

微型感測器讀取電路與系統

Micro Sensor Readout Circuits and Systems

林奕成、蔡淑如、陳柔甄、蕭文澤、陳峰志

Yi-Cheng Lin, Shu-Ju Tsai, Rou-Jhen Chen, Wen-Tse Hsiao, Fong-Zhi Chen

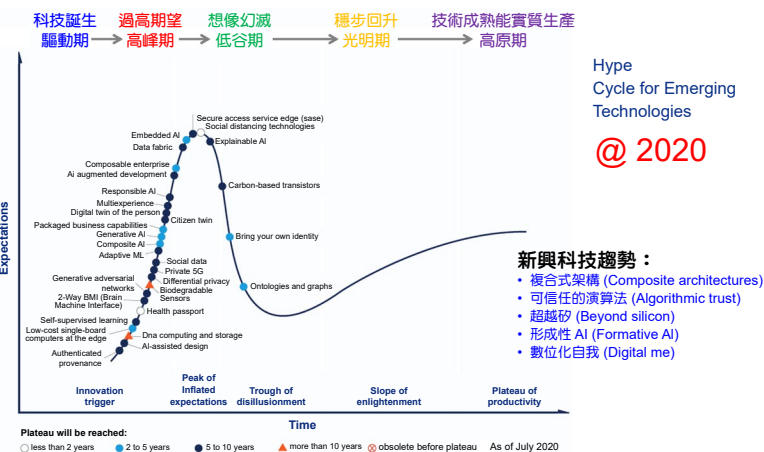
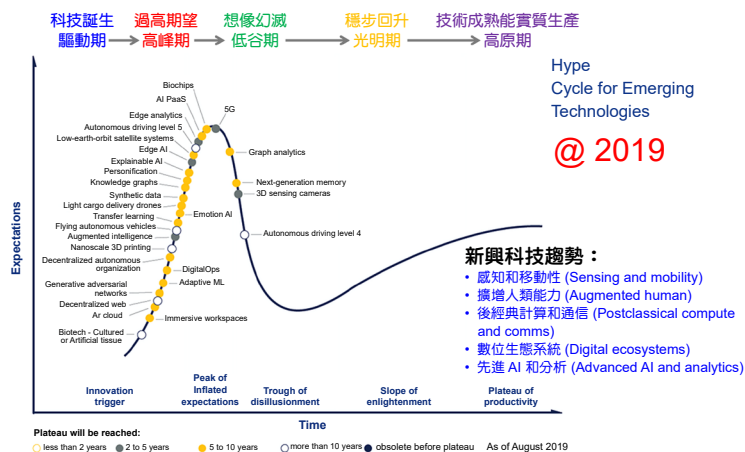
本篇文章深入介紹微型氣體感測器讀取電路與系統的開發，該系統針對半導體式電阻型氣體感測材料應用進行設計，包括金屬氧化物、二維材料及奈米材料化合物等薄膜，這些材料因其高靈敏度、快速響應及對各種氣體的選擇性而被廣泛應用。本系統設計強調可配合不同材料特性的響應變化需求，從而提升對多種氣體的檢測精度與穩定性，進行電阻值變化的精準量測與校正。

This article introduces micro gas sensor readout circuits designed for semiconductor resistive gas sensing materials, including metal oxides, two-dimensional materials, and nanomaterials. Known for their high sensitivity, fast response, and selectivity, these materials enhance detection accuracy and stability by matching the system's response to different material properties, accurately measuring and correcting resistance changes.

一、微型化感測器背景與市場分析

根據市調機構 Persistence Market Research 市場報告指出，移動物聯網 (cellular internet of thing) 市場預估從 2018 年至 2026 年的複合年增長率為 26.7%⁽¹⁾。Cellular IoT 提供先進連接技術，可將數十億物聯網設備連接到全球互聯網。使用的通訊技術包含：4G、5G 與低功率廣域 (low power wide area, LPWA) 移動技術 (NB-IoT、LTE-M)。其中 NB-IoT 為新興移動技術之一，可實現高效通信、延長大規模分佈式設備的電池壽命、降低能耗，並降低廣泛地理覆蓋範圍成本。同時可連接數百萬台裝置設備、感測器進行服務。NB-IoT 應用包括：智慧停車、智慧城市、智慧農業、工業監控、煙霧探測等需求浮現。此外，LTE-M (用於機器的 LTE)，利用移動運營商的 4G LTE 網絡基礎設施的物聯網 LPWA 技術。可應用在：資產跟蹤、智慧手錶、健身帶、電／水錶與寵物跟蹤。

由通訊基礎建設的成長可知，帶動雲端、通訊、穿戴型裝置及物聯網 (internet of thing, IoT) 等新興產業應用快速發展，促使感測器元件與感測器用材料開發。國際研究顧問機構 Gartner 統計新興技術發展週期，產品發展約略可分為五階段，包括：科技誕生的驅動期、過高期望的高峰期、想像幻滅的低谷期、穩步回升的光明期與技術成熟能實質生產的高原期。圖 1 為 Gartner 市調機構統計在 2013—2020 年各項新興技術的演進歷程⁽²⁻⁵⁾。由圖中得知物聯網 (internet of things)、巨量資料 (big data)、雲端運算 (cloud computing)、感知



