 (2003).
4. Kentaro Noda, Nguyen Binh-Khiem, Yusuke Takei, Tomoyuki Takahata, Ken Matsumoto and Isao Shimoyama, "Multi-axial confocal distance sensor using varifocal liquid lens", The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 16-20 June, (2013).
5. Specification, "Fast Electrically Tunable Lens EL-10-30 Series", please refer to the website: <http://www.optotune.com>
6. H.-J. Jordan, M. Wegner and H. Tiziani, *Measurement Science and Technology*, **9** (7), 1142 (1998).
7. Dong-Ryoung Lee, Suin Jang, Min Woo Lee, Hongki Yoo, *Applied Optics*, **55** (27), 7631 (2016).
8. Yun-bo Zhang, Wen-mei Hou, Ji-hong Zheng, *Applied Optics*, **33** (1), 14 (2012).
9. 藍子賢, "應用可變焦式液態透鏡於光學共焦距離量測系統之開發", 國立交通大學碩士論文, 民國 104 年.
10. 葉政傑, "可變焦透鏡應用於微曲面量測的分析與實作", 國立交通大學碩士論文, 民國 105 年.
11. 盧柏榕, "數位變焦光學測距系統於表面形貌掃描的開發與應用", 國立交通大學碩士論文, 民國 107 年.
12. 藍子賢, "可變焦式透鏡於光學共焦距離量測系統之應用", 科儀新知, 212, 73 (2017).

## 作者簡介

呂國豪先生為國立嘉義大學生物機電工程學系碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心專案佐理研究員。

Guo-Hao Lu received his M.S. in the Department of Biomechatronic Engineering from National Chiayi University. He is currently a Project Research Assistant at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

盧柏榕先生為國立陽明交通大學機械所碩士。

Bo-Rong Lu received his M.S. in Mechanical Engineering at National Yang Ming Chiao Tung University.

劉兆峰先生為國立陽明交通大學機械所碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心佐理研究員。

Chao-Feng Liu received his M.S. in Mechanical Engineering from National Yang Ming Chiao Tung University. He is currently a Research Assistant at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

鄭璧瑩先生為國立成功大學機械研究所博士，現為國立陽明交通大學機械系副教授。

Pi-Ying Cheng received his Ph.D. in Mechanical Engineering from National Cheng Kung University. He is currently an Associate Professor in the Department of mechanical engineering at National Yang Ming Chiao Tung University.

翁俊仁先生為國立陽明交通大學光電工程研究所博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員。

Chun-Jen Weng received his Ph.D. in Electro-Optical Engineering from National Yang Ming Chiao Tung University. He is currently a Research Fellow at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

# 邁向智慧環境 AIoT 時代的利器 —晶圓級氣體感測器高效能點測系統

## High-throughput Wafer-level Probing System for Micro Gas Sensors, the Innovative Driver of AIoT Intelligent Environment

陳銘福

Ming-Fu Chen

世界首創「晶圓級氣體感測器高效能點測系統」，於晶圓階段即可測試氣體感測器 (感測晶片) 效能，且可同時測試多顆，不但大幅縮短檢測時間，且可提早於封裝前即查知每顆晶片的品質與分級，大幅降低封裝資源浪費；另外亦可回饋測試結果，據以改善製程，提高生產效能與品質。

環境空氣品質持續惡化，如何打造一具靈敏嗅覺之氣體感測器導入用戶生活週遭，以便能夠動態監測因應環境汙染問題，已成為近來各界共同關注的重要議題。根據產業研究機構 Yole Developpement 最新研究報告，預期於 2021 年全球氣體感測器市場可成長至 9.2 億美元的規模，其中又以智慧手持裝置與穿戴式裝置的成長幅度最大，台灣為半導體大國，對切入由半導體製程所製作的感測器市場具有絕對的優勢。

