

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。

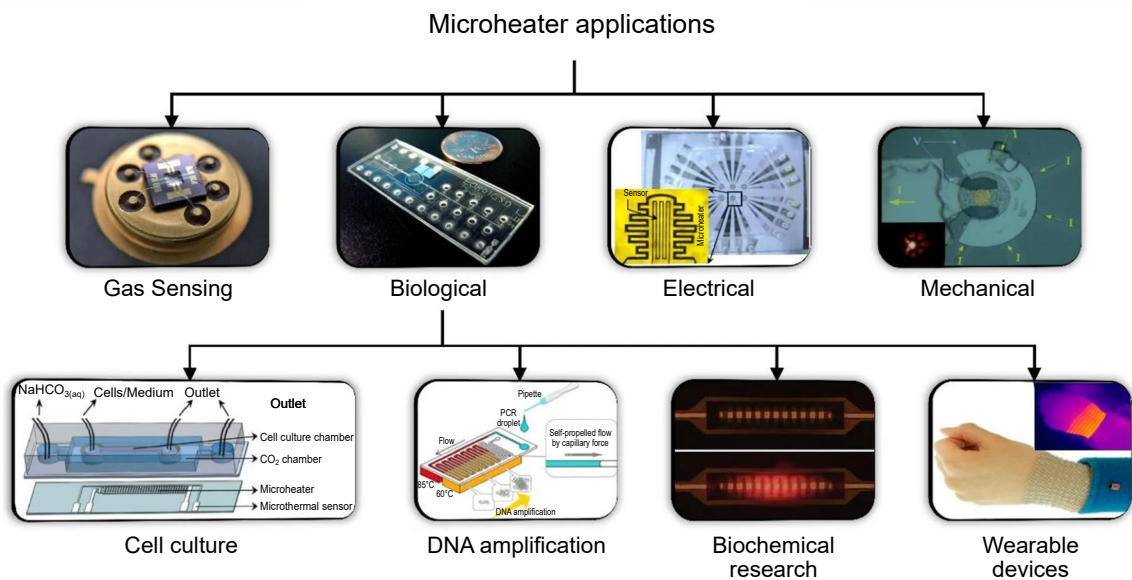


圖 1. 微型加熱器之應用⁽²⁾。

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。

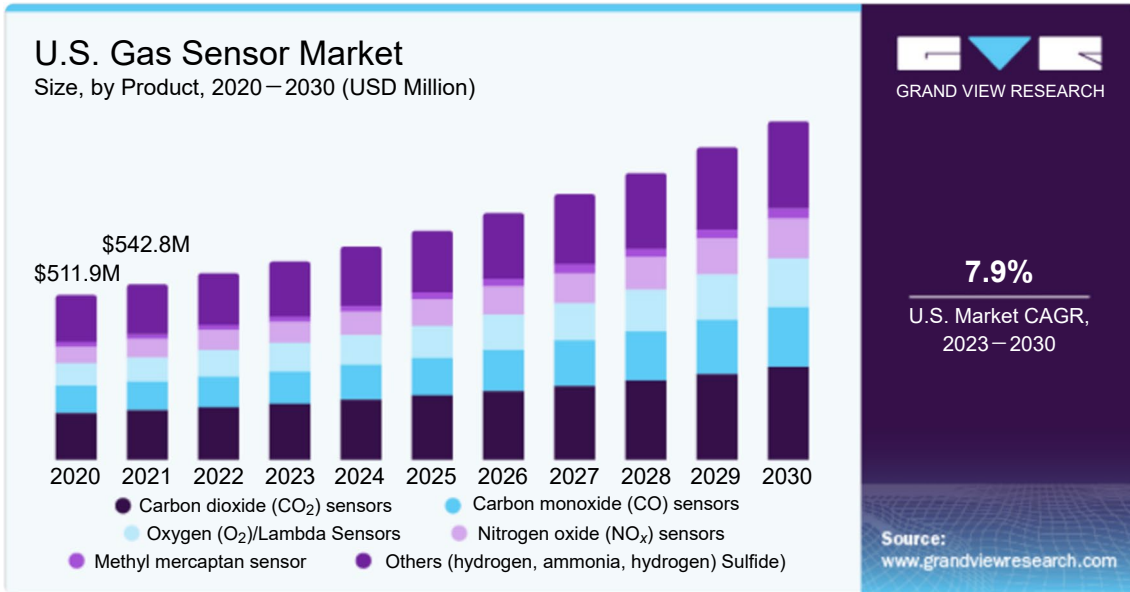


圖 2. 日商環球訊息有限公司 (Grand View Research) 分析報告⁽³⁾。

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：

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

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：

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

其中 (R_{tot}) 為總熱阻係數，是由傳導熱阻加上對流熱阻 ($R_{cond} + R_{conv}$) 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：