感知層為 IoT 架構之下最底層元件 (感測器)，透過感測器材料 (薄膜) 的基本物理特性如：光、聲、電、熱、力、磁等並與時間/空間資訊結合，將所量測到的物理量進行資訊傳遞並進行監控。以感測器為例可應用於下列產業：3C 產業 (智慧型手機、觸控面板)、車用電子 (安全氣囊、胎壓偵測、輔助駕駛、汽車導航)、醫療電子 (生理信號監控、居家照護)、智慧聯網 (交通運輸、公共建設、環境保護)、環境監控 (PM_{2.5})、設備監控 (預警) 等⁽⁶⁻⁸⁾。以氣體偵測器為例，行政院環境部於全國各地的監測站大多使用標準大型儀器設備 (如：NO₂ 氣體使用 Ecotech 9841、SO₂ 氣體使用 Ecotech 9850 等)。然而，面臨氣候快速變異的環境下，使用標準儀器來密集佈點進行偵測，在實際的情境上來應用實施實則困難。因此，透過發展微型化氣體感測器進行廣佈，以撒網的概念將有利於汙染熱點的搜尋。為此，微型化的氣體感測器開發參考應用情境相關法規，如空氣品質標準法規與室內空氣品質標準等，同時參考美國 US EPA Guidebook 與 AQ-SPEC 所述規範訂定感測器發展規格。

66 科儀新知 241 期 113.12

成，並由金線連接⁽⁹⁾。Noyce 提出了一種單片積體電路概念，該積體電路設計基於一平面化架構，使用矽 (Si) 元素與鋁導線，並將其共同沉積於具有二氧化矽絕緣層的矽晶圓表面，透過鋁導線的嫁接連接數個不同電路元件⁽¹⁰⁾。

英特爾 (Intel) 創始人 Gordon Moore 在 1965 年提出，積體電路上可容納的電晶體數目，每年會增加一倍論述至 1975 年時修正為隔兩年增加一倍，被稱為「摩爾定律 (Moore's law)」。1970 年代，該公司所推出的第一款積體電路單元，將 2300 個電晶體製作於 12 mm² 基板上。若將一個電晶體類比為一個人，當時積體電路中電晶體的密度概念，就如同一座小型音樂廳擠入滿堂的人潮一般；六十年後的當代，這樣積體電路的概念，已經能將超過 13 億 (1.3 billion) 個電晶體微縮製造於十倍大的基板上 (122 mm²)⁽¹¹⁾。

智慧微塵 (smartdust)，其特色是將具備電腦功能的微型化感測器，由微處理器 (MCU, microcontroller)、通訊與感測材料所組成的微型化元件，具備感測器、讀取電路整合之多功能特色，並可透過網路串接成網域。該項技術 2001 年由美國加州大學柏克萊分校教授 Pister 所提出，如圖 2 所示⁽¹²⁾。利於蒐集資訊，處理資訊，並與其他節點連接形成網路 (network)。目前大多運用於軍事、醫療健康與環境監控。

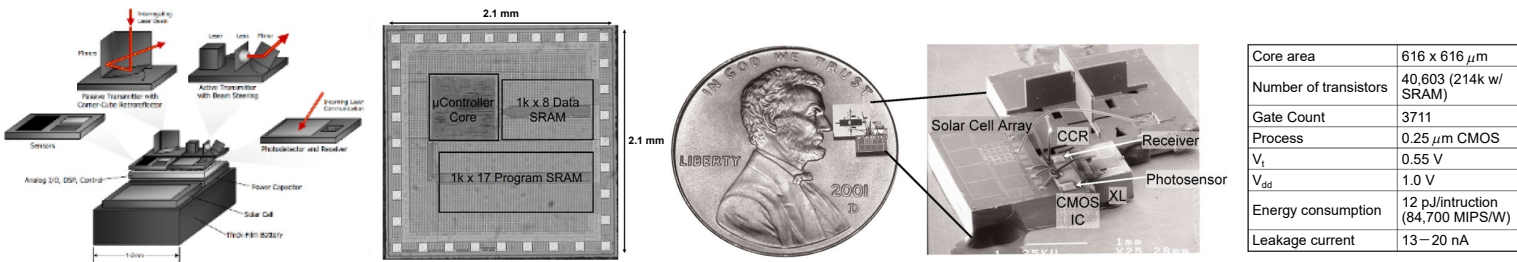


圖 2. 智慧微塵感測元件架構⁽¹²⁾。

Shi 等人⁽¹³⁾ 發展可植入體內進行生理監控的無線微型裝置，包含可以探測體溫的溫度感測器、超音波感測器等裝置，透過無線供電方式進行感測元件運行，並可傳輸量測資訊，該感測器尺寸小於 0.1 mm³、功耗低於 1 nW，並經由小鼠神經刺激測試感測功能，如圖 3 所示。