### 整合六大技術 世界首創檢測系統

氣體感測器必須加熱、通氣才能測試其感測效能，目前市面測試氣體感測器的方式只能將一顆顆感測晶片切割、封裝後，才能進行測試，耗時又浪費封裝資源。

國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心開發「晶圓級氣體感測器高效能點測系統」，則是在晶圓上製作出一格一格的晶片後、在尚未切割封裝前 (即晶圓階段)，即進行感測晶片之氣體反應電性量測，並整合「自動光學對位系統」、「線陣列探針點測裝置」及「精密定位移動平台」的核心技術，以「線陣列探針」進行多顆 (例如 10 顆) 晶片的測試，大幅提升測試速度！

氣體感測器進行量測時須先將晶圓加熱至該感測器晶粒的操作溫度 (例如 200 °C)，另某些氣體亦具有腐蝕性，所以探針點測裝置必須具備抗腐蝕設計及耐高溫或阻熱與導熱設計，且晶圓吸盤亦須考量加熱器不可產生電磁波而影響量測時的電性及維持吸盤表面高度形變量的平坦度。本設備之吸盤以隔熱材料配合機構與吸氣管道設計，使熱向上傳至晶圓吸盤表面，同時阻隔熱往下方的吸盤機構傳遞，維持吸盤平坦並降低吸盤模組之固定機構因熱膨脹產生高度變易而影響探針行程誤差，良好的隔熱設計亦可維持晶圓承載面的溫度穩定性及降低能耗。

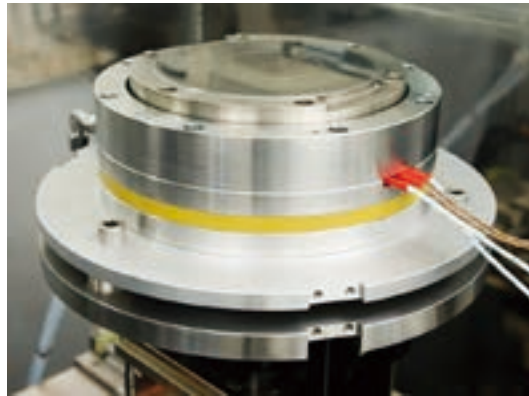


圖 1. 整合加熱裝置之晶圓吸盤模組實體圖。

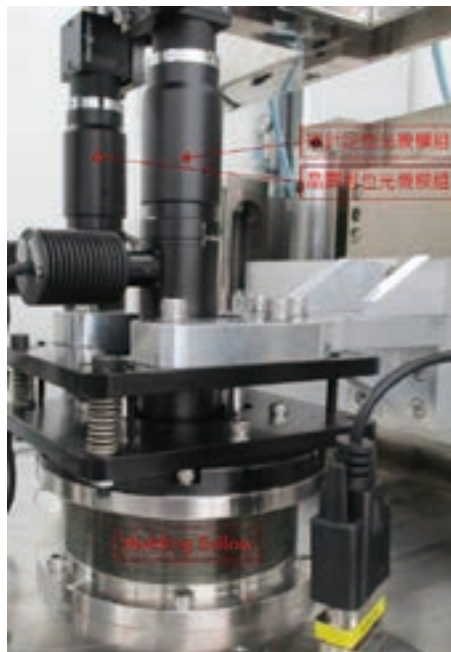


圖 2. 整合自動光學對位系統與探針點測裝置調校機構之實體圖。

此量測系統設備整合六大技術，包含可導入多種不同氣體成分及濃度氣體狀態之真空腔氣體供應系統、自動光學對位系統、線陣列探針點測裝置、整合加熱裝置之晶圓吸盤等新穎設計，並結合精密定位移動平台及電控與點測軟體等量測程序控制與系統整合測試成為具

有高效能之晶圓級氣體感測器的電性點測與品質分級的設備。目前設備已可使用於可感測  $H_2$ 、 $H_2S$ 、 $NH_3$ 、 $C_2H_5OH$  與  $CO$  等不同氣體成分的氣體感測器的電性量測，以  $1 \times 1\text{ mm}$  晶粒之 6" 晶圓 (約 17.6 K 顆) 為實例，可在 30 分鐘內完成電性量測 (點測 10 顆/次)，其點測效能為現有市售設備 (點測 1 顆/次) 至少 10 倍以上。

