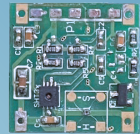
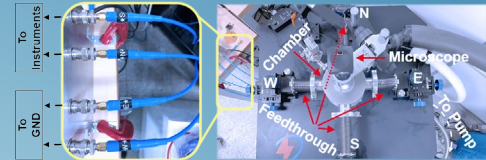
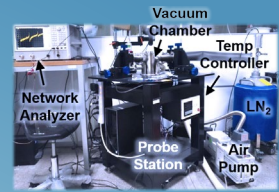


Instruments Today 2023 Q4

科儀新知



智慧微塵技術與應用觀測

Smart Dust Technology and Application Observation

【人物專訪】

財團法人三聯科技教育基金會 林廷芳董事長

237

ISSN 1019-5440

Mitutoyo

以精密量測技術貢獻社會

NEW
Products



▲ 座標測定機

更多詳細資料



光學尺 ▶



NEW
Products



◀ 現場型
座標測定機

輪廓形狀 ▶
及表面
粗度測定機



NEW
Products

NEW
Products



◀ 高精度CNC
影像測定機

測定工具 ▶



35th

傳承 創新 跨越

台灣三豐儀器
www.mitutoyo.com.tw

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

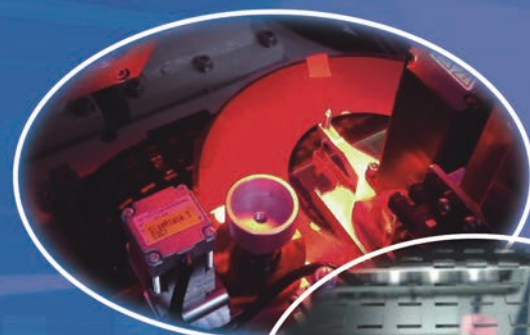
• 扇型封裝高精度黏晶機 Fan Out Die Bonder

• 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

東捷科技

研發、設計、生產一條龍
滿足各產業客戶需求

東捷科技以雷射技術為核心，致力於自動化、
檢測與雷射修補設備，跨足面板、半導體、PCB等領域。
近年來更切入 Mini / Micro LED 設備市場，為國內數一數二領導廠商！



完善服務網絡 服務據點在地化 維修保養 定期設備調校 客戶問題即時對應



全臺據點:新竹/臺中/臺南/高雄

總公司:臺南市臺南科學工業園區南科六路9號



+886-6-5051188



東捷科技股份有限公司
Control Control Technology Co., Ltd.

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



SYNTEC



LEANTEC



LINE

HIWIN®

實現您的智慧工廠

HIWIN 為工業 4.0 提供高附加價值的整體解決方案
全方位系列產品，實現您的智慧工廠。



關節式機器手臂
Articulated Robot



史卡拉機器手臂
SCARA Robot



晶圓機器人
Wafer Robot



晶圓移載系統
EFEM



智慧型滾珠螺桿
Intelligent 4.0 Ballscrew
智慧型線性滑軌
Intelligent 4.0 Guideway



諧波減速機
DATORKER® Strain Wave Gear
旋轉致動器
DATORKER® Strain Wave Gear System



RCH系列



RCV系列



RAS系列

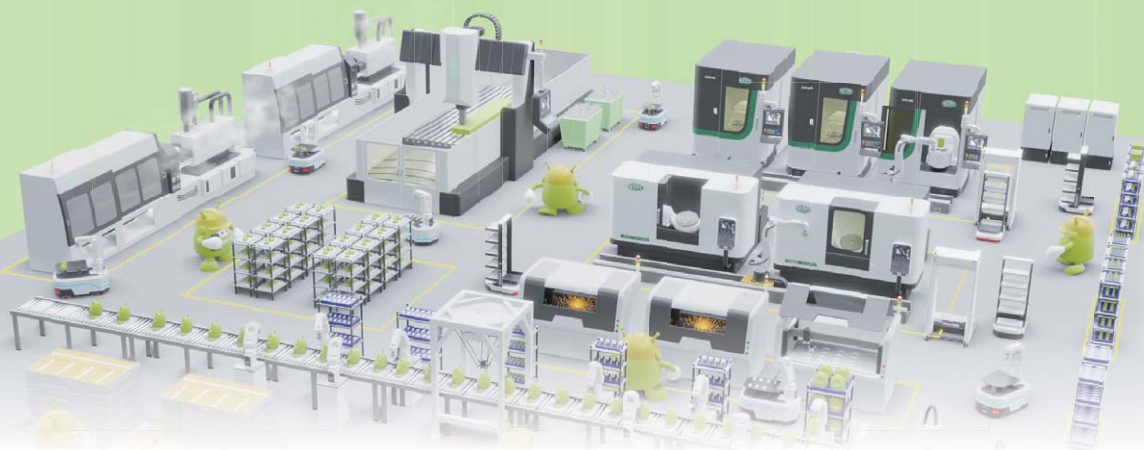


RAB系列

Torque Motor 迴轉工作台
Torque Motor Rotary Table



了解更多
HIWIN產品



全球營運總部

上銀科技股份有限公司
HIWIN TECHNOLOGIES CORP.
台中市40852精密機械園區精科路7號
Tel : (04) 2359-4510
www.hiwin.tw
business@hiwin.tw

關係企業

大銀微系統股份有限公司
HIWIN MIKROSYSTEM CORP.
台中市40852精密機械園區精科中路6號
Tel : (04) 2355-0110
www.hiwinmikro.tw
business@hiwinmikro.tw

全球銷售暨服務據點

德國 www.hiwin.de	日本 www.hiwin.co.jp	美國 www.hiwin.us	義大利 www.hiwin.it
瑞士 www.hiwin.ch	捷克 www.hiwin.cz	法國 www.hiwin.fr	新加坡 www.hiwin.sg
韓國 www.hiwin.kr	中國 www.hiwin.cn	以色列 www.mega-fabs.com	

全新七合一儀器合而為一

InfiniiVision 3000G X 系列示波器



3000G X 系列示波器一機抵多機，提供進行通用電子設計所需的一切功能。

它隨附各種軟體和探棒，並提供直方圖和區域觸控觸發等進階功能，以及 KeysightCare 技術支援，是研發階段進行除錯、低速串列設計和測試、電源完整性測試的理想選擇。



InfiniiVision 3000G X 系列示波器



選擇合適的探棒

免費客服專線：0800-047-866

© Keysight Technologies, Inc. 2023

 **KEYSIGHT**

台灣是德科技股份有限公司

Optics Development and Research Collaboration at TIRI



航太級鏡片拋光與檢測服務

航太級光學鍍膜客製開發

精密光學鏡頭(元件)客製設計與開發

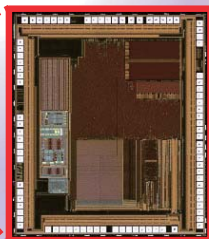
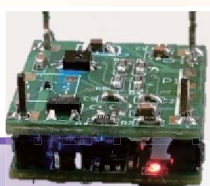
台灣儀器科技研究中心
Taiwan Instrument Research Institute

智慧微塵感測器技術研發服務平台

Smart Dust Sensors R&D Services

智慧微塵感測器技術研發服務平台為國內少數從研發、量測、測試到試量產的全製程服務平台，可讓學術界專注於感測元件與材料開發，加速接軌場域與產業應用，提高前瞻感測材料研發進程。

元件製程 ... QC品質管理 ... 測試驗證



感測器元件公板模組 (公板 ASIC 晶片開發)

公板規格 Specifications

- 尺寸：17 mm x 17 mm
- 規格：ADC 16 - 24 bits、更新率~300 K/s、感測器訊號讀值誤差 < 1%、功耗 < 30 mW (無加熱器)
- 感測元件介接條件：電阻值 1k ~ 5M ohm
- 五大功能：
 - (a) 感測器數位訊號擷取、(b) 供應電壓調節功能、
 - (c) 溫溼度偵測數值輸出、(d) 溫度自校正功能、
 - (e) 運算整合輸出



感測器晶片與模組篩選

可提供服務項目 Services

- Good Die 篩選 (max. to 6")：Wafer type (4" and 6")、Die type
- 市售無毒、無腐蝕性氣體
- 客製化點測電路與探針卡開發

註：1. 無激發晶片用之反應光源
2. 若為加熱型晶片，需自備加熱電路
3. Wafer type 可同時點測多顆，Die type 單次只可測一顆



標準氣體量測與驗證

可提供服務項目 Services

- 模組標準化測試流程
- 測試氣體：CO、CO₂、NO、NO₂、SO₂、H₂S、NH₃、TVOCs
- 偵測濃度範圍從 ppb 至 ppm



整合臨場極淺層薄膜分析之六吋叢集式 ALD/ALE 平台

6" Cluster ALD/ALE Platform Integrated with *in-situ* XPS Analysis

➤ 簡介 Introduction

隨著製程微縮技術發展，薄膜表面佔其厚度比例逐漸提高，大氣污染對量測造成影響也愈來愈大，特別是在大氣環境下易反應的薄膜材料。因此，減少晶圓製造過程中樣品表面遭受大氣汙染為製程分析正確性之關鍵，故需進一步透過整合製程模組及分析模組來達成。

➤ 特點 Features

本系統涵蓋六吋 ALD/ ALE/ RTP/ XPS 等模組，可達成不須破真空之元件連續製程與即時分析。可應用於開發新穎低溫金屬、無氧薄膜 (氮化物、氟化物)、連續元件製程。

➤ 可提供服務 Services

學研界對於前驅物材料之 ALD/ALE 鍍膜測試 / 產業界製程參數的調變測試與驗證 / 各界客製化的真空腔體設計與系統整合服務。

➤ 規格 Specifications

Tool	Spec.	Materials
PEALE	400°C, Ar, CF ₄ , O ₂	Al ₂ O ₃ , ZnO, SiO ₂
Oxide PEALD	450°C, Ar/O ₂ plasma, O ₃	Al ₂ O ₃ , HfO ₂ , ZrO ₂
Nitride PEALD	450°C, NH ₃ , N ₂ H ₄	AlN, TaN
Rapid Thermal Processing (RTP)	900°C, forming gas, H ₂	Annealing
X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)	<i>in-situ</i> analysis	Thin film



2024 國研盃 智慧機械競賽

學生競賽國內賽
ASME Taiwan SPDC



[競賽項目]

① Student Design Competition 學生設計競賽

題目 | Robot Mini Golf

② Old Guard Oral Presentation Competition 演講競賽

題目與機械相關即可，英文演講 10 分鐘，無即席問答。

[競賽獎項與獎金] 主辦單位保留依報名狀況調整獎項名額之權利

① 學生設計競賽

第一名 50,000 元 / 第二名 25,000 元 / 第三名 15,000 元
最近洞口獎 (第 2 洞) 5,000 元 / 最佳系統設計獎 5,000 元

② 演講競賽

第一名 10,000 元 / 第二名 5,000 元

[報名時間與方式]

報名時間 | 即日起至 2024 年 3 月 2 日截止。

報名方式 | 線上報名網址 <https://www.tiri.narl.org.tw/ASME>



[競賽時間]

2024.03.16

[競賽地點]

國立清華大學
工程一館

| 主辦單位 |

美國機械工程師學會 台灣分會
國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心

| 承辦單位 |

美國機械工程師學會 清華大學學生分會
美國機械工程師學會 中山大學學生分會
美國機械工程師學會 臺灣大學學生分會
美國機械工程師學會 陽明交通大學學生分會

[聯絡資訊]

ASME 學生競賽 (SPDC) 國內賽

· 總召 / 江鎮宇 email : 104204bert@gmail.com

· 副召 / 劉軒愷 email : lesterliou@gmail.com

劉京榕 email : gino256abc@gmail.com

詳情請上 Facebook 搜尋

f ASME SPDC 台灣國內賽 | 搜尋



科儀新知

INSTRUMENTS TODAY 季刊

中華民國 112 年 12 月 30 日出版



封面說明

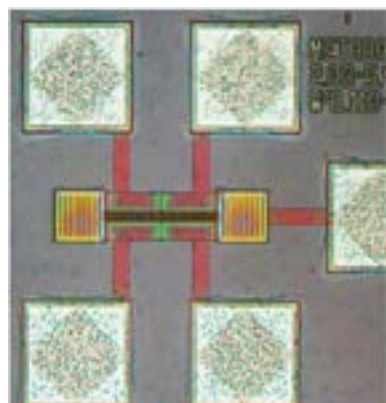
為強化自主感測器技術研發量能、感測元件模組國產化，儀科中心建立「智慧微塵感測器技術研發服務平台」，提供感測器元件 Good Die 與模組篩選點測，藉以確定感測器初始效能，可客製化 Wafer type 及標準公規 Die type (下圖)。除此之外，亦開發微塵感測器公板，提供學術界進行界接使用 (右上圖)。本次專題亦介紹一創新技術，使用基於調諧質量阻尼結構之多維度諧振器做為質量感測元件，以此來達成更高的感測靈敏度。相較於一般電路元件，微機電共振器具有較高的品質因子，適合作為頻率、時脈參考元件，或利用其頻率對特定物理量的變化來製作共振式感測器。為了達到高品質因子，國立臺灣大學李尉彰教授團隊協同國內廠商開發製作的共振器量測探針台，除了可以提供低壓的量測環境外，亦可透過液態氮及溫控設備進行升降溫量測。(左上圖)

-
- 發行人：潘正堂
 - 諮詢委員：吳文桂、陳力俊、關志達、蔡定平
 - 客座主編：陳永裕
 - 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
-



19



35

人物專訪

- 4 財團法人三聯科技教育基金會－林廷芳董事長
不要浪費一場好的危機
林麗娥

智慧微塵技術與應用觀測

- 11 「智慧微塵技術與應用觀測」專題介紹
陳永裕

- 13 以氧化銦奈米磚為基礎之手機操控可攜式半導體式臭
氧感測器
徐子軒、洪承彬、王大輔、蘇暉中、孫揚喆、劉承恩、林鶴南

- 24 基於調諧質量阻尼之微機械質量感測器
杜文睿、劉嘉仁、陳庭毅、李尉彰

- 37 一氧化氮氣體感測器與其電路模組之應用
邱俊瑋、洪瑞華

- 54 研究金奈米粒子吸附氧化鋅奈米結構之甲醇氣體感測
器特性
朱彥霖、李韋宏、楊勝州

- 66 設計微機電加熱器熱分析模擬與驗證
黃柏銘、蕭育仁

科儀專欄

- 78 氣體稜鏡技術應用於氣體折射率量測
杜星旻、韋安琪、施至柔

- 97 提升遙測衛星成像品質的秘密－開箱全臺灣唯一的大
口徑非球面鏡
陳柏荔、林麗娥、魏崇倫、莊子右

INSTRUMENTS TODAY

December 2023

People

- 4** **Mr. Tim F. Lin, Chairman of Sanlien Technology Education Foundation**
Never Let a Good Crisis Go to Waste.
Claire Lin

Special Issue: Smart Dust Technology and Application Observation

- 11** **Special Issue Introduction of "Smart Dust Technology and Application Observation"**
Yung-Yu Chen

- 13** **Indium Oxide Nanobrick Based and Smart Phone Operated Portable Semiconductor Type Ozone Gas Sensor**
Tzu-Hsuan Hsu, Cheng-Bin Hung, Da-Fu Wang, Wei-Chung Su, Yang-Che Sun, Cheng-En Liu, Heh-Nan Lin

- 24** **A Tuned Mass Damper Based Micromechanical Mass Sensor**
Wen-Ruei Du, Jia-Ren Liu, Ting-Yi Chen, Wei-Chang Li

- 37** **Application of NO Gas Sensor with Circuit Module**
Chun-Wei Chiu, Ray-Hua Horng

- 54** **Investigation and Characterization of Methanol Gas Sensor for the ZnO Nanostructures with Adsorbed Au Nanoparticles**
Yen-Lin Chu, Wei-Hong Li, Sheng-Joue Young

- 66** **Design of Microelectromechanical Heater Thermal Analysis Simulation and Verification**
Bo-Ming Huang, Yu-Jen Hsiao

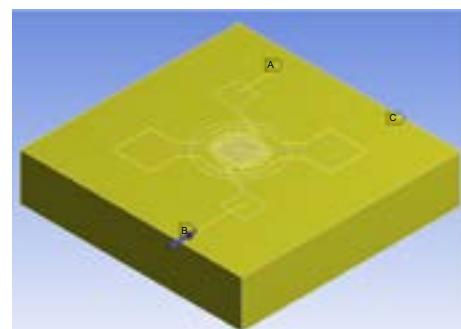
Column

- 78** **A Novel Gas-prism Applied on the Inspection of Gas Refractive-index**
Hsing-Min Tu, An-Chi Wei, Jyh-Rou Sze

- 97** **The Secrets of Improving Image Quality of Remote Sensing Satellites Unboxing the Only Large-diameter Aspherical Lens in Taiwan**
Po-Li Chen, Claire Lin, Chong-Lun Wei, Tzu-Yu Chuang



47



74



財團法人三聯科技教育基金會

林廷芳 董事長

不要浪費一場好的危機

Never Let a Good Crisis Go to Waste.

撰文：林麗娥

協助巴黎聖母院浴火重生的感測器，
外銷到日本、東南亞、美國多個國家的「地震預警與速報系統」，
都是出自於臺灣環境監測第一品牌：三聯科技。

臺灣這塊不算太大的土地上，孕育出許多全球性或區域性市場領袖地位的中小型企業。時光倒轉到對臺灣經濟成長扮演重要角色的十大建設，其施工監控、地震監控也都可以看到三聯科技的身影。《科儀新知》237期特別為讀者規劃可探測周圍諸多環境參數，能夠收集大量數據，進行適當計算處理，應用於農業、軍事、健康醫療、環境監測的「智慧微塵技術與應用觀測」專題。本期「人物專訪」特別邀請到財團法人三聯科技教育基金會、勤美集團的林廷芳董事長。讓讀者了解臺灣長青科技企業的韌性與發展過程，如何在地營運，進行全球化長期佈局。

成立於 1967 年的三聯科技，多年以來仍然維持每週一早上的 8:30 的週會。《科儀新知》適逢與林廷芳董事長約訪週一的上午，在會議室門外稍作等候的我們，聽到林董事長正提醒、勉勵同仁執行工作不忘三聯科技的使命 (mission statement)：「協助人類了解環境」。正式開始訪問後，林廷芳表示：「由於我現在還是三聯科技教育基金會董事長，過一段時間還是會再提醒一下同仁，我們是透過監測來了解我們的自然環境、工作環境，以提高人類生活居住的安全與品質，所以不要忘記公司的使命，而且要提供 real data，這樣公司產品才會受到信賴。」作為聚焦於感測、監測產品和服務的長青企業，產品服務受到世界各地的信賴，的確其「有所值，來自有所堅持」。

不要浪費一場好的危機

三聯的故事要從林廷芳的父親—三聯科技的創辦人林榮渠董事長說起。林廷芳從小看著父母為了創業奔走忙碌，父親在創辦之前曾在台電服務長達 15 年，工作表現優異，還當到台電機電科科長。當時的水力發電廠都遠在深山、交通也不方便，出差往返經常不在家，父親擔心這樣下去會影響小孩的學業，於是在朋友的鼓勵下，成立了三聯科技，以配電盤製造、電氣安裝、代理儀器為主。當時林廷芳才 10 歲，開玩笑地說到：「所以我很小就當童工，在家裡幫忙鎖螺絲、擺配電盤。」

林廷芳分享到，三聯科技創立以來，一路上面對的危機、困難，可比喻為族繁不及備載，印象比較深刻的是，第一次的經營危機是發生在 1973 年的石油危機。當時因為中東地區戰事連年，導致石油價格暴漲，很多接單都因為原物料上漲而做不下去。有些公司為了節省成本都會偷工減料，像是採用次級品或使用較細的銅線來渡過難關，父親堅持誠實的理念，不願採用這些方法，就把相關部門收掉不做。有鑒於工程監測對製造品質的重要性，公司決定由電力工程轉到貿易商的角色，開始引進、代理各項監控及精密儀器。

林廷芳表示，就如同凱因斯理論：政府在經濟衰退時會提出各種政策刺激需求，以達到減緩失業、經濟復甦的目的。當時政府在石油危機爆發後的兩個月，宣布推動「十大建設」以刺激經濟發展。當時許多重大土木工程都需要感測監控技術，以驗證工程設計正確性與監控施工的安全性，三聯科技接到政府的「水庫工程監測」。當時林廷芳申請上美國加州大學柏克萊分校，準備出國讀書。柏克萊的教授 Carlson 博士 (Roy W. Carlson) 告訴他：「學校永遠會在。你可以參與到工地從第一塊石頭 (the first rock) 到完成，這機會太難得了。」於是林廷芳回到臺灣，從翡翠水庫開始，逐漸建立了自己的土木、精密機械的專業監測技術團隊，一路到德基、石門、曾文等水庫，核一、核二與核三廠，雪山隧道甚至連中油 LNG 液化儲氣槽、台塑六輕油槽等，其施工監控、地震監控，都是由三聯科技所提供。

實際上在臺灣經濟起飛前，整個臺灣經濟環境並不好，第一次石油危機、當時還受到中日斷交、退出聯合國、中美斷交等國際情勢的影響，當時臺灣要進口儀器設備，黑市還喊價到 40 幾塊台幣兌換 1 美元。林廷芳表示：「創業真的是一件很辛苦的事情，那時候為了發薪水，跟著父親去了當舖好多次。」讓林廷芳印象深刻、第二次的發展困難，也是受到 1979 年第二次石油危機所影響，石油對臺灣而言就是「成本」，進口石油的價格大幅飆漲，企業整體成本就會立刻飆升，就會影響到三聯科技的營運穩定與表現。

第三次的發展困難是發生在 1995 年李登輝總統訪美引爆的台海飛彈危機，當時半導體產業逐漸興起的趨勢下，三聯決定與日本多摩化學 (TAMA) 合作，在臺灣成立多聯科技公

司。只是當時兩岸情勢緊張、日本甚至還準備撤僑，在努力溝通協調與信心建立的機制下，與多摩化學談成 50% 對 50% 的投資比例，跨國合作成立專業化學廠，主要提供半導體產業與光電產業高純度品質特用材料，使三聯科技再度跨向新的領域，更加往國際發展。而第四次印象深刻的經營困難，則是 1999 年臺灣發生 921 大地震之後，協助政府臺南科學園區標準廠房的新建工程。由於對南臺灣地方「地緣性」的不熟，在打通關係了解行情上，費了不少功夫。

英國前首相邱吉爾 (Winston Churchill) 有句名言：「不要浪費掉一場好的危機」(Never let a good crisis go to waste.)。林廷芳分享三聯科技從創辦到經營的每次轉折與蛻變，異曲巧妙地表示：「每一次危機裡都潛藏著機會，不要浪費掉每次危機，面對陽光就不會看到陰影，要努力讓它成為轉機。」三聯科技的發展無疑是臺灣工業發展史的縮影－「用監測儀器與技術做記錄：為科技作見證、為工業寫歷史」。

實測臺灣場域，保護家園，行銷國際

林廷芳表示三聯開始有自研自製地震預警系統的念頭，主要是來自 921 大地震，那一夜間，震碎了許多人的家園。林廷芳感慨地說道：「在臺灣平均每年 4 萬次地震、3.6 個颱風，還有數不完的土石流，我們避也避不掉，卻連自產的地震儀、氣象儀都沒有，全都仰賴進口。」基於愛護臺灣這片土地的使命感，三聯著手投入經費進行研發「地震預警與速報系統」。先是投入以 MEMS 為基礎之地震緊急遮斷開關，2009 年起與國立臺灣大學地質系吳逸民教授進行產學合作，再比對全世界八百筆強震資料，研發出「Palert 地震 P 波感測器」，並於 2010 年起正式投入量產與設置台灣地震 P 波預警觀測網。2013 年與中央氣象局地震測報中心主任郭鎧紋合作，簽署區域地震資訊傳遞服務，搶在地震 S 波來襲前 8 到 30 秒就先預警，讓人民可以先關掉瓦斯、開門、躲在桌下躲避地震，而產業更因此可預先切斷一切可能受災的閥門以降低損失，台灣是全世界繼日本之後有地震預警服務的國家。臺灣本身就是很好的驗證場域，加上 ICT 產業強大，三聯科技將臺灣先天地理環境位置的劣勢轉化成優勢，積極研發出地震預警系統，被全世界廣泛地採用。



臺北捷運採用三聯科技「pALERT F330 力平衡地震 P 波監測儀」，進行地震預警防護。

臺灣企業普遍的困境：國人對本土品牌沒有信心

三聯科技做出第一個國產地震儀後，正式從儀器代理轉入製造、研發。2012 年取得 TAF 認證的振動校正實驗室，為三聯自產的地震儀提供校正服務及國際認證保證。單是 2012 年就售出多達兩、三百部地震儀，客戶遍及日本、瑞士、新加坡與中國，甚至韓國的高鐵也採購了三聯的地震儀，也協助政府進行科技外交，捐出許多台系統到印尼、印度、尼泊爾、不丹等國家。

反觀在臺灣本土市場占有率就相對沒有這麼高，很多機關團體自國外採購的地震儀、氣象儀，往往都沒有 TAF 認證過。國人普遍對本土品牌沒有信心，很多 MIT 品牌都是到國外打拼後才紅回臺灣，甚至要到國外設立公司，產品貼上「made in USA」、「made in Germany」，國人才會買單。

林廷芳也與我們分享，三聯科技也為高科技廠房進行震動量測。臺灣有很多大廠的結構都是以鋼筋為主，安全性足夠，但是韌性不足。像是半導體晶圓製作、光學元件模組鏡面加工等等，會受到環境的振動，而影響到設備機能的表現及產品的良率。好比軍人過吊橋的時候不能踢正步，因為士兵邁正步走的頻率如果與大橋的固有頻率一致，橋的振動加強，當它的振幅達到最大，以至超過橋樑的抗壓力時，橋就會斷裂。半導體等科技業由於大多使用精密的儀器或設備，對於環境的震動要求極高，使用者雖然感覺不到環境的微小震動，但卻會反應在產線機台或產品品質上。在三聯科技震動監控與設定警報的機制下，協助許多產業進行裝機環境的改善。



三聯科技為高科技廠房提供震動量測服務，改善裝機環境強化產品良率。

傳承與溝通，在長期與短期利益之間找到平衡點

訪問席間，三聯科技現任董事長林大鈞也一起進入會議室接受訪問。林大鈞是在 29 歲 (2017 年) 那年，從創業的祖父林榮渠手中接下董事長職務，是企業第三代接班人，而林廷芳當時擔任總經理，罕見的父子檔總董座搭配組合，還成為政大企家班教授司徒達賢的教學案例。當《科儀新知》的編輯問到：「要經營延續並擴大家族企業並不容易，父子間如果遇

到經營想法不同時，是如何進行溝通、協調？」父子倆相視而笑：「就一起喝個酒」，林廷芳繼續解釋說：我們最常溝通的就是長期利益與短期利益的問題。兩者利益經常是衝突的，有時急事緩辦、事緩則圓，所以盡量在長期與短期利益間找到平衡點。加上公司的人力、時間、資源都有限，不可能同時實施這麼多專案，須先排出優先順序 (priority)，同時掌握內外環境的變動，隨時滾動式調整策略走向。



三聯科技祖父孫三代，從第一代紮根、第二代版圖拓展，第三代鏈結國際，逐步建立全球檢測事業版圖。

以賽代訓，知己知彼，屢創佳績

林廷芳不僅在商場上是位成功的企業家，過去還曾經代表國家參加 1980 年美國寧靜湖奧運冬季滑雪與射擊兩項競賽。「從運動競賽中讓他體悟到兩件事：一個是自律、另一個是學會放手」。了解自己不是體育專科生，所以比選手還要更加勤奮練習、加上外文能力相對好，所以就會主動搜尋很多國外選手比賽的資訊與經驗，才得以打敗許多體專學生。這樣的自我要求的自律，也維持到現在，每天約清晨 5 點起床，會固定快走或跑步 5 公里。而現在從選手變教練，「換了位置，當然要換腦袋，當了教練就不可能再去當選手。好比籃球比賽，不管比數如何，都要讓板凳球員下場，讓他有磨練的機會，想辦法讓員工成長得比你更快。」他的方式就是幫員工找比賽，以賽代訓，像是人事部就讓他去申請人事管理競賽、管理部就讓他去申請國家磐石獎，效果往往比老闆天天碎念員工進步得更快。



林廷芳自 1980 年美國寧靜湖 (Lake Placid) 冬季奧運回來後，受當時的行政院院長孫運璿親自接見。

三聯的未來：建立與氣候變遷相關的全球檢測事業版圖

林廷芳用詼諧的方式比喻公司的轉型，從配電盤轉到儀器代理商，「我們賣的儀器都很好，就像大同電鍋一樣，都不會壞，還可以傳承三代，所以獲利很低」。轉到土木工程將儀器搬到現場檢測，施工現場環境嚴苛非常辛苦，「不然來賣米好了」，於是開始賣起化學材料。老是做儀器代理商，沒有自己的東西，常常代理權還會被拿走，自己做儀器來保護自己的家園，這樣更扎根。

林大鈞表示：「凡是和環境監測、氣候變遷相關的傳感器都是我們關注的領域」。三聯科技早在 2018 年就布局歐洲，因聯合國巴黎協定納入氣候變遷考量，讓三聯決定攜手法國夥伴 OSMOS 併購義大利最大的氣象儀器公司 SIAP，該公司儀器經聯合國世界氣象組織 (World Meteorological Organization, WMO) 認定，且取得不少國際標案，透過併購，擴大三聯的世界影響力。2022 年則是在美國設立子公司，爭取全球訂單。林廷芳補充說明，三聯科技對與相關產業的併購有敏銳的雷達，原因在於這一代的企業接班與父親那一代有很明顯的不同。父親那一代都生很多小孩、兄弟姊妹很多，像是林廷芳就有七個叔叔、六個阿姨，公司的經營都是依照家族的成員所學專長來分配。「商科畢業就去管錢、會開車的就去當司機、工科的就去研發」，甚至發展出許多家族關係企業。發展到第二、第三代比較晚婚、家裡小孩都生得少，經常碰到企業接班後繼無人或者第三代不想接手，但是這些企業都擁有技術，像是三聯所併購的義大利 SIAP 公司，就是因為家族沒有人願意接續經營，真正的傳承不僅僅是公司管理權、財務的傳承，更多是人脈的傳承。併購公司讓三聯站在巨人的肩膀上，可以發揮更大的影響力。

三聯的下一步將為各地的橋梁結構進行健康檢查。林廷芳以社會對醫生的需求作比喻，過去二次大戰後的嬰兒潮，婦產科最受歡迎，現在則是長照科 (長期照護科)。不僅人口老齡化、許多建築也老齡化了。臺灣因為地形關係，大小橋梁約有 2.8 萬座，不可能全數進行廢除或改建。唯有透過科技技術進行量測與分級。因此，三聯科技為老舊的橋樑、建築物提供結構健康監測系統 (structural health monitoring, SHM)，能夠收集實時數據，實現實時評估和分析。以振動測量技術，持續監測和診斷橋樑的健康狀態。有安全問題的老舊橋梁，立即改建。以主動的方法使得潛在問題能夠及早檢測，並進行必要的維修或修復，減少重大故障的風險，以確保橋樑基礎設施的安全性。



三聯科技為金門大橋進行結構健康監測系統 (SHM)。

「智慧微塵技術與應用觀測」 專題介紹

Special Issue Introduction of “Smart Dust Technology and Application Observation”

客座主編－陳永裕教授

大同大學機械與材料工程學系

「智慧微塵」是讓具備感測、運算、通訊等功能的無線感測器，縮小成如同約沙粒或塵埃的體積，用以檢測如氣體、溫度、振動等。可大量佈建在實際應用場域中，進行資訊偵測、蒐集、傳遞與處理等作業。目前在軍事、農業、環境保護、醫療等領域已有應用案例，然廣泛應用仍有技術、成本等課題待解決。緣此，本期特別推出「智慧微塵技術與應用觀測」專題，著重探討氣體感測器的發展狀況及應用面。搭配專題內容，亦特別邀請財團法人三聯科技教育基金會－林廷芳董事長擔任「人物專訪」受訪嘉賓，讓讀者了解臺灣環境監測第一品牌：三聯科技，是如何從儀器代理轉入製造、研發，製作地震預警系統，被全世界廣泛地採用。

目前氣體感測器主要分為半導體氣體感測器、電化學氣體感測器、固態氣體感測器、觸媒燃燒式氣體感測器等型式。本期收錄了三篇半導體氣體感測器的技術應用與發展，包含國立清華大學林鶴南教授團隊：「以氧化銦奈米磚為基礎之手機操控可攜式半導體式臭氧感測器」，以低溫化學製程製作氧化銦奈米磚，對臭氧感測具有高靈敏度，可大量生產且成本低廉，並自製可用於環境氣體監測的手機操控可攜式半導體式氣體感測器；國立陽明交通大學洪瑞華教授團隊：「一氧化氮氣體感測器與其電路模組之應用」，開發一氧化氮氣體感測器，具有響應高、反應快、成本低和體積較小的優勢，目前主要用於廢氣環境監測，未來可望將低濃度一氧化氮應用於偵測氣喘等醫療應用；聯合大學楊勝州教授「研究金奈米粒子吸附氧化鋅奈米結構之甲醇氣體感測器特性」，以簡單的水熱法過程與直流濺鍍系統，成功製備出金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱於氧化銦錫玻璃基板上，製作為氣體感測元件，進一步證實金奈米粒子不但可以有效地提升感測器的靈敏度，也增強了對感測元件的穩定度。

在技術創新方面，國立臺灣大學李尉彰教授團隊有別於傳統諧振式微機械感測元件如懸臂樑結構，發展「基於調諧質量阻尼之微機械質量感測器」，將調諧質量阻尼的概念實現於微機械製程中，在兩端固定樑上方建構調諧質量阻尼器，並應用於質量感測器，以此來達成更高的感測靈敏度。南臺科技大學蕭育仁教授「設計微機電加熱器熱分析模擬與驗證」，則是著重在底部式微型加熱結合氣體感測應用之微型加熱器的設計與製造，以確保感測器的工作溫度可以上升到所需的工作範圍，並確保其可靠性。

智慧微塵在整個網路資訊整合，可視為一種終極的物聯網，然而要實現微塵感測器網路的宏圖，核心技術還是要製造出單個微塵。期望在本期作者群深入淺出的介紹下，激發讀者新的研究想法與方向，進而促進臺灣在感測元件模組的國產化，建立自主感測器技術能量。

以氧化銦奈米磚為基礎之手機操控可攜式半導體式臭氧感測器

Indium Oxide Nanobrick Based and Smart Phone Operated Portable Semiconductor Type Ozone Gas Sensor

徐子軒、洪承彬、王大輔、蘇暉中、孫揚喆、劉承恩、林鶴南

Tzu-Hsuan Hsu, Cheng-Bin Hung, Da-Fu Wang, Wei-Chung Su, Yang-Che Sun, Cheng-En Liu, Heh-Nan Lin

本研究敘述對臭氧感測具高靈敏度之氧化銦奈米磚合成，及手機操控可攜式半導體式氣體感測器建構。氧化銦奈米磚以低成本化學製程製作，在紫外光活化模式，對 O_3 感測電阻變化靈敏度達 22.7 ppm^{-1} ，最低偵測極限為 1 ppb ，對 NO_2 感測靈敏度約為 8 ppm^{-1} ，兩者比值約 $1:0.35$ ，對其他氣體則極低。將氣體感測器架於空品監測站進行機器學習，以感測晶片電阻及環境溫濕度作為輸入值，以測站真實濃度作為目標值，並建構人工神經網路運算來預測濃度，在 $1 O_3 + 0.54 NO_2$ 作為目標濃度值，決定係數 R^2 可達 0.48 。

This work describes the synthesis of highly O_3 sensitive indium oxide nanobricks and the construction of a smart phone operated portable semiconductor type gas sensor. The indium oxide nanobricks are synthesized by a low-cost chemical process. Under UV-activated sensing, a resistance change sensitivity of 22.7 ppm^{-1} and a lowest detection limit of 1 ppb for O_3 sensing are obtained. The sensitivity is around 8 ppm^{-1} for NO_2 and the sensitivity ratio is around $1:0.35$. The sensitivities are significantly lower for other gases. The gas sensor is deployed in an air quality monitoring station for machine learning. The chip resistance, the temperature, and the relative humidity are taken as the input values, and the station concentrations the target values. An artificial neural network algorithm has been developed to predict the concentration. A coefficient of determination R^2 of 0.48 has been obtained when using $1 O_3 + 0.54 NO_2$ as the target concentration.