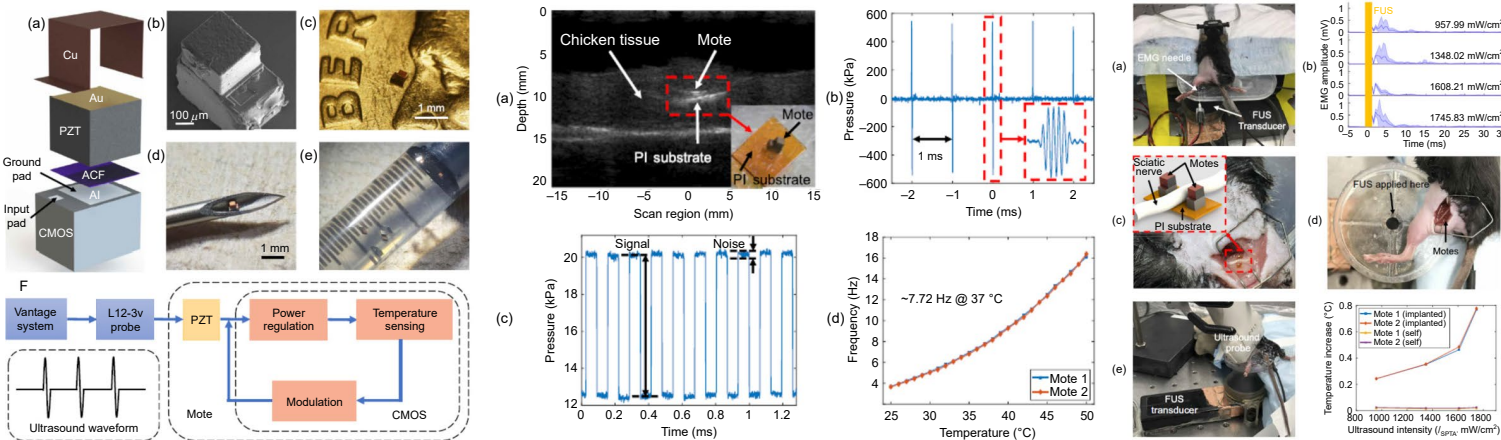


圖 3. 可植入體內進行生理監控的無線微型裝置⁽¹³⁾。

Zhang 等人⁽¹⁴⁾ 提出一種無線、無電池的感測裝置整合之微型無機發光二極體，具備超低功耗，可透過微流體系統傳遞到偵測目標周圍的神經。透過光與藥物間的交互作用進行長時間分析，如圖 4 所示。