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

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：

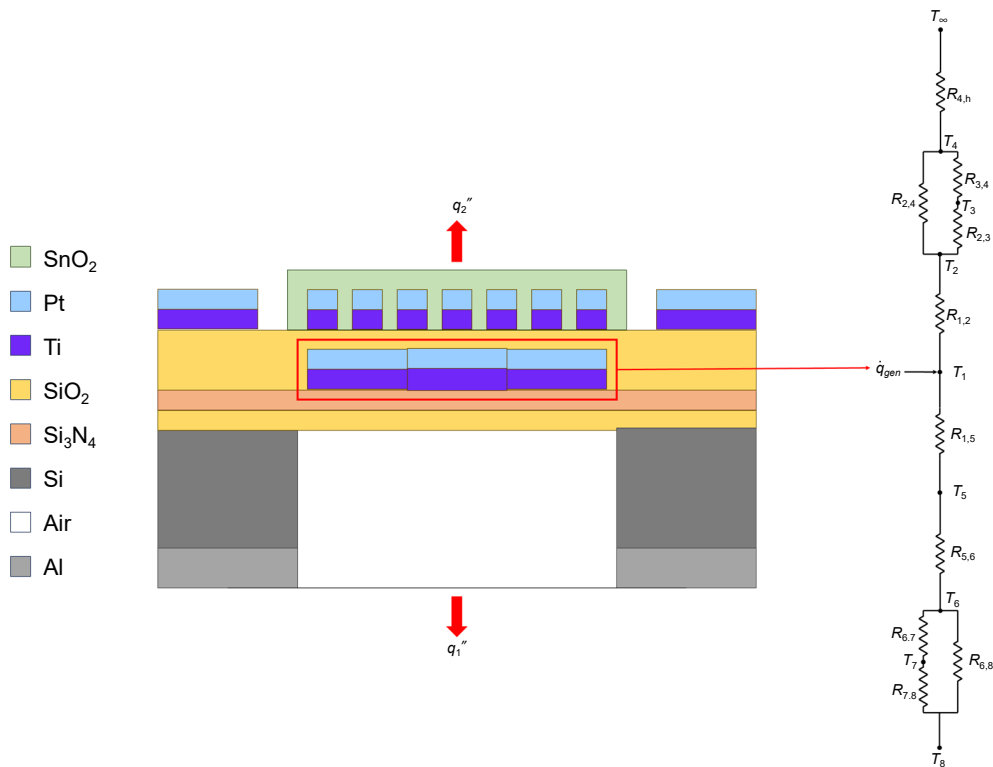


圖 3. 熱阻以及等效熱電阻圖。

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

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：

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

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：

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

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：

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

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。

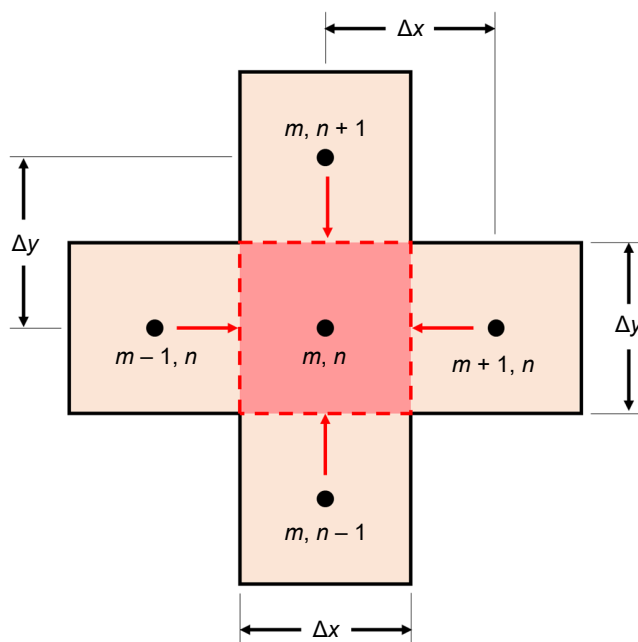


圖 4. 相鄰節點傳導至內部節點示意圖。

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。

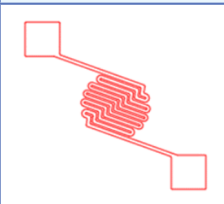
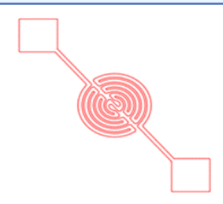
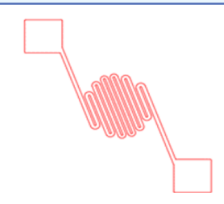
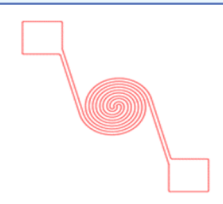
三、微型加熱器的模擬與製作

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 W/m²K) 相對於強制對流 (25–250 W/m²K) 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。