一、簡介

隨著科技日益發展，許多環境相關問題也逐漸浮現，其中空氣品質是人類關注的重要議題之一。世界衛生組織於 2021 年提出的報告中指出⁽¹⁾，幾乎全球所有人口呼吸的空氣，都超過世界衛生組織的空氣品質準則值，並導致每年有數百萬人死於室內及室外的空氣汙染。

在污染性氣體中，臭氧是較易產生且危害性的主要氣體之一。不過高空平流層中的臭氧具有保護作用，而地表對流層中臭氧則會危害人體健康。環境中的臭氧並非是人為直接排放，而是二次污染物，其產生過程如圖 1 所示⁽²⁾，主要是由工廠或車輛所排放的氮氧化物或有機揮發物，再經由光化學作用而產生。長期接觸臭氧或氮氧化物，皆會導致肺部和呼吸系統的損傷，包括氣喘、肺功能下降、支氣管炎和肺纖維化等^(3, 4)，更有研究指出，接觸過量臭氧或二氧化氮等污染物也會增加冠狀病毒感染的風險，對全球公衛造成嚴重影響⁽⁵⁾。

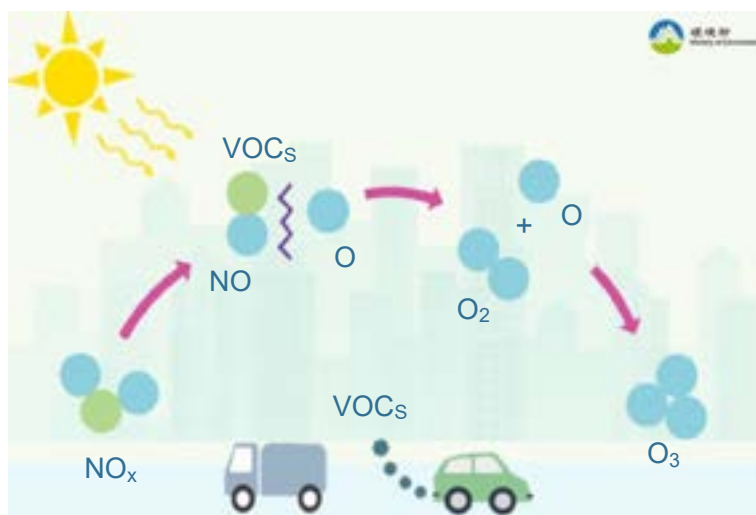


圖 1. 人為排放污染物經光化學作用產生臭氧之示意圖 (取自環境部網站⁽²⁾)。

臭氧對人體的危害取決於暴露時間、濃度及個體敏感程度。一般室內環境的臭氧濃度為 10–30 ppb，而環境部訂定的室內標準為 60 ppb。當暴露在濃度為 120–500 ppb 臭氧時，會使肺部受損、咳嗽，並讓呼吸道對過敏原更加敏感；當暴露在臭氧濃度 500 ppb 以上，會開始出現眼睛、呼吸道、頭部、胸部等器官疼痛且不適；暴露在 10 ppm 的臭氧便會引發肺水腫與急性支氣管炎⁽⁶⁾。

目前環境部於各個縣市及重點區域皆設有空氣品質監測站，然而所使用氣體監測儀器皆由國外進口，雖能準確監測各種複雜的污染性氣體，但其體積龐大且價格不菲，且需有空調設施，因此只能少量佈建，無法滿足民眾對於空氣品質資訊的需求，也無法守護民眾健康。而較低價的小型氣體感測器，或因靈敏度不足，或因無法在台灣的高濕度 (80% 以上) 環境正常運作，目前並無應用於戶外空氣品質監測。因此若是能由國內生產可於戶外運作的小型低成本氣體感測器，便能實現環境空氣品質監測物聯網，達成守護國人健康的目的。

常見的氣體感測器中，半導體式 (或稱作化學電阻式) 是戶外氣體偵測的最佳選擇^(7, 8)，常見的感測器材料為金屬氧化物奈米材料，如氧化鋅、氧化銦、氧化鎢、氧化錫等⁽⁹⁾，這些奈米材料如奈米粒子、奈米柱、奈米線、奈米管等等，由於具高表面積對體積比，因此對目標氣體具高靈敏度。

本研究成長氧化銦奈米磚 (nanobrick) 於大面積基板上，並應用於臭氧氣體感測。此外結合紫外光發光二極體感測模組，搭配控制電路及無線通訊模組，形成一台可攜式半導體式氣體感測器。經由無線通訊模組連接手機，並利用應用程式記錄感測晶片電阻變化，便可得知周圍環境的臭氧濃度。

二、奈米材料應用於氣體感測

1. 氧化銦奈米材料

氧化銦是一種 n 型的半導體材料，具有無毒、高電子遷移率及高穩定性等特點。近年來，許多研究致力於氧化銦奈米材料的應用與發展，不同尺寸及奈米結構相繼被發表，如奈米柱、奈米管、奈米磚及奈米纖維等等^(10, 11)，使得氧化銦奈米材料有潛力成為商用氣體感測材料。

2. 氣體吸附機制

當材料暴露於活性氣體時，氣體分子會吸附於材料表面，並可分為物理及化學吸附。物理吸附是由分子間的凡德瓦力 (van der Waals) 所導致，不會破壞化學鍵，吸附能較小，因此只要提升些許溫度，氣體分子便能脫附。而化學吸附則是氣體與材料表面產生電荷轉移，會有化學鍵的變化，故吸附能較大，氣體分子較難脫附。半導體式氣體感測器即是測量活性氣體產生化學吸附後，感測材料的電阻變化，進而得知氣體濃度。

氣體可分為氧化性及還原性氣體，當氧化性氣體 (如氧氣、二氧化氮、臭氧等) 吸附於 n 型半導體表面時，氣體分子會奪走半導體材料的電子，導致電子空乏區 (electron depletion layer) 擴大⁽¹²⁾，提高材料電阻。相反地，當還原性氣體 (如一氧化碳、氨氣、乙醇等) 吸附於 n 型半導體表面時，氣體分子會釋放電子至半導體材料，使電子空乏區變小，進而降低材料的電阻。此外，因為氧化性氣體具有吸收電子而形成化學吸附的特性，因此使用主要載子為電子的 n 型半導體來感測氧化性氣體，會比使用主要載子為電洞的 p 型半導體具有較高靈敏度⁽¹³⁾。

3. 氣體脫附機制

當感測材料暴露於活性氣體產生化學吸附後，由於吸附能通常為 1–10 eV⁽¹⁴⁾，故需提供額外能量，才能使氣體分子脫附，使感測材料回復至起始電阻值，如此才能具備重複感測能力。而常用的方式有兩種，第一種是加熱，通常於感測器下方設置微型加熱板，並加熱至 100 °C 以上，藉由提供氣體分子能量，增加化學鍵斷鍵機率使氣體脫附⁽¹⁵⁾，此方法較為耗能且容易影響感測晶片的壽命。另一種方式則是照光，對感測材料照射能量大於其能隙的光，使其內部產生電子電洞，電洞會移動至材料表面與氧化性氣體分子結合，使氣體脫附。以方鐵錳礦氧化銦晶體為例，文獻記載其能隙為 2.9 eV (但光學實驗得出較高能隙)⁽¹⁶⁾，因此對應光激發波長應短於 425 nm。

三、實驗步驟

1. 氧化銦感測晶片製程

首先以黃光微影製程在矽晶圓上定義電極圖樣，然後使用電子束蒸鍍機分別鍍上一層鈦與金薄膜，最後將光阻除去，即可得到具金／鈦電極之晶圓。氧化銦奈米磚感測晶片製備流程如圖 2 所示，首先於瓶中加入 80 毫升去離子水及磁石，待水溫達 97 °C，緩緩加入硝酸銦溶液，再緩緩滴入六亞甲基四胺溶液，並使用磁石均勻攪拌 2 小時。然後以 8000 rpm 的轉速離心 10 分鐘。將離心後粉末放入烘箱於 60 °C 下持溫 10 小時，得到氫氧化銦奈米材料

粉末。再將 0.13 克氫氧化銦粉末加入 150 毫升乙醇，混合均勻後噴塗在晶圓上，然後在 400 °C 高溫爐中持溫 2 小時，冷卻後得到氧化銦奈米磚。將四吋晶圓破片得到將感測晶片，將晶片固定於印刷電路板上，使用超音波焊線將晶片上電極與印刷電路以鋁線連接，即完成感測晶片之製備。

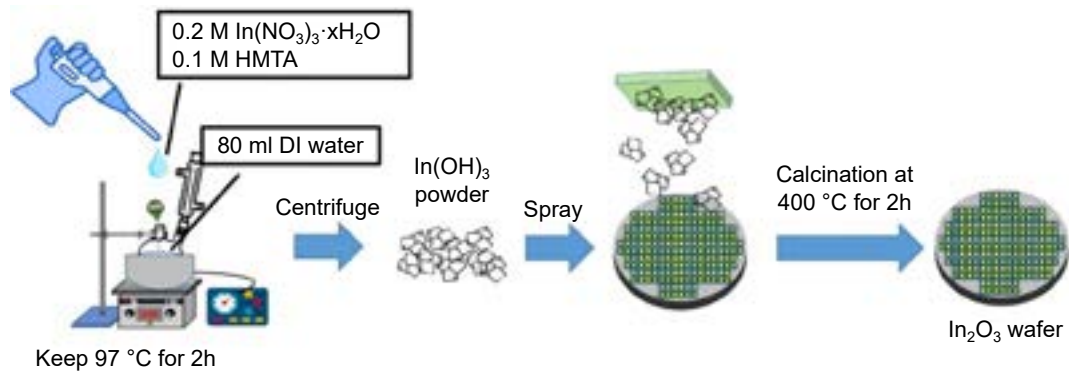


圖 2. 氧化銦奈米磚感測晶片製備示意圖。

2. 氣體感測

由於臭氧易隨時間分解，無法以鋼瓶儲存，所以本研究以流動式感測系統進行臭氧氣體感測，感測腔體兩側連接閥門保持常開，形成一個開放系統，進氣的同時也在抽氣。我們使用臭氧產生機 (Thermo Scientific Model 49i-PS) 作為氣源，產生一固定流速且濃度可控制在 5–1250 ppb 之臭氧氣流，將產生的臭氧氣體通入感測腔體，將感測晶片放入感測模組並置腔體，背景氣體為大氣。對其他氣體感測，則是以高濃度氣體鋼瓶作為氣源，以質量流速控制器固定進氣速度，藉由控制進氣時間達到腔體內所需氣體濃度。在氣體感測時，對晶片持續照射 365 nm 紫外光，並施加 5 V 電壓於晶片兩端電極，同時測量通氣前後電阻對時間變化。氣體感測響應值定義為通氣前後電阻變化率⁽¹⁷⁾，如方程式 (1) 所述， R_a 為感測晶片在大氣環境下電阻， R_g 為通入目標氣體後電阻，響應 (response) 為

$$\text{Response (\%)} = \frac{R_g - R_a}{R_a} \quad (1)$$

四、結果與討論

1. 奈米材料影像及分析

圖 3 為氧化銦奈米磚於電子顯微鏡 (scanning electron microscope, SEM) 下的形貌，圖 3(a) 及 (b) 分別為 50 k、5 k 的放大倍率，可看出磚形氧化銦的形狀結構一致，其面與面之間的夾角為 90 度直角，且表面非常光滑且均勻，邊長約為 100 奈米，並且可於圖 3(c) 500 倍放大倍率中看出，在較大面積的範圍下依然具有高度均勻性。圖 3(d) 為氧化銦薄膜橫截面影像，可看出厚度約為 500 奈米。經由其他分析，確認氧化銦奈米磚為方鐵錳礦結構，其能隙由吸收光譜測量得出為 3.3 eV。

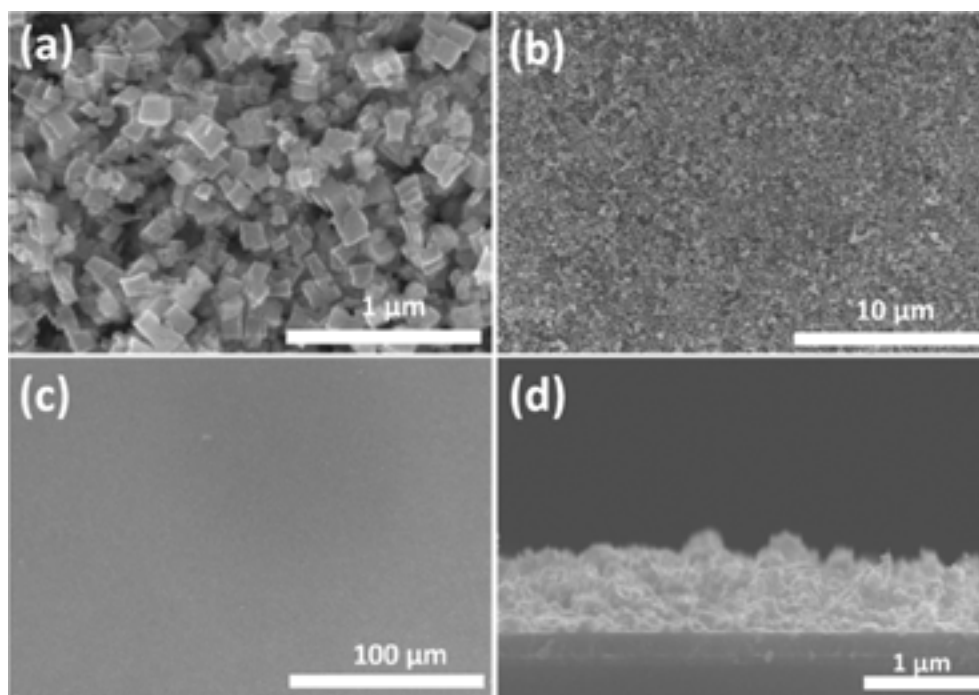


圖 3. 氧化鋅奈米磚之 SEM 影像。(a) 50 k 放大倍率；(b) 5 k 放大倍率；(c) 500 倍放大倍率；(d) 氧化鋅薄膜橫截面影像。

2. 氣體感測

圖 4 為氧化鋅奈米磚感測晶片對不同氣體的感測數據，圖 4(a) 中顯示在 250 ppb O_3 時響應約為 600%，圖 4(b) 中顯示在 250 ppb NO_2 時響應約為 200%，兩者靈敏度粗估約為 24 及 8 ppm^{-1} ， O_3 有著較高的選擇性，在同濃度下 O_3 響應約為 NO_2 的 3 倍。而氧化鋅奈米磚對環境中其他氣體的響應非常低，趨近於零，感測結果整理於圖 4(c) 中，因此應用於臭氧偵測時，除了二氧化氮外，其他氣體干擾可忽略。

進一步對感測晶片進行不同濃度 O_3 感測，其電阻對時間變化圖如圖 5(a) 所示，在 75、125、250、500、750、1000 及 1250 ppb 的濃度下，分別得到 70%、210%、590%、1100%、1700%、2200% 及 2900% 的響應。將響應對濃度做圖，如圖 5(b) 所示，當濃度逐漸增高時，響應也逐漸增加，並且在低於 1250 ppb 的濃度範圍內，響應和濃度呈現線性關係，其靈敏度約為 22.7 ppm^{-1} ，或等同 2.27% ppb^{-1} 。由於空氣中電阻值雜訊約為 0.8%，而最低偵測極限為響應等於 3 倍雜訊 (約 2.4%) 時濃度，因此氧化鋅奈米磚的最低偵測極限約為 1 ppb，優於環境部對 O_3 最低感測濃度 5 ppb 的要求，顯示其作為臭氧感測晶片的優異性。

五、手機操控可攜式氣體感測器製作

我們仿照實驗室感測架構，組裝了一台手機操控可攜式氣體感測器，以用於戶外場域測試。其架構如圖 6 所示，分為 UV 活化感測模組、信號處理和藍芽通訊電路模組、及手機操控介面三部分。UV-LED 驅動電流由微控制器控制，信號處理由橋式電路實現，內部電路以微控制器作為類比數位轉換，進行信號讀取，演算和數據傳輸。晶片電壓由微控制器的 ADC1 與 ADC2 提供並得出電流，進而計算出電阻，再經由藍芽通訊電路與手機傳輸數據。

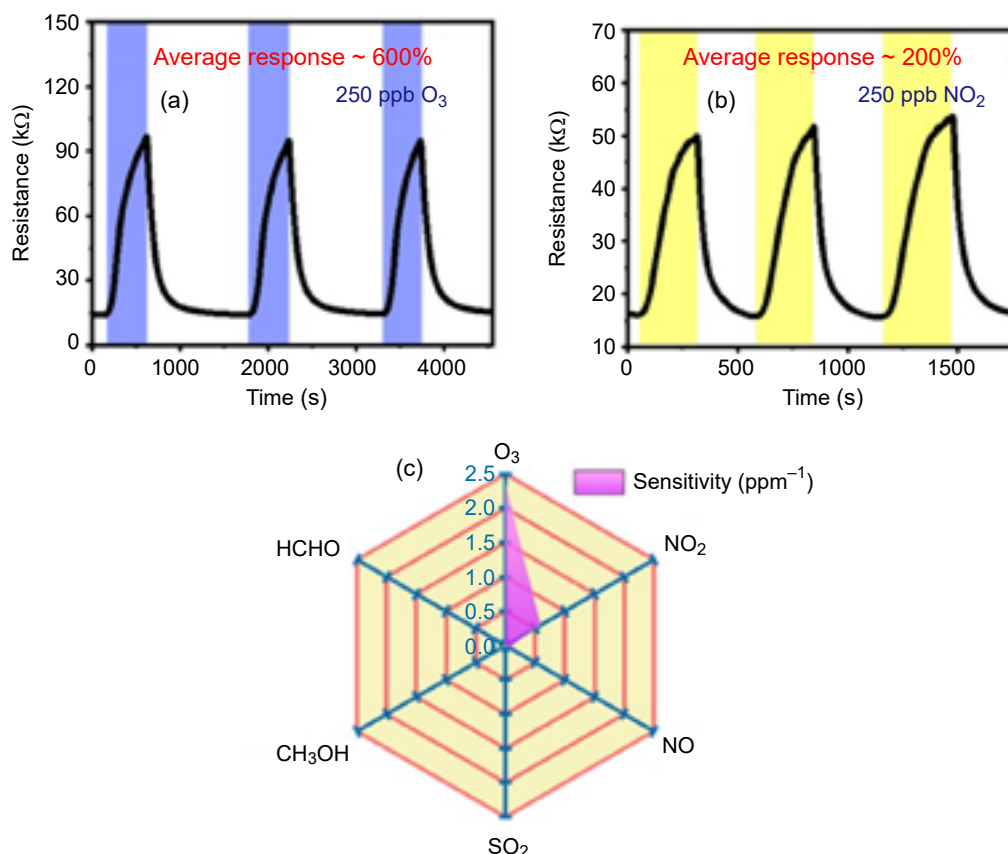


圖 4. 氧化銦奈米磚氣體感測。(a) 通入 250 ppb O₃ 時的電阻對時間圖；(b) 通入 250 ppb NO₂ 時的電阻對時間圖；(c) 不同氣體靈敏度雷達圖。

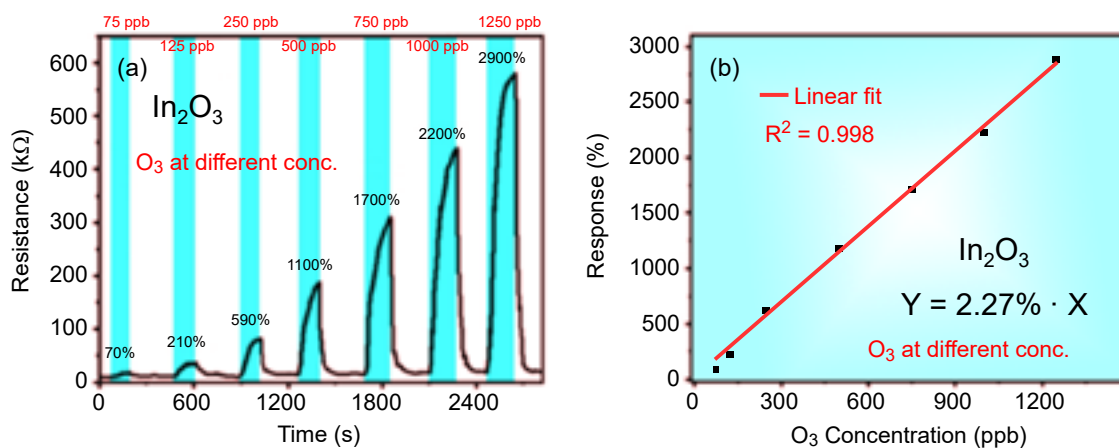


圖 5. 氧化銦於不同濃度之 O₃ 氣體感測。(a) 75–1250 ppb O₃ 的電阻對時間變化圖；(b) 75–1250 ppb O₃ 的響應對濃度圖，及濃度線性擬合。

感測器由手機操控，由 Java 寫成的 Android App，透過藍芽與感測器電路連線，接收量測的晶片電阻和環境溫度溼度，也能設定 LED 電流，並以內建參數值或智慧運算程式計算氣體濃度，並可上傳到雲端資料庫儲存。感測器實體如圖 7 所示，長寬高各為 11、8 及 3 cm，上方為感測模組，內有感測晶片及 UV LED，下方為信號處理和藍芽通訊電路模組。

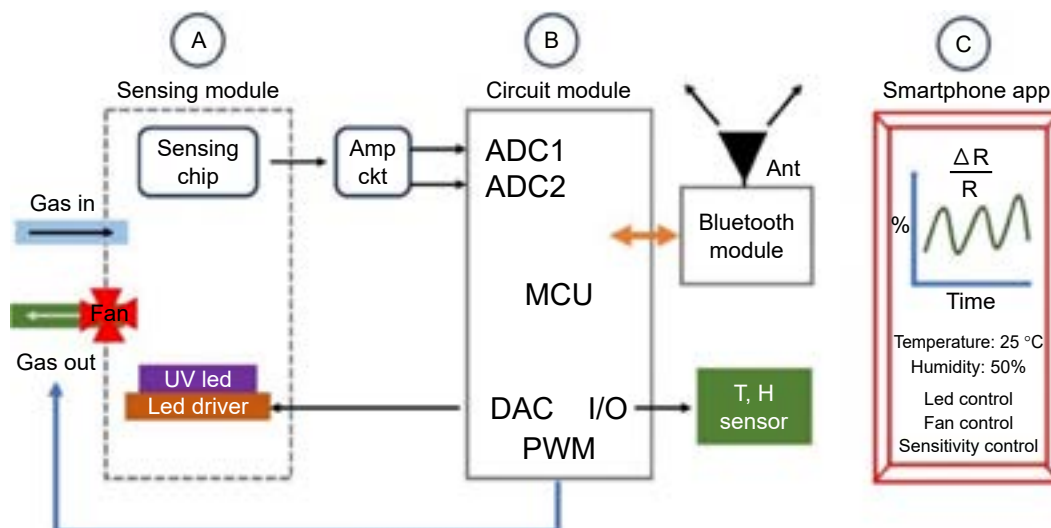


圖 6. 手機操控可攜式氣體感測器架構。

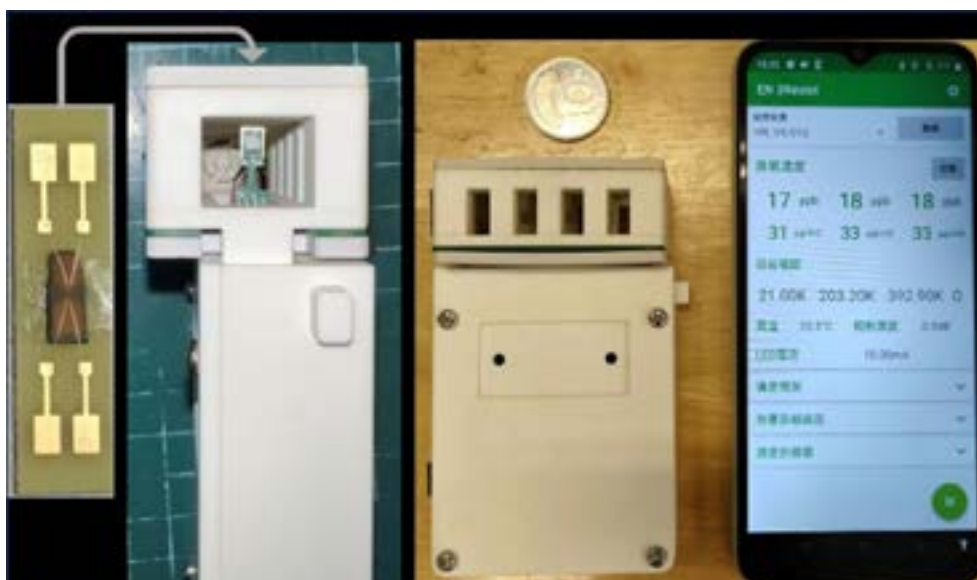


圖 7. 手機操控可攜式氣體感測器，上方為感測模組，內有感測晶片及 UV LED，下方為控制電路及手機操控藍芽通訊模組，數據可透過手機 App 上傳雲端。

六、場域實測

將之手機及氣體感測器放入防水空氣盒子，內部擺放如圖 8(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，提供手機及氣體感測器電力。將空氣盒子架設於環境部新北市永和測站進行場域實測，位置與環境如圖 8(b) 所示，感測數據可和測站數據進行比對。

置於戶外的感測晶片電阻值除了受氣體濃度影響外還受溫度、溼度、風速等多種因素影響，因此為了更好的將量測到的電阻值轉換成預測氣體濃度，因此使用人工神經網路



圖 8. (a) 空氣盒子內部設置圖，(b) 永和環境部測站照片。

(artificial neural network, ANN) 模型做為計算工具。人工神經網路是一種機器學習的方式，利用函數來近似想要的目標值。對本研究，由實驗數據得知感測晶片對 O_3 及 NO_2 兩者皆有一定比例的響應，因此我們以不同比例的 $x O_3 + (1 - x) NO_2$ 氣體濃度作為預測目標，又試片電阻 (R) 也同時受到溫度 (T)、濕度 (H) 影響，透過測量電阻、溫度、濕度，可以計算出目標氣體的濃度。因此氣體濃度可視為函數 $F(R, H, T)$ 。當有實際氣體濃度可作為參考值的情況下，可以利用機器學習的方式，來近似此函數 F 。而在機器學習模型的學習過程中，我們需要定義一個損失函數來決定機器學習的優化方向，再用數學最佳化方法來最小化此損失函數。將損失函數定義為平均絕對誤差 (mean absolute error, MAE)， $MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_{\text{predicted}}^i - y_{\text{true}}^i|$ ，再利用梯度下降 (gradient descent) 的迭代求解，使損失函數下降至區域最小值，並透過此方式找到函數 F 的局部最佳解。

由於感測反應時間影響，晶片電阻無法立即反應當下環境的參數，此刻電阻會受前一刻時間的環境影響。因此將函數進一步修正為 $F(R_t, R_{t-1}, R^{-1}, H, T)$ ，其中 t 為時間。最終我們可透過感測器測量每分鐘室外溫度、濕度及感測晶片之電阻值，並配合一段時間的同地點的真實氣體濃度數據做 ANN 模型的訓練以完成預測模型的建置。利用測站氣體濃度數據，以一個禮拜的時間做為 ANN 模型的訓練，再以該模型透過輸入溫度、濕度及電阻三個數值來預測未來的氣體濃度。

圖 9(a) 為對 $1 O_3 + 0.54 NO_2$ 的總濃度 (亦即 O_3 濃度加上 NO_2 干擾)。在一個月時間，每分鐘預測濃度與真實濃度比較，可看出感測器成功預測氣體變化的趨勢，並對預測值也有相當的準確度。圖 9(b) 顯示決定係數 (coefficient of determination) R^2 約 0.48，MAE 值為 5.24 ppb，此 R^2 相當接近商用氣體感測器水準。圖 9(c) 為對 O_3 濃度，在同時間內每分鐘預測濃度與真實濃度比較，圖 9(d) 顯示決定係數 R^2 僅有 0.19，而 MAE 值為 13.8 ppb。以上結果顯示，氧化銦奈米磚感測晶片可於台灣高濕戶外環境正常工作，對 O_3 雖然有高選擇性，但 NO_2 仍有極大干擾，因此選擇性仍須提升，以達到更準確環境臭氧偵測。

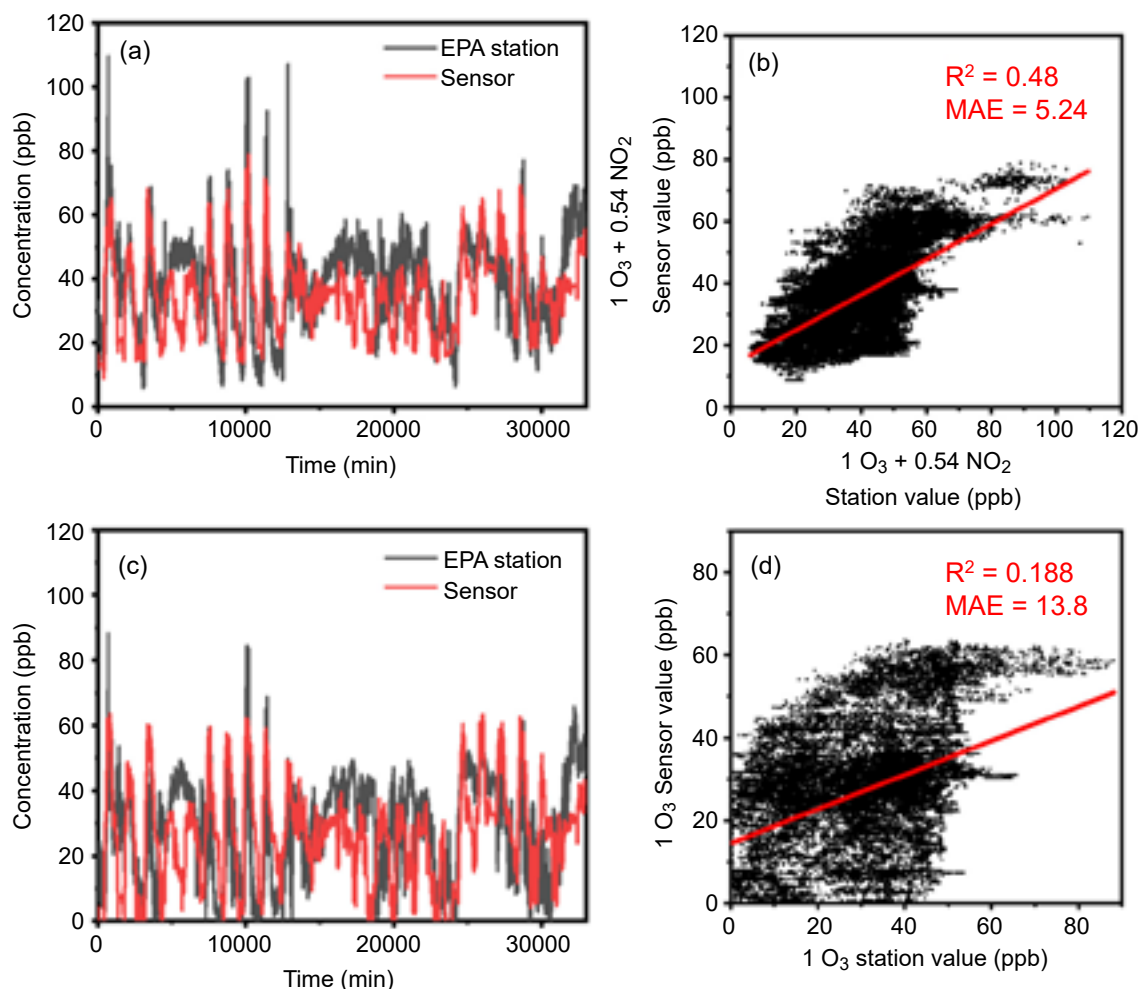


圖 9. 神經網路模型測試之結果。(a) 感測晶片以 $1 \text{ O}_3 + 0.54 \text{ NO}_2$ 為目標，一個月內分鐘預測濃度與真實濃度比較，及 (b) 所得 R^2 及 MAE。(c) 感測晶片以 1 O_3 為目標，一個月內分鐘預測濃度與真實濃度比較，及 (d) 所得 R^2 及 MAE。

八、結論

本研究以低溫化學製程製作氧化銦奈米磚，對臭氧感測具有高靈敏度，可大量生產且成本低廉，並自製可用於環境氣體監測的手機操控可攜式半導體式氣體感測器。在紫外光活化模式，氧化銦奈米磚對 O_3 感測電阻變化線性範圍為 $1-1250 \text{ ppb}$ ，靈敏度達 22.7 ppm^{-1} ，最低偵測極限為 1 ppb ，對 NO_2 靈敏度約為 8 ppm^{-1} ，兩者比值約 $1:0.35$ ，對其他氣體則極低。偵測極限符合環境部對環境臭氧偵測規格要求，並可透過手機 App 即時顯示與上傳資料至雲端儲存。

將氧化銦感測晶片搭配可攜式氣體感測器，架設於空品監測站進行場域實測及機器學習，以晶片電阻及環境溫濕度作為輸入值，以測站真實濃度作為目標值，並建構人工神經網路運算來預測濃度，在一個月的測試時間，以 $1 \text{ O}_3 + 0.54 \text{ NO}_2$ 為預測濃度，決定係數 R^2 可達 0.48 ，顯示氧化銦奈米磚感測晶片可在高濕環境下正常工作。

關於實際應用，雖然二氧化氮會對臭氧感測造成干擾，但若應用場域中二氧化氮濃度不高或變化不大，本研究所開發之氧化銦奈米磚感測晶片仍有不錯實用性，可應用於戶外環境或製造工廠臭氧偵測，未來也可與對臭氧及二氧化氮有不同選擇性之感測晶片合併使用，以智慧運算方式，得出兩種氣體個別濃度。

誌謝

作者感謝國家科學暨技術委員會經費補助 (計畫編號 112-2218-E-007-016-MBK)，以及國研院台灣儀器科技研究中心在氣體感測器製作的協助。

參考文獻

1. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, World Health Organization (2021).
2. 行政院環境部空氣品質監測網, please refer to the website : <https://reurl.cc/Ny9ydQ>.
3. R. T. Burnett, J. R. Brook, W. T. Yung, R. E. Dales, and D. Krewski, *Environmental Research*, **72**, 24 (1997).
4. Y. O. Khaniabadi, P. K. Hopke, G. Goudarzi, S. M. Daryanoosh, M. Jourvand, and H. Basiri, *Environmental Research*, **152**, 336 (2017).
5. M. A. Zoran, R. S. Savastru, D. M. Savastru, and M. N. Tautan, *Science of The Total Environment*, **740**, 140005 (2020).
6. M. F. Boeniger, *American Industrial Hygiene Association Journal*, **56**, 590 (1995).
7. X. Liu, S. Cheng, H. Liu, S. Hu, D. Zhang, and H. Ning, *Sensors*, **12**, 9635 (2012).
8. P. Srinivasan, M. Ezhilan, A. J. Kulandaisamy, K. J. Babu, and J. B. B. Rayappan, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **30**, 15825 (2019).
9. L. Francioso, M. Russo, A. Taurino, and P. Siciliano, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **119**, 159 (2006).
10. Y. Ding, Y. Ren, D. Zhang, G. Liu, and F. Shan, *Applied Physics Letters*, **121**, 033301 (2022).
11. Z. A. Husain, A. A. Majeed, R. T. Rasheed, H. S. Mansoor, and N. N. Hussein, *Materials Today: Proceedings*, **42**, 1816 (2021).
12. N. Kaur, M. Singh, and E. Comini, *Advanced Materials Interfaces*, **9**, 2101629 (2022).
13. L. Liu, Y. Wang, Y. Liu, S. Wang, T. Li, S. Feng, S. Qin, and T. Zhang, *Microsystems & Nanoengineering*, **8**, 85 (2022).
14. S. W. Fan, A. K. Srivastava, and V. P. David, *Applied Physics Letters*, **95**, 142106 (2009).
15. N. D. Chinh, N. D. Quang, H. Lee, T. T. Hien, N. M. Hieu, D. Kim, C. Kim, and D. Kim, *Scientific Reports*, **6**, 35066 (2016).
16. P. King, T. D. Veal, F. Fuchs, C. Y. Wang, D. Payne, A. Bourlange, H. Zhang, G. R. Bell, V. Cimalla, and O. Ambacher, *Physical Review B*, **79**, 205211 (2009).
17. T. Murugesan, R. R. Kumar, A. k. Anbalagan, C.-H. Lee, and H.-N. Lin, *ACS Applied Nano Materials*, **5**, 4921 (2022).

作者簡介

徐子軒先生現為國立清華大學材料科學工程學系碩士班學生。

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

洪承彬先生為國立清華大學材料科學工程學系碩士。

Cheng-Bin Hung received his M.S. in the Department of Materials Science and Engineering from National Tsing Hua University.

王大輔先生為國立清華大學材料科學工程學系碩士，現為台積電製程整合工程師。

Da-Fu Wang received his M.S. in the Department of Materials Science and Engineering from National Tsing Hua University. He is currently a Process Integration Engineer in the Taiwan Semiconductor Manufacturing Company.

蘇暉中先生現為國立清華大學理學院學士班學生。

Wei-Chung Su is currently a B.S. student in the Interdisciplinary Program of Science at National Tsing Hua University.

孫揚喆先生現為國立陽明交通大學醫學系學生。

Yang-Che Sun is currently a B.S. student in the School of Medicine at National Yang Ming Chiao Tung University.

劉承恩先生現為國立清華大學材料科學工程學系碩士班學生。

Cheng-En Liu is currently a M.S. student in the Department of Materials Science and Engineering at National Tsing Hua University.

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.

基於調諧質量阻尼之微機械質量感測器

A Tuned Mass Damper Based Micromechanical Mass Sensor

杜文睿、劉嘉仁、陳庭毅、李尉彰

Wen-Ruei Du, Jia-Ren Liu, Ting-Yi Chen, Wei-Chang Li

透過微機械諧振器之諧振頻率隨著外在環境變化而偏移的效果作為感測器使用，是目前廣泛應用的感測機制之一，並已用於質量、力量與電壓計等感測應用。有別於傳統諧振式微機械感測元件如懸臂梁結構，本文使用基於調諧質量阻尼結構之多維度諧振器做為質量感測元件，以此來達成更高的感測靈敏度。本文將依序介紹調諧質量阻尼微機械感測器的物理模型、量測架設以及實驗結果。

Micromechanical resonators, of which their resonance frequencies change in response to environmental perturbations, could be used as sensors. To date, Resonant-type sensors are the most widely adopted sensing mechanism in numerous application fields, including mass sensors, force sensors, electrometers, etc. Compared to regular micromechanical sensing devices, i.e., cantilever beam resonators, this article uses a tuned-mass-damper-based resonator for mass sensing applications to achieve higher sensitivity. This article is organized as follows: (1) physical models, (2) measurement set-up, and (3) measurement results.

一、微機械諧振器作為感測器使用

1. 單維度諧振感測器系統

基本上，微機械諧振器隨著不同的設計，會有其特定的諧振頻率。圖 1 使用懸臂樑作為質量感測器來做為範例，在不考慮阻尼與外力的情況下，該結構可等效為一組彈簧與質量系統。當懸臂樑發生諧振時，系統的運動可用一單維度 (single degree-of-freedom, 1-DoF) 的微分方程式表示，寫作

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

其中 k 為諧振系統的等效剛性 (effective stiffness)、 m 為諧振系統的等效質量 (effective

mass)。而諧振頻率 f 可表示為

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

當環境物理量改變時，用於感測的微機械結構諧振頻率會隨之產生變化。以質量感測為例，頻率隨著質量增減的公式可表示為⁽³⁾

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta m}{2m} \quad (3)$$

其中 Δf 為感測器系統在增加 Δm 的質量後所產生的頻率變化量。式 (3) 中的負號代表了當感測系統的質量增加時，其諧振頻率 f 將隨之下降。然而，單維度微機械諧振感測器系統已無法滿足今日對於質量感測靈敏度的需求。舉例來說，文獻⁽¹⁾ 所使用的微機械諧振器具有三種不同的設計，以其最高靈敏度的設計為例，每奈克 (nanogram, ng) 的質量增加將造成 -475 Hz 的頻率變化，相當於 -266.7 ppm/ng 的無因次變化量以及 115 皮克 (picogram, pg) 的解析度。然而，文獻⁽⁴⁾ 提及 PM_{2.5} 懸浮微粒之密度事實上介在 15.9 至 156.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間，若以一立方公分 (cm^3) 的單位體積而言，該體積內僅會有 15.9 pg 的質量。因此若欲感測如此小的質量變化，無論是對靈敏度或是解析度的要求，⁽³⁾ 的單維度微機械諧振式感測器已不敷使用。

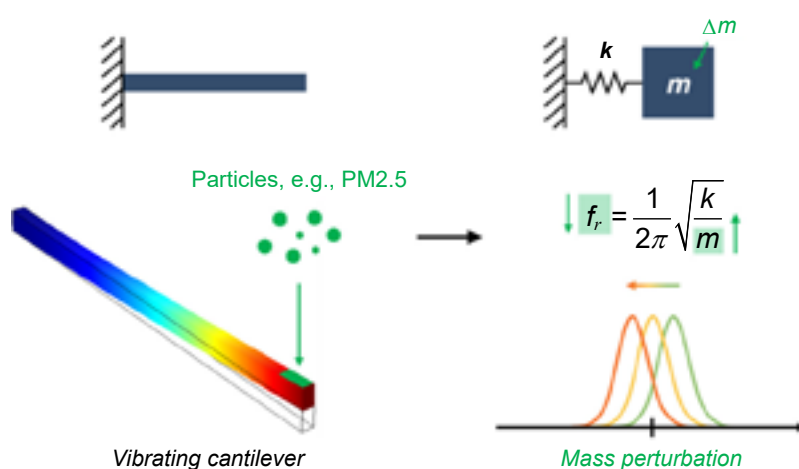


圖 1. 微機械諧振器用於質量感測應用。

2. 雙維度耦合諧振感測器系統

為了改善質量感測的靈敏度，近年來大多利用數個諧振器之間的耦合 (coupled) 效應來做為前端感測元件的感測機制，其中大多數文獻皆以對稱式雙維度 (two degree-of-freedom, 2-DoF) 耦合的微機械結構為大宗，如文獻^(5, 6)。其等效的物理模型，在不考慮阻尼與外力的情況下，如圖 2 所示，而系統的耦合運動方程式可表示為

$$[M] \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + [K] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$



圖 2. 對稱式雙維度耦合諧振器之物理模型示意圖。

其中

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, \quad [K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_c & -k_c \\ -k_c & k_c + k_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

m_1 與 m_2 分別為耦合機械系統中兩不同質量塊的等效質量， k_1 、 k_2 與 k_c 分別為耦合系統中連結 m_1 與 m_2 的等效剛性，以及連結兩質量塊的連結剛性。將式 (4) 與 (5) 整理並移項，可得

$$\begin{bmatrix} -\frac{k_1 + k_c}{m_1} & \frac{k_c}{m_1} \\ \frac{k_c}{m_2} & -\frac{k_c + k_2}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

再進行特徵值 (Eigenvalue) 與特徵向量 (Eigenvector) 的求解

$$|A + \omega^2 I| = 0 = \begin{vmatrix} \omega^2 - \frac{k_1 + k_c}{m_1} & \frac{k_c}{m_1} \\ \frac{k_c}{m_2} & \omega^2 - \frac{k_c + k_2}{m_2} \end{vmatrix} \quad (7)$$

即可得到特徵值

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{k_1 + k_c}{m_1} + \frac{k_c + k_2}{m_2} \right) \mp \sqrt{\left(\frac{k_1 + k_c}{m_1} - \frac{k_c + k_2}{m_2} \right)^2 + 4 \frac{k_c^2}{m_1 m_2}} \right] \quad (8)$$

其中 $\omega_{1,2} = 2\pi f_{1,2}$ 的下標 1 與 2 分別代表雙維度諧振器系統中的同相位 (in-phase) 與反相位 (Out-of-phase) 運動的諧振頻率。至此，雙維度諧振感測器系統的靈敏度即可表示為

$$S = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_{1,2} - f_0}{f_0} \quad (9)$$

其中 f_0 為諧振器系統在不受質量擾動情況下的諧振頻率，而 $f_{1,2}$ 為受質量擾動下同相與反相運動的諧振頻率。

文獻⁽⁷⁾ 展示了耦合的微機械諧振器並用於質量感測應用，若是使用頻率對於質量變化的感測機制，該感測器具有 300 ppm/pg 的感測靈敏度。代表耦合諧振系統的感測表現將優於使用單維度的諧振感測器系統。

3. 雙維度調諧質量阻尼諧振感測器系統

為了更進一步增進感測器系統的靈敏度，本文基於前一節所提及的 2-DoF 諧振器，探討若是將其中一個質量塊更改為小質量塊，其靈敏度是否相較於 2-DoF 系統而言能夠進一步提升。考慮如圖 3 所示的物理模型，本文將原本在圖 2 中與 m_1 相同大小的 m_2 變為一較小的質量塊，此即構成一調諧質量阻尼 (tuned-mass-damper, TMD) 諧振器系統。此系統之特徵值與前述式 (8) 之形式類似，經推導後可得

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \mp \sqrt{\left(\frac{k_1 + k_c}{m_1} - \frac{k_2}{m_2} \right)^2 + 4 \frac{k_2^2}{m_1 m_2}} \right] \quad (10)$$

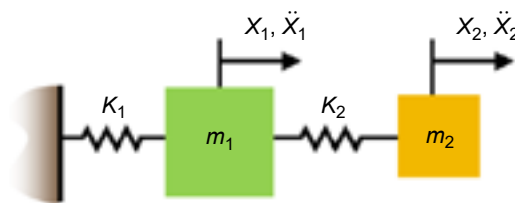


圖 3. 調諧質量阻尼諧振器之物理模型示意圖⁽¹⁾。

至此，便能夠比較對稱式雙維度系統與 TMD 系統之靈敏度差異。建構如圖 2 及圖 3 之物理模型，並使用如表 1 之參數，其針對環境質量變化所造成的頻率偏移量將如圖 4 所示。透過圖 4 之模擬結果可發現對稱式雙維度相比於 TMD 感測器系統，在相同質量變化，如 -16 pg 的情況下，後者具有約 0.13 的頻率偏移量，而前者僅約 0.018，應證了 TMD 感測器系統具有約 7× 的靈敏度表現提升。

表 1. 用於對稱式雙維度與雙維度調諧質量阻尼諧振系統靈敏度模擬之參數列表。

Param.	對稱式雙維度	雙維度調諧質量阻尼諧振
k_1 (N/m)	4374.9	4374.9
m_1 (ng)	3.728	3.728
f_0 (MHz)	5.452	5.452
k_2 (N/m)	4374.9	32.96
m_2 (ng)	3.728	28.21×10^{-3}
f_0 (MHz)	5.452	5.454
k_c (N/m)	$0.001 \times k_1$	—

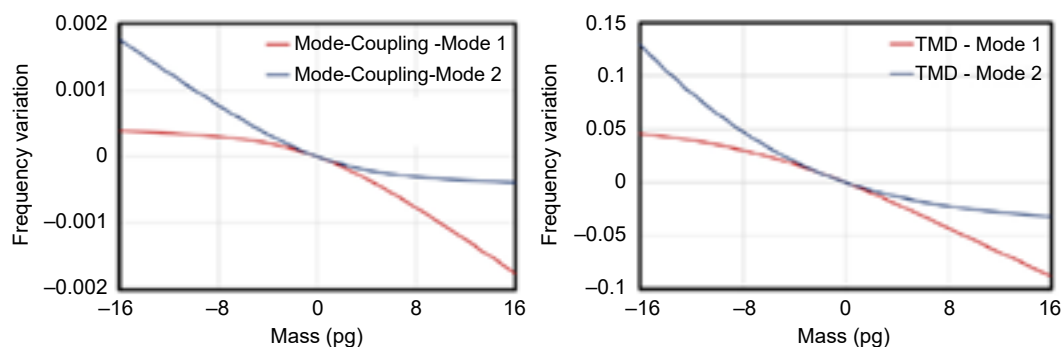


圖 4. 對稱式雙維度 (左) 與雙維度調諧質量阻尼諧振系統 (右) 之頻率變化對質量增減之靈敏度模擬結果⁽²⁾。

4. 三維度調諧質量阻尼感測器

基於上述 TMD 諧振器將具有較好感測靈敏度的發現，本文實際建構如圖 5 之感測元件，其中包含了一個主要的兩端固定樑 (clamped-clamped beam, CC-beam) 結構，以及其上方作為 TMD 的複式 (duplex) 樑型結構。由於支撐 TMD 的固定點 (anchor) 位在樑的正中心，有如一 T 字型，因此上方的樑結構被分割為兩個獨立的懸臂樑並共用同一固定點。基於此緣故，圖 5 的感測器元件⁽⁸⁾ 需使用如圖 6 的三維度物理模型加以分析。