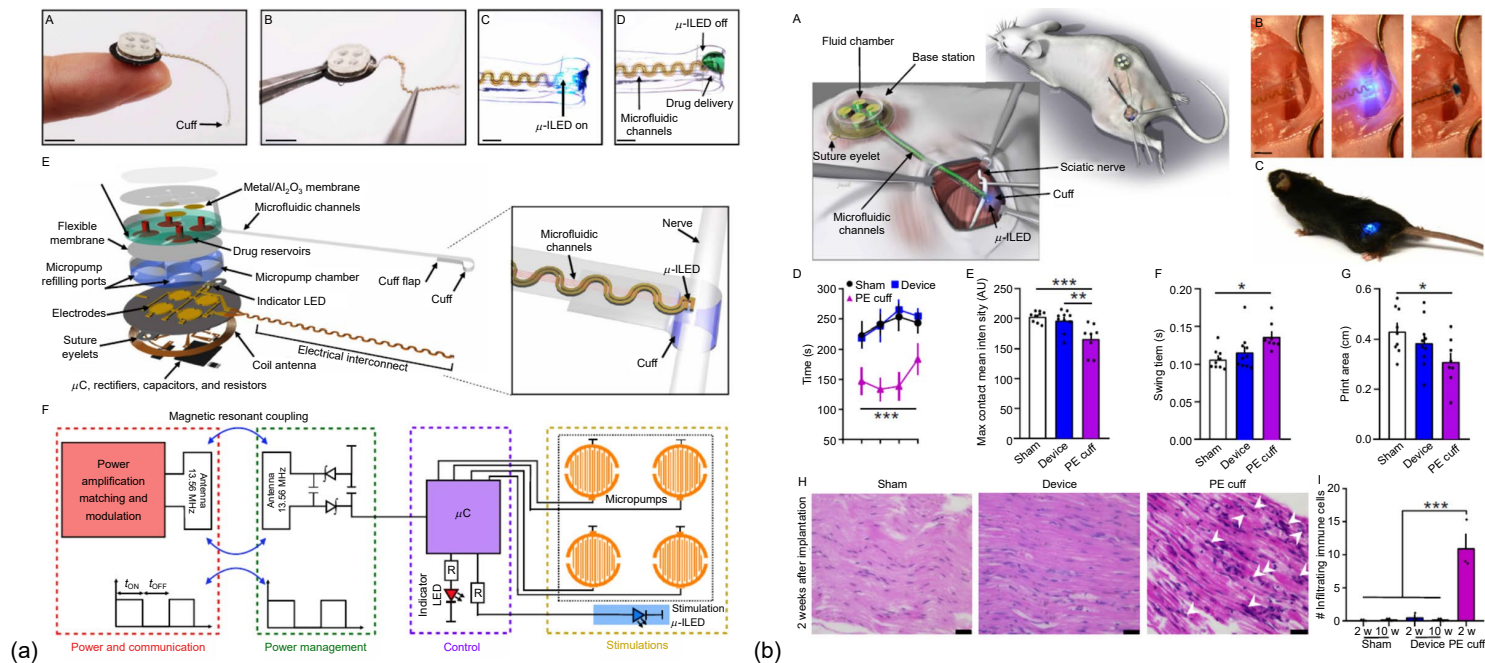


圖 4. (a) 用於可編程藥理學和光遺傳學的無線、無電池神經袖帶、(b) 無電池光流體神經袖帶系統的植入及其對動物行為和神經健康的影響⁽¹⁴⁾。

Inamori 等人⁽¹⁵⁾ 發展了可穿戴的經皮膽紅素計 (圖 5)，整合氧飽和度 (SpO_2) 和心率 (HR) 感應功能，透過新生兒的臨床實驗證明了可能性。通過可穿戴膽紅素計和光療設備的自動鏈接，以優化治療新生兒黃疸。

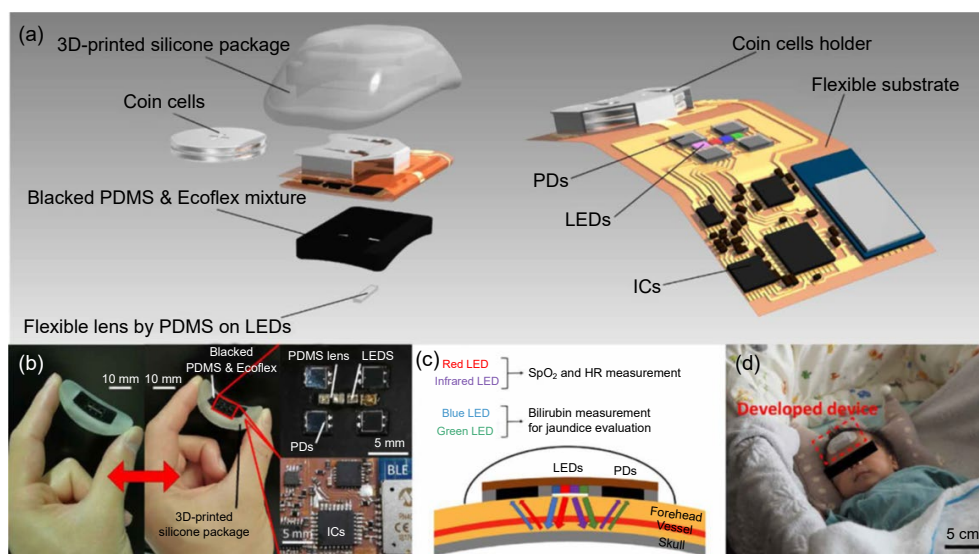


圖 5. 可穿戴膽紅素計實際結構⁽¹⁵⁾。

Han 等人⁽¹⁶⁾ 發展能夠精確、連續測量生理健康柔性皮膚感測器於臨床醫療保健當中，整合可撓式材料、設備設計、無線電力輸送和通信策略，以及類皮膚、無電池傳感器的整體系統架構可用於整個身體的溫度和壓力偵測。應用在臨床睡眠實驗室進行受試者研究 (圖 6)。