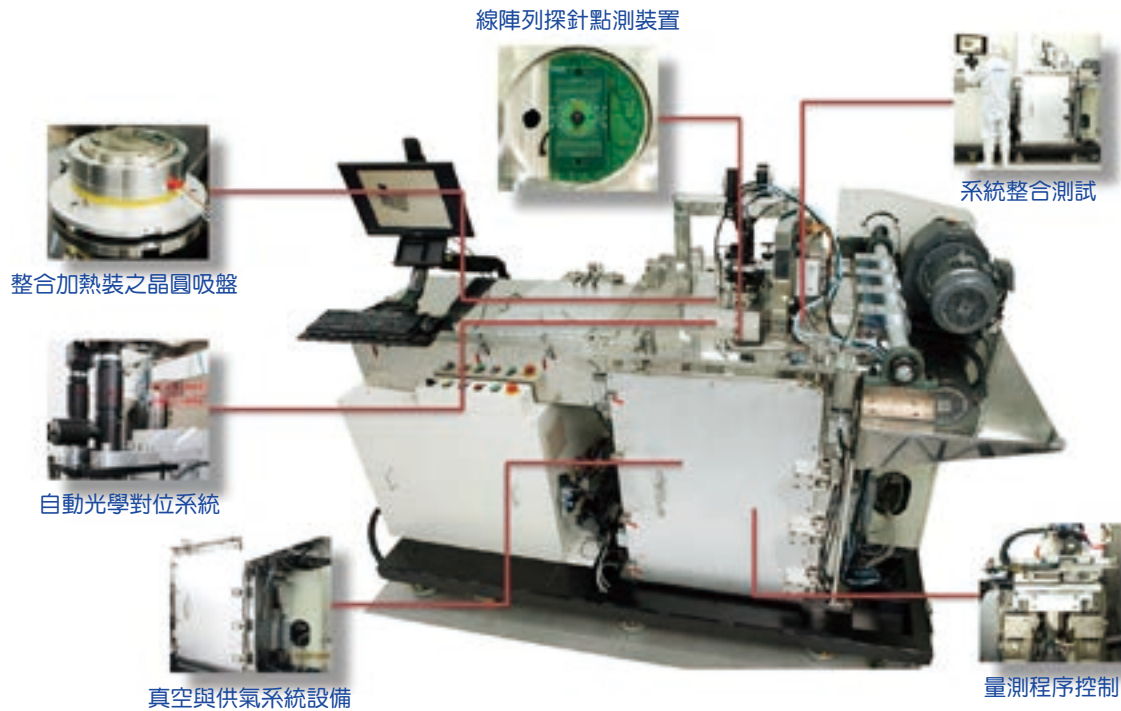


圖 3. 量測系統設備包含 6 大核心技術。



圖 4. 晶圓級氣體感測器高效能電性量測系統設備實體圖。

本量測系統設備可提供氣體感測器在晶圓階段進行符合實際感測環境下之高效能電性量測，不需完成封裝程序即可得知每顆氣體感測器之性能與品質，大幅縮短感測器開發的試驗週期，提高新產品開發效率。在生產應用方面，產品於晶圓狀態即可確認元件功能，可早期

篩檢出性能不佳的晶粒，避免其進入後續的封裝製程而造成資源與時間的浪費，並提高生產效能；亦可及早發現不良或不穩定產品的產出，以及利於快速的對製程與產線進行矯正，因此可有效地降低整體生產成本，增加產品競爭力。

在智慧環境 AIoT (AI + IoT) 時代，感測器扮演著舉足輕重的角色。國研院儀科中心運用高度整合的光機電及真空等技術所建置之創新高效能「晶圓級氣體感測器高效能點測系統」，將引領台灣廠商搶攻感測器市場，成為台灣邁向智慧環境 AIoT 時代的利器。

## 作者簡介

陳銘福先生為國立臺灣大學機械工程碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員兼任組長。

Ming-Fu Chen received his M.S. in the Department of Mechanical Engineering from National Taiwan University. He is currently a Research Fellow and Division Director at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.