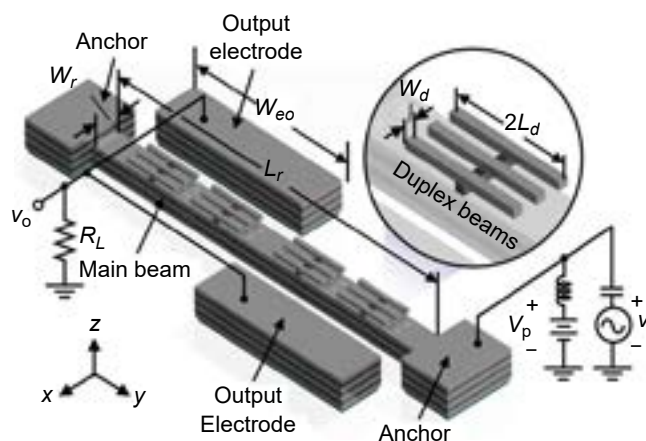


圖 5. 上方具複式懸臂樑結構之調諧質量阻尼諧振感測元件⁽⁸⁾。

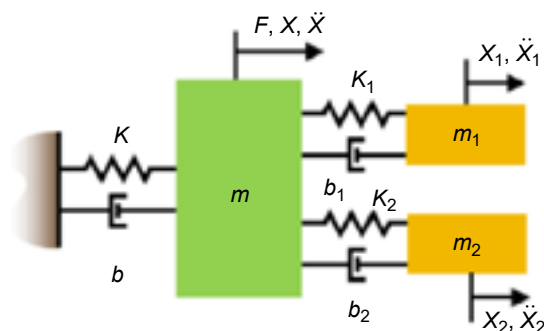


圖 6. 三維度 TMD 之等效物理模型示意圖⁽¹⁾。

由於三維度模型較為複雜，因此在模型分析上本文使用狀態空間分析法 (state-space analysis) 計算從外力驅動到微機械結構位移之間的轉移函數，並表達為三維度耦合運動方程式的解。圖 6 之運動方程式可表達為

$$\begin{cases} m\ddot{x} + b\dot{x} + kx + b_1(\dot{x} - \dot{x}_1) + k_1(x - x_1) + b_2(\dot{x} - \dot{x}_2) + k_2(x - x_2) = F \\ m_1\ddot{x}_1 + b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}) + k_1(x_1 - x) = 0 \\ m_2\ddot{x}_2 + b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}) + k_2(x_2 - x) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

將式 (11) 透過 $q_1 = x$, $q_2 = \dot{q}_1 = \dot{x}$, $q_3 = x_1$, $q_4 = \dot{q}_3 = \dot{x}_1$, $q_5 = x_2$, $q_6 = \dot{q}_5 = \dot{x}_2$ 的變數變換將二階微分方系統進行降階，並以矩陣形式表達可得

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} \frac{0}{m} & \frac{0}{m} & \frac{0}{m} & \frac{0}{m} & \frac{0}{m} & \frac{0}{m} \\ \frac{-k - k_1 - k_2}{m} & \frac{-b - b_1 - b_2}{m} & \frac{k_1}{m} & \frac{b_1}{m} & \frac{k_2}{m} & \frac{b_2}{m} \\ \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{1}{m_1} & 0 & 0 \\ \frac{k_1}{m_1} & \frac{b_1}{m_1} & -\frac{k_1}{m_1} & -\frac{b_1}{m_1} & 0 & 0 \\ \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & 0 & 0 & \frac{0}{m_2} & \frac{1}{m_2} \\ \frac{k_2}{m_2} & \frac{b_2}{m_2} & 0 & 0 & -\frac{k_2}{m_2} & -\frac{b_2}{m_2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{1}{m} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [010000], D = 0$$

進一步將式 (13) 透過拉式轉換 (Laplace transform) 並移項後可得

$$\begin{cases} sX(s) = AX(s) + BU(s) \\ Y(s) = CX(s) + DU(s) \end{cases} \quad (14)$$

$$X(s) = (sI - A)^{-1}BU(s) = \Phi(s)BU(s) \quad (15)$$

$$Y(s) = CX(s) + DU(s) = C\Phi(s)BU(s) + DU(s) = (\Phi(s)B + D)U(s) \quad (16)$$

因此輸入外力與位移輸出的轉移函數即可表達為

$$T(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C\Phi(s)B + D = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (17)$$

圖 7 為利用數值分析工具 MATLAB 利用式 (17) 所繪製的波德圖 (Bode plot)，可觀察出針對此三維度系統與二維度系統類似，同樣具有同相與反相的運動。有了物理模型與其解之後，本文進一步透過改變上方懸臂樑的質量變化，觀察其對圖 8 中同相位 (如圖中 Mode 1 箭頭所指) 與反相 (如圖中 Mode 2 箭頭所指) 諧振頻率的影響。

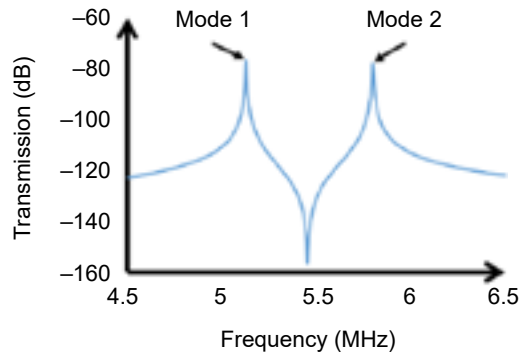


圖 7. 利用空間狀態分析方法所得到的三維度 TMD 頻譜響應模擬結果⁽¹⁾。

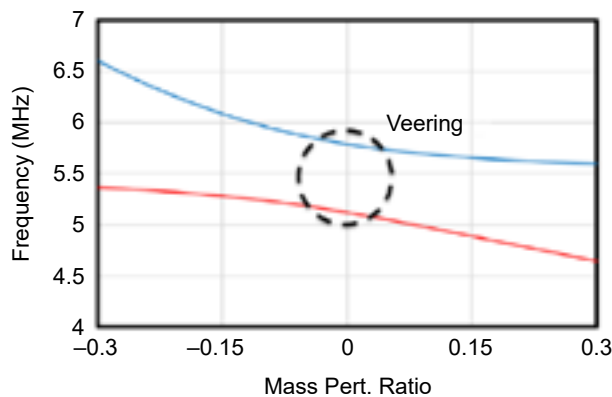


圖 8. 利用空間狀態分析方法針對質量擾動對諧振頻率偏移之模擬結果⁽¹⁾。

製程方面，本文透過國研院台灣半導體中心提供之 $0.35\text{-}\mu\text{m}$ CMOS-MEMS 製程平台，並取其多層結構的優勢來建構調諧質量阻尼諧振感測器。該元件的主結構包含了數層金屬層 METAL1 至 METAL3，而頂層的 METAL4 則用作調諧質量阻尼系統之小質量塊。在任兩層金屬層之間具有中介氧化層來連接上下兩層金屬，在氧化層外圍則包以由鎢金屬所構成的 VIA 外牆，防止濕蝕刻破壞主結構內部的結構連續性。圖 9 顯示了後製程步驟，僅需一道濕蝕刻即可完成元件釋放 (release)。

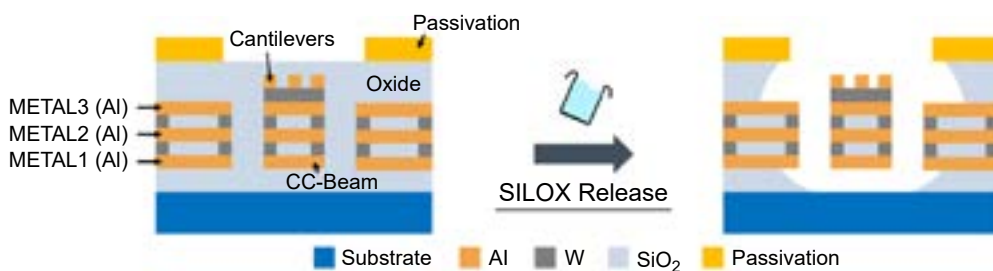


圖 9. 元件後製程濕蝕刻圖。

二、諧振感測器之實驗架設

圖 10 為三維度 TMD 諧振感測器之掃描式電子顯微鏡 (scanning electron microscope, SEM) 圖片⁽⁸⁾，可以明顯看到在主結構的兩端固定樑之上具有複式懸臂樑的結構。為了測試微機械結構的特性，本文使用靜電力驅動主結構⁽⁹⁾，當微機械結構開始運動時，兩端固定樑與訊號收取電極之間間隙改變形成位移電流 (motional current)，此一電流訊號與頻率相依，並且在通過轉阻放大器 (transimpedance amplifier, TIA)，將電流轉換為電壓訊號並放大後，即可用作量測感測器系統的頻譜響應。

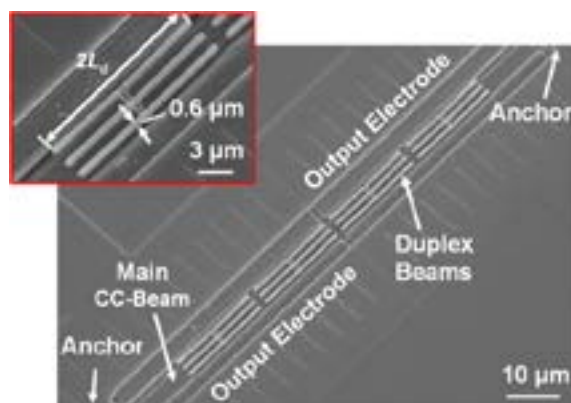


圖 10. 三維度 TMD 諧振感測器的掃描式電子顯微鏡照片，以及針對主結構上方複式懸臂樑的局部放大圖片。⁽⁸⁾

在元件設計時，為了驅動主結構的第二模態，因此電極鋪設的方式為對角線設計，並使用同一電訊號進行驅動。透過這樣的方式，電訊號將在斜對角兩側對主結構施力。圖 11 顯示了用於量測的實驗架設，其中用於驅動主結構的電訊號儀器包括產生極化電壓 (polarization voltage, V_p) 的電源供應器 (Keysight E3647A power supply) 以及產生交流電 (time-varying voltage, v_i) 訊號的網路分析儀 (Keysight E5080B vector network analyzer, VNA)，將 V_p 與 v_i 透過 Bias-Tee 耦合後即用作驅動主結構的靜電力。主結構運動所造成的輸出訊號在通過轉阻放大器 (HF2TA 50 MHz current amplifier) 後再回到網路分析儀中進行運算並繪製頻譜響應圖。實驗過程中，感測器元件本身皆放置於具有溫度恆定功能的真空探針台中進行量測。表 2 條列了用於量測的各項儀器參數。圖 12 為量測架設之實際照片，探針台包括了 E、S、W、N 四根探針，其中 S 與 N 分別用做驅動與訊號接收，而 E 與 W 則本文的各項實驗中皆無使用。

三、調諧質量阻尼諧振感測器之實驗結果

針對質量變化所造成的頻率改變，本文使用兩種方式來引入不同的懸臂樑質量，分別為在感測器晶片設計之初即設計不同的懸臂樑長度，並透過計算的方式換算成不同的質量大小，並利用諧振頻率的偏移量來得到本感測器的靈敏度。而另一種為透過線香點燃後在特定塑膠管中所造成的懸浮微粒，沉積在感測器懸臂樑上方所造成的質量改變後，比較沉積前後的頻譜響應變化，並以此演示更實務的質量感測應用。

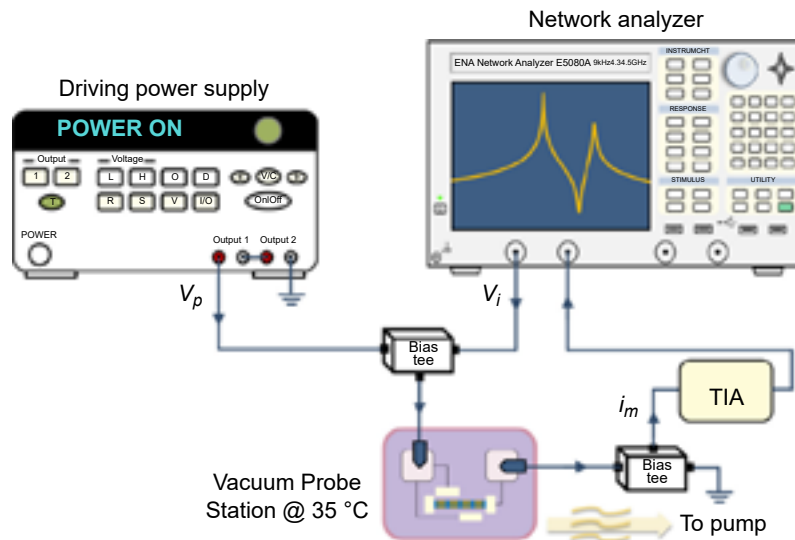


圖 11. TMD 諧振感測器元件的量測架設示意圖。

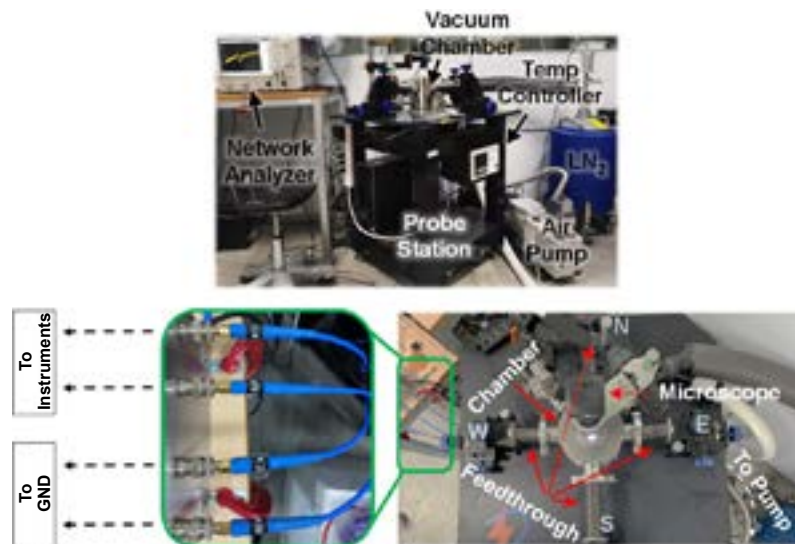


圖 12. TMD 諧振感測器元件的量測架設實際照片⁽²⁾。

表 2. 量測所使用儀器的各項參數。

Keysight E3647A Power Supply	
VP	35 V
Keysight E5080B Vector Network Analyzer	
vi	0.056 V
IF Bandwidth	30 Hz
Measurement Point	1601
Transmission	S21
Custom-Built Vacuum Chamber	
Pressure	7.5×10^{-5} Torr
Temperature	35 °C

1. 設計不同懸臂樑長度

圖 13 顯示了調諧質量阻尼感測器在不同懸臂樑長度 $L_d = 8.525, 8.800, 9.350, 9.625 \mu\text{m}$ (即 $\Delta L_d = 0, 0.275, 0.825, 1.1 \mu\text{m}$) 下的頻譜響應結果⁽⁸⁾。在這張圖中，本文使用了去嵌入化 (de-embedding) 的技術來去掉背景訊號對實際待測訊號的影響。針對諧振頻率的變化量，且為了與其他基於不同技術的質量感測器進行比較，因此諧振頻率的變化量還會再除去不考慮質量變化的諧振頻率值，以達到無因次化的效果。圖 14 顯示了其對質量變化的量測結果，其中藍線為模擬值，而磚紅色的方塊為量測結果。從圖 14 我們觀察到感測元件具有 $0.14\%/\text{pg}$ (即 1400 ppm/pg) 的靈敏度⁽⁸⁾，較⁽⁷⁾之結果提升了約 $4\times$ 。事實上，模態局部化效應由於其模態轉向 (Mode veering) 的特性，使得質量感測器的頻率偏移對質量的關係是非線性的。然而由於模態局部化具有解析解，因此若是欲將此感測器進一步商業化，可透過查表的方式來實現質量感測的應用，且在模態局部化效應發生的範圍內，質量的感測並不會出現飽和的情況。

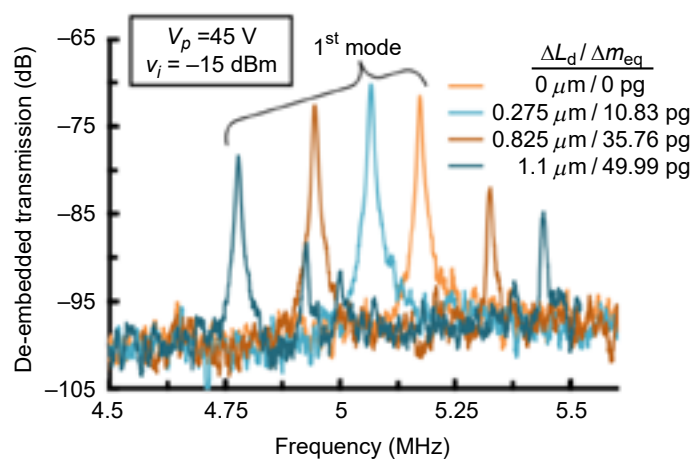


圖 13. 調諧質量阻尼感測器之諧振頻率在不同懸臂樑尺寸設計之下的頻譜響應結果⁽⁸⁾。

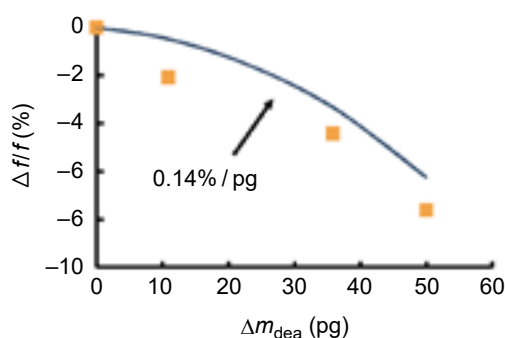


圖 14. 調諧質量阻尼無因次頻率變化量對質量改變的量測結果，顯示 $0.14\%/\text{pg}$ 的靈敏度⁽⁸⁾。

2. 透過點燃線香進行懸浮微粒沉積

針對更實務面的應用，本文進一步探討質量感測器對懸浮粒子附著後對輸出訊號的變化。我們選用點燃線香後的焚香灰作為附著於感測器的懸浮粒子，並設計了一個壓克力管，

用於引導焚香煙至諧振器表面，以完成粒子附著。圖 15 為壓克力管的設計圖，上蓋的導孔旨在引導焚香煙向上對流。由於孔洞較小，煙霧會集中在管內的上方，創造出一個充滿懸浮粒子的環境。在這樣的情況下，我們進一步將感測元件固定在上蓋的內側，使得整個實驗在密閉空間中進行，以檢測由線香燃燒所造成的懸浮粒子。30 秒後，可以看到煙灰布滿了壓克力管。我們分別在放置 1 分鐘和 2 分鐘後測量附著的香灰對諧振器頻率響應的變化，如圖 16 所示。從圖中觀察到，與實驗前的測量數據相比，放置 1 分鐘和 2 分鐘後，諧振頻率都呈現向左飄移的趨勢。實驗前後的光學式顯微鏡照片如圖 17 所示，可觀察到實驗前後晶片表面的顏色變化。

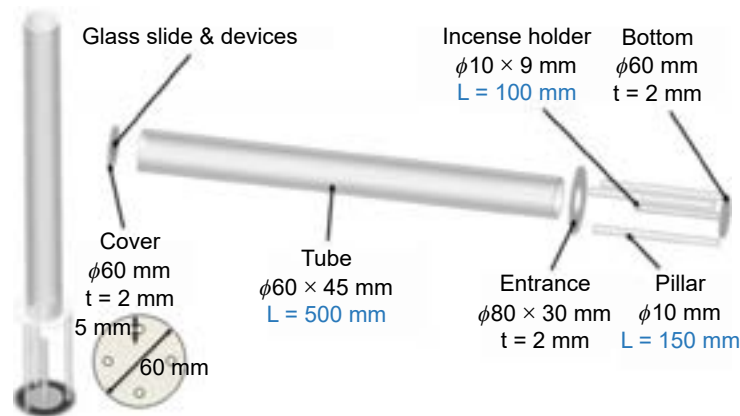


圖 15. 用於引導線香點燃後產生焚香灰的壓克力管⁽¹⁾。

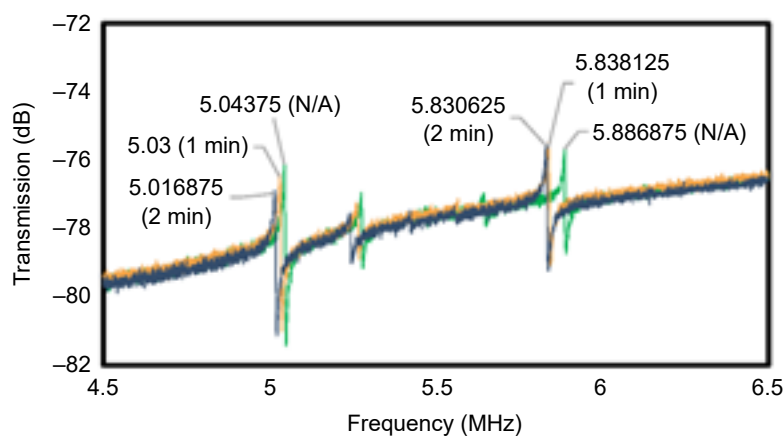


圖 16. 實驗前、點燃線香 1 分鐘與 2 分鐘後進行頻譜響應量測之結果⁽¹⁾。

為了進行對照，我們設置了一個控制組，使用了 CC-Beam 諧振器作為參考，同樣進行懸浮粒子附著的實驗。這旨在比較 CC-Beam 對微小質量擾動後諧振頻率的變化。從實驗結果 (圖 18) 中可以看出，CC-Beam 諧振器的頻率幾乎沒有明顯變化，顯示出 CC-Beam 的解析度不足以檢測微小質量的變化。然而，TMD 諧振器卻可以檢測到信號的變動。這一現象證實了對於 TMD 諧振器而言，頻率變化主要來自於耦合的懸臂樑感測對微小質量引起的頻率響應變化。

將測量數據與在相同條件下的理論預測結果進行比較，我們假設懸浮粒子均勻附著在懸臂樑的中央位置，可以視為在懸臂樑的中央施加了質量。通過能量法的計算，當懸臂樑在第一模態下施加質量於中央位置時，末端的等效質量約為中央施加質量的約 0.2357 倍。因

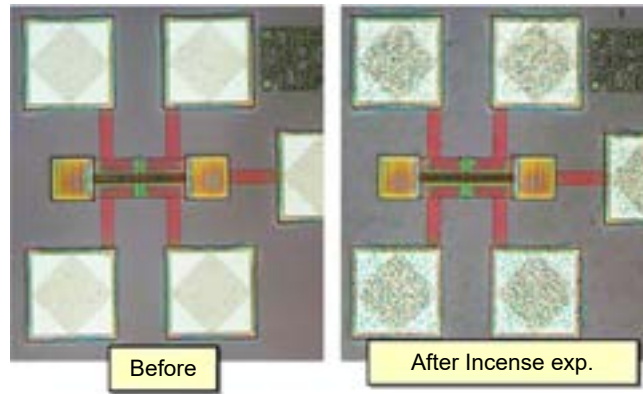


圖 17. 焚香實驗前後的光學顯微鏡拍攝圖⁽¹⁾。

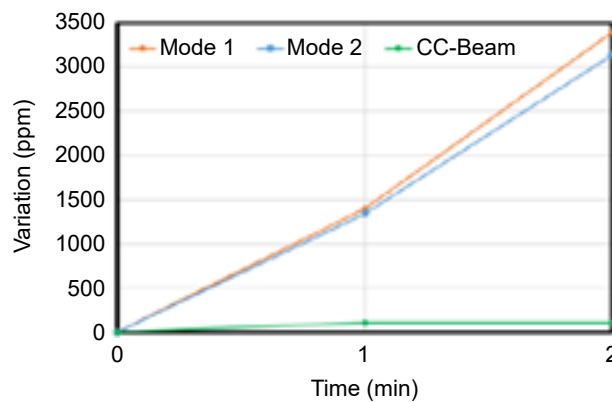


圖 18. 調諧質量阻尼質量感測器與一般兩端固定樑之性能比較⁽¹⁾。

此，我們可以根據頻率變化計算出附著在懸臂樑上的質量，計算結果如表 3 所示。儘管這種方法無法確定實際附加的質量大小，但它仍然能夠確認感測端表面對懸浮粒子的附著效果，以及這種質量感測器在懸浮粒子環境中測量質量。

四、結論

本文將調諧質量阻尼的概念實現於微機械製程中，在兩端固定樑上方建構調諧質量阻尼器，並應用於質量感測器。本文設計不同長度的懸臂樑，以此來觀察頻率響應對質量變化的效果。不論是透過狀態空間分析方法來模擬系統的響應變化，抑或是後續實驗驗證的結果，皆印證了調諧質量阻尼諧振感測元件確實能夠提高質量感測器的靈敏度。另一方面，透過焚香實驗測試，本文所提出的質量感測元件成功在懸浮粒子環境中偵測到微小質量的擾動，並反映在諧振頻率的變化上。然而事實上，空氣中溫溼度的變化也可能造成共振式質量感測器的共振頻率偏移。本研究所進行的質量感測實驗為在恆溫的真空測量腔體中進行，始能在不受溫溼度影響的情況下進行質量感測的探討。然而若是在溫度／濕度可能有所變異的情況下，則需要另外整合溫度／濕度感測器，並在測量微粒的同時透過一旁的溫度／濕度感測器來得之當下的溫溼度情況，才能補償由於外在環境變異造成的質量感測誤差。

針對未來進一步的商業化開發，可以透過後端電路來讀取頻率偏移的量，並以此反推沉積在感測器上的質量。由於本研究使用CMOS-MEMS製程，因此本身就能夠很容易地將

表 3. 實驗量測的頻率與計算之沉積質量變化表

Mode 1	Time	N/A	1 min	2 mins
	Frequency	5.009 MHz	5.002 MHz	4.992 MHz
	Calc. Depos. Mass	N/A	0.643 pg	1.506 pg
Mode 2	Time	N/A	1 min	2 mins
	Frequency	5.9593 MHz	5.9513 MHz	5.9406 MHz
	Calc. Depos. Mass	N/A	0.753 pg	1.775 pg

MEMS 感測元件與 CMOS 讀取電路進行單晶片整合。只需在外加電池與電源管理模組等商用 IC，即可將本研究所開發之質量感測器進一步整合成可攜式微粒偵測裝置。

本文章大部分理論推導及實驗結果源自杜文睿的碩士班研究成果⁽¹⁾。

參考文獻

1. 杜文睿, 適用於質量感測之基於調諧質量阻尼器結構 CMOS-MEMS 模態局部化共振器, 碩士論文, 國立臺灣大學 (2019).
2. 黃品淳, 基於調諧質量阻尼器之 CMOS-MEMS 模態局部化電壓感測器, 碩士論文, 國立臺灣大學 (2023).
3. A. Hajjam, J. C. Wilson, A. Rahafrooz, and S. Pourkamali, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **20**, 125019 (2010).
4. X. Li, K. He, C. Li, F. Yang, Q. Zhao, Y. Ma, Y. Cheng, W. Ouyang, G. Chen, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118** (12), 158 (2013).
5. Y. Hao, J. Liang, H. Kang, W. Yuan, and H. Chang, *IEEE Sensors Journal*, **21** (4), 4325 (2020).
6. M. Spletzer, A. Raman, A. Q. Wu, X. Xu, and R. Reifenberger, *Applied Physics Letters*, **88** (25), 254102 (2006).
7. T. Rabenimanana, V. Walter, N. Kacem, P. L. Moal, G. Bourbon, J. Lardiès, *Sensors and Actuators A: Physical*, **295**, 634 (2019).
8. J.-R. Liu, Y.-C. Lo, and W.-C. Li, "A Novel Micromechanical Mode-Localized Resonator Utilizing Anti-Resonating Structures," *Proc., 32nd IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'19)*, Seoul, South Korea, Jan. 27-31, 214 (2019).
9. F. D. Bannon, J. R. Clark and C. T.-C. Nguyen, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, **35** (4), 512 (2000).

作者簡介

杜文睿先生為國立臺灣大學應用力學所碩士。

Wen-Ruei Du received his M.S. in the Institute of Applied Mechanics from National Taiwan University.

劉嘉仁先生為國立臺灣大學應用力學所碩士，現為創意電子股份有限公司工程師。

Jia-Ren Liu received his M.S. in the Institute of Applied Mechanics from National Taiwan University. He is currently an Engineer in GUC Co., Ltd..

陳庭毅先生現為國立臺灣大學應用力學所博士候選人。

Ting-Yi Chen is currently a Ph.D. candidate in the Institute of Applied Mechanics at National Taiwan University.

李尉彰先生為加州大學柏克萊分校電機工程博士，現為國立臺灣大學應用力學所副教授。

Wei-Chang Li received his Ph.D. in Electrical Engineering from the University of California, Berkeley. He is currently an Associate Professor in the Institute of Applied Mechanics at National Taiwan University.

一氧化氮氣體感測器與其電路模組之應用

Application of NO Gas Sensor with Circuit Module

邱俊瑋、洪瑞華

Chun-Wei Chiu, Ray-Hua Horng

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

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

一、氣體感測器

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

下，2020 年洲際甚至區域之移動受到限制，人類的生活已完全邁向網路鏈結世代，伴隨著網路迅速的發展，從 4G 通訊技術發展到新世代 5G 通訊技術，衍生而來的是所有感測裝置其訊號將邁向雲端化與智慧化，若所有的感測裝置皆可以透過網路上傳收集到資訊，可藉由後端系統收集資訊，最後藉由大數據分析判斷使用者情境與進行需求回饋，如圖 1，此一應用情境已逐漸驗證在不同領域。此外，氣體感測器也能應用於醫療方面，研究指出，從人體呼出的氣體種類以及濃度，就能夠初步得知病患身體狀況，若是呼出丙酮 (Acetone)，則可能和糖尿病心血管疾病有關⁽¹⁾；若是呼出氨氣 (NH₃)，則可能是腎臟病所引起⁽²⁾；若是人體呼出氣體含有超過 35 ppb 的一氧化氮 (NO)，則有極高可能已經罹患氣喘⁽³⁻⁶⁾。上述不同氣體中，又以一氧化氮 (NO) 受到較多關注，根據 2018 年全球氣喘報告 (The Global Asthma Report 2018) 統計，全球約有 3.4 億人患有氣喘疾病，若能利用 NO 氣體感測器對人類呼氣進行精準、非侵入式且可重複的檢測，將能大大改變現今生醫檢測生態，因此能夠檢測低 ppb 濃度的 NO 氣體感測器具有相當大的研究價值。本研究計畫秉持著正在發生中的雲端智慧化的發展，將採用先進的薄膜製造技術與分析能力，研製高感度與適用於環境監控之氣體感測器與穿戴式醫療用之非侵入式檢測呼吸成分氣體感測器，透過模擬，不僅優化氣體感測器，也將微加熱器最佳化，最後結合人工智慧化系統與雲端服務，將此氣體感測器應用在城市的氣體監控，預測有毒之氣體，以達到即時危險氣體之監測，與達到先端智慧製造的需求。

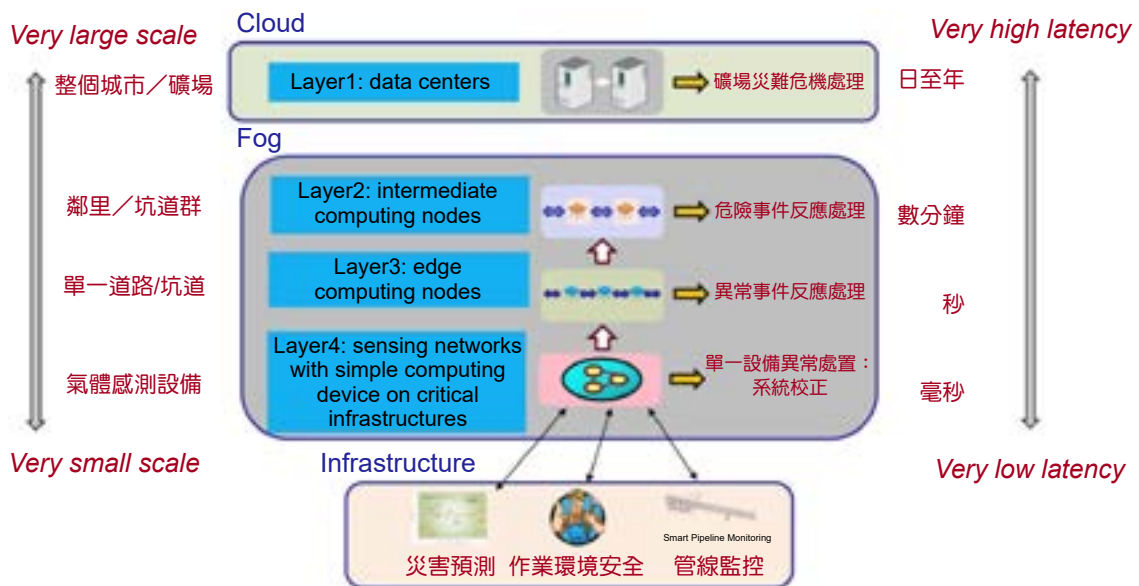


圖 1. 智慧化感測系統層級圖。

氣體感測器最早來自 1932 年由 Hersch⁽⁷⁾ 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⁽⁸⁾ 提出固態電解質氣體感測器，1953 年 P.B.Weisz⁽⁷⁾ 發現半導體材料吸附氣體會發生電阻變化，然後 1962 年 Seiyama⁽⁸⁾ 利用半導體阻值改變方式偵測氣體，而 1968 年 Figaro⁽⁹⁾ 率先將半導體型可燃式氣體感測器商業化，1974⁽¹⁰⁾ 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⁽¹¹⁾，然後眾多種類感測氣體的方式，皆各有其優缺點以及應用於不同領域。近年

來由於智慧裝置急速發展，網路發達，傳輸速度亦越來越快，透過無線傳輸，氣體感測器之應用不僅只讓現場人知悉，亦可透過無線傳輸，讓各個災難救助單位及時得到訊息，防止災難發生。因此，氣體感測器市場預估至 2021 年可達 900 億美元商機且年複合成長率達 7.3%，如圖 2⁽¹²⁾，所以各大廠積極投入智慧型氣體感測器裝置開發，其中以環境感測最為熱門，目前已知各大廠皆在室內空氣品質監測皆有產品推出，如 Bosch 推出的空氣品質監測元件如圖 3，該感測器結合溫度與濕度的偵測且以微機電製程製作 (microelectromechanical system, MEMS)，元件尺寸可以做到極小化，另外就是由日本 Figaro 公司推出的環境偵測晶片如圖 4，其構造以簡單微機電製程完成，元件本身只有單純氣體感測功能，還有英國 CMOS Cambridge 所研發生產空氣品質監測元件如圖⁽⁵⁾，該感測器具有簡單微控制器 (MCU)，可針對氣體感測訊號進行處理，眾多室內空氣品質偵測模組主要針對二氧化碳以及有機揮發物 (total volatile organic compound, TVOC) 作為主要偵測氣體，除此之外，酒精感測器也是氣體感測器重要一部份，主要是針對酒駕駕駛做反應式偵測，然而對於一氧化氮偵測這一應用，多以電化學式為主，圖 6 為商規氣體感測器 SGX MiCS-2714 (半導體式) 以及 NGK NO₂-MD-1000 (電化學式)，表 1 為此兩氣體感測器針對 NO₂ 氣體的感測規格 (由於目前尚未有半導體式之 NO 氣體感測氣，因此以 NO₂ 氣體感測器進行比較，圖中可看見半導體式的 SGX MiCS-2714 感測器具有結構簡單、體積小等特點；另一方面，電化學式的 MEMBRAPOR NO/S-25 氣體感測器針對低濃度有較高的感測靈敏度，最低氣體濃度解析度 0.05 ppm (50 ppb) 以及較短的反應時間 (25 秒)，且輸出訊號與濃度關係線性，因此電化學式氣體感測器主要被應用針對低濃度的生醫感測；然而，其結構較複雜，且使用壽命受到內部電解液限制，成為電化學式氣體感測器最致命之缺點。又近年來商業化規模的製作主要考量為成本控制與實用性，因此，儘管現有的技術顯示半導體式氣體感測器在低濃度感測上較困難，但結構簡單且成本較低之優勢，使其仍然具有相當大發展的潛力，有鑒於此，本研究計畫將開發半導體式氣體感測器，研究此感測器之感應特性、優化，使其能針對低濃度氣體有較高的感測靈敏度並縮短感測時間，以其應用於生醫感測、IoT 物聯網及攜帶式電子化商品。

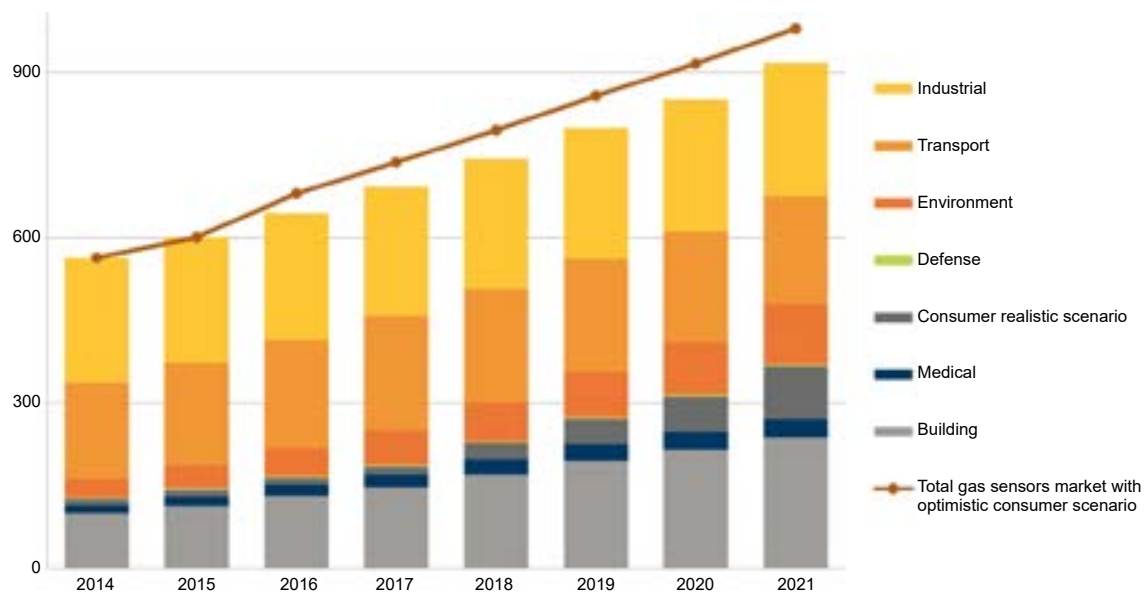


圖 2. 氣體感測器市場應用佔比分佈圖。

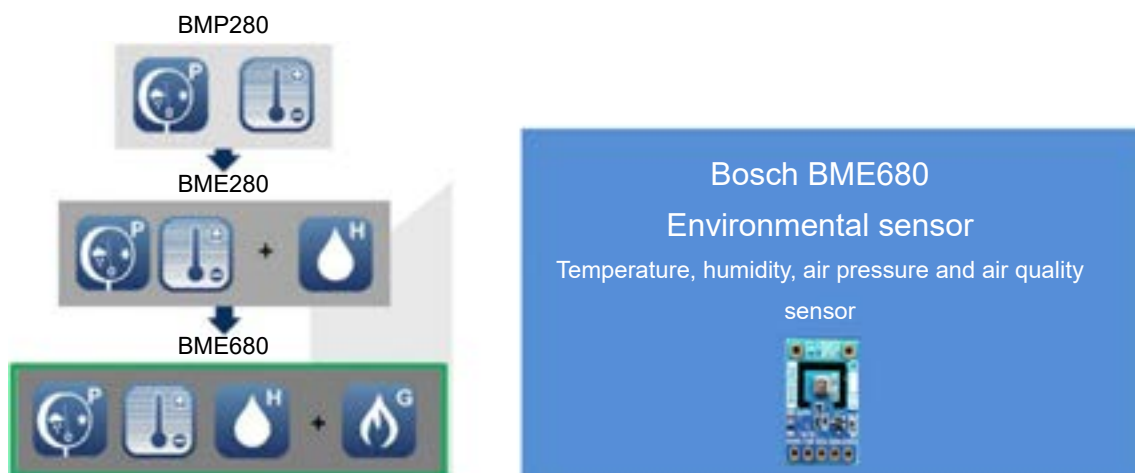


圖 3. Bosch 整合型環境偵測感測器。

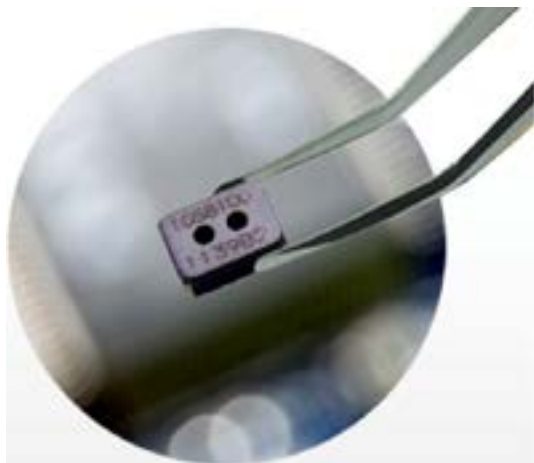


圖 4. Figaro TVOC 環境偵測感測器。



圖 5. CMOS Cambridge 環境偵測感測器。

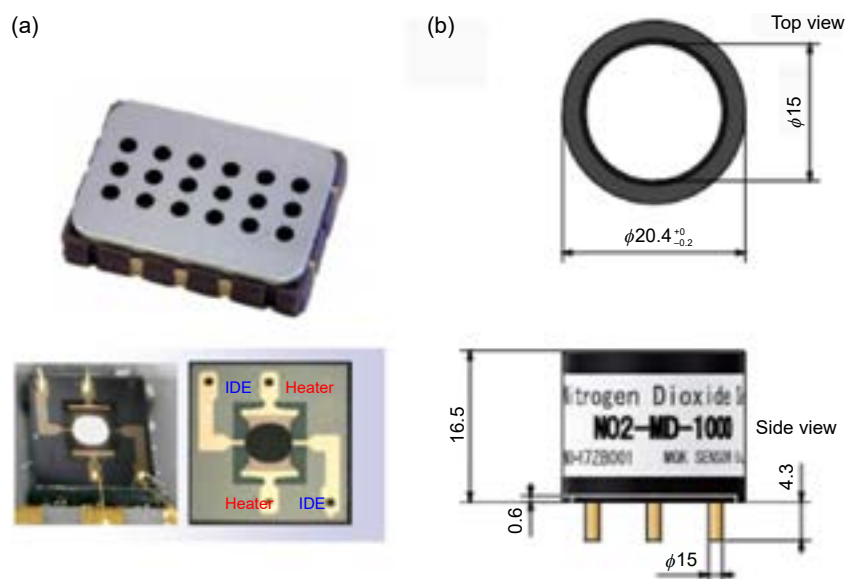


圖 6. (a) 半導體式 FIGARO FECS41-250 以及 (b) 電化學式 MEMBRAPOR NO/S-25 氣體感測器結構圖。

表 1. 商規氣體感測器 SGX MiCS-2714 以及 NGK NO₂-MD-1000 之感測規格。

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

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

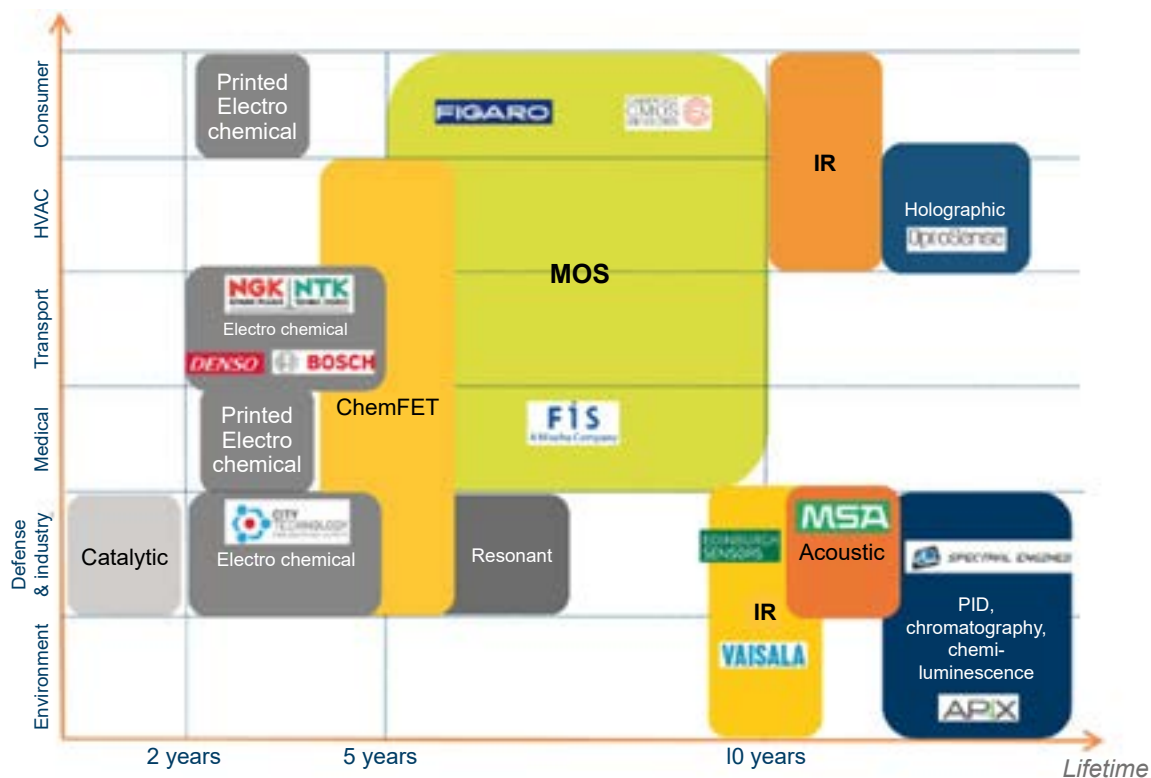


圖 7. 氣體感測器技術應用領域與使用壽命。

Comparison of three gas-sensing technologies.