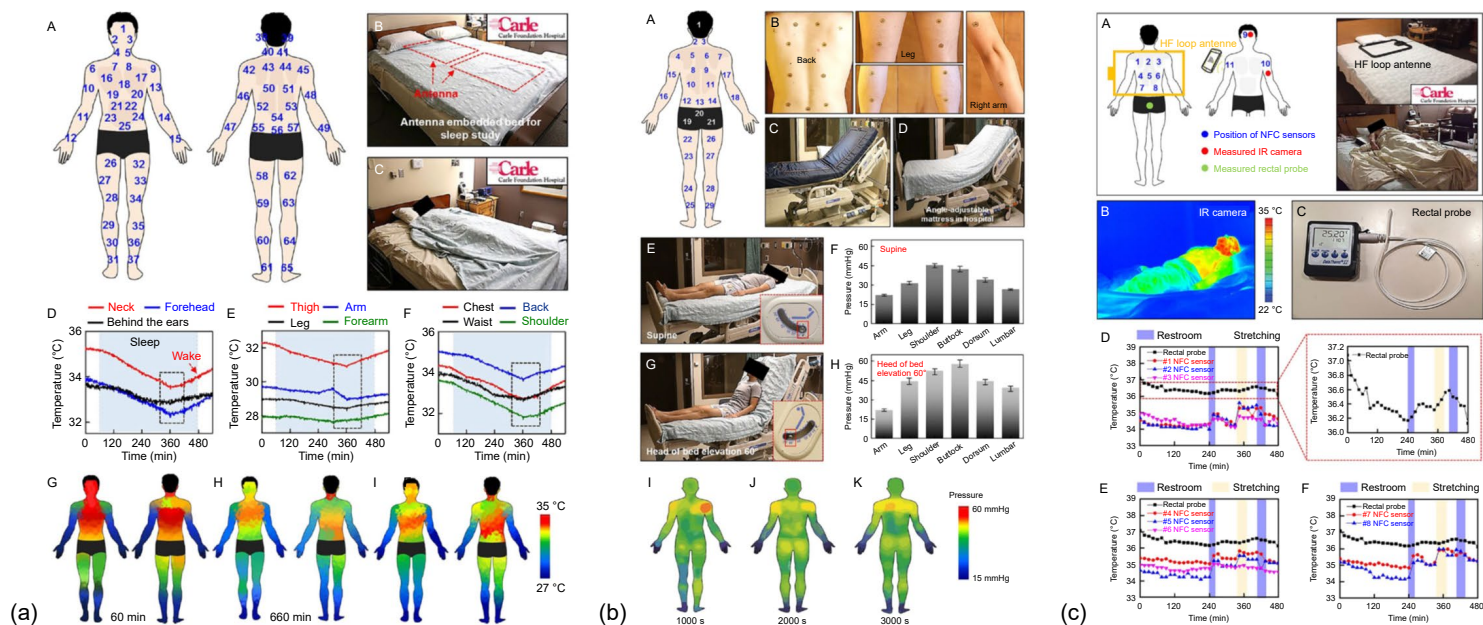


圖 6. 柔性皮膚感測器於臨床醫療應用⁽¹⁶⁾。

自 2015 年起國際大廠盛思銳 (Sensirion)、博世 (Bosch)、奧地利微電子 (AMS) 分別投入整合式氣體感測元件的開發，如：Sensirion (SGP30)、Bosch (BME680)、AMS (AS-MLV-P2, CCS801) 如圖 7 所示。多功能整合晶片 (SoC) 係由下述幾個功能元件，包含：感測材料 (sensing materials) + 電路 (embedded circuit) + 通訊 + 自供電功能所組成，兼具微小化與低耗能特性。

Devices Analyzed - Gas Sensor

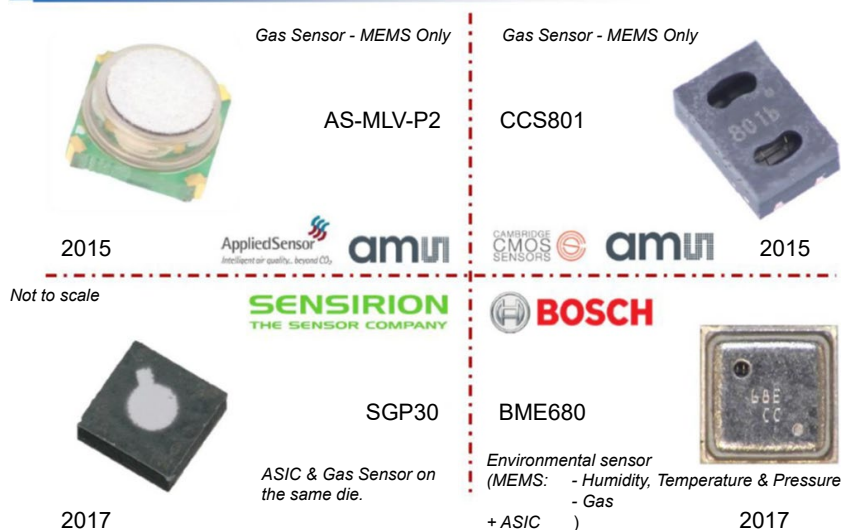


圖 7. 氣體感測器國際大廠整合式晶片產品研發。

二、微型化氣體感測器系統架構與訊號讀取電路設計

微型化氣體感測器可以透過半導體製程進行大批量製作，其具有體積小和易封裝整合等特性，預期將逐漸加重氣體感測器市場占有率，因此後段電路整合開發之感測器驅動與訊號讀取系統，其技術發展具備其重要性。微型化氣體感測器系統電路架構，如圖 8 所示，包含：(a) 氣體感測器元件端、(b) 電源供應端、(c) 電子/電路訊號處理端與 (d) 通訊介面端等功能，針對不同應用情境與偵測氣體標的，其感測薄膜材料將有所不同。

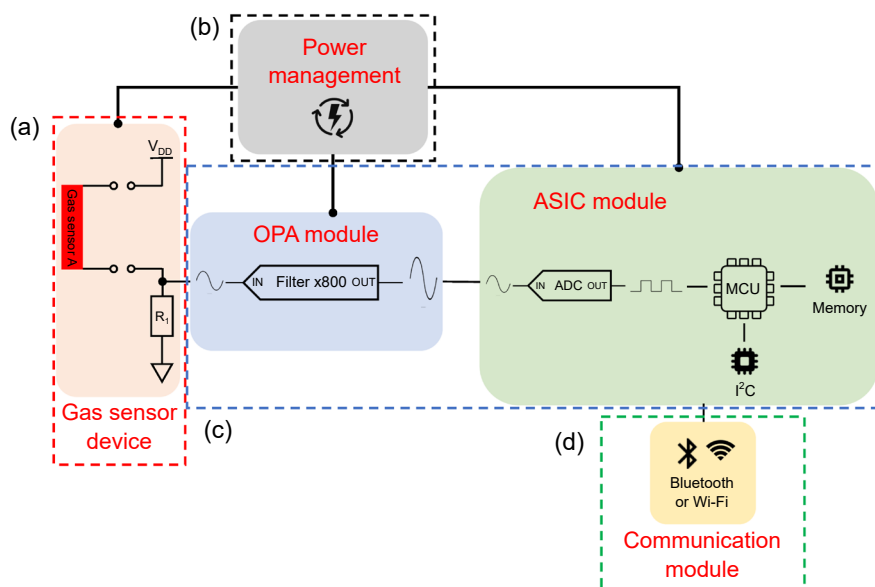


圖 8. 微型化氣體感測器電路架構，包含：(a) 氣體感測器元件端、(b) 電源供應端、(c) 電子／電路訊號處理端及 (d) 通訊介面端。

本文所述之微型化氣體感測器架構適用於民生應用場域 (環境部標準測站、智慧城市應用)、特殊環境場域(汙水處理廠、科學園區測站)與業界場域 (半導體製程場域)，其可偵測之氣體標的如：CO、NO₂、SO₂、O₃、NH₃、H₂S、VOCs 等，多數微型化氣體感測器使用半導體薄膜電阻式感測材料作為與氣體分子反應之介質，本架構以極小化方式進行電路系統設計及佈局，單一電路板面積僅有 17 mm × 17 mm，微型化氣體感測器公板系統電路系統佈局，如圖 9 所示，其腳位功能及規格分述如下：

- [V_{in}]：電壓輸入，輸入範圍為直流電壓 2.8 V–3.6 V。
- [GND]：接地。
- [TX]：資料輸出。
- [RX]：資料接收。
- [溫度與濕度感測元件]：採用 I²C 通訊協定，其濕度誤差值為 1.5 %，溫度誤差值為 0.2 °C。
- [R_s]：標準電阻，耐受性 (tolerance) 0.1%，溫度係數 (temperature coefficient of resistance, TCR) 10 ppm/°C。
- [AI–S]：感測器元件訊號端與讀取電路連接打線區，透過此區域與感測元件端 (Sensor) 連接，其參考電壓 (V_{ref}) 為 1.2 V
- [AI–H]：為感測器元件加熱器 (heater) 端與讀取電路連接打線區，透過電晶體脈衝寬度週期調變 (pulse width modulation, PWM) 比率精準調節加熱元件輸出功率。其所獲得之平均

電壓如方程式 (1) 所示：

$$PWM \text{ duty} = V_{in} \times Duty \quad (1)$$

其中 V_{in} 為輸入電壓 (V)， $Duty$ 為脈衝寬度週期 (%)

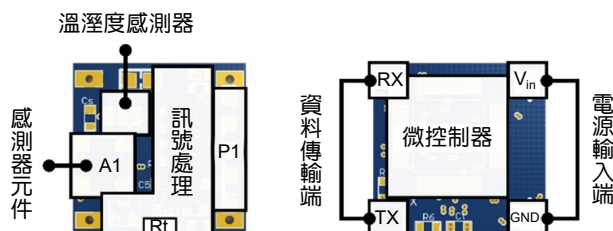


圖 9. 微型化氣體感測器公板系統電路設計及佈局。

三、微型化氣體感測器讀取電路與測試

感測器元件訊號讀取電路架構如圖 10 所示，當氣體感測元件與響應氣體進行反應時，感測元件電阻值變化時即觸發進行訊號擷取三個分壓數據訊號 (ADC1~ADC3)。其中 ADC1 為 MCU 所提供的參考電壓 (V_{ref}) 訊號 1.2 V，ADC2 為氣體感測器電阻值 (R_s) 與標準電阻值 (R_t) 之間的分壓。ADC3 為進入接地端的分壓訊號，藉此可推導出感測元件電阻值即時變化情形，如方程式 (2) 至 (4) 所示。

$$V_{out} = V_{ADC2} = V_{ref} \cdot \frac{R_t}{R_t + R_s} \quad (2)$$

$$R_t = 100 \text{ kohm} \quad (3)$$

$$R_s = V_{ref} \cdot \frac{R_t \cdot (V_{ref} - V_{out})}{V_{out}} \quad (4)$$

其中 R_s 為感測器元件電阻值 (ohm)， R_t 為標準電阻值 (ohm)， V_{out} 為感測器元件電阻值 (R_s) 與標準電阻值 (R_t) 之間的分壓。