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



圖 8. Figaro 氣體感測器技術分析。

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

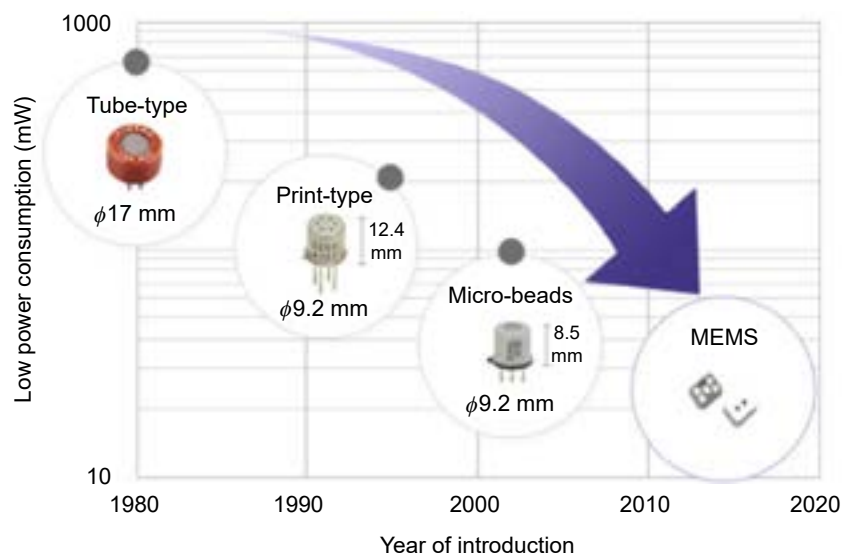


圖 9. 電阻式氣體感測器元件發展現況。

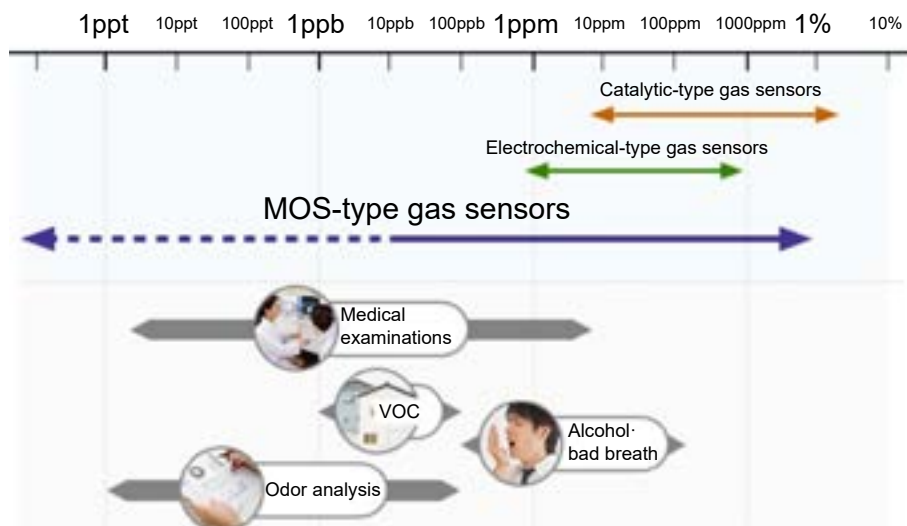


圖 10. 氣體感測器技術感測範圍應用。

表 2. 常見氣體感測器種類之特性比較⁽¹⁾。

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

二、氣體感測器特性評估

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

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

如果通入的目標氣體為氧化性氣體 (如 NO 及 NO₂)，氣體會捕獲薄膜表面的電子形成氧負離子吸附於表面，增加薄膜的空乏區 (depletion region)，導致電阻值上升，因此氣體響應度的定義為

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

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

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

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

如果通入的目標氣體為還原性氣體 (如 NH₃ 及 SO₂)，則氣體形成氧負離子吸附於薄膜表面後會將電子釋放回薄膜之中，減少薄膜的空乏區，導致電阻值下降，為了使氣體響應度恆大於一，因此氣體響應度的定義為

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

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

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

S_{sen} ：氣體靈敏度 (sensitivity)，單位為 ppm⁻¹ 或是 ppb⁻¹。

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

ΔC ：目標氣體濃度 (concentration) 變化，單位為 ppm⁻¹ 或是 ppb⁻¹。

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

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

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

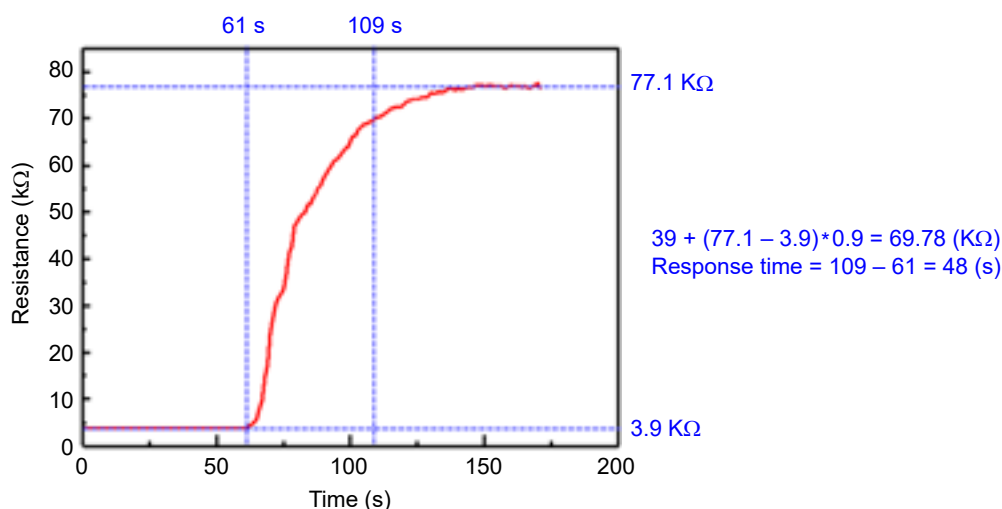


圖 11. 氣體反應時間示意圖。

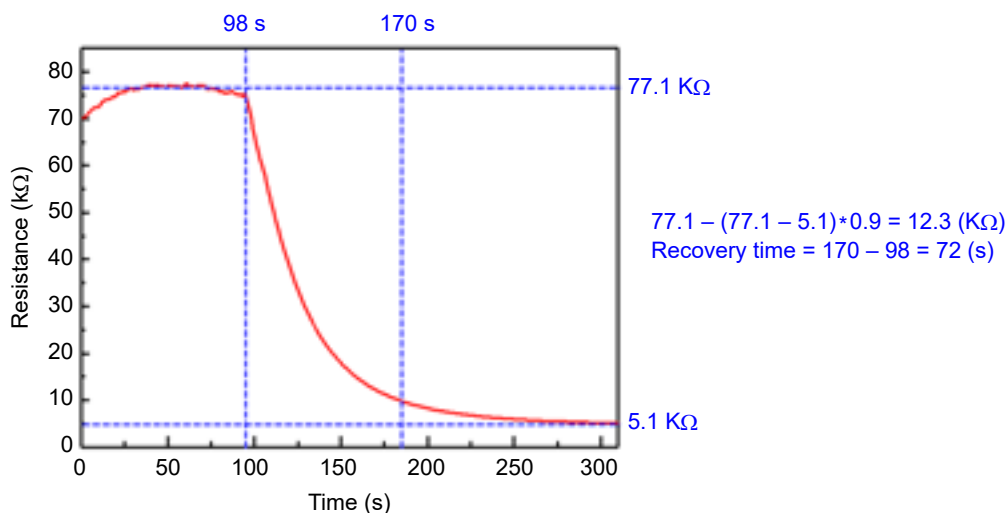


圖 12. 氣體回復時間示意圖。

三、半導體式氣體感測器偵測原理

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

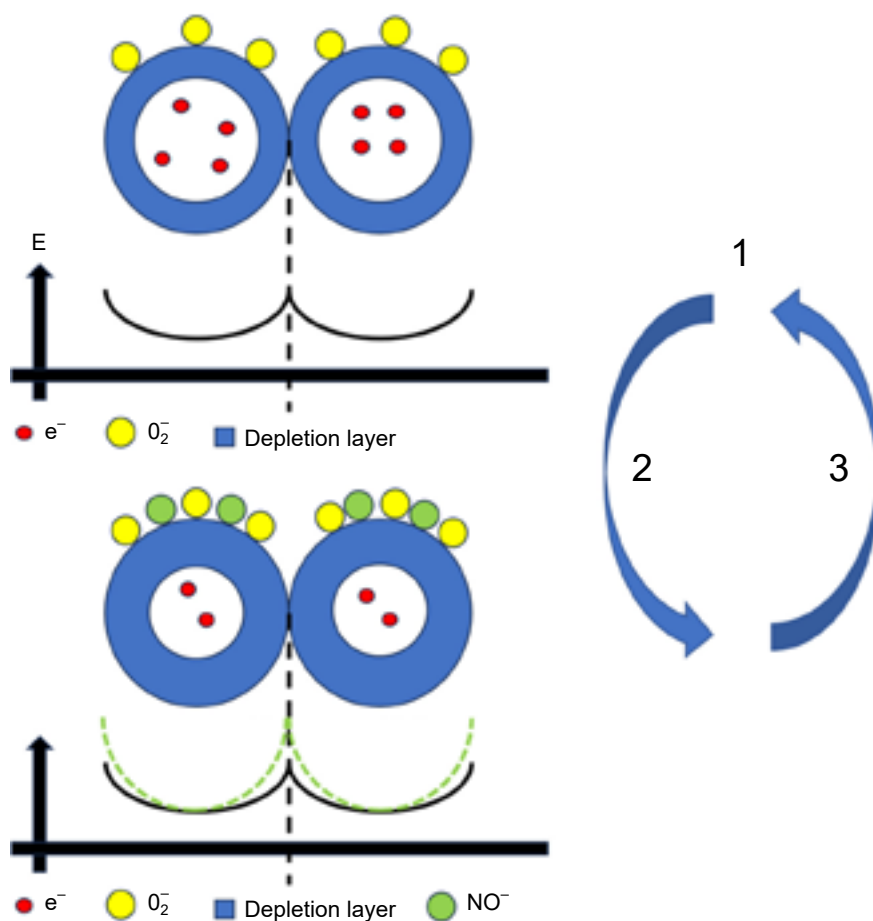


圖 13. 感測機制模型。

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

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

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

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

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

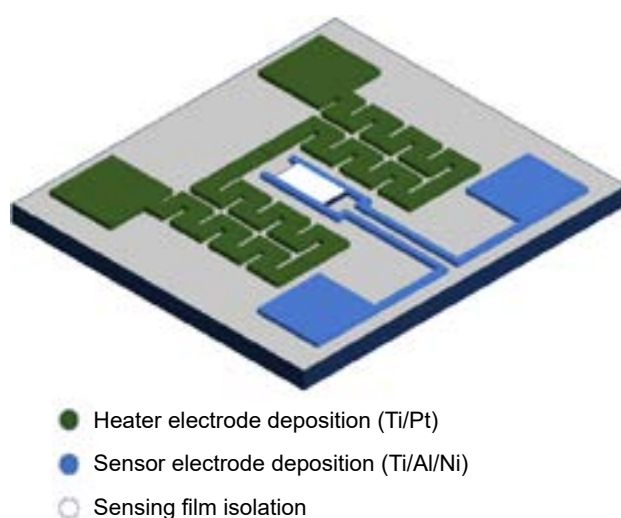


圖 14. 半導體式氣體感測器示意圖。

四、感測電路模組

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

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

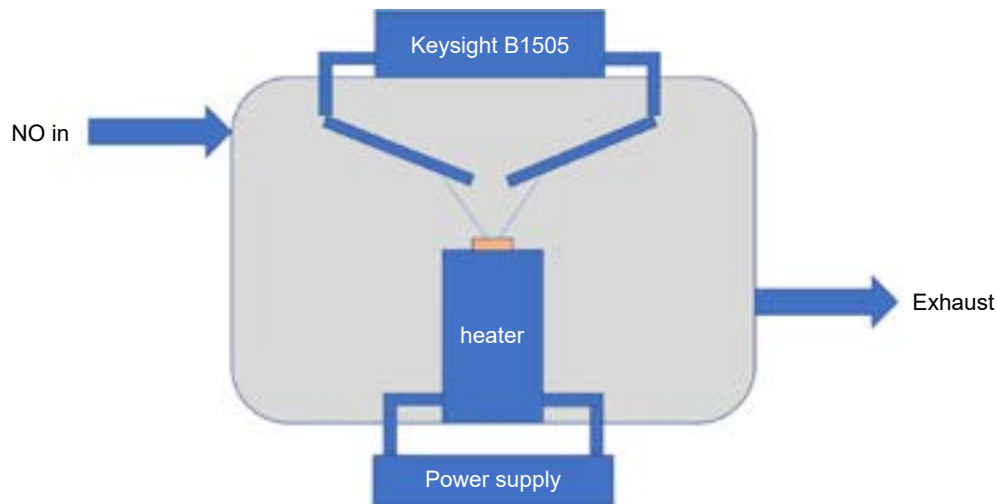


圖 15. 一般半導體量測機台示意圖。

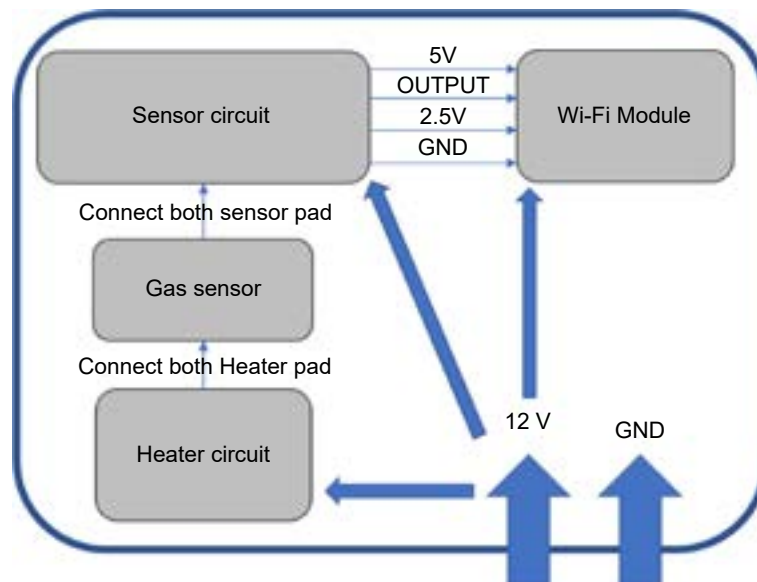


圖 16. 感測電路模組示意圖。

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

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

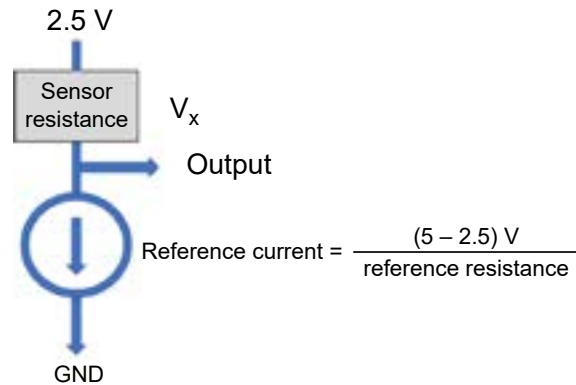


圖 17. 感測電路簡易模型。

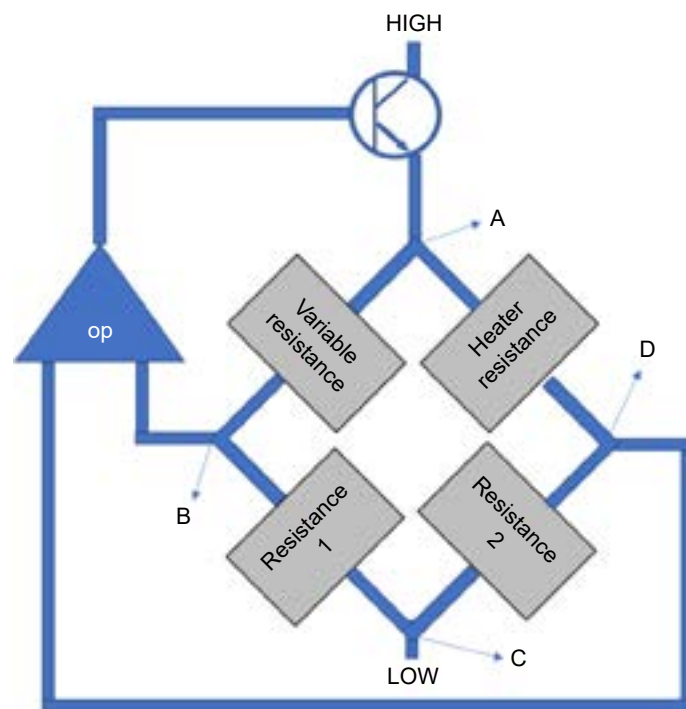


圖 18. 加熱電路。

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

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

經由化簡可得一簡單等式：

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

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

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

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



圖 19. 感測電路模組中的加熱電路與感測電路實際圖。



圖 20. 感測電路模組中的 Wi-Fi 模組實際圖。

四、感測電路模組與一般量測系統之分析比較

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

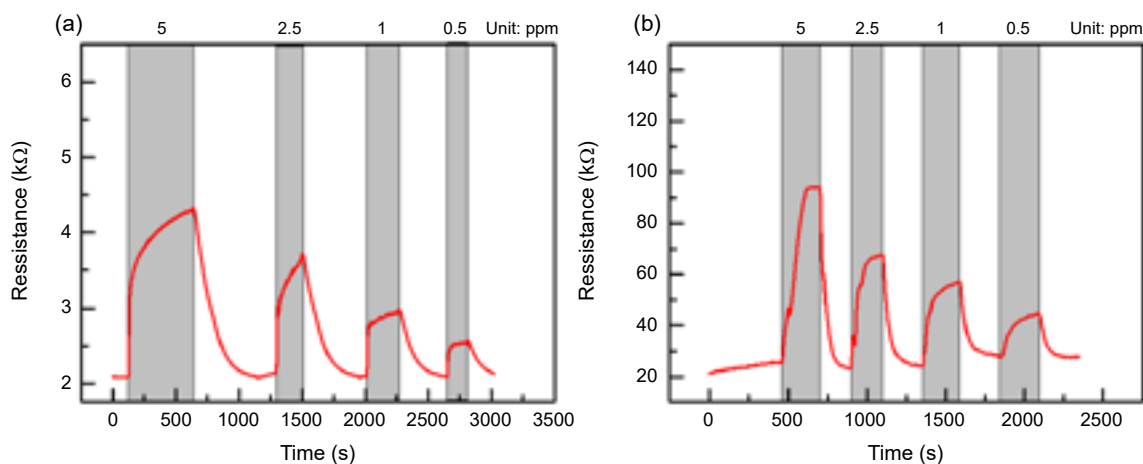


圖 21. 電阻對時間圖；(a) 於半導體量測系統與 (b) 於感測電路模組。

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

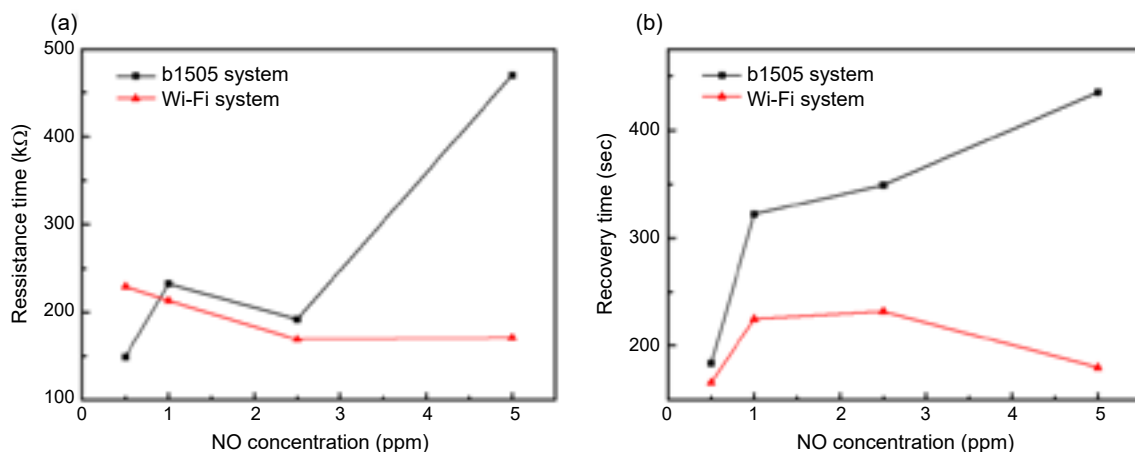


圖 22. 於兩種系統 (a) 反應時間比較 (b) 回復時間比較。

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

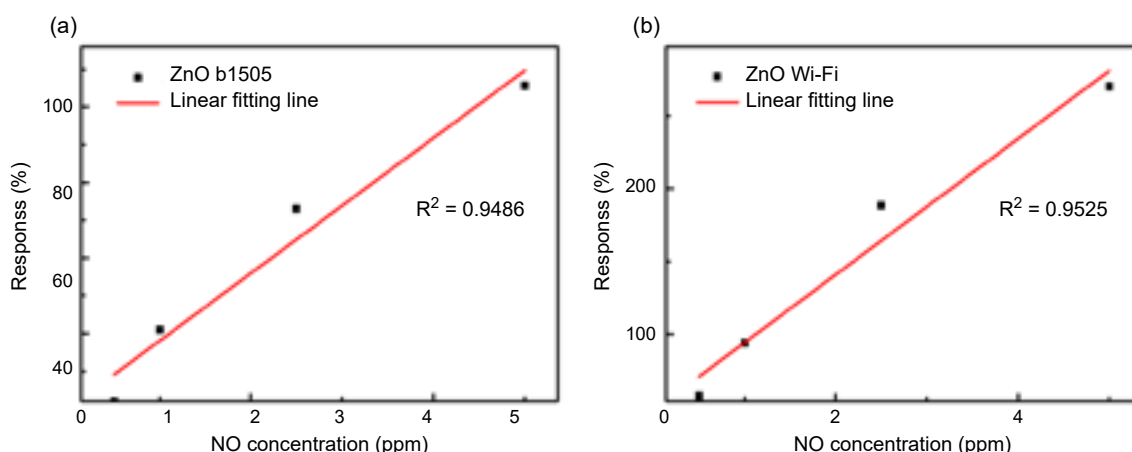


圖 23. 氣體響應度之線性度 (a) 於半導體量測系統 (b) 於感測電路模組。

五、結論

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

參考文獻

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

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

作者簡介

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

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

邱俊瑋先生現為國立陽明交通大學資訊科學與工程研究所博士生。

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

研究金奈米粒子吸附氧化鋅奈米結構之甲醇氣體感測器特性

Investigation and Characterization of Methanol Gas Sensor for the ZnO Nanostructures with Adsorbed Au Nanoparticles

朱彥霖、李韋宏、楊勝州

Yen-Lin Chu、Wei-Hong Li、Sheng-Joue Young

在氧化銦錫玻璃基板上生長高密度且排列良好之氧化鋅奈米結構和吸附金奈米顆粒被用作氣感材料，通過簡單的水熱法，在不同的直流濺鍍系統沉積時間 (0 s、30 s)，金奈米顆粒吸附的奈米柱陣列成功地在基板上生長，製作為氣體感測元件。透過儀器的分析 [掃描式電子顯微鏡、能量色散 X 射線譜、X 射線繞射儀、光致發光儀、穿透式電子顯微鏡圖]，觀察其奈米結構的表面型態、材料的結晶度、光學特性以及元素含量的分布，證實金奈米粒子成功吸附在奈米結構上，在元件的部分，有無金奈米粒子吸附的氧化鋅奈米柱對甲醇 1000 ppm 響應值分別為 63% 與 41%，並且在工作溫度 150 °C 和甲醇濃度為 1000 ppm 下呈現出良好的特性，進一步證實金奈米粒子不但可以有效的提升感測器的靈敏度也增強了對感測元件的穩定度。

High-density and well-aligned zinc oxide (ZnO) nanostructures and adsorbed gold (Au) nanoparticles grown on indium tin oxide (ITO) glass substrates were used as gas materials. Through a simple hydrothermal method and at different deposition times of the DC sputtering system (0 s、30 s), the nanorod (NR) arrays adsorbed by Au nanoparticles were successfully grown on the substrate to produce gas-sensing devices. Through instrument analysis [scanning electron microscope (SEM), energy-dispersive spectroscopy (EDS), X-ray diffraction (XRD), photoluminescence (PL), transmission electron microscopy (TEM)], the surface morphology of nanostructure, crystallinity of the material, optical property, and distribution of element content were observed, confirming the successful adsorption of Au nanoparticles on the nanostructure. In the device section, the response values of ZnO nanorods with or without Au nanoparticles adsorption to 1000 ppm methanol were 63% and 41%, respectively, and showed good characteristics at operating temperature of 150 °C and methanol concentration of 1000 ppm. This further confirms that Au nanoparticles can not only effectively improve the sensitivity of the sensor but also enhance the stability of the sensing device.

一、研究動機

在日常生活或工業生產中，大多數氣體是無色無味的，在實驗室、工廠、公司和家庭中都觀察到了不確定性。就人類的嗅覺而言，人體的感官無法區分氣體，所以應使用氣體感測器來檢測暴露於危險環境時潛在的嚴重影響，醇類一般屬於揮發性有機化合物，通常沸點低、反應活性高，且常與干擾氣體混合，因此，需要開發一種低溫工作、高靈敏度、高選擇性的揮發性感測器。⁽¹⁾

甲醇 (methanol, CH_3OH) 是一種重要的化工原料，廣泛應用於工業和許多家用產品，如藥品、香水、防凍劑等，也可用作車輛的替代品 (燃料) 在周圍環境中，是無色透明的，易燃、有毒、高揮發性液體，會對人體造成傷害，例如，當人們吸入或吸收甲醇時，會造成皮膚、不可逆的組織損傷，尤其是眼睛和神經系統，可能會導致死亡，如圖 1 和圖 2 所示。⁽²⁻³⁾

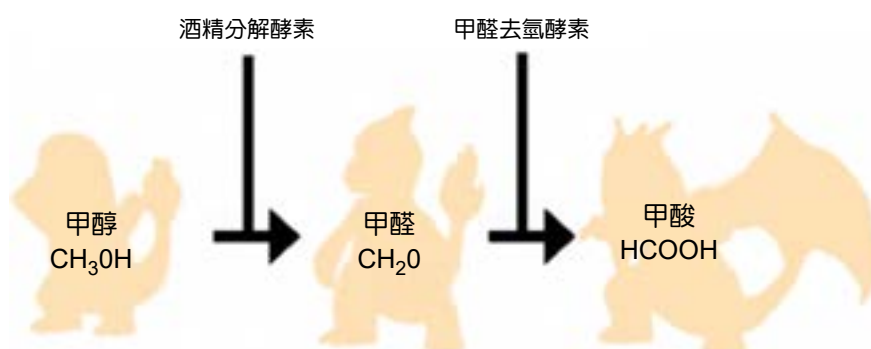


圖 1. 為人體內甲醇到甲酸之代謝過程⁽⁴⁾。

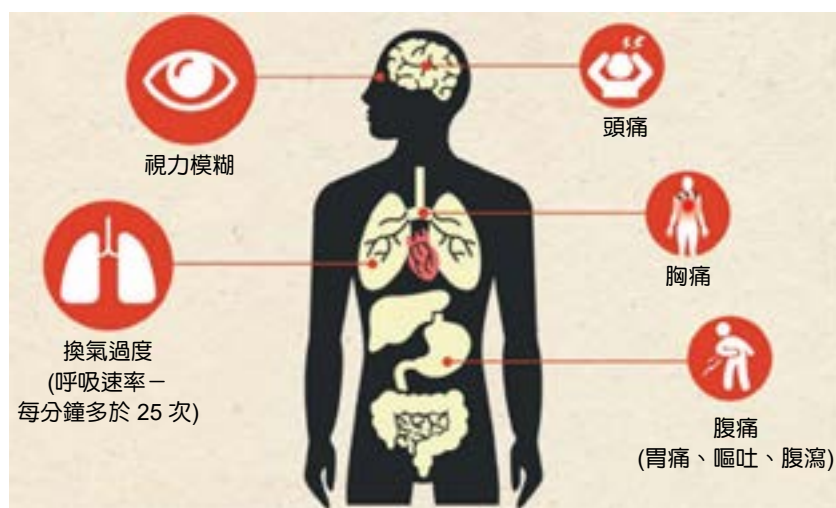


圖 2. 為甲醇中毒的情況⁽⁴⁾。

近年來，許多研究團隊漸漸地開始使用金屬奈米粒子去吸附在氧化鋅奈米結構上，吸附的金屬奈米粒子可以提高導電特性之外，也可增加樣品載子濃度，而目前為了提高感測器的靈敏度以及選擇性，會在感測器上添加貴金屬觸媒粒子或三族元素等等材料。⁽⁴⁾

二、介紹

奈米科技為材料創新提供了一個新途徑，這些新材料不僅更強韌、更具彈性，且材料本身又具有高靈敏度、多功能、智慧化等特性。隨著科技技術的進步，我們從微米時代進入了奈米時代，所謂的奈米材料是指 1–100 奈米之間的微小物質，廣泛的定義為三維空間中至少有一維處於奈米尺度的範圍內，此處的三維即物體的長、寬、高，若按維度的數目來區分，基本上奈米材料可分成零維、一維、二維，零維奈米材料是指三維尺度都在奈米尺度內，形狀近似點狀，例如：奈米粒子、量子點等等，一維奈米材料是指三維中的寬與高存在於奈米尺度，形狀為長條狀，例如：奈米針、奈米柱、奈米管、奈米線等等，二維奈米材料則是僅有高度存在於奈米尺度，形狀有如平面，例如：奈米片、奈米花等等。⁽⁴⁾

目前，金屬氧化物半導體用於氣體感測器的製造，其中，氧化鋅因其合成簡單、成本低廉、無毒、對揮發性有機氣體特別是甲醇氣體具有高響應性和穩定性，是近年來最流行的半導體材料之一，氧化鋅具有非中心對稱的六方纖鋅礦結構和室溫下的直接寬帶隙 (3.37 eV)，氧化鋅在 n 型半導體和 II-VI 族中具有 60 meV 的激子結合能，也具有較高的化學穩定性和熱穩定性，廣泛用於技術或商業應用，例如：紫外光電檢測器、pH 感測器、場發射器件和氣體感測器，成長一維氧化鋅奈米結構的方法，例如：濺鍍法、化學氣相沉積法、溶膠－凝膠法、熱蒸鍍法、脈衝雷射蒸鍍法、電漿輔助化學氣相沉積系統、電化學沉積法、分子束磊晶、有機金屬化學氣相磊晶法、水熱法。在不同的生長方法中，通常使用水熱法，其因設計簡單、成本低廉且可以在低溫下合成，此外，目前人們也已經進行了一些嘗試，例如使用元素摻雜劑 (In、Ga、Al) 和貴金屬顆粒 (Pd、Pt、Ag、Au) 來增強氧化鋅的氣體響應，這些經過不同處理的氣體感測器表現出了良好的氣感性能。⁽⁴⁾

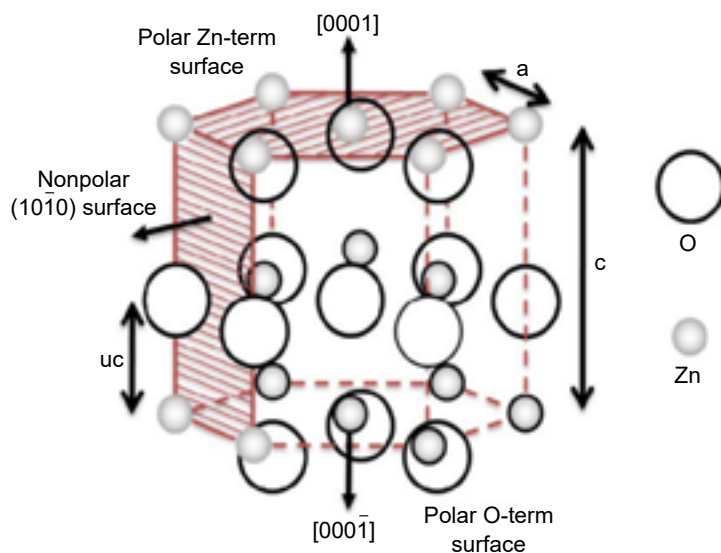


圖 3. 為氧化鋅的晶格結構示意圖⁽⁴⁾。

三、實驗部分

圖 4 為製作金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱之實驗流程圖，以射頻濺鍍系統 (RF magnetron sputter) 沉積氧化鋅晶種層 (ZnO seed layer) 於氧化銦錫 (indium tin oxide, ITO) 玻璃

基板 (1 cm × 0.5 cm) 上，接著使用水熱法合成氧化鋅奈米柱，並利用直流濺鍍系統 (direct current sputtering) 濺鍍金奈米粒子於氧化鋅奈米柱上完成元件 (濺鍍時間為 30 s)，用掃描式電子顯微鏡 (scanning electron microscope, SEM)、能量色散 X 射線譜 (energy-dispersive spectroscopy, EDS)、X 射線繞射儀 (X-ray diffraction, XRD)、光致發光儀 (photoluminescence, PL)、穿透式電子顯微鏡圖 (transmission electron microscopy, TEM) 進行樣品的表面形貌分析，以及使用銀電極來當作氧化鋅奈米柱元件的接觸電極，去做氣體感測器量測分析。⁽⁴⁾

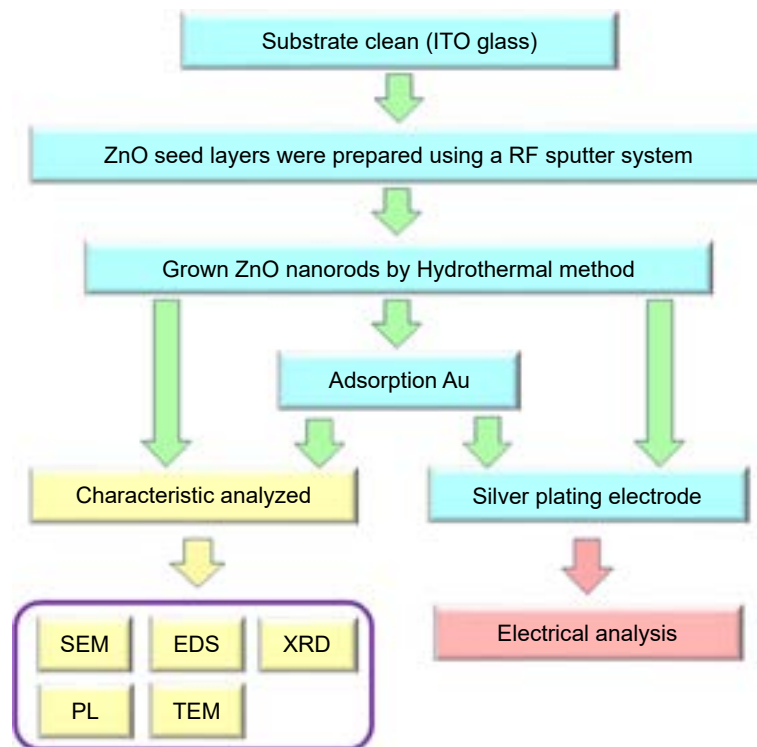


圖 4. 為製作金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱氣體感測器之流程圖與結構量測圖⁽⁴⁾。

四、實驗結果

1. 材料分析

圖 5 為氧化鋅晶種層塗覆的氧化銦錫 (indium tin oxide, ITO) 玻璃基板上生長 1 維奈米結構的掃描式電子顯微鏡，圖 5(a)-(d) 所示，製備奈米結構的側視圖和俯視圖表明奈米柱是相互交織，並且大部分垂直於基板表面取向，均勻性良好，氧化鋅奈米柱的長度和直徑分別為 1.71 μm 和 59 nm，而金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱的長度和直徑分別為 1.75 μm 和 54 nm，此外，也很明顯看到金奈米粒子成功地吸附於氧化鋅奈米柱上。⁽⁴⁾

圖 6 是利用 X 射線繞射儀分析兩個樣品之繞射圖譜，在結果中，兩個樣品都具有 (002)、(102)、(103) 峰值，其中 (002) 峰值強度是最強的，這一現象表明，奈米結構優先沿 c 軸方向生長，並具有六方纖鋅礦晶體的特徵，垂直生長於基板上 (JCPDS Card No. 36-1451)，此外，對於金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱而言，發現到多出了 (111) 峰值，這表明金奈米粒子沉積在奈米柱表面上 (JCPDS Card No. 89-3697)。⁽⁴⁻⁵⁾