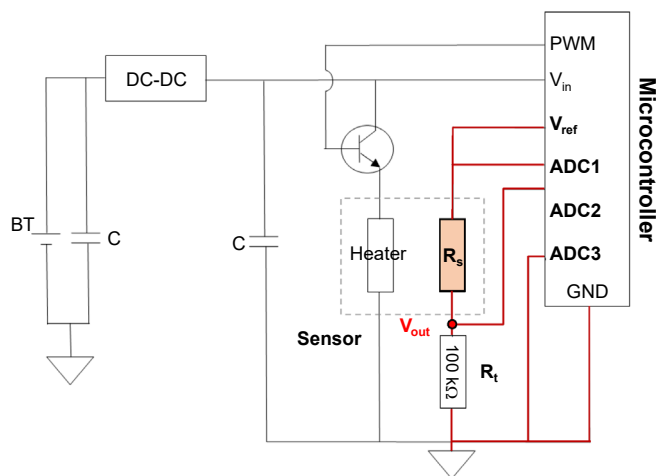


圖 10. 感測器元件訊號讀取電路架構圖。

經由擷取三個分壓數據訊號後導入微控制器 (MCU) 進行 r 減法放大器及後端運算處理，進行瞬間雜訊突波抑制。進而推算原有純淨訊號，藉以達成數位濾波，如圖 11 所示。

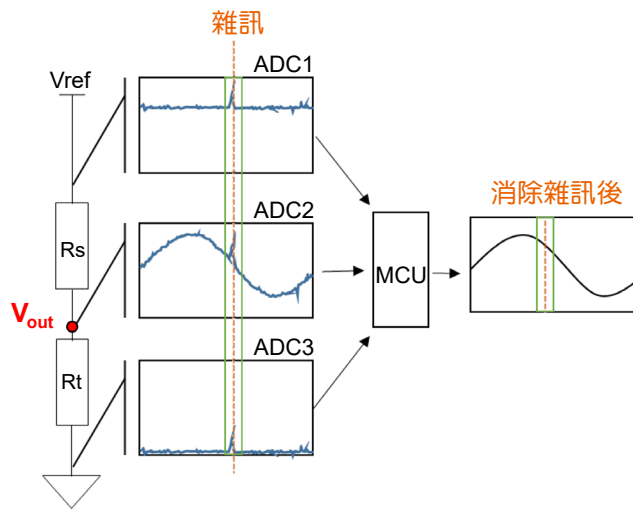


圖 11. 感測器擷取功能電路架構圖。

系統依據 MCU 韌體設定取樣時間進行資料輸出，定時以 ASCII 格式輸出連續字元組合，透過預先設定解析格式將字元進行逐步解析，經解析後所獲得的感測器電阻值即為量測訊號，最後將測得之電阻值帶入不同的氣體濃度響應方程式與溫度、濕度感測器之讀值進行參數校正後即可進行感測器氣體濃度變化曲線繪製。

透過具備高精度與低溫度飄移係數的標準電阻 (R_t) 與感測元件 (R_s) 進行分壓，藉以實際獲得感測元件電阻值。因此，當感測元件在不同的初始電阻值區間將有 1% 至 3% 不等的偵測誤差。本研究係以標準電阻接入感測元件端進行驗證，模擬感測元件電阻值從 100 ohm 至 16,700,000 ohm 之區間進行連續切換與偵測數據之擷取與記錄所量測的電阻值誤差範圍。最終彙整成電阻值與誤差範圍區間數據資料，如圖 12 所示。經測試後本公板系統讀取誤差 $< \pm 1\%$ 之感測元件電阻值適用範圍介於 1,000 ohm 至 5,000,000 ohm，超出其範圍者其誤差值越大 (如：16,000,000 ohm，誤差 $< 3\%$)。考量感測元件功耗、氣體濃度偵測範圍與偵測精準度，本系統建議適用於感測元件電阻值區間為 1,000 ohm 至 5,000,000 ohm 偵測範圍。然而較大的電阻值區間範圍 (如 5,000,000 ohm 至 16,700,000 ohm) 雖可進行量測，但其量測誤差將隨之提高，而需進行誤差補償。

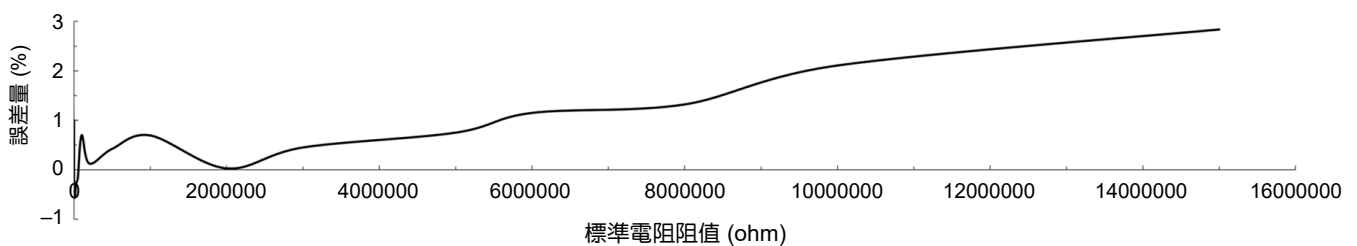


圖 12. 感測器系統標準電阻誤差實測結果。

微型化氣體感測器公板系統可提供學研界感測元件開發與後續商品化介接，透過本系統感測元件 (感測端與加熱端) 與公板進行黏合，即可提供氣體感測元件加熱控制與感測電阻值擷取，透過後端軟體進行電訊號與氣體濃度變化轉換，可在不同應用情境下進行數據蒐集與分析。

由於微型化氣體感測器公板系統體積僅有骰子般大小 ($17 \times 17 \times 17 \text{ mm}^3$)，如圖 13 所示。搭配微型鋰電池，通訊方式使用藍牙 5.1，平均可使用超過兩小時。無線通訊與加熱器整體功耗範圍約 10 mW，因此可透過有線方式進行電力供應，或搭載小型太陽能板進行長時間持續運作，以利達成低成本且廣泛佈點目標。

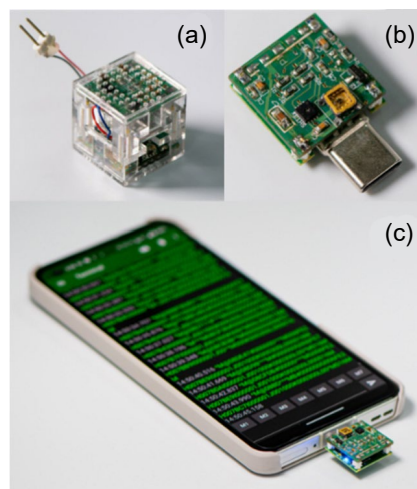


圖 13. 微型化氣體感測器公板系統。

四、結論

物聯網時代隨之而來的是 AI 浪潮技術高速發展，提供此龐大系統運作的最基礎單元即為感測器元件，可預測於未來提供單一的 AI 成熟系統進行訓練與運作，所需的感測器數量需達百萬，因此如何使感測器系統得以微小化、高可靠度、高協作性與低成本，如同摩天大樓的地基，直接影響整體系統的基礎是否穩固，透過建立微型感測器讀取系統，可以將大量的感測器設置於生活中的每個角落，雖然其微小到容易忽略其存在，但透過網路系統互相連結，緊密的協同合作，無時無刻的替人民警戒著環境的各種突發危害，於生活中守護你我的健康與安全。

誌謝

本研究承蒙國家科學及技術委員會經費補助 (計畫編號 NSTC 110-2218-E-492 -005-MBK、111-2218-E-492-008-MBK、112-2218-E-492-006-MBK、113-2218-E-492-001-MBK)，使本研究得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

1. Sales Revenue in the Cellular IoT Market to Register a Stellar CAGR During 2026 - 2026. Persistence Market Research, January 23 (2019).

2. Jayavardhana Gubbi, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic, Marimuthu Palaniswami, *Future Generation Computer Systems*, **29** (7), 1645 (2013).
3. Please refer to the website: <https://technews.tw/2018/08/27/gartner-2018-hype-cycle-for-emerging-technologies/>
4. Please refer to the website:
<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-appear-on-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2019/>
5. Please refer to the website:
<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-drive-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2020/>
6. Please refer to the website: <http://www.ctimes.com.tw/>
7. Please refer to the website: <http://www.mem.com.tw/>
8. Please refer to the website: <http://big5.china.com/>
9. J. Kilby, *IEEE Transactions on Electron Devices*, **23**, 648 (1976).
10. C.H. Museum, <https://go.nature.com/2wF9Q1r>, (2018).
11. 林彥甫, 二維電子元件的發展可否成為下一世代的希望?, 物理雙月刊, (2019)。
12. B. A. Warneke, K. S.J. Pister, "An Ultra-Low Energy Microcontroller for Smart Dust Wireless Sensor Networks," *2004 IEEE International Solid-State Circuits Conference*, February 15-19, 316 (2004)
13. Chen Shi, Victoria Andino-Pavlovsky, Stephen A. Lee, Tiago Costa, Jeffrey Elloian, Elisa E. Konofagou, Kenneth L. Shepard, *Science Advances*, **7** (19), eabf6312 (2021).
14. Yi Zhang et al., *Science Advances*, **5** (7), eaaw5296 (2019).
15. Go Inamori et al., *Science Advances*, **7** (10), eabe3793 (2021).
16. Seungyong Han et al., *Science Translational Medicine*, **10** (435), eaan4950 (2018).

作者簡介

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

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

蔡淑如為美國馬里蘭大學學院市分校材料工程與科學系博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。

Shu-Ju Tsai received her Ph. D. in Department of Materials Science and Engineering from University of Maryland, College Park. She is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

陳柔甄小姐為南台科技大學電子工程系碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心助理研究員。

Rou-Jhen Chen received her M.S. in Department of Electronic Engineering from National Formosa University. She is currently a research assistant at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

蕭文澤先生為國立彰化師範大學機電工程所博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員。

Wen-Tse Hsiao received his Ph.D. in Mechatronics Engineering from National Changhua University of Education. He is currently a Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

陳峰志先生為國立成功大學機械工程博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員兼副主任。

Fong-Zhi Chen received his Ph.D. in Mechanical Engineering from National Cheng Kung University. He is currently a Researcher and Deputy Director General at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.