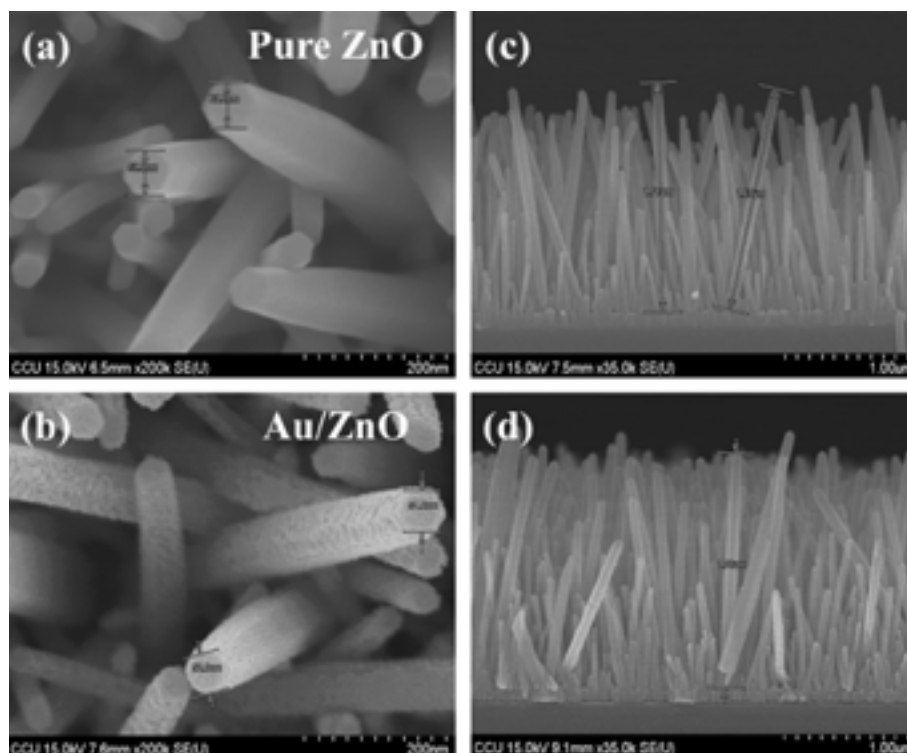


圖 5. 為兩個樣品之 SEM 圖⁽⁴⁾。

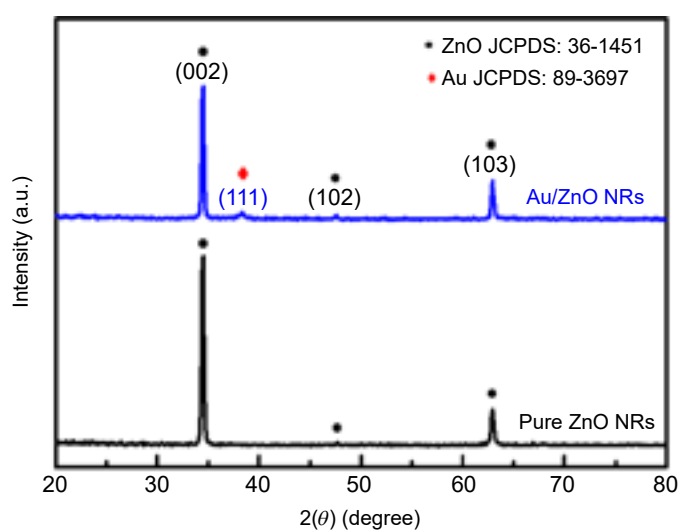


圖 6. 為兩個樣品之 XRD 圖⁽⁴⁾。

圖 7 為金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱之穿透式電子顯微鏡圖，圖 7(a) 可以明顯發現單根氧化鋅奈米柱的表面上有吸附金奈米粒子，在圖 7(b) 中可觀察到氧化鋅奈米柱與金奈米粒子之晶格間距，分別為 0.266 nm 以及 0.24 nm，其氧化鋅奈米柱與金奈米粒子主要生長方向為 (002) 方向和 (111) 方向，在圖 7(c) 為金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱之選擇區域電子衍射圖 (selected area electron diffraction, SAED)，從圖中證明了一維氧化鋅奈米柱為單晶結

晶排列且為纖鋅礦的結構，圖 7(d)-(f) 為金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱的穿透式電子顯微鏡 mapping 圖，可以看出鋅、氧、金元素均勻分布在單根奈米柱上，圖 7(g) 為能量色散 X 射線譜 (energy-dispersive spectroscopy, EDS)，其鋅、氧、金原子百分比為 50.36 at%、47.20 at%、2.44 at%。⁽⁴⁾

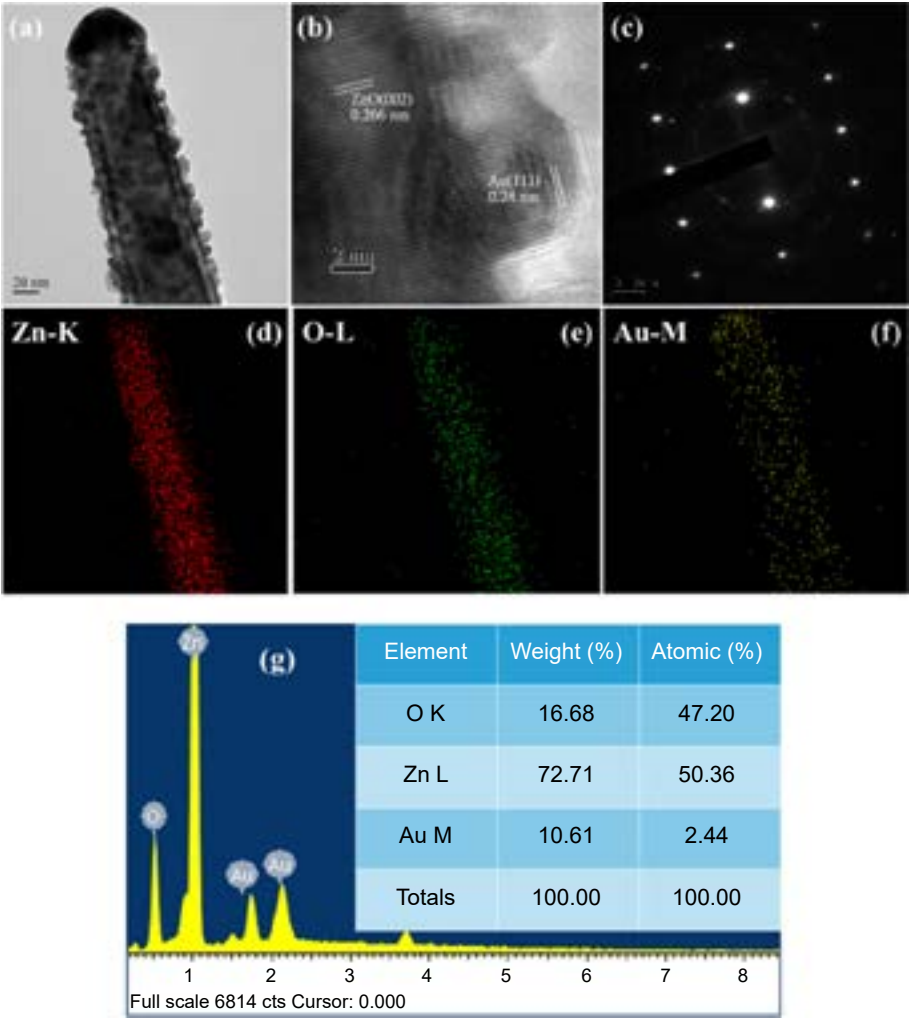


圖 7. 為兩個樣品之 TEM 圖和 EDS 圖⁽⁴⁾。

圖 8 顯示了通過 He-Cd laser (325 nm 波長) 激發的兩個樣品之光致發光儀光譜，一般來說，氧化鋅奈米結構主要產生兩個發射區域，第一個是近帶邊緣發射，這是由於與 ~380 nm 紫外光區域的自由激子復合所致，二是寬帶深能級發射，這是由於氧化鋅的本徵缺陷所致 (500–700 nm)，結果顯示，氧化鋅奈米柱的紫外光強度高於金奈米粒子吸附於氧化鋅奈米柱，而金奈米粒子吸附於氧化鋅奈米柱材料的本徵缺陷強度在可見光區域逐漸降低，這一結果可以歸因於兩個原因：(1) 激發電子移動進入導帶中的金奈米粒子，導致電子－電洞複合能力降低，(2) 貴金屬可以改善紫外線發射和氧空位。^(4, 6)

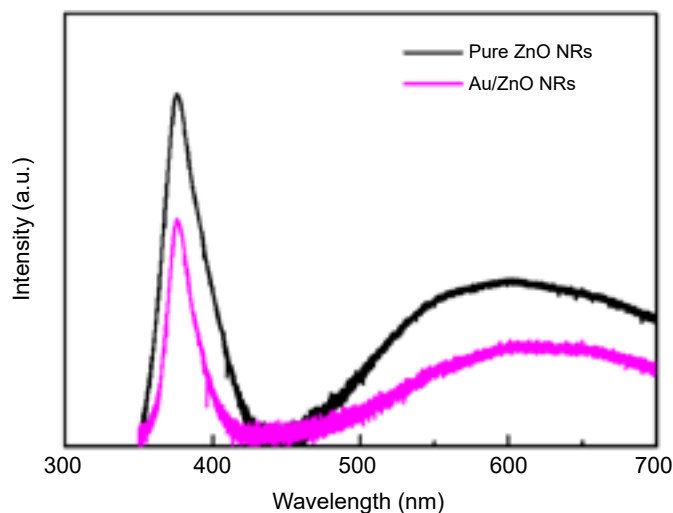


圖 8. 為兩個樣品之 PL 圖⁽⁴⁾。

2. 電性分析

此實驗為使用氧化鋅奈米柱與金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱對揮發性有機化合物進行氣體量測分析，氣體量測的容器與載台是使用高真空量測系統之 10 L 腔體與圓形加熱盤，並搭配 Keithley 2410 系統進行元件的氣體感測之電性分析。^(4,7)

氣體感測器之響應值公式如下：^(4,8)

$$\text{Response (\%)} = (R_{\text{air}} - R_{\text{gas}} / R_{\text{air}}) \times 100\%$$

如圖 9 和圖 10 所示，為氧化鋅奈米柱與金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱在不同溫度下對 1000 ppm 甲醇的響應圖與線性圖，可以明顯看到工作溫度從 100–200 °C，氧化鋅奈米柱和金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱對氣體的響應在 150 °C 時響應值有最大值，當操作溫度達到一定值時，會使固體材料的表面化學吸附的數量達到最大，而超過特定的溫度時，材料可能造成缺陷使得對氣體的吸附數量不能達到最大，造成熱衰退，接下來我們將會以 150 °C 作為最佳工作溫度量測氣體感測元件。^(4,9)

圖 11 和圖 12 是氧化鋅奈米柱和金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱在工作溫度為 150 °C 下對不同濃度之甲醇的響應圖與線性圖，當甲醇氣體通入腔體時，金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱的響應值從 200 ppm–1000 ppm 分別為 42%、49%、52%、56%、63%，而氧化鋅奈米柱的響應值從 200 ppm–1000 ppm 分別為 26%、30%、34%、37%、41%，可以明顯的看出金奈米粒子不但能有效提升氧化鋅奈米柱對氣體的響應，還有效的加快了氣體與氧化鋅奈米柱的反應。^(4,10)

如圖 13 顯示氧化鋅奈米柱與金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱在工作溫度為 150 °C 下對不同氣體之 1000 ppm 的量測分析，所使用的氣體包含了甲醇、乙醇、丙酮、異丙醇等揮發性有機化合物氣體，可以明顯的看到氧化鋅奈米柱與金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱對於甲醇的響應最佳，表示其感測元件具有很高的氣體選擇性。^(4,11)

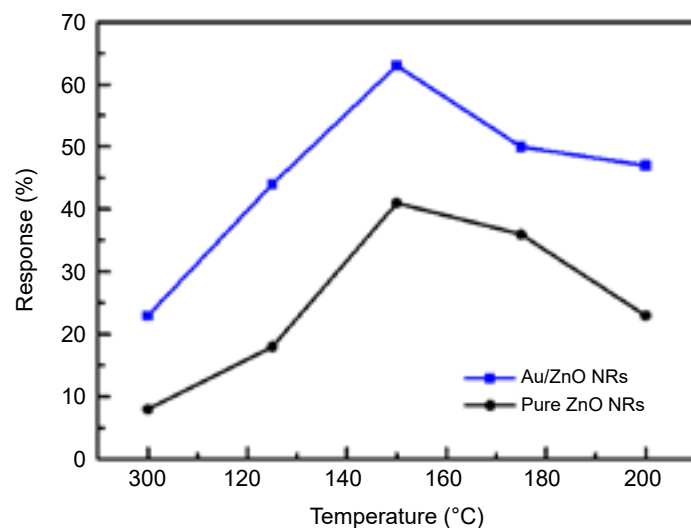


圖 9. 為兩個樣品在不同工作溫度下對甲醇的響應線性圖⁽⁴⁾。

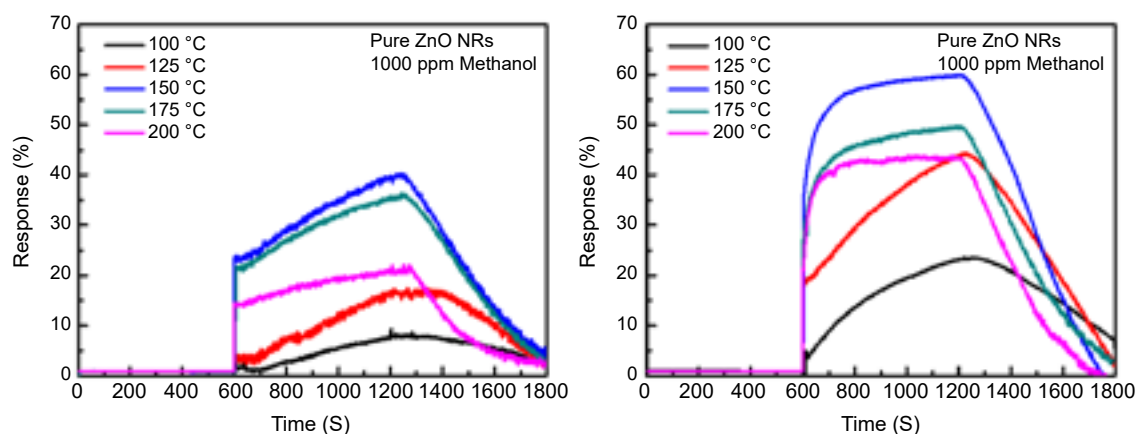


圖 10. 為兩個樣品在不同工作溫度下對甲醇的響應圖⁽⁴⁾。

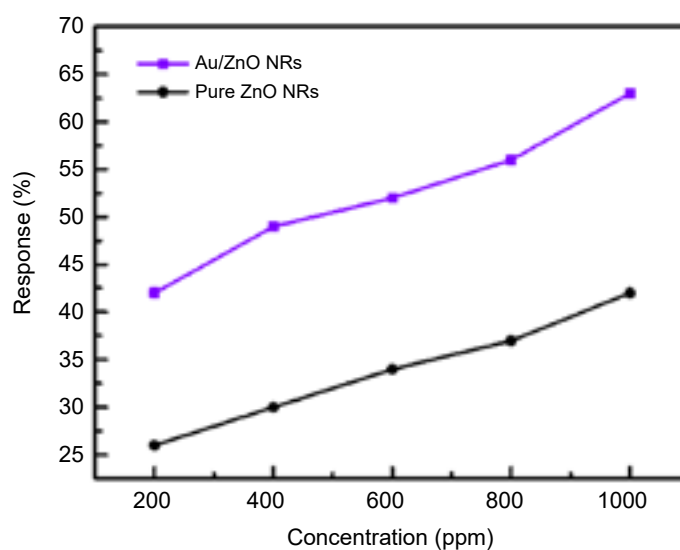


圖 11. 為氧化鋅奈米柱與金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱不同濃度的甲醇線性圖⁽⁴⁾。

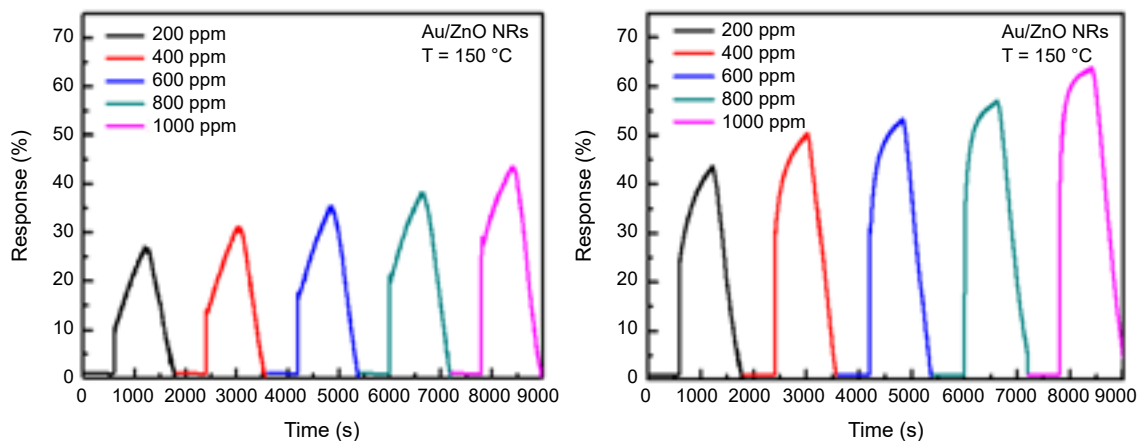


圖 12. 為兩個樣品在不同濃度的甲醇響應圖⁽⁴⁾。

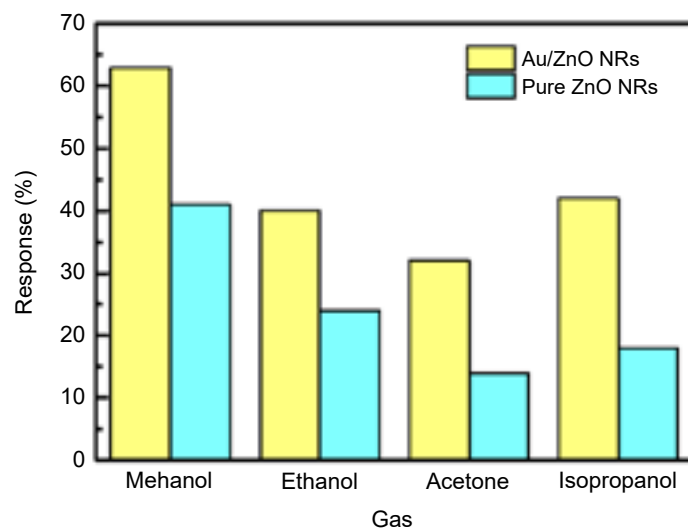


圖 13. 在 150 °C 下，對 1000 ppm 的各種氣體之響應圖⁽⁴⁾。

圖 14 為氧化鋅奈米柱和金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱在工作溫度為 150 °C，對 1000 ppm 濃度之甲醇測量氣體感測器再現性，從氧化鋅奈米柱的響應圖可以觀察到氧化鋅奈米柱在連續三次通入 1000 ppm 甲醇時，其響應值為 41%，而在金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱於連續三次通入 1000 ppm 甲醇時，其響應值都保持在 63%，因此證明金奈米粒子可以幫助氧化鋅奈米柱對於感測甲醇有著良好的響應與再現性。⁽⁴⁾

根據以上感測器測量結果，可以發現氧氣吸附在甲醇氣體感測的氧化鋅奈米柱的電性傳輸中起著相當重要的作用，如圖 15(a) 所示，當氣體感測器置於環境空氣中時，氧分子通常會被吸附於奈米柱的表面，並藉由捕捉氧化鋅中的電子將其離子化為 O^- 、 O^{2-} 、 O_2^- 等氧離子，從而在氧化鋅區域的表面上形成厚的電子空乏區，從而導致電子遷移率的下降，感測器的電阻上升，電子的傳輸路徑沿垂直軸方向，最有利於在氧化鋅表面發生感測反應，而吸附在感測器表面的氧氣會經歷以下不同階段的反應：^(4, 12)

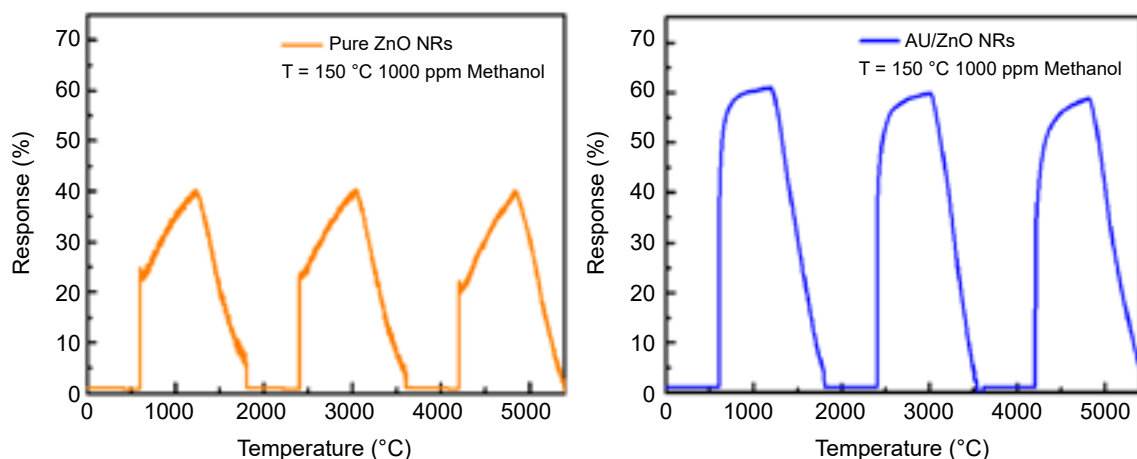
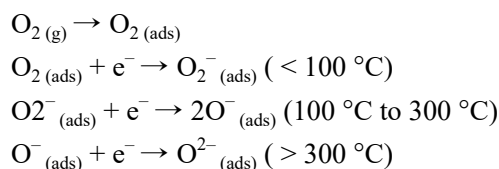
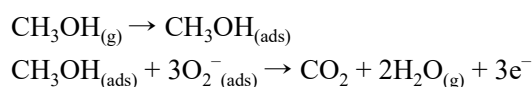


圖 14. 為兩個樣品在甲醇環境下的再現性響應圖⁽⁴⁾。



其中 (gas) 表示為氣體於空氣中，而 (ads) 表示為氣體已吸附於表面，當感測器置於甲醇氣體中，氣體分子會分散並容易與吸附的氧離子結合，並將被氧氣捕獲的電子釋放回導電帶中，如圖 15(b) 所示，這種現象可以形成薄的空間電荷層並降低晶界處的勢壘，進一步達到降低感測器阻抗，在感測器於工作溫度下， 2O^- 作為主要的氧物種會與甲醇分子產生反應，可以使用以下方程式描述受測氣體 (甲醇) 可能發生的反應：^(4, 13-15)



而在另外一方面，添加的貴金屬元素也有助於材料的氣體性質，可以從兩個因素來解釋：(1) 以金奈米粒子的功函數高於氧化鋅的功函數，這代表氧化鋅的費米能階 (Fermi level) 比金的能階來的更高，此現象歸因於金奈米粒子與氧化鋅材料之間的電子相互作用，另外也會導致氧化鋅表面上形成大量的微小蕭特基 (Schottky) 界面，使得電子空乏區變寬，(2) 金奈米粒子由於其催化作用而促進吸附與激活更多氧分子，活化的氧分子隨後通過溢流效應移動到氧化鋅奈米柱的表面，從而加速了氧離子化的過程，如圖 15(c) 所示，與氧化鋅奈米柱相比，金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱中捕捉了更多的電子，並形成厚電子空乏區，在圖 15(d) 中，金奈米粒子有利於在氧化鋅表面上進行氣體反應之後的氣體解吸附過程，上述化學和電子其反應可協同改善金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱的氣體特性，因此，金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱感測器顯示出比氧化鋅奈米柱感測器更高響應。^(4, 13-15)

此外，將金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱樣品與其他氣體材料做比較，更進一步發現，我們設計的樣品具有良好的氣體響應，如表 1 所示。⁽¹⁶⁻²⁰⁾

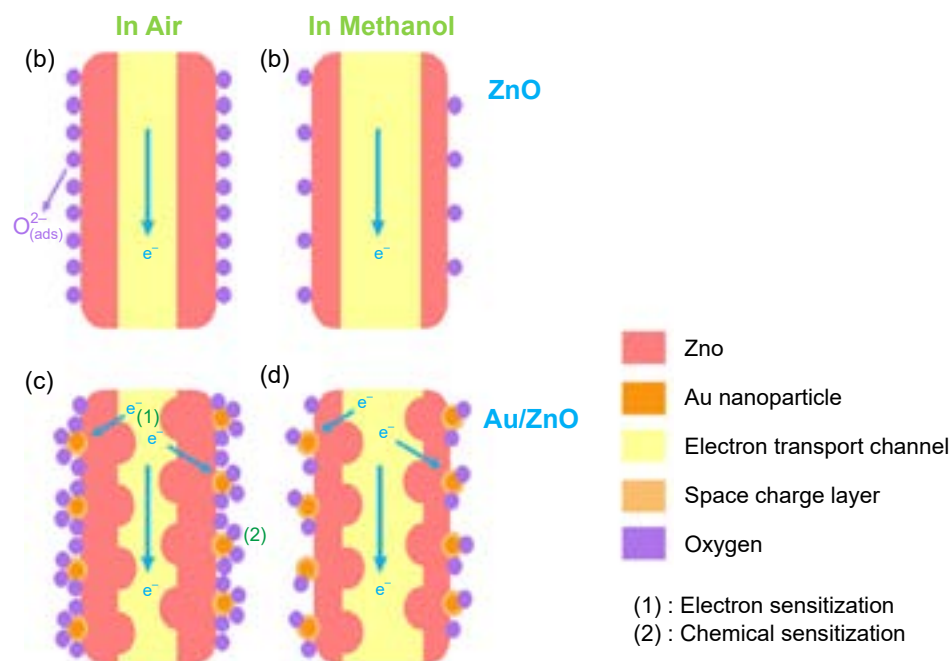


圖 15. 為氧化鋅奈米柱與金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱之氣體感測機制圖⁽⁴⁾。

表 1. 為 Au/ZnO 樣品與其他感測材料比較之結果⁽¹⁶⁻²⁰⁾。

材料	甲醇濃度 (ppm)	溫度 (°C)	響應值 (%)	參考文獻
Al/ZnO	500	275	44	(16)
Pt/WO ₃	1012	275	2.13	(17)
CuO	200	370	9.32	(18)
CuO	100	200	4.25	(19)
ZnO	500	340	16	(20)
Au/ZnO	1000	150	63	This work

五、結論

通過簡單的水熱法過程與直流濺鍍系統，成功製備出金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱於氧化銻錫 (indium tin oxide, ITO) 玻璃基板上，以掃描式電子顯微鏡圖、能量色散 X 射線譜 (energy-dispersive spectroscopy, EDS) 圖、穿透式電子顯微鏡圖 (transmission electron microscopy, TEM) 圖中，可以發現奈米柱的表面上有著明顯的金顆粒形狀和金的含量，且所合成的樣品都具有六方纖鋅礦之結構，X 射線繞射儀 (X-ray diffraction, XRD) 和光致發光儀 (photoluminescence, PL) 而言，其峰值皆有符合氧化鋅奈米柱與金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱之結構的特徵，在進行氣體量測的分析上，氣體感測器在最佳工作溫度 150 °C 顯示出對甲醇氣體的最大響應，氧化鋅奈米柱和吸附金奈米粒子的氧化鋅奈米柱對不同甲醇濃度皆呈現出線性的響應，也發現金奈米粒子除了有效的提升氣體感測元件之響應值，響應值從原本的 41% 提升至 63%，此外，對甲醇氣體也有良好的選擇性以及穩定性。

參考文獻

1. M. C. Horrillo, J. Getino, J. Gutierrez, L. Ares, J. I. Robla, C. Garcia, and I. Sayago, *Sens. Actuators B: Chem.*, **43** (1), 193 (1997).
2. J. Getino, M. C. Horrillo, J. Gutierrez, L. Ares, J. I. Robla, C. Garcia, and I. Sayago, *Sens. Actuators B: Chem.*, **43** (1), 200 (1997).
3. N. G. Patel, P. D. Patel, and V. S. Vaishnav, *Sens. Actuators B: Chem.*, **96** (1), 180 (2003).
4. 李韋宏, “探討金奈米粒子吸附氧化鋅奈米柱之氣體感測元件特性分析”, 國立虎尾科技大學電子工程系所碩士論文, (2021).
5. L. Su, and N. Qin, *Ceram. Int.*, **41** (2), 2673 (2015).
6. Y. L. Chu, Y. H. Liu, T. T. Chu, and S. J. Young, *IEEE Sens. J.*, **22** (6), 5644 (2022).
7. S. J. Young, and L. T. Lai, *IEEE Trans. Electron Devices*, **67** (1), 304 (2020).
8. Y. L. Chu, S. J. Young, L. W. Ji, T. T. Chu, K. T. Lam, Y. J. Hsiao, I. T. Tang, and T. H. Kuo, *J. Electrochem. Soc.*, **167** (11), 117503 (2020).
9. X. P. Shen, L. J. Guo, G. X. Zhu, C. Y. Xi, Z. Y. Ji, and H. Zhou, *RSC Adv.*, **5** (79), 64228 (2015).
10. S. J. Young, and Y. L. Chu, *IEEE Trans. Electron Devices*, **68** (4), 1886 (2021).
11. Q. Tan, J. Fang, W. Liu, J. Xiong, and W. Zhang, *Sensors*, **15** (11), 28502 (2015).
12. J. Ding, J. W. Zhu, P. C. Yao, J. Li, H. P. Bi, and X. Wang, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **54** (36), 8947 (2015).
13. X. Liu, J. Zhang, L. Wang, T. Yang, X. Guo, S. Wu, and S. Wang, *J. Mater. Chem.*, **21** (2), 349 (2011).
14. A. Kolmakov, D. O. Klenov, Y. Lilach, S. Stemmer, and M. Moskovits, *Nano Lett.*, **5** (4), 667 (2005).
15. J. Guo, J. Zhang, M. Zhu, D. Ju, H. Xu, and B. Cao, *Sensor. Actuator B: Chem.*, **199**, 339 (2014).
16. P. P. Sahay, and R. K. Nath, *Sensor. Actuator B: Chem.*, **134** (2), 654 (2008).
17. I. P. Liu, C. H. Chang, T. C. Chou, and K. W. Lin, *Sensor. Actuator B: Chem.*, **291**, 148 (2019).
18. A. Umar, A. A. Alshahrani, H. Algarni, and R. Kumar, *Sensor. Actuator B: Chem.*, **250**, 24 (2017).
19. W. C. Geng, Z. Y. Ma, Y. J. Zhao, J. H. Yang, X. W. He, L. B. Duan, F. Li, H. Hou, and Q. Y. Zhang, *Sensor. Actuator B: Chem.*, **325**, 128775 (2020).
20. F. Xu, C. T. Zhou, and H. P. Ho, *J. Alloys Compd.*, **858**, 158294, (2021).

作者簡介

朱彥霖先生為國立虎尾科技大學光電工程系光電與材料科技所博士，現為日月光半導體製造股份有限公司工程中心主任工程師

Yen-Lin Chu received his Ph.D. in the Department of Electro-Optical Engineering & Institute of Electro-Optical and Materials Science at National Formosa University. He is currently a Supervisor in the Department of Central Engineering from Advanced Semiconductor Engineering (ASE), Inc.

李韋宏先生為國立虎尾科技大學電子工程系所碩士

Wei-Hong Li received his M.S. in the Department of Electronic Engineering from National Formosa University.

楊勝州先生為國立成功大學微電子所博士，現為國立聯合大學電子工程學系教授

Sheng-Joue Young received his Ph.D. in the Institute of Microelectronics from National Cheng Kung University. He is currently a Professor in the Department of Electronic Engineering at National United University.

設計微機電加熱器熱分析模擬與 驗證

Design of Microelectromechanical Heater Thermal Analysis Simulation and Verification

黃柏銘、蕭育仁

Bo-Ming Huang, Yu-Jen Hsiao

微型加熱器的開發宗旨為提高加熱效率、降低耗能、縮小尺寸、更快的響應時間以及精確的溫度控制。研究主要著重在底部式微型加熱結合氣體感測應用之微型加熱器的設計與製造，以分析耗能和溫度分佈為主要目的，並利用此元件進行開發與模擬。模擬 4 種不同幾何設計的加熱電極，以此來比較出哪種設計耗能較低，並且以微機電技術製程來研發。

Microheaters are developed for higher conversion rates of input power to operating heat, lower energy consumption, faster response times, precise temperature control and in smaller size. This research mainly focuses on the design and manufacture of a micro-heaters combined with bottom heating and gas sensing applications. Along with the main purpose of analyzing energy consumption, temperature distribution and using this component for development and simulation. Simulation comparison of 4 heating electrodes with different geometric designs are compared for less energy consumption design and are developed using micro-electromechanical technology processes.

一、前言

在當今科技發展的背景下，加熱技術在科學、工程以及航太等領域中的關鍵技術。其目的是通過精確控制溫度，為設備提供適合的加熱環境。然而，傳統的加熱技術，如加熱板或帕耳帖 (Peltier) 元件，由於尺寸過於龐大且轉化率低，限制了現代技術的應用，因此，微型化已成為目前的趨勢。為了實現微型化的目標，開發新型材料、改進加熱元件設計以及採用更有效的熱傳輸等方面的技術創新是必要的。其中，提高加熱效率和降低耗能是關鍵的挑戰，因為加熱效率表示輸入的電能轉換為所需的熱能，像是熱傳導性能或熱損失等都是可以提高加熱效率；降低耗能則是以較低電能可以達到目標溫度。此外，溫度控制技術的精確性也是確保加熱器穩定性和可靠性的關鍵。微型加熱器具有體積更小、溫度範圍更廣、溫度控制更精確等優點⁽¹⁾，會使響應速度更快，將能量傳遞至加熱區域。

根據 2022 年 Jeroish, ZE、Bhuvaneshwari, KS、Samsuri, F. 等人，發表了微型加熱器：材料、設計、製造、溫度控制和應用在 COVID-19 中的作用⁽²⁾，提到如圖 1 所示在許多生物和氣體感測應用中，特定的反應、感測和驅動過程僅在高溫下發生。例如，在生物科技領域，DNA 擴增和細胞培養需要保持溫度，以便分別檢測和繁殖病原體。同樣，在氣體感測時，半導體化學電阻膜必須在特定溫度下加熱，以通過吸附氧原子形成空乏層，以感測還原氣體的濃度。因此，在這些設備中必須使用微型加熱器。

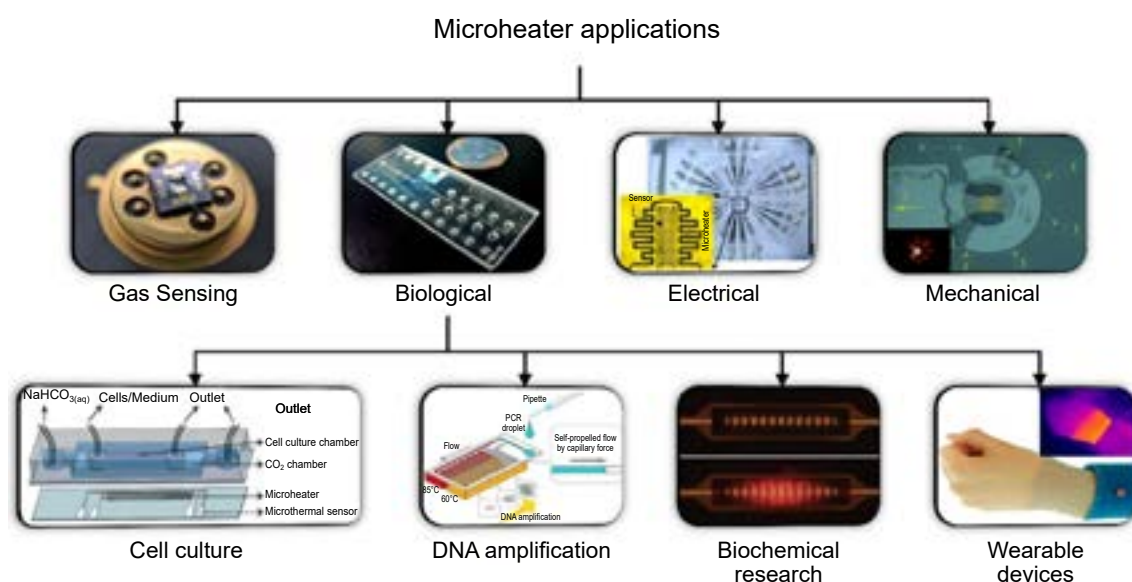


圖 1. 微型加熱器之應用⁽²⁾。

隨著物聯網 (Internet of Things, IoT) 的普及和第五代行動通訊技術 (5G) 的發展，半導體式微型氣體感測器也持續朝向微型化、高效能、低耗能及低成本方向邁進。目前微型加熱器於氣體感測器已被廣泛應用，並藉由 MEMS 技術製造，將微型加熱器與氣體感測器整合一起，其目的是為了提升效能。根據日本機構為日商環球訊息有限公司 (Grand View Research)⁽³⁾ 的分析報告，如圖 2 所示，2022 年全球氣體感測器市場規模為 26.9 億美元，預計 2023 年的氣體感測器在市場上複合年均增長率 (compound annual growth rate, CAGR) 將以 7.9% 的速度增加。

在氣體感測領域中，基於金屬氧化物半導體 (metal oxide semiconductor, MOS) 的氣體感測器因其可接受的靈敏度、低成本、生產靈活性以及在廣泛工作溫度範圍內的穩定性和應用性而被研究和應用，如環境監測、醫藥、食品工業、工業和有毒氣體檢測等領域。其中，微型加熱器是 MOS 氣體感測器的關鍵組件，其作為控制感測層的溫度。

半導體氣體感測器通常利用吸附或解吸來檢測氣體濃度的變化，這種變化反映在電阻值中。為了檢測這些電阻變化，微型加熱器的溫度必須在整個加熱器區域保持恆定和均勻。為此，使用 MEMS 技術製造的微型加熱器，可以改善感測過程的動態響應並降低耗能。在這種情況下，使用塊狀矽底作為微加工的基礎，並將加熱器沉積在膜上進行焦耳加熱，以保持整個感測區域的高溫。使用矽襯底的另一個優點是可以將電子電路和感測器集成在一個晶片上，從而提高整個系統的性能和穩定性。因此，微型加熱器在半導體氣體感測器中扮演著至關重要的角色，它可以維持和控制感測薄膜的溫度，確保半導體氣體感測器具有適當的性能。

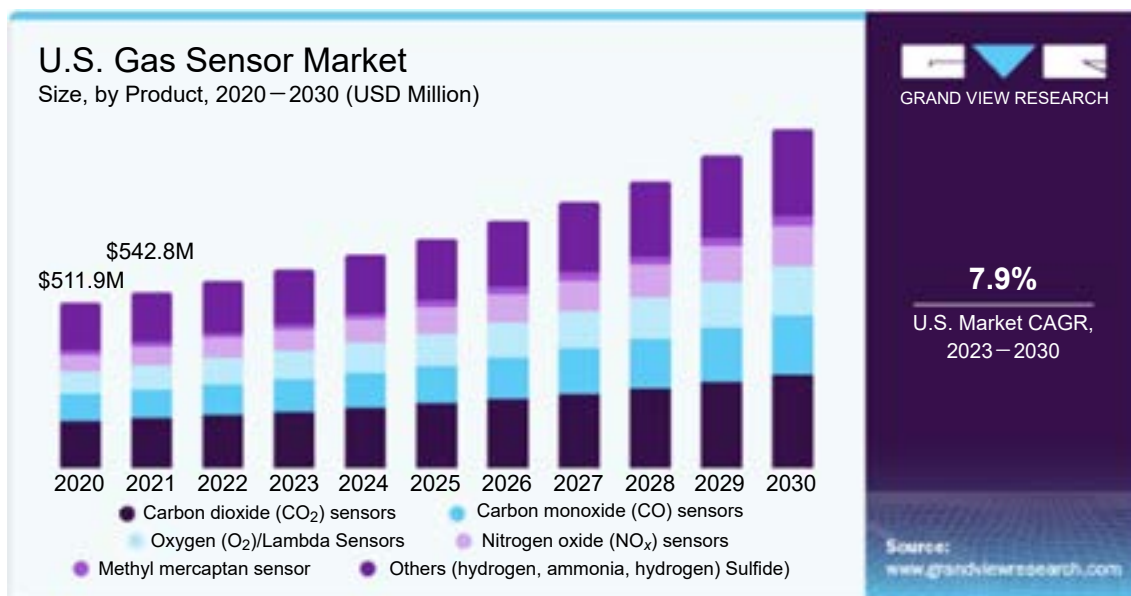


圖 2. 日商環球訊息有限公司 (Grand View Research) 分析報告⁽³⁾。

研究之目的是設計、模擬以及評估低耗能微型氣體感測器之加熱器的性能，以確保感測器的工作溫度可以升到所需的工作範圍並保證其可靠性。為了優化微型加熱器的結構，會通過考慮不同加熱電極的幾何形狀、尺寸和材料，並模擬出溫度分布以及耗能，在模擬出各種微型加熱器後，會對於模擬的微型加熱器進行開發，並使用熱影像儀進行驗證以及耗能分析。

二、模擬微型加熱器之設計原理

在自然界裡，熱是一種能量形式，只要物體之間有溫度差的存在，熱傳遞就會發生，通常由高溫流向低溫，直到達到熱平衡。熱傳遞方式分為三種：傳導 (conduction)、對流 (convection) 和輻射 (radiation)，分別通過直接接觸、流體運動和電磁波的形式進行。研究中微型加熱器是通過傳導的方式來傳遞熱能，因此在進行模擬分析時首先考量熱力學第一定律—能量守恆⁽⁴⁾，為熱分析系統的基本原理，其描述系統的總能量之守恆性質。因此系統中能量數量發生變化的唯一方式是能量跨越其邊界。第一定律還涉及能量跨越系統邊界的方式。對於封閉系統 (固定質量的區域)，只有兩個：通過邊界的傳熱以及系統上或系統所做的功。因此，能量守恆的公式表示如下：

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_{gen} - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (1)$$

其中 $\dot{E}_{in}$ 和 $\dot{E}_{out}$ 為流進和流出的熱能或機械能， $\dot{E}_{gen}$ 為能量產生，其形式是將其他能量 (如：電能、核能等) 轉換為熱能， $\dot{E}_{st}$ 為儲存熱能或機械能。根據能量守恆的公式，微型加熱器產生熱能 ($\dot{E}_{gen}$) 時，要計算達到目標溫度 300 °C 時會消耗多少耗能，因此要去計算耗能損失 (焦耳熱)。研究中的微型加熱器為電阻式微型加熱器，其原理為金屬之焦耳加熱原理 (Joule heating)，將電能轉換為熱能，金屬電極中每秒所產生熱能與電阻和電流的平方成正比，所

以每秒所放出的熱能等於吸收的耗能損失。所以焦耳加熱的公式表示如下：

$$P = VI = I^2 R = \frac{V^2}{R} \quad (2)$$

其中 P 為耗能損失 (焦耳熱)， V 為電壓差， I 為電流， R 為電阻值。這個公式解釋為 (每單位時間消耗的能量) = (電荷移動所需的能量) $\times$ (單位時間通過導線截面的電荷量)。因此在計算耗能損失之前，需要計算出設計的微型加熱器的電阻值。電阻值的大小會隨著電阻式微型加熱器的尺寸大小而改變，但是電阻率或導電率不會隨著尺寸而有所改變，因此可以通過電阻率或導電率來找出合適的材料，所以電阻值高或低與設計之大小、幾何形狀及材料性質有關，公式表示如下：

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\sigma A} \quad (3)$$

其中 l 為微型加熱器長度 (cm)， A 為微型加熱器的截面積 (cm^2)， ρ 為電阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)， σ 為導電率 ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)， σ 則為 ρ 的倒數。所以計算出的電阻值越小，代表耗能損失越少。在計算完耗能損失，接著了解模擬的微型加熱器結構的熱傳遞方向，分為兩個方向，一個是以微型加熱器在傳遞熱能時，溫度往上與往下傳遞，另一個為微型加熱器在加熱過程中溫度由中心往四周傳遞熱能的分布情形。

如圖 3 所示，假設熱傳遞情形為一維傳導以及穩態傳熱，這個情況只需要考慮熱是以 Z 軸方向傳遞，所以熱源是由微型加熱器的中心傳遞只有往上與往下，透過傳遞各層材料的熱傳導係數、截面積以及厚度等，並將以上之敘述以熱阻觀念表示。滿足熱阻形式需要兩個條件，一個是無熱能產生 (no heat generation) 另外一個是穩態傳熱 (steady state)。所以在這個情況下可以假設熱影像儀觀察到感測器表面溫度為 300°C ，是初始溫度 (T_i)，因為熱能由微型加熱器往上與往下傳遞，所以可以推算出微型加熱器需要多少溫度可以達到感測器表面為 300°C ，為目標溫度 (T)。計算出微型加熱器的溫度之後，可以推算微型加熱器會不會由於底部支撐的材料熱能擴散出去。因此除了微型加熱器之外，其他各層材料皆以熱阻為基準的總熱傳係數 U (overall heat transfer coefficient) 作為這個情形的分析標準，其公式如下：

$$U = \frac{1}{R_{\text{tot}} A} \quad (4)$$

其中 (R_{tot}) 為總熱阻係數，是由傳導熱阻加上對流熱阻 ($R_{\text{cond}} + R_{\text{conv}}$) 組成， A 則是流經熱阻的截面積。 R_{cond} 為微型加熱器的熱能於感測器內部以熱傳導方式傳遞時，遇到的阻力為傳導熱阻，其表示如下：

$$R_{\text{cond}} = \frac{L}{kA} \quad (5)$$

其中 L 是流經熱阻的長度， K 是熱傳導係數。 R_{conv} 為氣體感測器與流體 (空氣) 之間的熱阻，稱為對流熱阻，其表示如下：

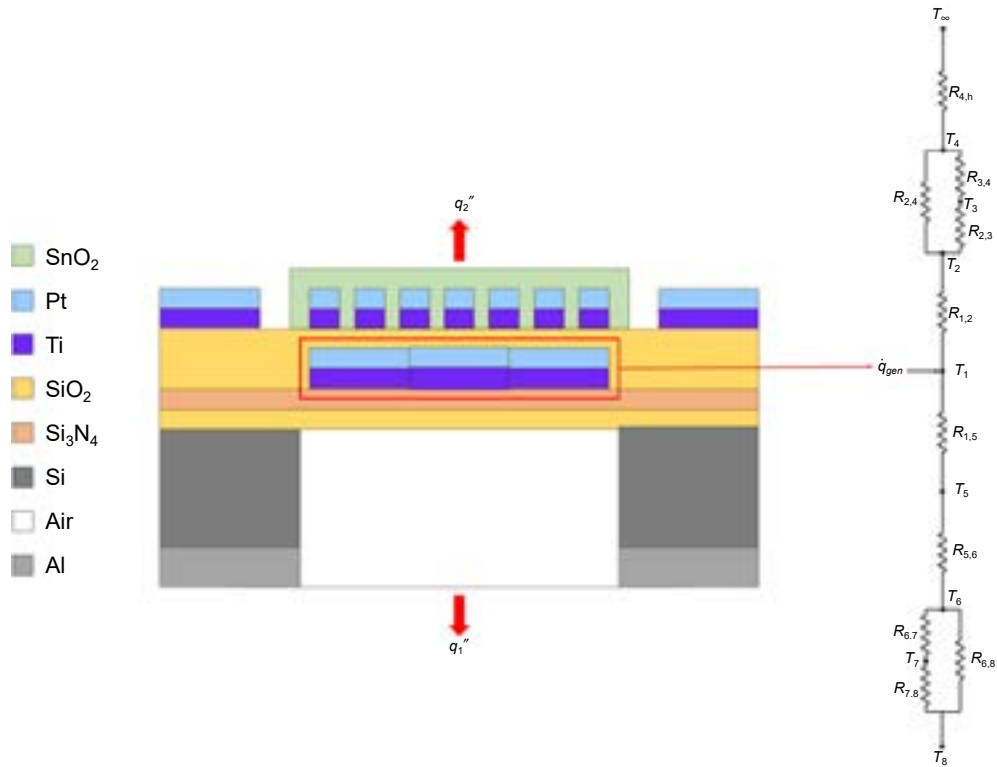


圖 3. 熱阻以及等效熱電阻圖。

$$R_{conv} \equiv \frac{1}{hA} \quad (6)$$

其中 h 是熱對流係數。得到總傳熱係數 U 之後，需要帶入熱通量 q_x ，其公式表示如下：

$$q_x \equiv UA\Delta T \quad (7)$$

其中 ΔT 是溫度梯度。然後將 (4)、(7) 結合一起，得到熱通量 q_x 方程式表示如下：

$$q_x \equiv \frac{1}{R_{tot}} \Delta T \quad (8)$$

將得到熱通量 (q_x) 與初始溫度 (T_i) 相加，可以得到目標溫度 (T)。

接下來要看溫度往四周傳遞熱能的分布情形，這個情況將用二維熱傳導來討論，假設將微型加熱器的節點看成一個二維平面，若要得知微型加熱器各個位置的溫度分布，可以利用節點與二維熱傳導公式來計算。首先直角座標系中熱擴散的一般公式表示如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

這個公式提供了熱傳導分析的基本工具。因為是以二維觀點去處理，所以 z 軸 $\frac{\partial}{\partial z}(k \frac{\partial T}{\partial z})$ 這項為零，又是以穩態熱傳去分析，所以 $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ 這項為零。假設 k 為常數，公式整理之後，公式表示如下：

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (10)$$

然後利用能量平衡法中，通過能量守恆定律獲得節點的有限差分公式到節點區域的控制體積。所以公式表示如下：

$$\left(\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} \right) + \frac{\dot{q}}{k} (\Delta x \cdot \Delta y) = 0 \quad (11)$$

其中公式 (11) 的 x, y 分別為直角坐標系的兩個方向， $\frac{\dot{q}}{k}$ 為產生熱源， $T(x, y)$ 代表在空間座標 (x_m, y_n) 上的溫度，將空間座標 (x_m, y_n) 帶入之後， x 軸以及 y 軸的差分形式表示如下：

$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} \approx \frac{T(x + \Delta x, y) - 2T(x, y) + T(x - \Delta x, y)}{(\Delta x)^2} \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} \approx \frac{T(x, y + \Delta y) - 2T(x, y) + T(x, y - \Delta y)}{(\Delta y)^2} \quad (13)$$

將 (12)、(13) 式帶入 (11) 式中，而且假設 $\Delta x = \Delta y$ ，整理過後可以得到的二維熱傳導差分公式如下：

$$\begin{aligned} & \frac{T(x + \Delta x, y) - 2T(x, y) + T(x - \Delta x, y)}{(\Delta x)^2} \\ & + \frac{T(x, y + \Delta y) - 2T(x, y) + T(x, y - \Delta y)}{(\Delta x)^2} \\ & + \frac{\dot{q}(\Delta x)^2}{k} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

將 (14) 式整理之後，可以得到二維熱傳導的離散形式表示如下：

$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + \frac{\dot{q}(\Delta x)^2}{k} - 4T_{m,n} = 0 \quad (15)$$

因為研究中的微型加熱器是複雜幾何圖形，因此在考量熱能以平面形式傳遞的分布情形可用節點方式去計算，如圖 4 所示，若要計算出下一個節點的溫度，可以利用前一個節點的溫度以及此節點周圍四個位置的溫度來求得。

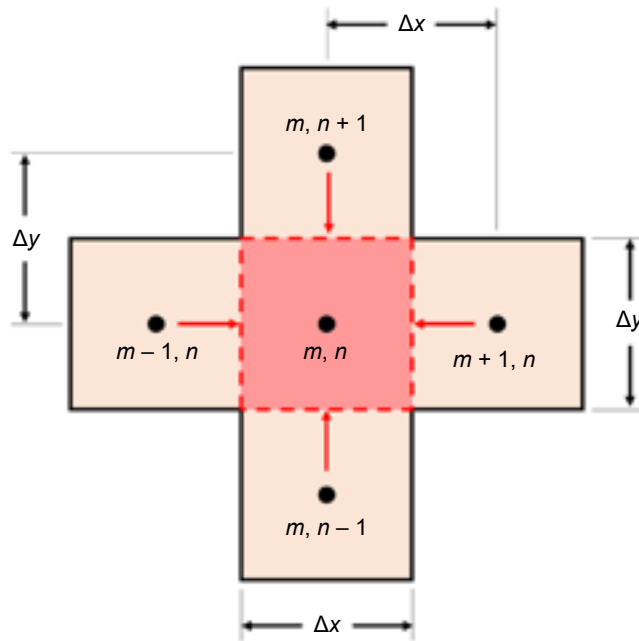


圖 4. 相鄰節點傳導至內部節點示意圖。

考量完能量守恆之後，接下來需要考量材料的特性參數，因為模擬微型加熱器的加熱過程中，加熱電極會受到溫度以及電流等影響，以至於在模擬時需要考慮溫度在材料之間的傳導係數，以及計算電阻率達到目標溫度時所產生的耗能。本研究的微型加熱器是使用鈦／鉑 (Ti/Pt)，之所以使用鈦／鉑，是因為它在高溫的情況下有很高的穩定性以及電氣特性⁽⁵⁻¹¹⁾，以下表 1 列出了幾種在模擬加熱過程中需注意的特性參數。

根據氣體感測器的基板、支撐層、加熱電極、絕緣層、感測電極、感測層以及阻擋層，建立起三維含有微型加熱器之氣體感測器的模型。微型加熱器的幾何設計於國外有許多研究成果。2004 年 M. Baroncini 等人，提出了一種用於氣體感測器的雙螺旋加熱元件，並對微加熱器穩態熱行為的簡單分析模型⁽¹²⁾。2010 年 Velmathi 等人，設計了方形雙螺旋幾何圖的微加熱器，採用了新穎的結構，其具有不同的線徑寬度，透過逐漸縮小線寬的方式來限制所需的加熱方式，所以其輸入功率較低⁽¹³⁾。2014 年 J.Kathirvelan 等人，模擬了雙螺旋型等微型加熱器，並對微型加熱器進行均勻的熱量分佈和功耗優化⁽¹⁴⁾。2017 年維吉尼亞理工大學 Shifeng Yu 等人，發表了高溫均勻性微加熱器，它具有加熱區域溫度分佈均勻且響應時間短的微型加熱器⁽¹⁵⁾。因此研究以 4 種不同幾何設計圖形的微型加熱器，建立後的模型如表 2 所示。表 2 中加熱器線寬是由中心往外逐漸增加，之所以這樣設計是因為在厚度不變的情況下，線寬越小，電流越難通過，會造成加熱效果越好，但是耗能也會有所提高，因此採用這種設計降低耗能。表 2 統一了加熱面積，造成加熱電極在幾何設計時線寬無法統一。

三、微型加熱器的模擬與製作

微型加熱器的模擬過程採用電－熱穩態溫度分析，模擬微型加熱器通過電流加熱到 300 °C 時之溫度變化以及耗能損失，設定電－熱穩態模擬的目標溫度為 300 °C，因為是穩態分析，所以不考慮時間向量。後續會比較溫度模擬結果與實驗量測結果之差異。如圖 5 所示模擬的初始條件與邊界條件設定如下：

表 1. 各層模擬材料之材料性質。

材料名稱	Si	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Ti	Pt	Al	SnO ₂
密度 Density (Kg/m ³)	2330	2220	2400	4500	21450	2689	6950
熱膨脹係數 CTE (°C)	3.61E-06	SE-07	2.8E-06	8.9E-06	9.1E-06	2.55E-05	7.1E-06
楊氏模數 Young's modulus (Pa)	1.1238E+11	7E+10	2.9E+07	1.1524E+11	1.7236E+11	6.8E+10	5.588E+10
蒲松比 Poisson's ratio	0.28	0.16667	0.25	0.34	0.39	0.36	0.27
體積模量 Bulk modulus (Pa)	8.5139E+10	3.5E+10	1.9333E+07	1.2004E+11	2.6115E+11	8.0952E+10	4.0493E+10
剪切模量 Shear modulus (Pa)	4.39E+10	3E+10	1.16E+07	4.3E+10	6.2E+10	2.5E+10	2.2E+10
熱傳導係數 Thermal conductivity (W/m·C)	148	1.5	16	21	72	210	27.4
比熱 Specific heat (J/kg·C)	712	745	691	552	133	951	0.000227
電阻率 Resistivity (Ω·cm)	0.01	NA	NA	5.54E-05	1.06E-05	2.7E-06	7140

表 2. 底部式微型加熱器之模型設計。

加熱器種類	底部式加熱器			
元件名稱	Sample A 曲折	Sample B 圓弧	Sample C 直線	Sample D 雙螺旋
CAD 設計圖				
加熱面積	400 μm ²	400 μm ²	400 μm ²	400 μm ²
加熱器線寬 由中心往外	15–20 μm	15–21 μm	15–21 μm	15–19 μm

初始條件：

利用電流的增加，將微型加熱器從常溫 22 °C 加熱到 300 °C 後以維持穩定狀態，所以模擬時設定的初始條件為環境溫度 22 °C，每步驟上升 5 mA。

邊界條件：

空氣：由於在量測過程中，微型加熱器在大氣下維持自然對流的接觸，並未使用風扇迫使空氣產生強制對流。根據熱傳學⁽¹⁶⁾ 氣體在自然對流的對流係數 ($2-25 \text{ W/m}^2\text{K}$) 相對於強制對流 ($25-250 \text{ W/m}^2\text{K}$) 顯得甚小，且在加熱過程中，除了加熱電極和底部黏在 PCB 板子之外，其餘部分都是在大氣下，因此空氣的對流係數會影響模擬結果。

電流：本研究是利用電阻式微型加熱器，通過增加電流產生電壓，形成迴路，使金屬材料之加熱電極產生熱源。由此得知在加熱過程中的功率失，因此電流不僅會影響溫度的模擬結果，也可以得知耗能。

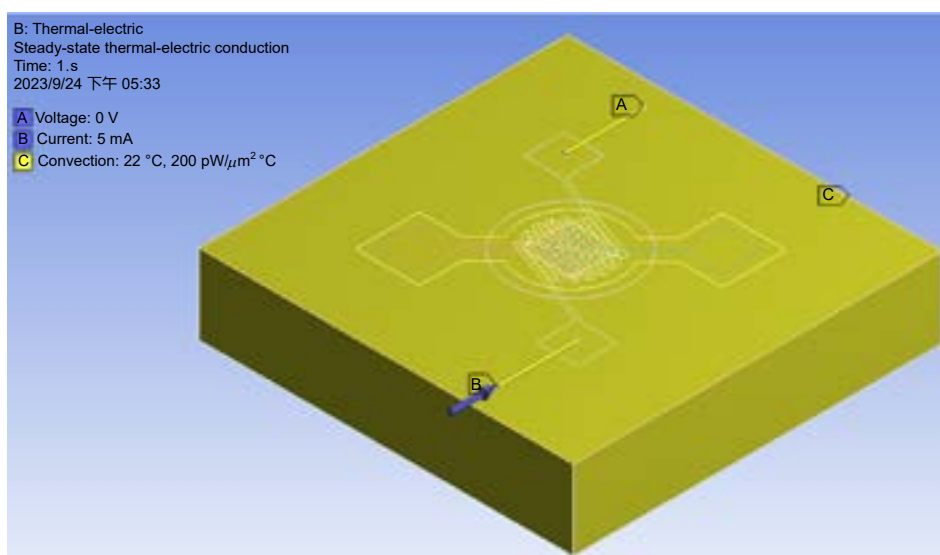


圖 5. 模擬條件。

接下來介紹底部式微型加熱器之半導體式氣體感測器的製程步驟，研究中所使用的氣體感測器是以 MEMS 結構製程來製作，其製程流程主要是以繪製出的光罩圖形來呈現出感測器結構，其感測器製程步驟如圖 6 所示。製程主要可以分為五道，分別為支撐層 (Si、 SiO_2 、 Si_3N_4)、加熱電極 (Ti、Pt)、絕緣層 (SiO_2)、感測電極 (Ti、Pt)、感測層 (SnO_2) 以及阻擋層 (Al)。首先透過高溫高壓爐管在矽基板 (Si) 上沉積了二氧化矽 (SiO_2) 以及氮化矽 (Si_3N_4)，然後使用化學機械研磨 (chemical mechanical polishing or planarization, CMP) 將沉積完的矽基板 (Si) 進行研磨薄化，並進行拋光。接著使用電子槍蒸鍍系統 (E-gun) 沉積鈦 (Ti) 以及鉑 (Pt) 所組成的加熱電極。然後利用電漿化學氣相沉積 (plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 沉積二氧化矽 (SiO_2) 作為絕緣層，是因為要避免感測電極與加熱電極之間的碰觸導致電流通導。再來使用電子槍蒸鍍系統 (E-gun) 沉積鈦以及鉑所組成的感測電極。接下來是在感測電極上利用射頻濺鍍機 (RF Sputter) 沉積一層二氧化錫 (SnO_2) 作為感測層。然後在利用直流濺鍍機 (DC Sputter) 在基板背面沉積一層鋁 (Al) 作為阻擋層，最後利用感應偶合式蝕刻 (ICP) 在沒有阻擋層的位置吃蝕刻，其目的是為了避免加熱電極所產生的熱由矽晶片導出，還可以降低微型加熱器之耗能以及熱會形成熱集中。

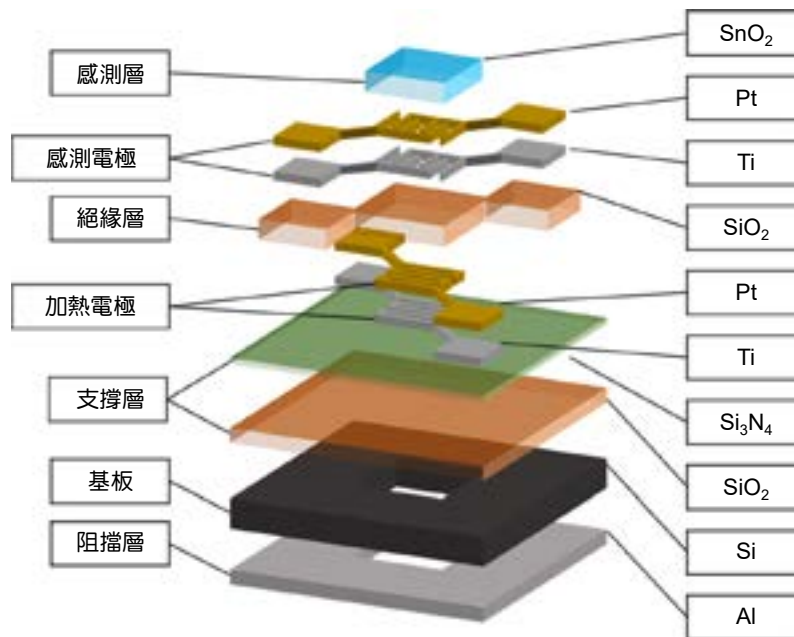


圖 6. 底部式微型加熱器之半導體式氣體感測器示意圖。

四、模擬與實際結果

探討模擬 4 種不同的幾何圖形，如圖 7 所示施加電流到達溫度 300 °C 的溫度分佈，以及溫度與耗能關係圖。施加的初始溫度以及環境溫度設為 22 °C，模擬在大氣強制對流的情形下施加對流，對流係數為 (200 W/m²K)，並對加熱電極施加電流以每步驟上升 5 mA，以觀察溫度達到 300 °C 時消耗多少耗能。

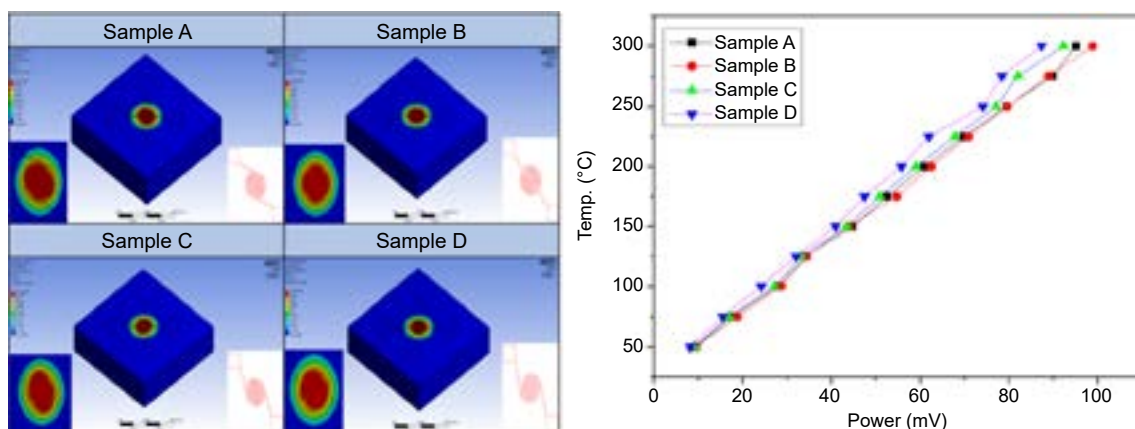


圖 7. 模擬加熱溫度與耗能結果。

從上述的模擬結果看出，Sample (A－D) 的加熱分布均勻，並且加熱的耗能相差無幾，但是相比之下，Sample D 的耗能為四種幾何圖形中為較低耗能。

將完成的感測器放置於熱影像儀下方，並透過電源供應器給予加熱電極電源，隨後透過熱影像儀的即時觀測功能，得出不同溫度下所需的電壓與電流，如圖 8 所示為計算出在最高點溫度 (300 °C) 下的耗能，以及實際加熱分佈圖。

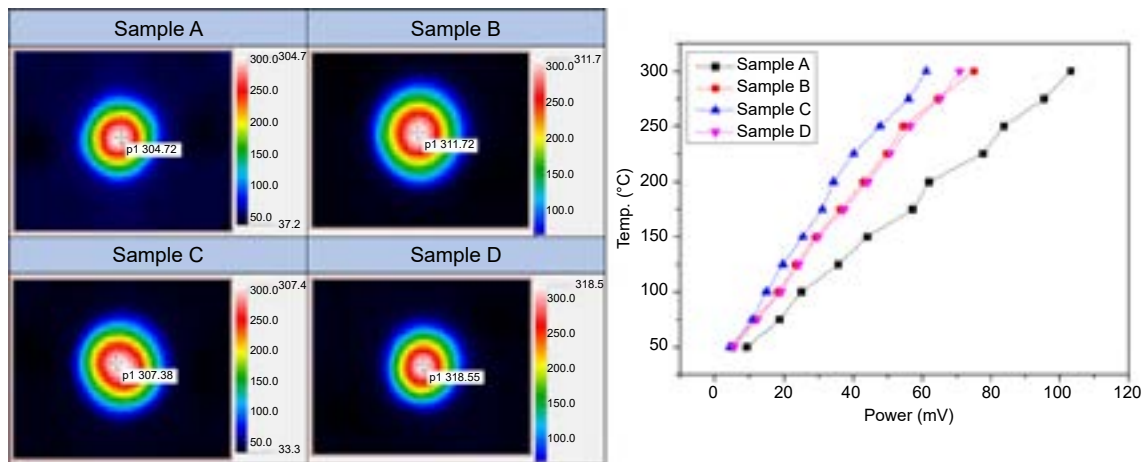


圖 8. 實際加熱溫度與耗能結果。

從上述的模擬結果看出，Sample (A–D) 的加熱分布均勻，Sample C 的耗能為四種幾何圖形中為較低耗能。實際結果雖然是 Sample C 微最佳，但是 Sample D 排在 Sample C 之下，又因為在製程過程中會有所損耗，像是製作過程中要通過舉離 (lift-off) 製程把圖形定義出來，這個過程中過度舉離會使線寬有所減少，Sample D 比 Sample C 更好舉離，以至於 Sample C 在定義出圖形時 Sample D 的線寬有所減少，所以總體比較之下 Sample D 為最佳。

表 3 為目前不同微型加熱器與本研究比較，從表 3 可以看出基底為玻璃 (glass) 的微型加熱器耗能最高為 1.3 W，再來是基底氮化矽 (Si_3N_4) 為 1 W，接著是基底二氧化矽 (SiO_2) 為 127 mW 和 84.66 mW，從以上結果可以看出本研究結合氮化矽 (Si_3N_4) 與二氧化矽 (SiO_2) 為基底，耗能為 70.89 mW。從材料厚度可以看出本研究雖然厚度為最厚，但是耗能為最低，可以推測出本研究的感測器大小與其他研究相比較之下為最小。

表 3. 微型加熱器之比較。

基底	材料	厚度	製造	應用	能耗	參考
Si_3N_4	Ti/Pt	20/200 nm	DC sputtering and lift-off	Gas sensor	1 W	(15)
Glass	Ti/Pt	20/200 nm	DC pulse sputtering system and lift-off	Gas sensors	1.3 W	(17)
SiO_2	Pt	150 nm 100 nm	NA	Semiconductor gas sensors	127 mW 84.66 mW	(18)
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$	Ti/Pt	300/300 nm	E-beam evaporator and lift-off	Semiconductor gas sensors	70.89 mW	本研究

五、結論

針對底部式微型加熱器的不同幾何設計進行模擬，了解感測層上的溫度分布，並進行實際製程來驗證，結果為 Sample D 為四種不同幾何設計之中為最佳。目前模擬跟實際驗證設計的微型加熱器溫度分布均勻度相同，但是耗能與其他研究相比稍微較低，但是達不到低耗能的需求，因此需要解決耗能的問題，可能成為具有低耗能微機電半導體氣體感測器。

參考文獻

1. P. Bhattacharyya, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, **14** (2), 589 (2014).
2. Z. E. Jeroish, K. S. Bhuvaneshwari, Fahmi Samsuri, Vigneswaran Narayanamurthy, *Biomed Microdevices*, **24** (3), (2022).
3. Please refer to the web:
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/gas-sensors-market>
4. Paul Ralph Ehrlich, Anne H. Ehrlich, John P. Holdren, *Valuing the Earth: Economics, Ecology, Ethics*, 44 (1993).
5. R.M. Tiggelaar, R.G.P. Sanders, A.W. Groenland, J.G.E. Gardeniers, *Sensors and Actuators A: Physical*, **152** (1), 39 (2009).
6. Duk-Dong Lee, Wan-Young Chung, Man-Sik Choi, Jong-Mu Baek, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **33** (1-3), 147 (1996).
7. Sberveglieri, G., Hellmich, W. & Müller, G., *Microsystem Technologies*, **3**, 183 (1997).
8. A Götz, I Gràcia, C Cané and E Lora-Tamayo, et al., *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **7** (3), 247 (1997).
9. Carole Rossi, Pierre Temple-Boyer, Daniel Esteve, *Sensors and Actuators A: Physical*, **64** (3), 241 (1998).
10. Carole Rossi, Emmanuel Scheid, Daniel Estève, *Sensors and Actuators A: Physical*, **63** (3), 183 (1997).
11. Isolde Simon, Nicolae Barsan, Michael Bauer, Udo Weimar, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **73** (1), 1 (2001).
12. M. Baroncini, P. Placidi, G.C. Cardinali, A. Scorzoni, *Sensors and Actuators A: Physical*, **115** (1), 8 (2004).
13. G. Velmathi, N. Ramshanker and S. Mohan, "Design, Electro-Thermal simulation and geometrical optimization of double spiral shaped microheater on a suspended membrane for gas sensing," IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, AZ, USA, November 7-10 (2010).
14. Kathirvelan Jayaraman; Rajagopalan Vijayaraghavan., *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, **9** (11), 2307 (2014).
15. Shifeng Yu, Shuyu Wang, Ming Lu, Lei Zuo, *Sensors and Actuators A: Physical*, **257**, 58 (2017).
16. Frank P. Incropera et al., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition, Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, (2007).
17. PRAJESH, Rahul, et al., *Microsystem Technologies*, **25**, 3589 (2019).
18. BEDOUI, Souhir et al., "Design and electro-thermal analysis of a platinum micro heater for gas sensors." *2016 13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). IEEE*, March 21-24 (2016).

作者簡介

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系教授。

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

黃柏銘先生現為南臺科技大學機電所博士生。

Bo-Ming Huang is currently a Ph.D student in the Department of Electromechanical at Southern Taiwan University of Science and Technology.

氣體稜鏡技術應用於氣體折射率量測

A Novel Gas-prism Applied on the Inspection of Gas Refractive-index

杜星旻、韋安琪、施至柔

Hsing-Min Tu, An-Chi Wei, Jyh-Rou Sze

本研究利用氣體稜鏡技術即時檢測氣體折射率，利用光學稜鏡與待測氣體產生不同偏折角，再搭配 Shack-Hartmann 波前檢測架構，可換算出實際波前傾斜角度變化量，進一步推算出該氣體折射率。相比於一般量測稜鏡偏轉角之氣體折射率量測系統，藉由 Shack-Hartmann 波前檢測儀之微透鏡陣列，可以使取樣更多且更精確地取得偏轉角及氣體折射率。

In this research, we present a new system for real-time inspection of gas refractive-index. The system combines with an optical prism to measure the refraction by the deviation angle. A Shack-Hartmann wavefront sensor is also used in this system to analyze the wavefront change resulting from the different refractive indexes of gas. In this system, we use a plane wave as a light source to collaborate with the wavefront sensor. Also, the system applies a single-light-path design which is easier for adjustment or calibrations.

一、前言

Shack-Hartmann 波前檢測儀又稱透鏡陣列式波前檢測儀，其前身為 Hartmann 波前檢測儀^(1,2)，如圖 1。Hartmann 波前檢測儀並沒有透鏡陣列 (lenslet array)，因此精度與靈敏度皆較差⁽³⁾。其主要運用於天文望遠鏡上，用以偵測大氣中的波前變化，並且針對觀測到的影像做補償，以得到原始觀測影像。

Shack-Hartmann 波前檢測儀被廣泛運用於檢測透鏡等光學元件之像差，像差經轉換以獲得點擴散函數 (point spread function, PSF)，如圖 2 所示；點擴散函數再經轉換可得透鏡之調制傳遞函數 (modulated transfer function, MTF)，用以分析透鏡之特性。

波前檢測另一常見之檢測方式為使用干涉儀，利用共光路之兩道光進行干涉，並將干涉圖還原成波前圖，即可得知原始波前，但是干涉對於系統穩定度要求較高，若有震動等狀況，將會難以觀測干涉結果。因此依照不同需求，須選擇不同的波前檢測儀器⁽⁵⁾。

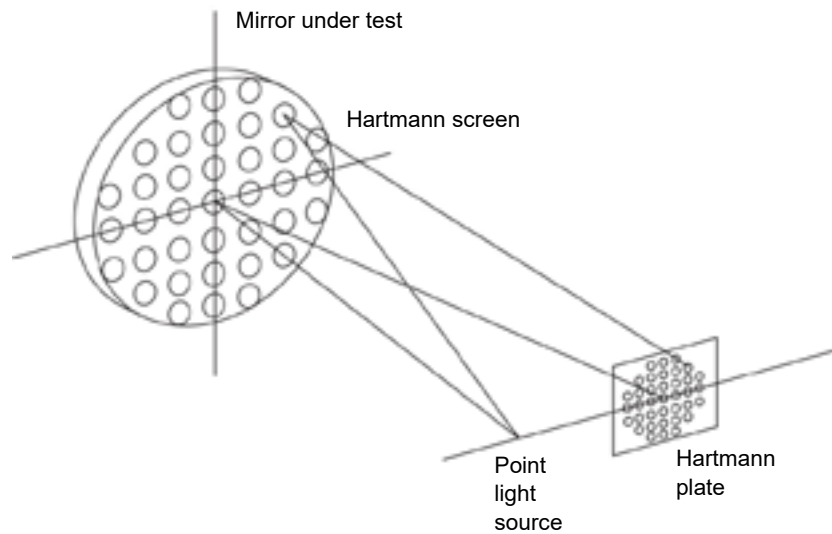


圖 1. Hartmann 波前檢測儀示意圖^(1,2)。

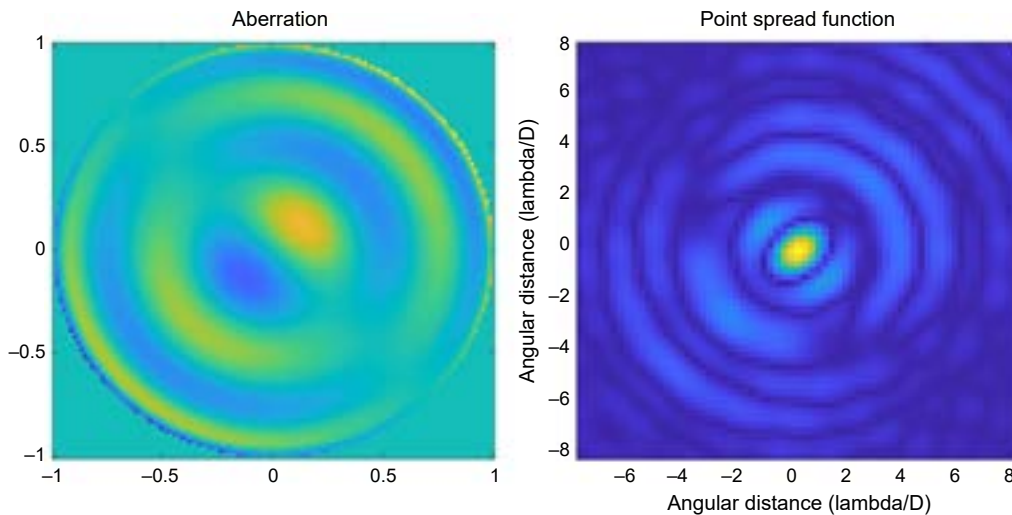


圖 2. 左：波前像差，右：該波前像差之點擴散函數。

Shack-Hartmann 波前檢測儀的精度主要受限於微透鏡陣列，近年來隨著微透鏡陣列製程之進步，其靈敏度也隨之大幅提升。而在提升靈敏度的同時，動態範圍也隨之降低，此兩者呈反比關係，故設計系統時，要在靈敏度與動態範圍間取得平衡。此外，現今 Shack-Hartmann 波前檢測儀技術也相當多元，例如 L. Seifert 等人提出使用 LCD 取代透鏡陣列之概念，其又稱為適應性 Shack-Hartmann 波前檢測儀⁽⁶⁾。

共光路 (common light path) 通常用於討論相位之研究，例如干涉⁽⁷⁻¹⁰⁾ 等。然而共光路系統對實驗環境有較高需求，因此也有為改善共光路之缺點，延伸出單光路設計之光學系統⁽¹¹⁾。本研究主要運用幾何光學之稜鏡偏轉角原理，並結合波前檢測進行量測，因此光路設計上，單光路即可滿足本實驗需求，且單光路相較於共光路等較複雜之光路架構，其更易於校正，對於實驗系統之穩定有一定之幫助。

另一方面，許多領域需求氣體折射率量測技術⁽¹²⁻¹⁴⁾，例如：量測氣體折射率可以得知該氣體在不同壓力之氣體密度，並由氣體密度推得熱力學溫度 (thermodynamic temperature)^(15, 16)。部分雷射光使用氣體激發，因此為確保其發光品質，需要檢測該氣體之純度、混合程度等，使用氣體折射率以確認之^(17, 18)。氣體折射率也可以用來分析空氣中之氣體混和成分⁽¹⁹⁾，例如環境二氧化碳檢測、開放式散熱系統之散熱媒介與空氣混合程度等。透過光學非接觸式的檢測方式，並不會打擾到原系統的運作，亦可以得到量測結果。氣體折射率的量測方式，普遍會使用麥克森干涉儀 (Michelson Interferometer)^(9, 20)，如圖 3 所示。光路經由光源出發，經中間之分光鏡後產生兩道光，並在另一端進行共光路之干涉。藉由觀察屏幕上之干涉條紋數量，計算出光程差 (optical path difference)，經過換算得到折射率，然而麥克森干涉儀對環境靈敏度要求較高，若有震動等外在環境的因素影響，干涉條紋會劇烈變化，導致其難以觀察。因此在動態系統中，麥克森干涉儀等運用傳統光學干涉方式之量測系統會較難發揮。此外，麥克森干涉儀除了可以用來量測氣體折射率，其也可被用來量測表面輪廓、相位等資訊，用途相當廣泛。

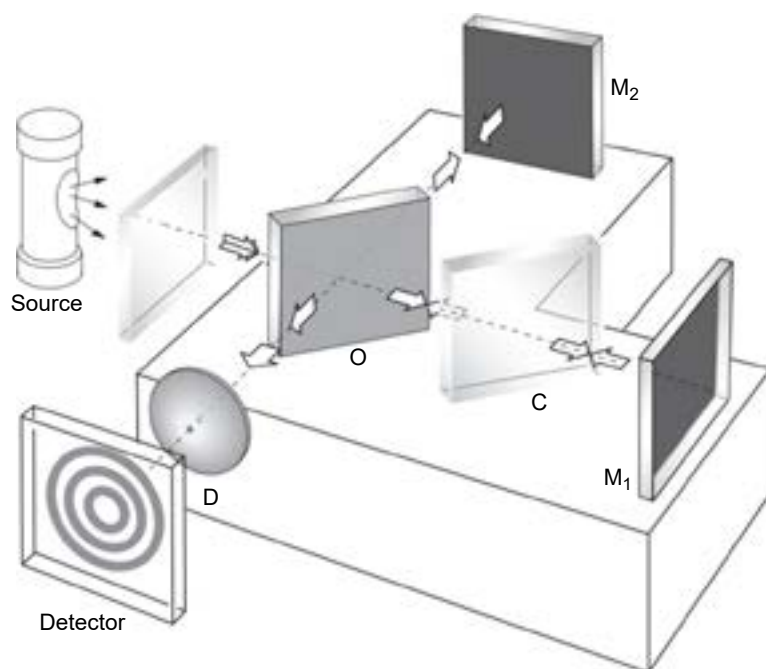


圖 3. 麥克森干涉儀⁽⁴⁾。

近年來，為改善麥克森干涉儀之靈敏度問題，光纖取代了麥克森干涉儀中之傳統透鏡式的光路系統⁽²¹⁾，光纖干涉儀對環境靈敏度極佳，且光纖可以承受一定程度之彎折，可以克服更嚴苛之量測環境。但也由於光纖製程之限制，因此其精度等皆會因為光纖尺寸的極限而有所限制。

另一種量測氣體折射率的方式，是利用稜鏡偏向角的特性，通常使用雷射光束作為光源，當光通過稜鏡後，由於另一端為不同折射率之氣體，會產生不同之偏向角，再藉由偏向角的不同，以回推出該氣體折射率⁽²²⁻²⁴⁾，但此種系統精度很難提升，且使用單一雷射光判斷折射角度，會因為雷射光斑造成界定不易，易有誤差產生。

此外，藉由光譜特性，或是二次諧波 (electric-field-induced second harmonic generation, ESHG) 與三次諧波 (third harmonic generation)，亦可測量氣體折射率⁽²⁵⁻³¹⁾。前述之量測方式為量測非線性氣體折射率 (nonlinear refractive index)，其系統需考慮偏振等問題。除了用量測的方式得到氣體折射率外，Edlen 於 1965 年利用大量實驗結果得出經驗公式，其利用空氣的壓力、溫度、濕度和二氧化碳濃度推算出該空氣之氣體折射率，後續也有不少人提出此經驗公式之修正，使其精度更為提升⁽²⁹⁾。然而隨著量測技術的進步，更簡便之量測方式即可取代該公式。

二、設計理論與方法

為了量測氣體折射率以評估散熱系統之效果，本研究研製氣體折射率量測系統⁽³⁰⁾。本系統之光源採用綠光雷射，搭配空間濾波器，過濾掉不必要的高頻訊號，並且經過一準直透鏡，使通過空間濾波器之球面波轉為平面波；光路中設置三角稜鏡，且稜鏡會直接接觸待測氣體，使光路因折射率不同而產生偏折，並且可以依照待測氣體之折射率範圍挑選其適合之稜鏡。同時，系統使用 Shack-Hartmann 波前檢測架構，並藉由其中的微透鏡陣列，使波前聚焦於 CCD 上，搭配廣泛運用於波前檢測中之澤爾尼克多項式 (Zernike polynomials)，將多項式中的傾斜 (Tilt y) 項，轉換為波前實際傾斜角度之變化量，以分析出波前折射率變化量，再換算得該氣體折射率，該系統如圖 4 所示。此法藉由透鏡陣列聚焦的多個光點，相較於僅用單一雷射光點，能有效降低誤差。本系統包含三個部分，光源、氣體腔體與波前檢測儀。將前述項建立在一光學平台上，並均有獨立且不相相互影響之治具。當需要調整系統時，模組化的各部件可以輕易地移至該指定位置，並不需要拆裝元件與重新校準。此外，目前市面上有許多手持折射率檢測儀器，皆是用以量測液體折射率，透過量測液體折射率，可以得知該液體之糖分濃度等資訊，但市面上沒有手持量測氣體折射率之儀器；本研究可視為一氣體折射率量測儀原型，未來可將本研究中之原理與巧思，重新縮小設計，即有望製作出手持氣體折射率檢測儀並商用。

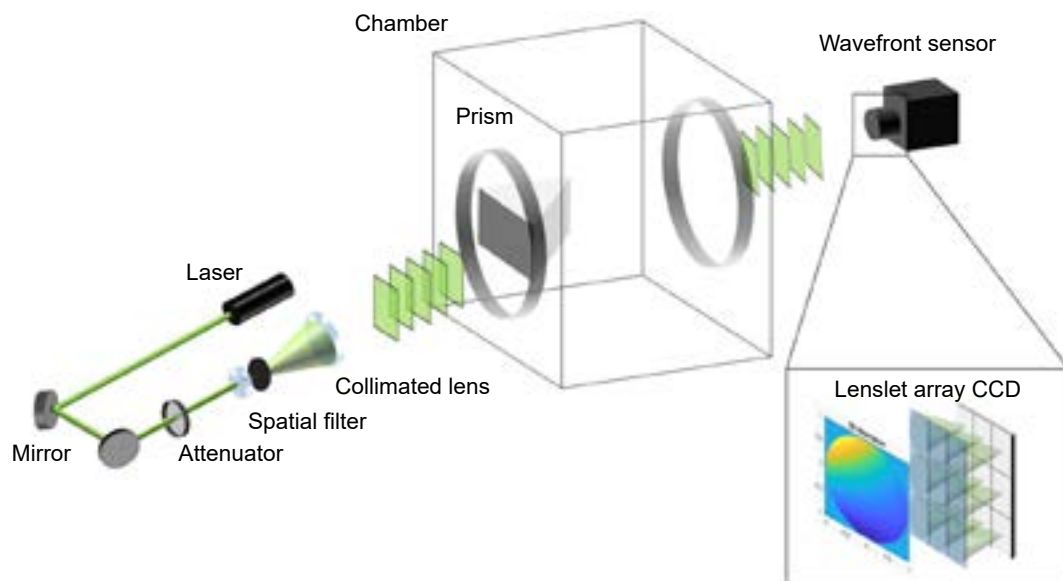


圖 4. 量測系統示意圖。

當光線從一介質傳播至另一種介質時，因為折射率不同，光行進的方向會因此改變，此現象稱為折射定律。本研究即是由折射率出發，進行氣體折射率之量測；透過數次折射定律的換算，推導出折射率與折射角之微分關係式，用以正確量測氣體折射率。如圖 5 所示。其入射角為 θ_i ，入射介質折射率為 n_i ，出射角為 θ_o ，出射介質折射率為 n_o ，兩者關係為：

$$n_i \sin \theta_i = n_o \sin \theta_o \quad (1)$$

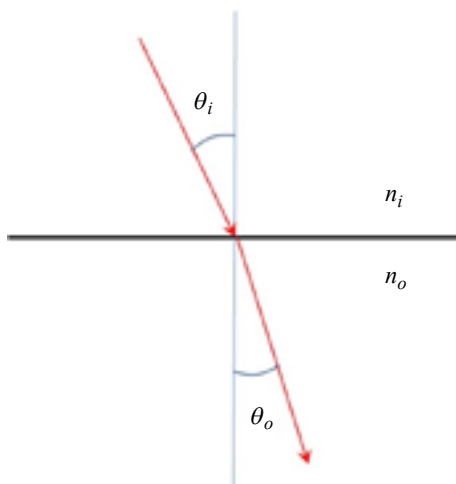


圖 5. 折射現象。

如圖 5 所示，不同的介質折射率，會導致右側出光角度有不同偏折，而偏折角度可以引導至 Zernike 多項式中，藉由波前傾斜項的變化，回推出該 n_2 的折射率。本研究中，入射角為 θ_1 ，當光線入射至待測氣體 (折射率為 n_2) 時，其路徑約與圖 6 中之水平面平行，如此可以確保出射光會穿過腔體另一端之窗鏡，避免光路被腔體遮蔽。不同的稜鏡，會有其對應的入射角。 n_2 的變化量與出射角的變化量之關係為：

$$\frac{dn_2}{d\theta_6} = \frac{\cos \theta_4 \cos \theta_6 n_{air}}{\sin \theta_p} \quad (2)$$

其中， θ_p 為入射光對向稜鏡之角度； $\theta_4 \sim \theta_6$ 可以由幾何光學推得：

$$\theta_4 = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_p \sqrt{n_l^2 - n_{air}^2 \sin^2 \theta_l} - \cos \theta_p \sin \theta_l n_{air}}{n^2} \right) \quad (3)$$

$$\theta_5 = \theta_p - \theta_4 \quad (4)$$

$$\theta_6 = \sin^{-1} \left(\frac{n_2 \sin \theta_5}{n_{air}} \right) \quad (5)$$

三、氣體折射率量測儀之系統架構

當平面波光源入射至稜鏡並接觸待測氣體時，所產生之折射角會因待測氣體折射率不同而產生相對應的變化。本系統以平面波作為光源，檢測該平面波之波前傾斜項，回推出稜鏡

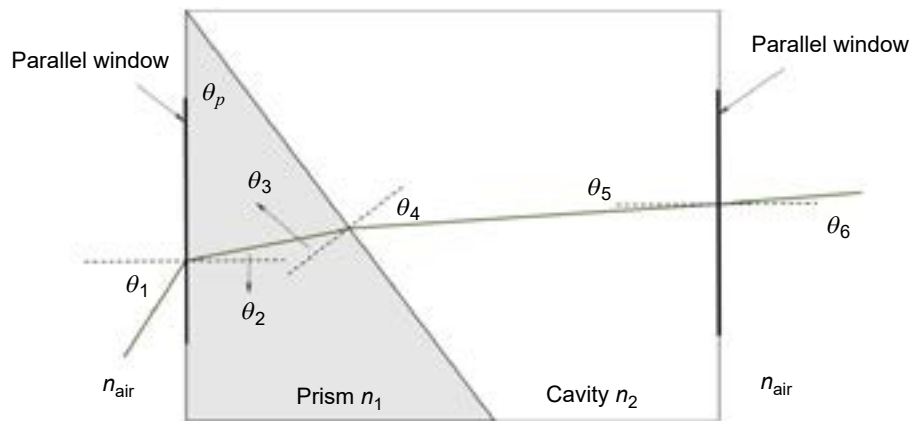


圖 6. 稜鏡偏轉角。

偏轉角，該項係數即為偏轉角之正切函數。並且定義真空時之光波折射率為 1，利用待測氣體與真空狀態之波前的水平傾斜項之差值，回推出偏轉角差值 $d\theta_6$ ，代回 (2) 式，即可得到待測氣體之折射率。整體架構如圖 7 所示。

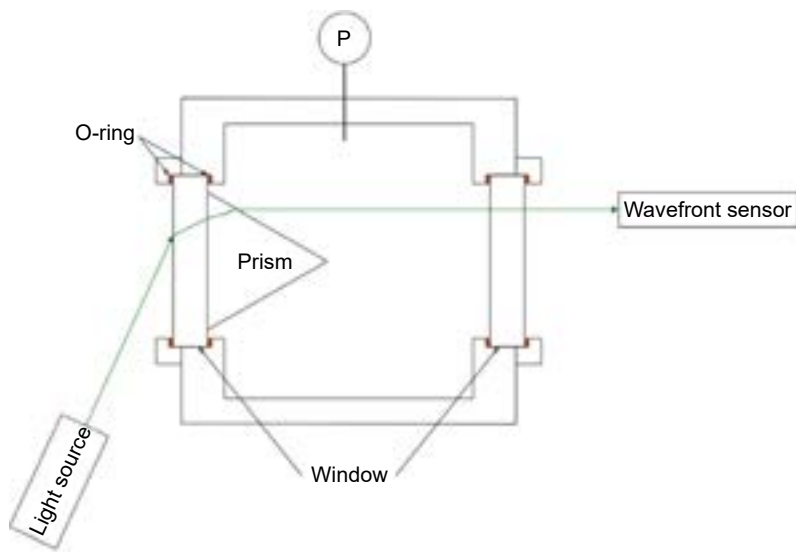


圖 7. 系統架構示意圖。

裝載待測氣體之容器為一金屬製方形腔體，腔體兩側有玻璃視窗，金屬腔體如圖 8 所示。玻璃視窗為預設之光路路徑，將稜鏡貼附於其中一個玻璃視窗上，並直接接觸待測氣體。由於此腔體需要承受內部與環境之壓差，因此腔體與其玻璃視窗須有一定強度，且玻璃與腔體間放置墊圈以確保其密封性。另外，於兩片玻璃視窗之入射面鍍上單層抗反射膜，用以減少系統的雜散光。

整體實驗架構建於一厚度 2 cm 之金屬板上，該金屬板表面為霧面材質，因此可減少因反射產生之雜散光；分別將光源、腔體與波前檢測儀模組化，如圖 9 所示，並且針對入射角需求及各治具之固定位置，於金屬板上鑽孔定位。若未來需調整入射角等，因其已模組化之緣故，因此僅需調整光源治具之固定位置，如此可以減少移動與調整各元件的程序，且移動光源模組後，無須重新校準光源系統。

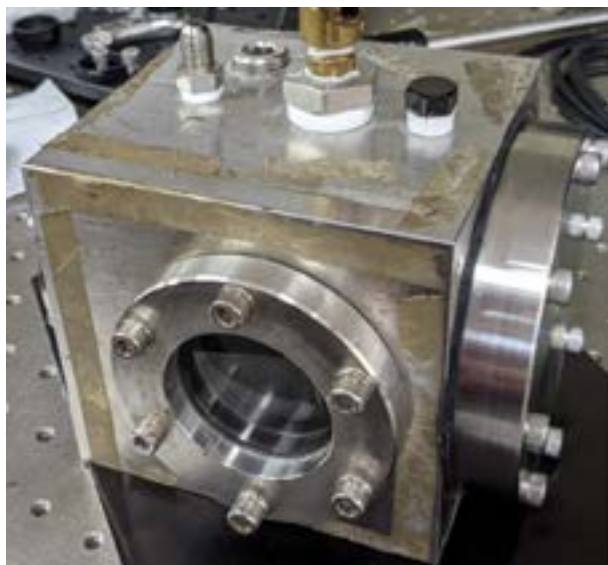


圖 8. 裝載待測氣體之腔體。

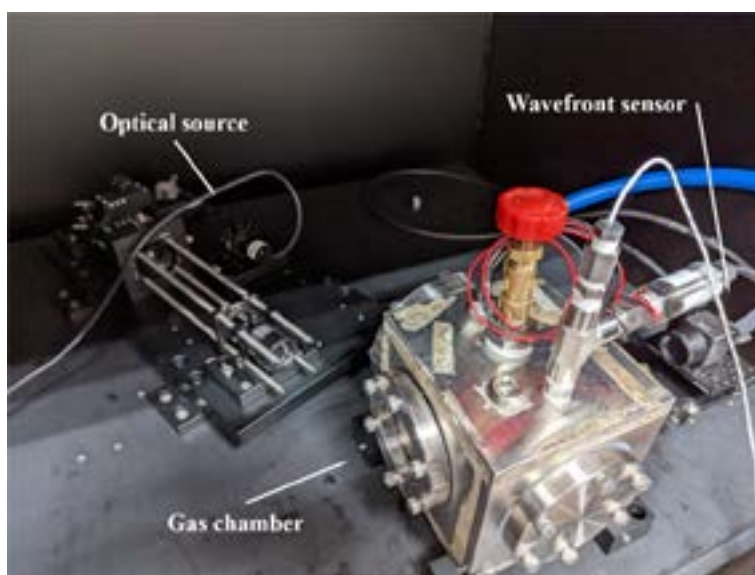


圖 9. 模組化實驗系統。

本實驗使用正三角形稜鏡， θ_p 為 60 度，計算出預期入射角 θ_i 為 68.2 度後，再依照入射角與稜鏡的折射率等，透過 (2) 式，可以計算出本實驗之波前傾角變化對應之折射率變化值，即 $dn_2/d\theta_6$ ，最後，氣體折射率 n_{gas} 可由波前水平傾角 θ_t 及上述參數推得：

$$n_{gas} = 1 + \frac{dn_2}{d\theta_6} \times \theta_t \quad (6)$$

其中，波前水平傾角 θ_t 可從 Zernike 多項式中之第二項的係數回推出：

$$\theta_t = c_2 = \frac{\Delta y}{f} = \frac{\Delta z}{d} \quad (7)$$

c_2 為 Zernike 多項式第二項之係數， Δy 為焦點位移量； f 為透鏡之焦距； Δz 為傾斜波前橫向位移量； d 為透鏡之直徑，示意圖如圖 10 所示。Zernike 多項式採用極座標表示，亦可將其換算得卡式座標表示。 Z_2 使用卡式座標，並增加其係數，可以改寫為：

$$Z_2 = c_2 \times y \quad (8)$$

當角度很小時， c_2 即是此波前傾斜之角度之斜率。

表 1. 系統參數計算。

θ_p	60°
θ_1	68.2°
n_1	1.7946
n_2	1
n_{air}	1.000233 ⁽²⁹⁾
$dn_2/d\theta_6$	0.578480

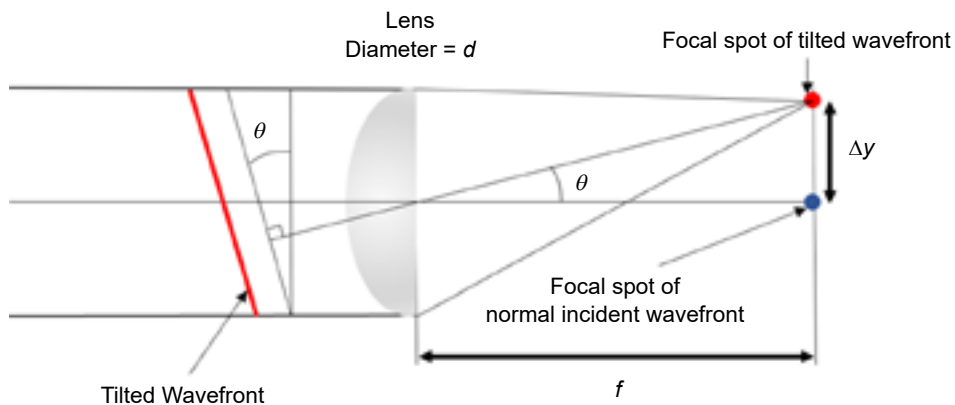


圖 10. 焦點位移量與波前傾斜之關係圖。

使用光學模擬軟體 LightTools，模擬光路與出射角度的變化，模擬如圖 11 所示。

圖 12 左側之稜鏡黏貼於一平板玻璃視窗上。由於入射角為固定角度，且根據折射定律，平板玻璃並不會造成入射角改變，因此光路上省略左方之平板玻璃右側之平板玻璃會直接與待測氣體接觸，折射角會因待測氣體折射率之不同而有所變化，因此右側平板玻璃視窗須納入計算。

模擬結果如表 2 所示，將模擬結果與本論文所提出之公式計算結果比較，可以得到兩者差異為小數點後第四位數，計算出的誤差小於 0.01%。

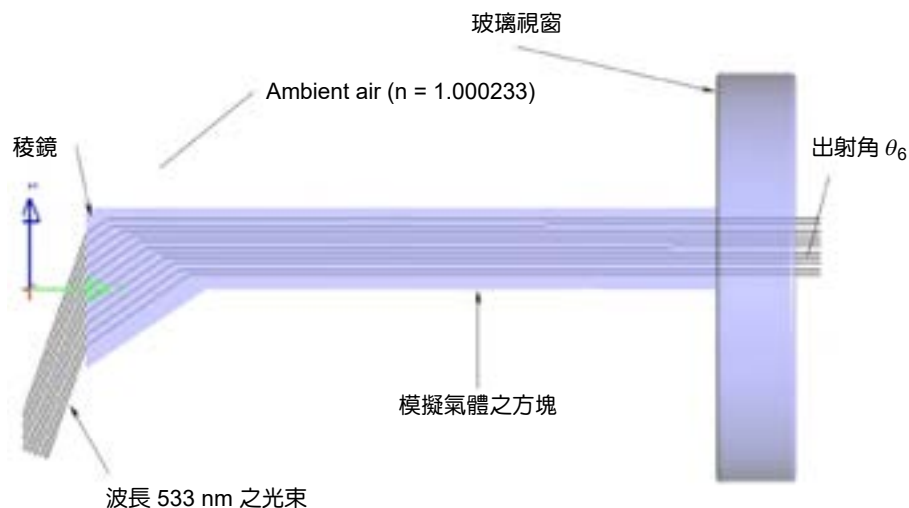


圖 11. LightTools 模擬光路。

表 2. 模擬結果與比較。

參數\方法	LightTools 模擬	理論計算結果
n_{air}	1.000233 ⁽³⁴⁾	1.000233 ⁽³⁴⁾
n_1	1.7946	1.7946
n_2	1	1
θ_1	68.2°	68.2°
$dn_2/d\theta_6$	0.578511	0.578480

此外，表 2 之計算結果採用空氣折射率作為參考值⁽³⁴⁾。為減少誤差，本文將於量測氮氣前，先行量測空氣折射率，並將 $dn_2/d\theta_6$ 之數值利用量測到的環境空氣折射率進行修正，再進行氮氣量測，使氮氣量測結果更貼近真實量測數據。

四、實驗結果與討論

本系統採用平面波之傾斜項的差值計算折射率，實驗時亦記錄每一狀態之波前與氣壓。首先量測腔體於一大氣壓之狀態，記錄氣壓與波前，再用泵浦將腔體抽至約 17 Torr 後，量測該狀態之氣壓與波前並記錄之。擷取波前檢測儀之影像後，輸入自行撰寫之 MATLAB 程式進行 Zernike 多項式中傾斜項之擬合，並將擬合結果換算成偏轉角度，最終得到空氣折射率。

量測後之影像經過程式之擬合後，結果如表 3 所示。其中，由於 Zernike 多項式之係數於擬合後數值過小，因此 Zernike 多項式的係數以 10^3 倍呈現之。經過測得環境之空氣折射率後，將其結果帶入 (2) 式，得修正後之 $dn_2/d\theta_6$ 。本文一共獨立量測五次氮氣折射率，因此每一次之量測前，皆會量測該次之空氣折射率。

表 3. 量測空氣實驗數據。

量測順序	壓力 (Torr)	Z_2 係數 $\times 10^3$	折射率	$dn_2/d\theta_6$
第一次量測	17	0	1	0.578609
	753	0.4933	1.000285	
第二次量測	18	0	1	0.578604
	753	0.4885	1.000283	
第三次量測	18	0	1	0.578638
	754	0.5129	1.000297	
第四次量測	18	0	1	0.578608
	752	0.4932	1.000285	
第五次量測	18	0	1	0.578634
	753	0.5098	1.000295	

為確保整個腔體與管路中無其他氣體存在，因此量測前，需先重複抽灌氮氣三次，以避免影響實驗結果。本實驗使用 99.995% 純度之氮氣，將腔體抽真空後，分次將氮氣灌入，至壓力感測器之最大可承受之壓力約 2400 Torr，並將其繪製成關係圖如圖 12 所示。

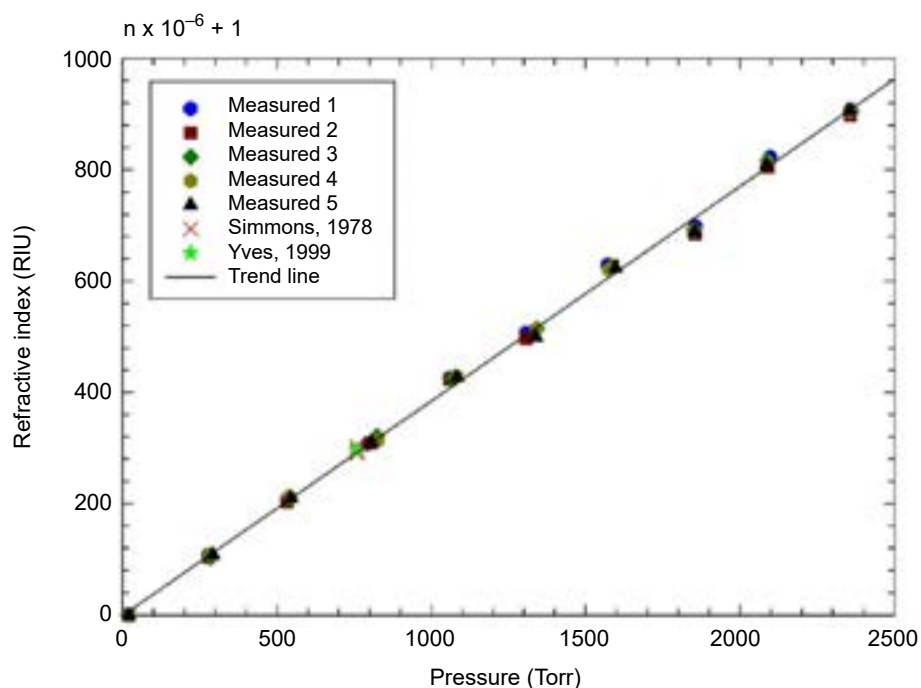


圖 12. 氮氣折射率量測結果。

由測量結果可知氮氣之折射率與壓力呈現線性關係，將參考文獻^(36, 37)之量測結果亦標於本實驗數據圖上，如圖 12 所示。該兩篇論文係量測一大氣壓下之氮氣折射率，由比較結果可知：本實驗之量測結果與文獻相符。

4.1 誤差分析

4.1.1 正切函數線性討論

當程式算出光通過微透鏡後之焦點位移量，透過下式，可以得到平面波前入射感測器之傾斜角度，示意圖如圖 10 所示。

$$\theta_t = \frac{\Delta y}{f} \quad (9)$$

其中， Δy 為焦點位移量， f 為透鏡之焦距， Δz 為傾斜波前橫向位移量， d 為透鏡之直徑。接著，前述感測結果會透過波前擬合至 Zernike 多項式，並用該多項式之係數來表示波前傾斜角度。由於在 Zernike 多項式中，該係數是波前傾斜之斜率，也會是該傾斜波前之正切函數，換言之，即是用斜率來表示傾斜程度。若要將擬合後的正切函數與波前傾斜角度直接連結，則必須確認正切函數在本論文所探討的角度範圍內是趨近線性關係。

將 $\tan\theta$ 以泰勒展開式改寫如下：

$$\tan\theta = \theta + \frac{\theta^3}{3} + \frac{2\theta^5}{15} + \dots, \forall \theta: |\theta| < \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

其中 θ 單位為弧度。當 θ 很小時，可以得：

$$\tan\theta \approx \theta, \forall \theta: |\theta| < \frac{\pi}{2} \quad (11)$$

通常當 $\theta < 5^\circ$ 時，(11) 式會成立，即光學中之近軸近似條件。為證明 5 度內之正切函數與其角度為線性關係，使用 MATLAB 將函數繪出，如圖 13。另外，本文所運用之角度範圍小於 2 度。

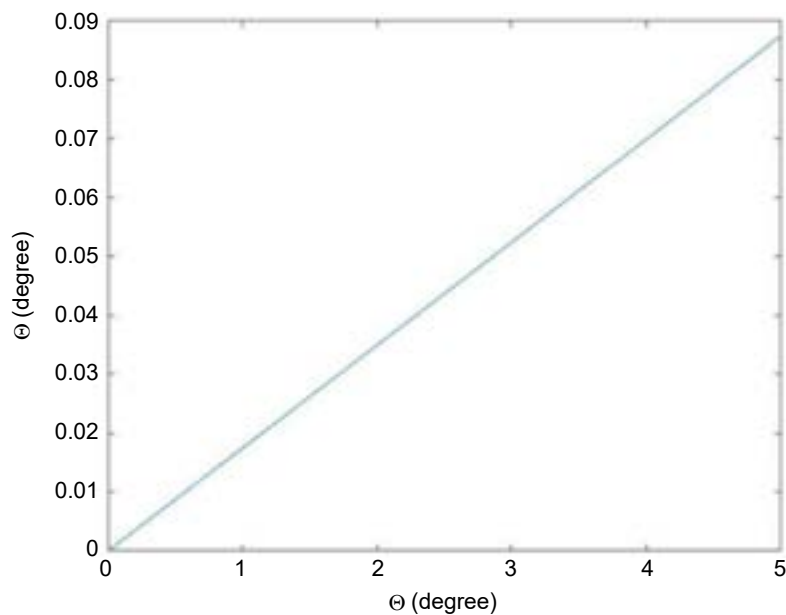


圖 13. 正切函數與角度之關係圖。

4.2 玻璃變形誤差探討

即使腔體玻璃視窗已選用厚度 14 mm 之玻璃，但因腔體內外之壓差，玻璃仍可能變形。本節將探討玻璃變形問題，分析玻璃變形效應，以縮小實驗誤差。

為驗證玻璃是否變形，本研究利用波前檢測儀，量測雷射光行經處之玻璃變形狀況，並以像差來表示結果。雷射光行經處已標記於玻璃上，如圖 14 所示。

有無黏貼稜鏡之玻璃變形量測結果分別如圖 15 與 16 所示，壓力範圍由 2400 Torr (本實驗最大可乘載壓力) 開始降壓至 750 Torr (一大氣壓)，主要觀察壓力差對玻璃變形之影響。由結果可知，經過反射波前量測結果，主要變動項目為 Zernike 多項式之 Z_1 與 Z_2 項的係數， Z_1 為 Tilt x 項 (Vertical tilt, 垂直傾斜項)；觀察本研究所關注的 Z_2 項，其係數變動範圍約 0.02×10^{-3} ，而根據 (6) 式推算氣體折射率，變動範圍僅影響到折射率小數點後第九位數，因此玻璃些微變形在本研究中是可以被接受的。

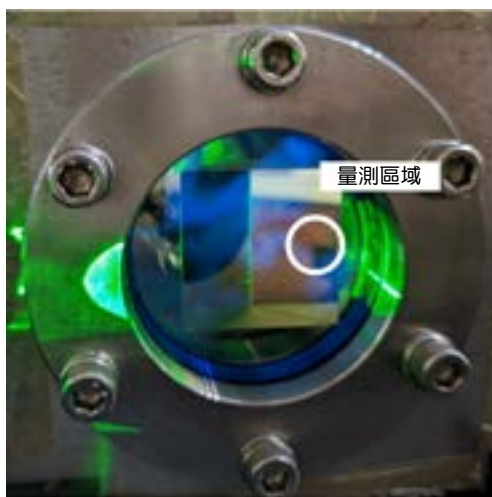


圖 14. 量測玻璃變形位置。

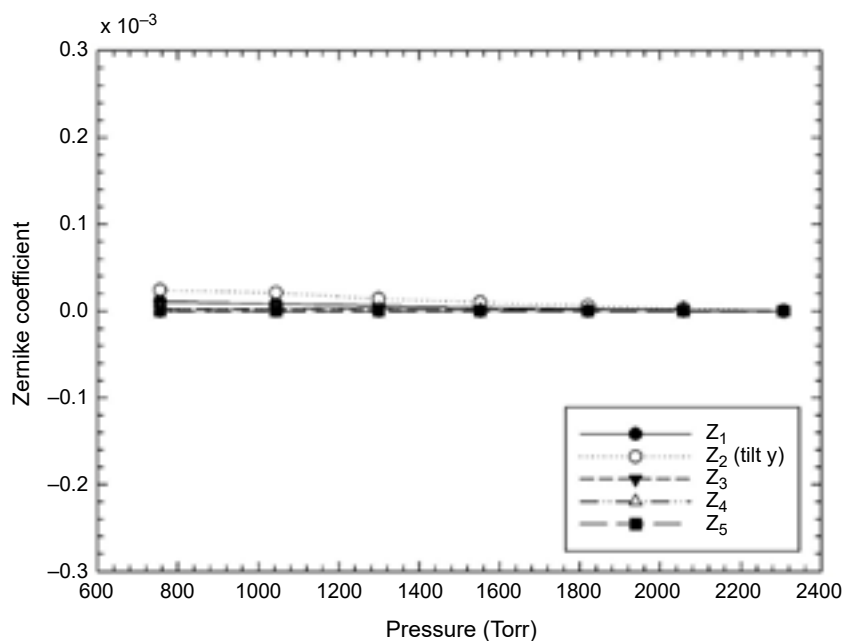


圖 15. 無黏貼稜鏡之玻璃變形折線圖。

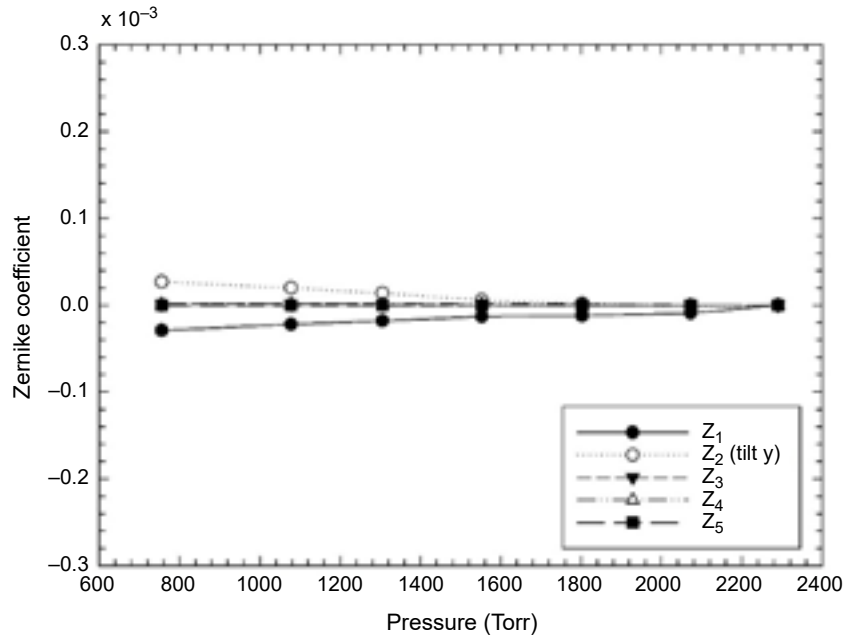


圖 16. 黏貼稜鏡之玻璃變形折線圖。

4.3 理論誤差

本節針對本研究之氣體折射率計算公式，進行理論誤差之分析。本實驗光路如圖 6，而待測氣體折射率 n_2 的變化量與出射角 θ_6 的變化量之關係為：

$$\frac{dn_2}{d\theta_6} = \frac{\cos \theta_4 \cos \theta_6 n_{\text{air}}}{\sin \theta_p} \quad (12)$$

其中， θ_p 為稜鏡之頂角； $\theta_4 - \theta_6$ 可推得：

$$\theta_4 = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_p \sqrt{n_1^2 - n_{\text{air}}^2 \sin^2 \theta_1} - \cos \theta_p \sin \theta_1 n_{\text{air}}}{\sin n_2} \right) \quad (13)$$

$$\theta_5 = \theta_p - \theta_4 \quad (14)$$

$$\theta_6 = \sin^{-1} \left(\frac{n_2 \sin \theta_5}{n_{\text{air}}} \right) \quad (15)$$

$dn_2/d\theta_6$ 之所有參數為： θ_4 、 θ_6 、 θ_p 、 n_{air} ，其中， θ_4 之參數為： θ_1 、 θ_p 、 n_{air} 、 n_1 、 n_2 ，而 θ_6 則與 θ_4 相關。觀察 θ_4 項，由於稜鏡角度與其折射率等數值皆固定，實驗中該些數值並不會有所改變，因此，最大誤差來源即為入射角 θ_1 。此外， $dn_2/d\theta_6$ 在本文中取六位有效位數進行運算，而最終折射率之有效位數係由穩定度分析後，僅取三位有效位數作為結果。

腔體固定造成之誤差，會導致入射角與預期不同，而入射角不同，會影響到 $dn_2/d\theta_6$ 之數值，繪製 $dn_2/d\theta_6$ 與小範圍變化之入射角關係圖，入射角則由原預期之入射角 68.2 度取正負 1 度之範圍，如圖 17 所示。

當入射角 θ_1 變動時，由圖 17 可知， $dn_2/d\theta_6$ 數值會產生變動，變動最大的兩個情況之誤差分別計算如下：當入射角為 67.2 度時， $dn_2/d\theta_6$ 為 0.564711，與入射角 68.2 度時誤差為 2.4%；當入射角為 69.2 度時， $dn_2/d\theta_6$ 為 0.591202，與入射角 68.2 度時之誤差為 2.2%。因此，未來延續本研究，可以針對稜鏡與光源之入射角度進行設計以降低誤差。

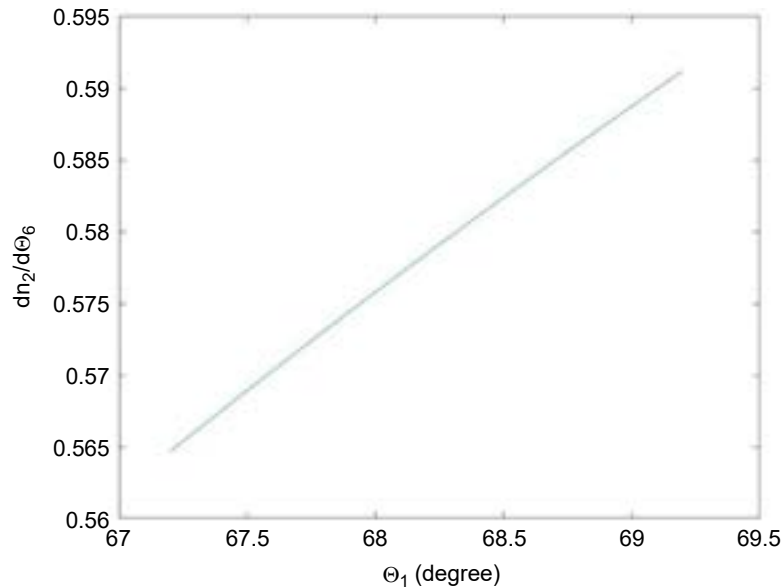


圖 17. $dn_2/d\theta_6$ 與入射角之關係圖。

4.4 系統穩定性分析

為測試本量測系統之穩定性，因此量測一大氣壓下之氮氣折射率，30 秒擷取一次，共取 50 個點進行分析。量測一大氣壓之氮氣可避免腔體未完全密封，導致壓力不穩定。量測結果如圖 18 所示。

本穩定度實驗之數據統計如圖 19 所示，平均折射率為 1.000302，標準差為 3.06×10^{-6} (1%)，在一個標準差內之數據有 31 個 (62%)；兩個標準差之內有 49 個 (98%)；三個標準差之內為 50 個 (100%)。因此取兩個標準差，即 $\pm 6 \times 10^{-6}$ ($\pm 2\%$)，作為本實驗之精確度範圍。

4.5 焦點位移量分析

4.5.1 空間域焦點位移量分析

本節分析 Shack-Hartmann 波前檢測儀之陣列接收效果，將經過剪切干涉儀 (shearing interferometer) 驗證後之平面波光源直接由 Shack-Hartmann 波前檢測儀接收，並使用自行撰寫之程式分析平面波通過透鏡陣列後之焦點位置。取透鏡陣列正中心之 13×13 個小透鏡 (lenslet) 作為取樣區域，該透鏡陣列之數量與氮氣折射率量測之數量相同，儘管透鏡陣列規格為 35×21 個小透鏡，但由於量測氮氣折射率實驗時，入射角為 68.2° ，導致有效光路面積較小，因此只能取 13×13 個小透鏡作為實驗數據。

將平面波之焦點數據圖進行處理後，可以得到各透鏡所對應之重心位置，為驗證各焦點之位移量是否相同，將 13×13 個透鏡陣列中第七行之重心設為原點 (即透鏡陣列之正中

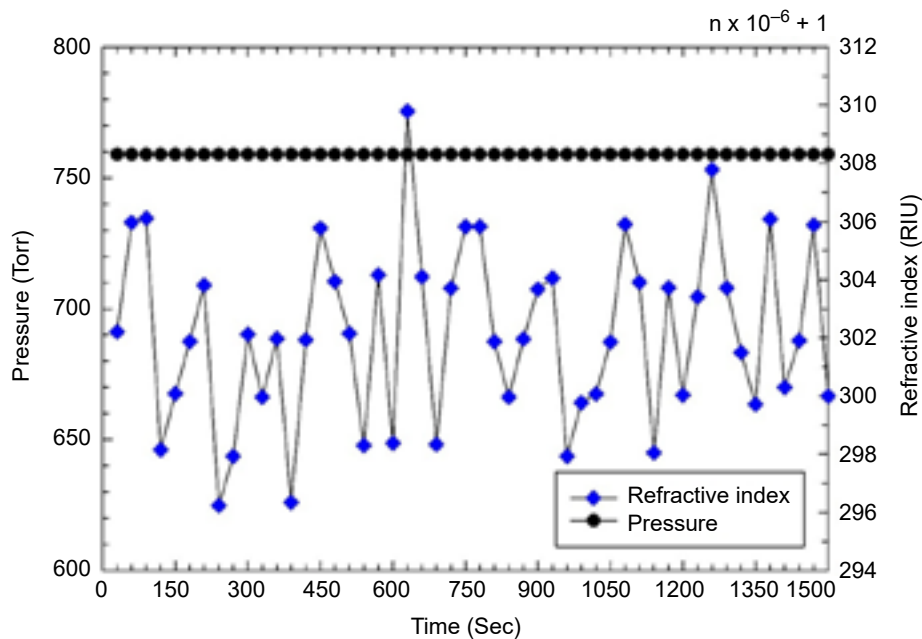


圖 18. 穩定度量測結果。

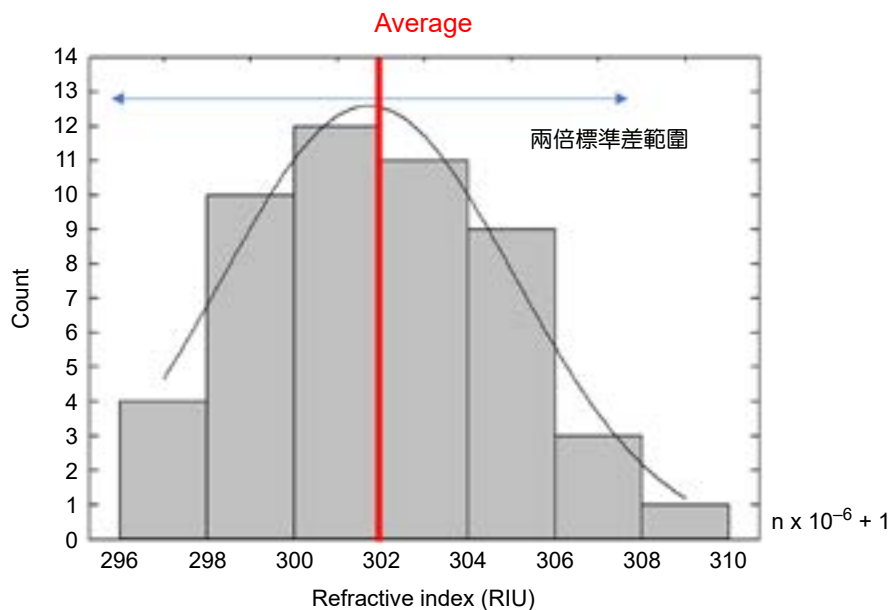


圖 19. 穩定度實驗資料點分布。

間)，並依照 ThorLabs 原廠提供之透鏡陣列與 CCD 數據進行推算，相鄰微透鏡之焦點所對應之距離應為其透鏡大小除以 CCD 感光單位之實際大小 ($300\ \mu\text{m}/5.83\ \mu\text{m}$)，可得原點左右透鏡之理論焦點位置，並與實際位置進行比較，得到其理論位置與實際位置之差，將結果繪製成立體圖，實際結果如圖 20 所示。

由圖 20 之結果得知，經剪切干涉儀驗證之平面波進入 Shack-Hartmann 波前檢測儀時，其實際焦點位置與理想焦點位置有所誤差，推測其因可能在於透鏡陣列之各個透鏡製程上的

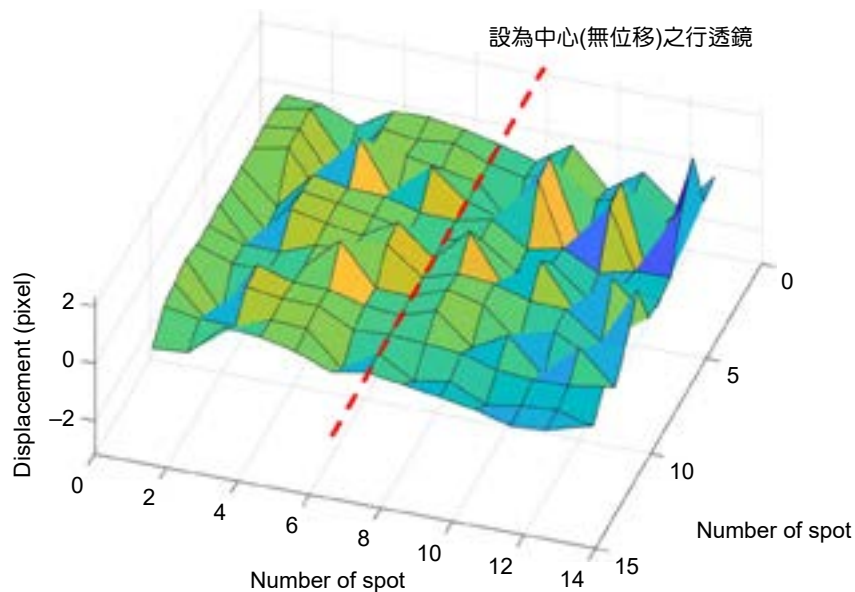


圖 20. 平面波於透鏡陣列之點位移。

誤差，以致各透鏡之像差、焦距等之不相同；亦可能是 CCD 上之各感光單元之誤差與雷射光源誤差所導致。儘管有前述之誤差存在，但因本研究於量測前皆先取一標準參考焦點位置(此時腔體抽至近真空)，再進行後續量測，並於後續量測時，計算各焦點與相對標準參考焦點位置之位移量，因此所得之量測值為相對於參考值之結果，其已扣除各透鏡原始焦點歪斜之影響，故在不同折射率下，仍可藉由透鏡陣列接收波前之變化以達成本實驗之目的。

4.5.2 單透鏡焦點位移量分析

前一節分析空間域焦點位移，本節則針對透鏡陣列中單一透鏡之焦點進行時域位移量之分析。隨機從透鏡陣列中取五個小透鏡，將其焦點之位移量隨時間圖繪製如圖 21 所示。

由空間域焦點位移量分析可知，每一個透鏡之位移量皆不同，因此圖 21 之位移量定義為與該透鏡 50 個資料點平均之位移量。圖 21 中，透鏡一到五之標準差分別為 0.001、0.014、0.016、0.003、0.009。而圖 21 的穩定度實驗中，將該標準差換算成與本章節討論之單位後，標準差為 0.013。由標準差之比較可以推論，單透鏡陣列之位移量變化經過陣列式擷取訊號後，可以有效取得其趨勢，並降低位移量之跳動值。

4.6 系統解析度

因本量測系統之光路經由稜鏡接觸待測氣體並產生折射後，會由波前檢測儀進行影像解析與後端程式計算，因此本文之氣體折射率解析度須由 Shack-Hartmann 波前檢測儀之解析度進行討論。

由本文所述，本系統使用動態範圍與靈敏度以針對本系統之量測能力進行說明。下式分別表示 Shack-Hartmann 波前檢測儀的動態範圍與靈敏度之計算：

$$\theta_{\max} = \frac{\Delta y_{\max}}{f} = \frac{d/2}{f} \quad (16)$$

$$\theta_{\min} = \frac{\Delta y_{\min}}{f} \quad (17)$$

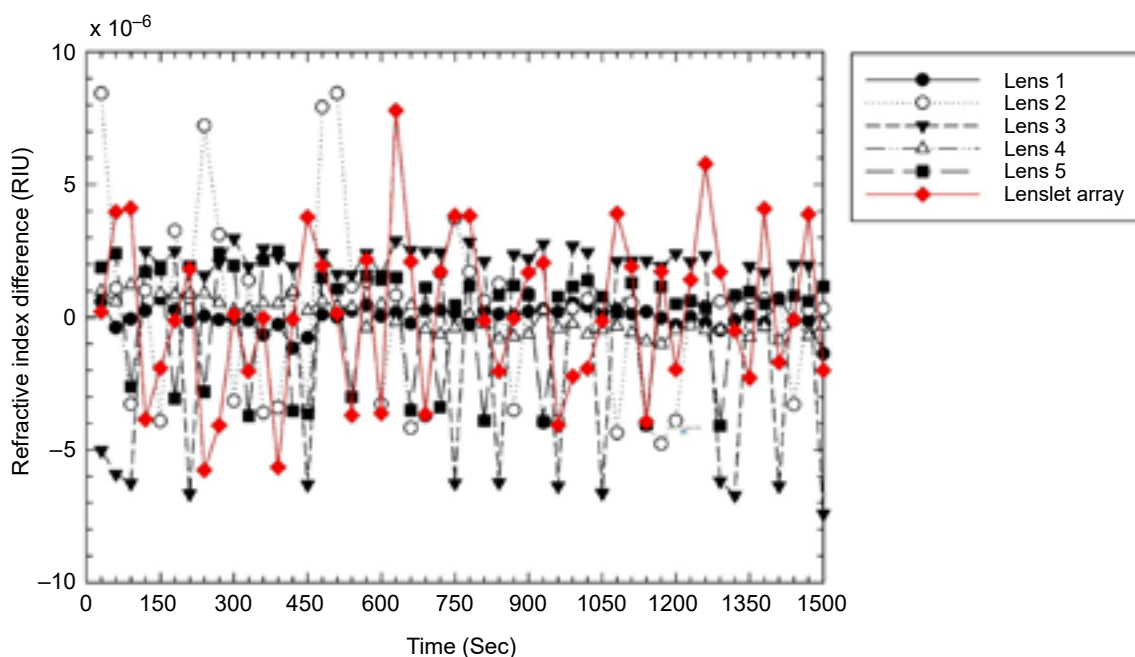


圖 21. 單透鏡焦點位移量。

由於透鏡陣列焦距 f 為 14.6 mm，透鏡陣列之直徑為 $295 \mu\text{m}$ ，故本系統之 $\theta_{\max}$ 為 0.57882° ($147.5 \mu\text{m}/14.6 \text{ mm}$)；而由於透鏡陣列焦距 f 為 14.6 mm，波前檢測儀之 CCD 之最小可檢測畫素大小為 $5.83 \mu\text{m}$ ，故 $\theta_{\min}$ 為 0.022879° ($5.83 \mu\text{m}/14.6 \text{ mm}$)。

計算波前檢測儀可偵測之最大傾角 $\theta_{\max}$ 後，須將傾斜角與稜鏡之偏轉角一同討論，即表示如下式：

$$n_{\max} = 1 + \frac{dn_2}{d\theta_6} * \theta_{\max} \quad (18)$$

由 (18) 式之計算，最大可檢測之氣體折射率 $\theta_{\max}$ 為 1.005843；而靈敏度則由下式表示：

$$n_{\min} = \frac{dn_2}{d\theta_6} * \theta_{\min} \quad (19)$$

由 (19) 式之計算，氣體折射率靈敏度 $n_{\min}$ 為 0.000231。

五、結論

本研究提出一氣體折射率量測系統，透過正三角形稜鏡與 Shack-Hartmann 波前檢測儀的相互配合，搭配折射率變化量與偏轉角關係式，可量測出待測氣體折射率。透過光學模擬軟體 LightTools 驗證後，確認此系統在光學設計中能有最佳之選擇，模擬結果與公式計算誤差小於 0.01%。實驗量測 99.995% 純度之氮氣，實驗結果與參考文獻相符^(36, 37)。經過穩定度測試，系統精確度範圍可達折射率之 $\pm 6 \times 10^{-6}$ RIU，即 $\pm 2\%$ ；本實驗最大可檢測 (動態範圍) 之氣體折射率 $n_{\max}$ 為 1.005843 RIU，而最小可檢測 (靈敏度) 之氣體折射率差 $n_{\min}$ 為 0.000231 RIU。

參考文獻

1. J. W. Hardy, "Adaptive optics for astronomical telescopes", Oxford University Press on Demand, (1998).
2. B. C. Platt and R. Shack, *Journal of Refractive Surgery*, **17** (5), S573 (2001).
3. D. R. Neal, J. Copland, and D. A. Neal, *International Society for Optics and Photonics*, **4779**, 148 (2002).
4. D. Malacara, "Optical shop testing", John Wiley & Sons, (2007).
5. B. M. Welsh, B. L. Ellerbroek, M. C. Roggemann, and T. L. Pennington, *Applied optics*, **34** (21), 4186 (1995).
6. L. Seifert, J. Liesener, and H. J. Tiziani, *Optics Communications*, **216** (4), 313 (2003).
7. C. Schwarz, O. Huter, and T. Brixner, *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, **32** (5), 933 (2015).
8. M. Ninck, A. Galler, T. Feurer, and T. Brixner, *Optics Letters*, **32** (23), 3379 (2007).
9. H. Gebbie and N. Stone, *Infrared physics*, **4** (2), 85 (1964).
10. G. Xiao, A. Adnet, Z. Zhang, F. Sun, and C. Grover, *Sensors and Actuators A Physical*, **118** (2), 177 (2005).
11. M. Plewicki, S. M. Weber, F. Weise, and A. Lindinger, *Applied Physics B*, **86** (2), 259 (2007).
12. K. G. Krishna, S. Parne, N. Pothukanuri, V. Kathirvelu, S. Gandi, D. Joshi, *Sensors and Actuators A: Physical*, **341**, 113578 (2022).
13. T. Li, W. Yin, S. Gao, Y. Sun, P. Xu, S. Wu, H. Kong, G. Yang, G. Wei, *Nanomaterials*, **12**, 982 (2022).
14. S. Uma, M.K. Shobana, *Sensors and Actuators A: Physical*, **349**, 114044 (2023).
15. Z. A. Zaky, A. M. Ahmed, A. S. Shalaby, and A. H. Aly, *Scientific Reports*, **10** (1), 9736 (2020).
16. P. M. C. Rourke et al., *Metrologia*, **56** (3), (2019).
17. N. Fabricius, G. Gauglitz, and J. Ingenhoff, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **7** (1), 672 (1992).
18. P. W. Smith, *Applied Physics Letters*, **19** (5), 132 (1971).
19. M. Ibadul Islam et al., *Sensing and Bio-Sensing Research*, **13**, 55 (2017).
20. J. Chamberlain, F. Findlay, and H. Gebbie, *Applied Optics*, **4** (11), 1382 (1965).
21. R. Pan et al., *IEEE Sensors Journal*, **21** (14), 15417 (2021).
22. H. B. Chae, J. W. Schmidt, and M. R. Moldover, *Journal of Physical Chemistry*, **94** (25), 8840 (1990).
23. J. W. Schmidt and M. R. Moldover, *Journal of Chemical and Engineering Data*, **39** (1), 39 (1994).
24. J. Yata, M. Hori, H. Kawakatsu, and T. Minamiyama, *International journal of thermophysics*, **17** (1), 65 (1996).
25. U. Gubler and C. Bosshard, *Physical Review B*, **61** (16), 10702 (2000).
26. H. J. Lehmeier, W. Leupacher, and A. Penzkofer, *Optics Communications*, **56** (1), 67 (1985).
27. J. F. Ward and G. H. C. New, *Physical Review*, **185** (1), (1969).
28. D. P. Shelton, *Physical Review A*, **42** (5), 2578 (1990).
29. S. Zahedpour, J. K. Wahlstrand, and H. M. Milchberg, *Opt. Lett.*, **40** (24), 5794 (2015).
30. J.-F. Ripoche et al., *Optics Communications*, **135** (4), 310 (1997).
31. E. T. J. Nibbering, G. Grillon, M. A. Franco, B. S. Prade, and A. Mysyrowicz, *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, **14** (3), 650 (1997).
32. K. Birch and M. Downs, *Metrologia*, **30** (3), 1993.
33. 杜星旻, "波前檢測應用於氣體折射率量測", 國立中央大學光機電工程研究所, 碩士論文 (2022).
34. O. Kruger and N. Chetty, *Applied Optics*, **55** (32), 9118 (2016).
35. Online resources : ThorLabs, "Spatial Filters Tutorial", please refer to the website: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10768
36. A. C. Simmons, *Optics Communications*, **25** (2), 211 (1978).
37. Y. Clergent, C. Durou, and M. Laurens, *Journal of Chemical & Engineering Data*, **44** (2), 197 (1999).

作者簡介

杜星旻先生為國立中央大學機械工程研究所碩士。

Hsing-Min Tu received his M.S. in the Department of Mechanical Engineering from National Central University.

韋安琪女士為國立陽明交通大學光電工程研究所博士，現為國立中央大學能源研究所副教授。

An-Chi Wei received her Ph.D. in the Department of Photonics from National Yang Ming Chiao Tung University. She is currently an Associate Professor at Graduate Institute of Energy Engineering at National Central University.

施至柔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。

Jyh-Rou Sze received his Ph.D. in the Department of Photonics from National Yang Ming Chiao Tung University. He is currently a Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

提升遙測衛星成像品質的秘密－開箱全臺灣唯一的大口徑非球面鏡

The Secrets of Improving Image Quality of Remote Sensing Satellites Unboxing the Only Large-diameter Aspherical Lens in Taiwan

陳柏荔、林麗娥、魏崇倫、莊子右

Po-Li Chen, Claire Lin, Chong-Lun Wei, Tzu-Yu Chuang

遙測衛星上的光學系統就如同衛星的眼睛，它的結構應該是什麼樣子？

大家都知道，太空科技的元件，大多是國際管制輸出的項目，是你有錢也買不到的，買不到怎麼辦呢？只能靠自己開發！遙測衛星中的光學系統，其中的大口徑非球面鏡製作技術更是關鍵瓶頸，國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心（以下簡稱國研院儀科中心）團隊以 40 年的光學技術與經驗，用了超過 3 年的時間，一步一腳印地突破拋光以及檢測技術，才開發出衛星遙測系統用的大口徑非球面鏡片，目前國研院儀科中心是全臺灣唯一可以製作 40 公分以上非球面鏡片的重要單位！讓我們一起開箱好好認識臺灣的技術與驕傲吧！

非球面鏡與球面鏡哪裡不同？

一般而言，透過球面鏡看到的影像，在邊緣會有模糊的現象產生，這是為什麼呢？如圖 1 所示，以會聚平行光束為例，使用球面透鏡時接近光軸光線與靠近鏡緣光線不會完美聚焦在同一個焦平面上而產生「球面像差」，使得聚焦點模糊，品質不如預期；而非球面鏡，在鏡片的邊緣修正曲率後，光線就能完美聚焦在同一個焦平面上，提升影像品質。

非球面鏡的優點

就光學成像原理而言，當光線經過鏡片折射，會聚於像平面時，成像點收斂的越小，影

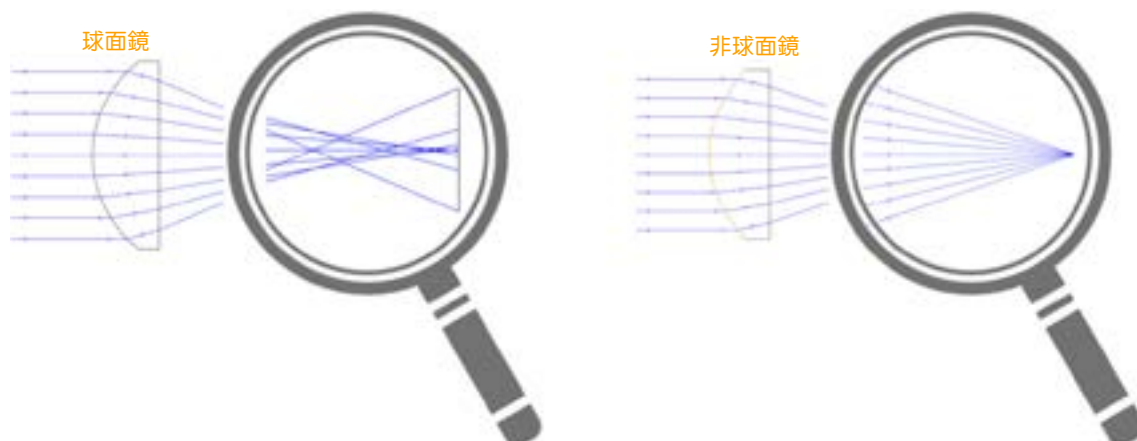


圖 1. 以會聚平行光束為例，使用球面透鏡與非球面透鏡的聚焦示意圖。

像愈臻於完美。像差，是光線實際落點與理想落點有差異所造成，起因於鏡片選材與配置，會造成影像模糊與扭曲。光學鏡頭為了規格與品質，需要依賴多片鏡片組合來減低像差影響。早期光學鏡頭幾乎全是以單一曲率之球面鏡所構成，然而，為了實現越來越高的規格與品質要求，光學鏡頭在設計上就會需要不斷增加鏡片數量，也就是說，會增加鏡頭整體體積和重量。

因此，為了能夠有效率地修正像差、提升光學品質、降低光學鏡片數量，一種具備了非固定曲率光學表面的鏡片－「非球面鏡片 (aspherical lens)」孕育而生。在複雜的光學系統中，可利用 1 個非球面透鏡取代多個球面透鏡，達到類似或更佳的效能，同時，可簡化系統組裝程序，並減少系統體積及重量。

「慢工」出細活的非球面鏡製造流程

遙測衛星中的非球面鏡為什麼如此關鍵？是因為若沒有掌控好鏡片的形狀以及表面粗糙度，都有可能造成影像模糊，就像 1990 年升空的哈伯望遠鏡，由於當初測量鏡片的儀器出了問題，主鏡被研磨拋光成錯誤的形狀，雖只是 2 微米的誤差，卻造成回傳的照片模糊，可謂是差之毫釐，失之千里！

如何才能製造出光滑無瑕的遙測衛星鏡片？尤其是大口徑的非球面鏡，十分仰賴專業技術與經驗，在製造過程中，其研磨拋光的製程繁瑣且難度極高，連技術純熟、經驗豐富的技師都必須時刻調整工序中的細節，需要「慢工」才能出細活，如圖 2 所示，一片精密的非球面鏡，需要經過許多複雜的程序，大致分為成形、球面預拋光及非球面拋光等。

在確認非球面鏡的光學設計規格後，首先進行「成形」，為了提升效率以及保持鏡片的強度，會將鏡片加工為近似球面的形狀，而非直接加工為非球面，通常會以鑽石磨砂輪大量移除材料，表面會產生較深的刀紋、刺孔等表面瑕疵，以及微裂縫等次表層破壞層，再以「球面預拋光」移除表面瑕疵與大部分次表層破壞層，過程中需控制其曲率半徑以符合所要求的公差與表面品質，採用球徑計 (spherometer) 進行快速曲率半徑檢測，再以三次元量床 (coordinate measuring machine, CMM) 或表面輪廓儀確認最後的近似球面形狀，可有效節省量測時間。

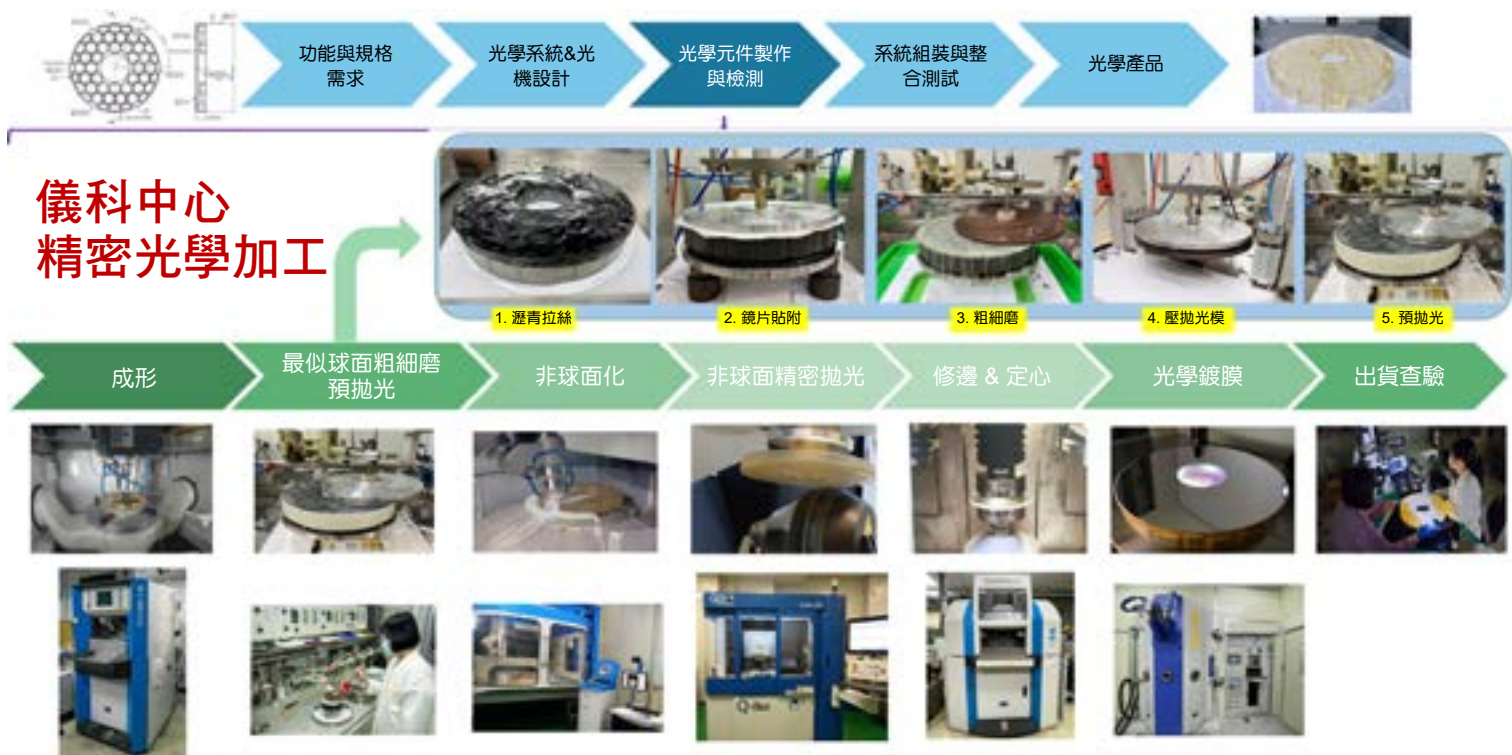


圖 2. 國研院儀科中心精密光學元件製作流程。

最後一個步驟則是「非球面拋光 (aspherization polishing)」，利用數控拋光機 (Computer Numerical Control, CNC) 搭配適當尺寸之拋光頭，並以穩定的材料移除率及停留時間將球面鏡片的形狀修正成為非球面曲面，國研院儀科中心以磁流拋光技術精準控制含有磨料之拋光流體，讓其持續且穩定地在鏡面表面循環流動，流體中的拋光磨料可穩定地移除鏡片材料，進而精準修正鏡片表面形貌誤差。非球面拋光製程並非一蹴可幾，每一回合的面形修正拋光會收斂面形精度往規格邁進。初始的非球面修正拋光回合往往會耗時超過 10 小時以上，隨著面形精度愈來愈好所需的拋光時間將也會逐漸減少。且在每個拋光回合後都需要搭配雷射干涉儀與電腦全像片來確認鏡片形狀誤差以作為下次修正拋光之依據。為了確認鏡片的形狀誤差，在檢測上所花費的時間通常會比拋光時間還久，有時甚至要花費數天進行重複性驗證才能獲得正確的數據，這樣的拋光/檢測循環的步驟需要持續到面形精度量測結果符合規格才算完成。

作為反射鏡的非球面鏡需再鍍製高反射率的金屬薄膜以提高其反射率。最後，非球面鏡需要符合所有檢驗規格，以保證上太空可達到期待的光學效能。由此可知，要製作出一片精密的非球面鏡，除了充滿了學問與技術經驗，更是「急不得」呀！

工欲善其事，必先利其器－非球面鏡的檢測

在製作出一片精密的非球面鏡後，要知道鏡片的表面形狀精度，需要搭配高精度的檢測設備，如圖 3 所示，大致可分為接觸式與非接觸式的檢測方式。使用接觸式的檢測設備 (如表面輪廓儀) 時，其探針尖端在量測過程中會以微小的力量接觸鏡片表面，好處在於可直接取得鏡片的表面形貌，但探針通常由紅寶石或鑽石製成，在檢測時還是有可能會劃傷鏡片表

面。而非接觸式的檢測設備 (如拼接式干涉儀以及光學檢測塔—電腦全像干涉量測)，屬於光學式檢測方式不需要接觸到測量鏡片表面，可以避免在表面留下刮痕，且能進行三維的曲面量測。

因此，如上節所述，為盡量避免鏡片刮傷，國研院儀科中心在進行非球面拋光的製程之前，會採用接觸式的檢測來確認鏡片的表面形貌，而在開始非球面拋光的製程之後，則會採用非接觸式的檢測來量測鏡片的形狀誤差與粗糙度，讓拋光設備依據量測結果進行修正拋光，逐步收斂鏡片形狀誤差以得到更高品質之光學元件。拼接式干涉量測技術是利用量測次口徑小範圍之鏡面形貌，再比對次口徑相互重疊區域並逐步拼接為完整鏡面形貌，突破了傳統干涉儀量測口徑的限制，甚至在不依靠其他輔助光學元件下得以量測非球面鏡面，對於開發遙測衛星之精密光學系統有莫大幫助。

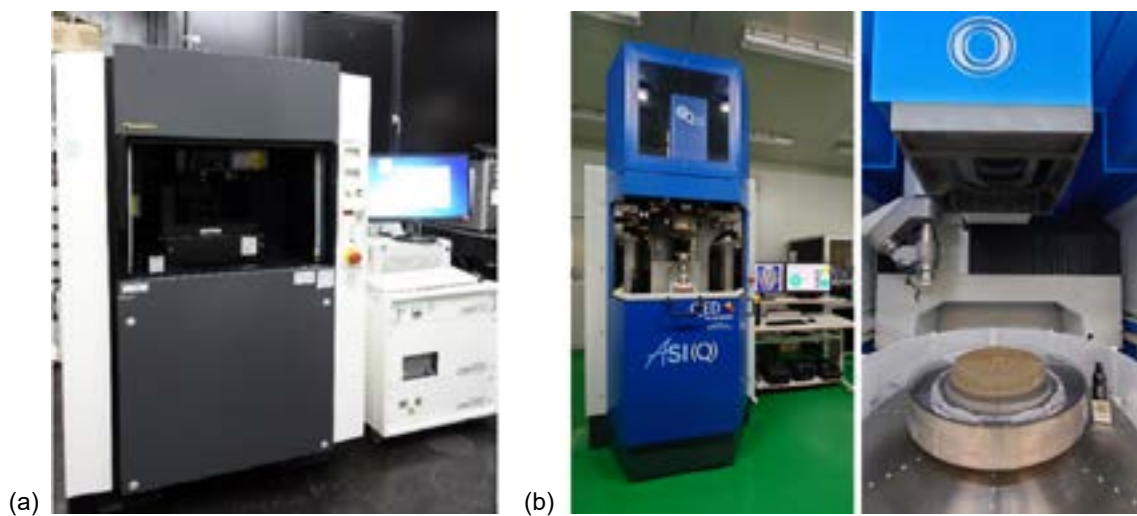


圖 3. (a) 接觸式檢測設備：表面輪廓儀；(b) 非接觸式檢測設備：拼接式干涉儀以及光學檢測塔 (電腦全像干涉量測)。

干涉儀的檢測原理是以標準鏡頭的反射波前做為參考，與從鏡面反射的波前產生干涉條紋，通過測量干涉條紋的變化，可獲得鏡片的表面形貌，如圖 4 所示，以福衛八號的鏡片為例，鏡片修正拋光過程的量測數據，顯示面形精度已逐漸收斂至系統要求的規格。

偷偷告訴你，國研院儀科中心製作出來的福衛八號主鏡，其外徑 41.6 cm、有效口徑 39.6 cm，「面形精度」達到 $PV < 126 \text{ nm}$ ，若以臺灣本島的面積換算，最高的山不能超過 7 公分 (6.832 cm)！若以足球場的大小換算，最大的高低差不能超過 30 nm！

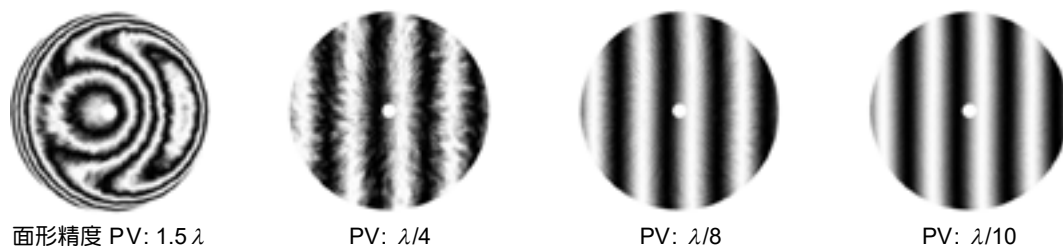


圖 4. 使用拼接式干涉儀量測鏡片修正拋光過程的數據。

備註：面形精度是指精密拋光表面與理想平面的偏差量，一般使用測量波前的干涉儀來檢測。 λ 為波長， $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。

探索未知—望遠鏡的種類

望遠鏡依照光學系統的結構主要分三大類型：折射式、反射式，以及折反射式，其原理以及優缺點歸納如表 1 所示。

二十世紀初，許多特殊設計的非球面鏡已廣泛應用在各式天文望遠鏡、顯微鏡和照相機中，例如 1931 年 B. Schmidt 開發出以一片近乎平面之非球面薄透鏡與球面反射鏡所組裝成的折反射式天文望遠鏡。太空望遠鏡為獲得清晰的星體影像，如果採用伽利略折射式望遠鏡，望遠鏡會變得很大又很笨重；透過卡塞格林改良式望遠鏡，光線經過多次反射與折射之後，望遠鏡可以縮成很短也可以增加口徑獲得很好的影像，重量也很輕方便送上太空。

近三十年來，由於非球面拋光製造精度大幅提升，不僅大型望遠鏡系統使用非球面鏡片，連單眼相機的鏡頭在設計上，也特別使用非球面鏡片，來減少所需的鏡片總數，進而減少鏡頭的整體大小與重量，此外，由於非球面鏡片可大幅改善球面像差，所以淺景深時，背景的模糊會更柔和，也能藉此獲得更佳的景深效果。另外，針對以往光學系統幾乎必定存在的色差問題，利用開發出的非球面繞射鏡片 (hybrid lens) 不僅可成功改善此類問題，亦可達成鏡頭輕、薄、短、小的設計目的。此外，在日常生活上的應用，對於高度數近視或散光或老花的人，非球面是必要的，因為度數高的情形，物體縮放的比例會增加，而且同一屈折率和同一度數的鏡片相比，非球面鏡片會較輕薄美觀。

大口徑非球面鏡的三個秘密

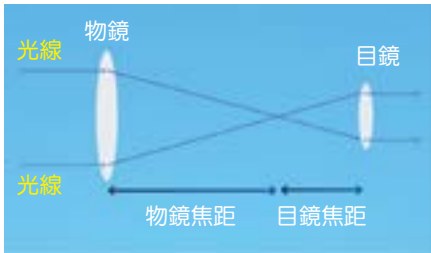
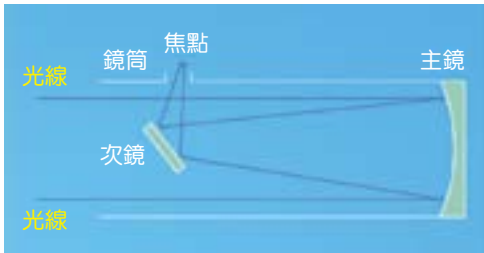
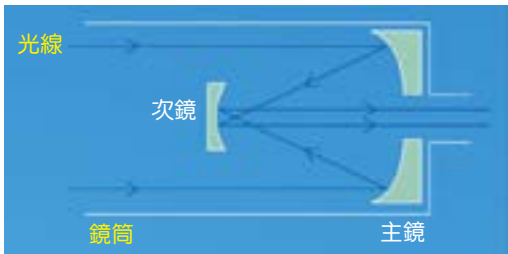
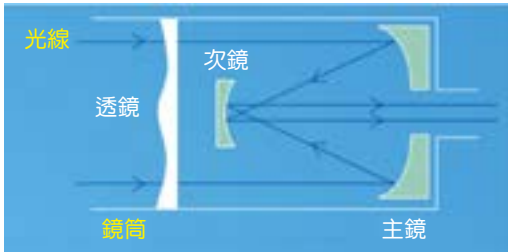
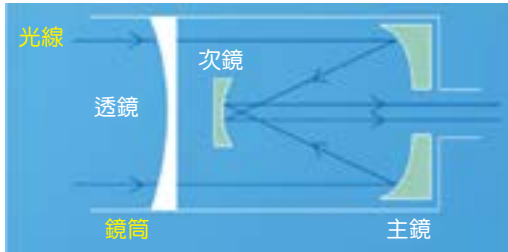
大家還記得 2017 年 8 月 25 號升空的福爾摩沙衛星五號 (FORMOSAT-5，簡稱福衛五號) 嗎？那是臺灣第一顆完全自主研发的光學遙測衛星，解析度達 2 米，相當於從 101 大樓上拿著望遠鏡，可以看到地上的螞蟻，現在它還在離地球 720 公里的軌道上繼續守護臺灣！

太空級天文望遠鏡內的元組件在國際間屬於管制性元件，且價格昂貴、不易取得，其中的大口徑非球面鏡更是需要突破關鍵技術瓶頸，2012 年國研院儀科中心累積 40 年的光學元件研製技術，研製福衛五號用主鏡片直徑達 46.6 公分 (如圖 5 所示)，是國內製造之最大型非球面鏡片。

專家開箱解析 (1) — 為什麼鏡片中間會有一個洞？

我們先來看看福衛五號光學系統的架構，如圖 6 所示，在福衛五號採用的是卡塞格林 (Cassegrain) 折反射式光學系統，焦長為 3,600 mm，通光口徑為 450 mm (即主鏡的有效直徑)，此種系統設計常見於地對空大型天文望遠鏡，以及可拍攝影像資料的遙測衛星，其系統組成主要為一凹面雙曲面主鏡 (M1)、一凸面雙曲面次鏡 (M2)，以及修正透鏡組、影像感測器。一般光學鏡頭會使用很多片的球面鏡來消除像差，讓鏡頭很長很重，這個設計就是利用非球面鏡取代多片的球面鏡，除了消除像差，更可減輕衛星的重量跟體積。當光線進入後會先被主鏡接收後反射至次鏡，次鏡再將光線反射通過主鏡中間的圓孔後，光線會進入修正透鏡組，最後成像在影像感測器上。這也是為什麼鏡片中間會有一個洞的原因。

表 1. 折射式、反射式，以及折反射式望遠鏡。

伽利略折射式望遠鏡 (1609 年) 1609 年伽利略發明了折射式望遠鏡，用來觀測月球、太陽、金星以及衛星，實現天文觀測。	
	原理：光線穿透凸透鏡物鏡折射聚焦。 優點：成像品質比同口徑反射望遠鏡好、使用方便、易於維護。 缺點：會產生色差與球面像差，造成影像失真；鏡片太重、鏡頭太長。
牛頓反射式望遠鏡 (1668 年) 1668 年牛頓發明了反射式望遠鏡，優點是結構簡單，容易製造大口徑的望遠鏡。口徑越大進來的光線越多，觀測物的細節也越明顯喔！	
	原理：使用曲面和平面的反射鏡組合來反射光線。 優點：結構簡單，容易製造大口徑的望遠鏡；沒有色差；適合設計成短焦比，鏡筒的長度比同口徑折射式系統要短得多，以利攜帶性。 缺點：會產生球面像差、彗形像差，造成影像失真；反射鏡上的光學薄膜會氧化，隨時間反射率會降低；容易撞歪，需減少碰撞；屬於開放式鏡筒，灰塵容易堆積在主鏡上，不易維護。
卡塞格林反射式望遠鏡 (1672 年) 1672 年卡塞格林發明反射式望遠鏡，主要由兩塊反射鏡組成的一種望遠鏡，大的反射鏡稱為主鏡其中央開孔，小的稱為次鏡。	
	原理：以拋物面鏡作主鏡，第二反射鏡是雙曲面鏡，將光線反射回後方，並穿過主鏡中心的洞孔。 優點：成像品質比同口徑反射式望遠鏡好；使用方便；屬於密閉式鏡筒，灰塵不易堆積在主鏡上，易於維護。 缺點：會產生球面像差、彗形像差，造成影像失真；鏡頭比折反射式望遠鏡長。
折反射式望遠鏡 現今觀測天文所使用的折反射式望遠鏡，是由卡塞格林望遠鏡改良衍生出來的，折反射式望遠鏡的系統到今日已經發展許多種類，世界級大型天文台許多都採用折反射式系統。	
施密特－卡塞格林折反射式望遠鏡 (1931 年) 	馬克蘇托夫－卡塞格林折反射式望遠鏡 (1940 年) 
原理：結合折射式與反射式兩種原理的光學系統。 優點：大幅減小望遠鏡長度，便於攜帶；便宜實用；屬於密閉式鏡筒，灰塵不易堆積在主鏡上，易於維護。 缺點：製作困難，容易撞歪，產生光軸偏移，需減少碰撞。	

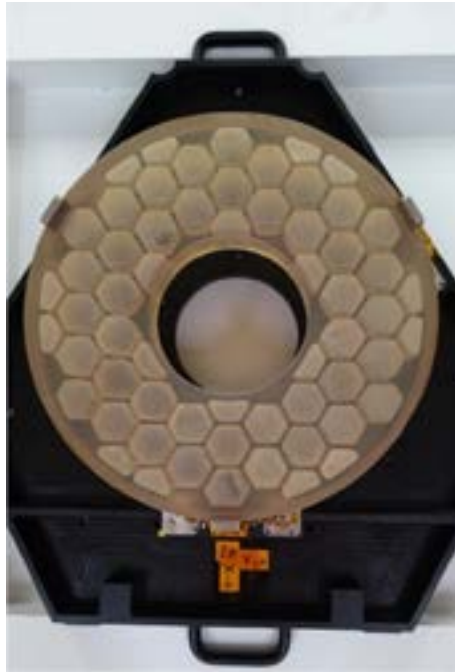
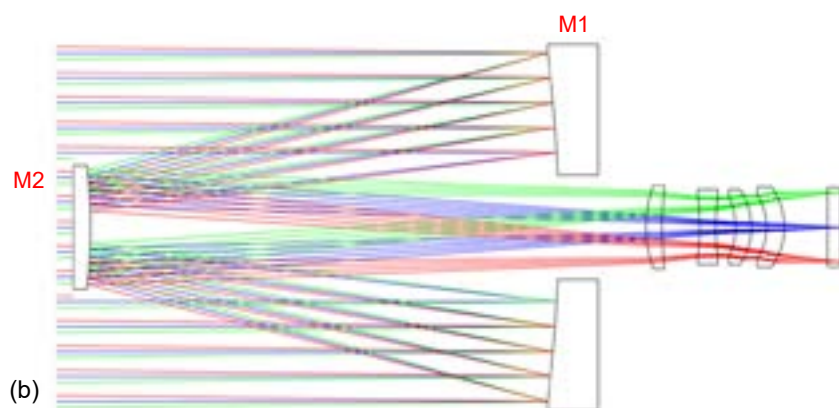


圖 5. 福衛五號主鏡 (鍍膜前)，鏡片直徑達 46.6 公分。



(a)



(b)

圖 6. (a) 福衛五號遙測系統實驗體。(b) 福衛五號卡塞格林式望遠鏡光路示意圖。

專家開箱解析 (2)－為什麼鏡片顏色會黃黃的？

太空環境的日照和夜間溫差很大，為了避免鏡片因溫度變化產生表面變形，影響遙測取像品質，採用零膨脹係數的光學陶瓷玻璃來製作。像這樣特殊的鏡片材質，相對一般光學玻璃來的硬，不好加工，而且鏡片形狀精度要求為奈米等級，相當於一個足球場上不能夠找到一根頭髮。國研院儀科中心用了超過 3 年的時間，一步一腳印地突破拋光以及檢測技術，才開發完成福衛五號大口徑非球面鏡片，目前國研院儀科中心是全臺灣唯一可以製作 40 公分以上非球面鏡片的單位，目前持續製作福衛八號系統裡所需的鏡片，支援國家太空政策發展！

專家開箱解析 (3)－為什麼鏡片後面會有蜂巢狀的結構？

通常太空望遠鏡的鏡片，為了減少自重力干擾影響成像品質，都會幫鏡片減重。幫鏡片減重的方法就是在鏡片背面以研磨的方式將背面材料移除，一般來說，以三角形及六角形結構效果較佳，如圖 7 所示。舉例來說，福衛五號的主鏡原本有 20 公斤，減重後剩 10 公斤，可大幅降低光學系統的總重量。此外，減重還可以節省發射費用喔！這是因為衛星發射是以重量來計算費用，以哈伯望遠鏡為例，主鏡 2.4 公尺，實重 3.628 噸，減重後 0.828 噸，依當時美國發射費用，衛星發射費用約 10,000－100,000 US\$/kg，減重至少省下發射費用 2,800 萬美元。(註：1981 年每公斤發射成本高達 85,216 美元，目前 SpaceX 的火箭每公斤承載發射成本最低為每公斤 1,410 美元，其他業者的成本約落在每公斤 5,000 美元，預估到 2040 年時會再降至每公斤 10 美元。)

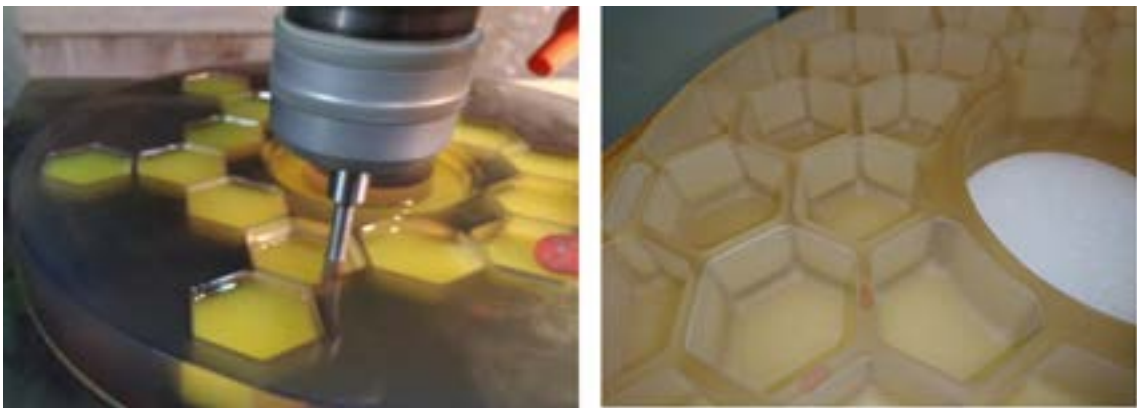


圖 7. 鏡片背面減重加工後的蜂巢結構。

結論

人類為什麼要瞭解宇宙的起源與奧秘？是為了找尋下一個適合居住的星球？解鎖黑洞和中子星的秘密？又或是研究星系形成和演化、觀測月球上的物質分布？在探索宇宙的過程中，科學家永遠少不了精密的望遠鏡設備，在太空中放一架由精密光學鏡片組成的望遠鏡，不會被大氣層干擾，讓探索未知太空世界的夢想化為可能。

然而，要製造出一台完全由臺灣自主研發的太空望遠鏡絕非易事，因太空元件不僅價格昂貴又受到國際監管，取得難度非常高，除了要克服技術挑戰，其中更缺少不了重要關鍵光學元件「大口徑非球面鏡」。本文期透過淺顯易懂的方式，引導讀者先了解球面鏡與非球面鏡的差異後，再開箱全臺灣唯一的大口徑非球面鏡，介紹大口徑非球面鏡的三大特點，了解太空元件自主開發的重要性。國研院儀科中心不僅是臺灣唯一為學術界提供跨領域客製前瞻儀器設備的研發機構，更憑藉超過 40 年的光學設計與鏡片製造經驗，突破大口徑非球面鏡的關鍵技術，成為國內唯一能夠生產太空衛星鏡片的重要單位，為臺灣自製太空科技元件的關鍵技術寫下里程碑，充分展現臺灣自製高階科研光學元件的技術與驕傲。

參考文獻

1. 郭慶祥, 余宗儒, 何承舫, 許巍耀, 陳峰志, 科儀新知 217 期, 福爾摩沙衛星五號專題 (2018).

作者簡介

陳柏荔女士為國立清華大學動力機械博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。
Po-Li Chen received her Ph.D. in Power Mechanical Engineering from National Tsing Hua University. She is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

林麗娥女士為國立政治大學東亞所碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副工程師。
Claire Lin receive her M.S. in the Graduate Institute of East Asian Studies from National Chengchi University. She is currently an Associate Engineer at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

魏崇倫先生為國立陽明交通大學材料科學與工程學博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心助理工程師。

Chong-Lun Wei received his Ph.D. in the Department of Materials Science and Engineering from National Yang Ming Chiao Tung University. He is currently an Assistant Engineer at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

莊子右先生為國立成功大學工業設計碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心佐理工程師。

Tzu-Yu Chuang received his M.S. in Industrial Design from National Cheng Kung University. He is currently an Engineering Assistant at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.