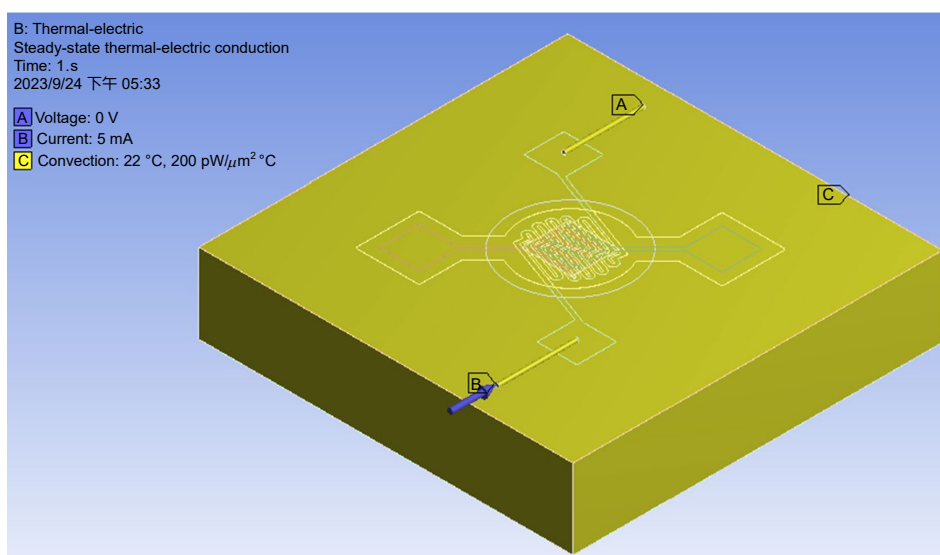


圖 5. 模擬條件。

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、SiO₂、Si₃N₄)、加熱電極 (Ti、Pt)、絕緣層 (SiO₂)、感測電極 (Ti、Pt)、感測層 (SnO₂) 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 (SiO₂) 以及氮化矽 (Si₃N₄)，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 (SiO₂) 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導通。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 (SnO₂) 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。

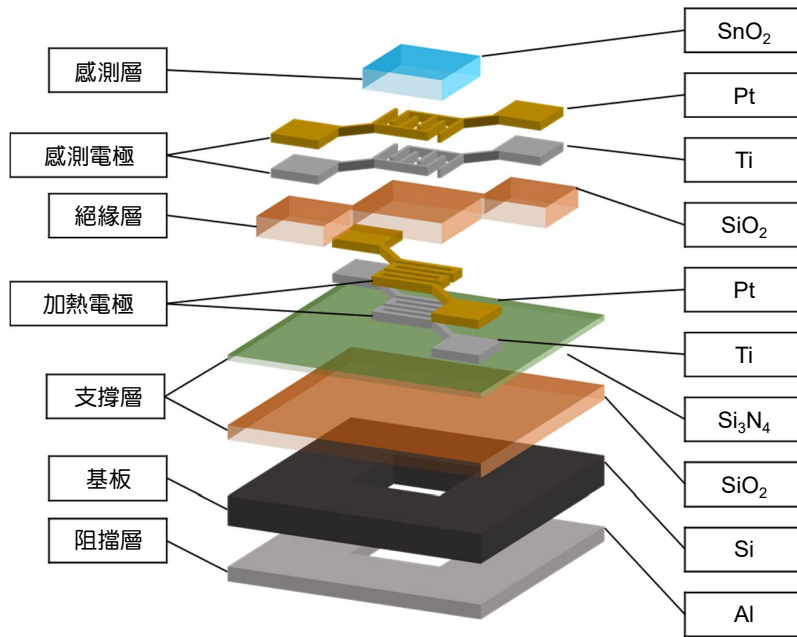


圖 6. 底部式微型加熱器之半導體式氣體感測器示意圖。

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。

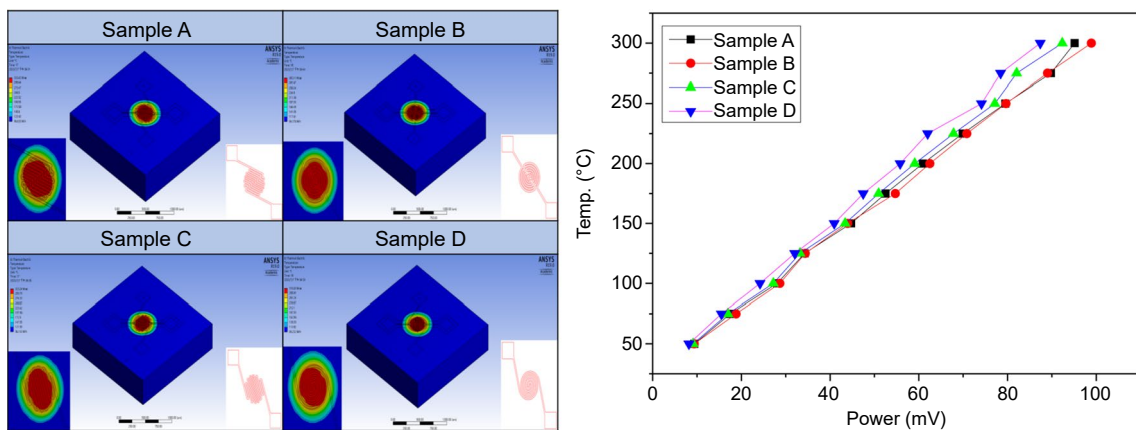


圖 7. 模擬加熱溫度與耗能結果。

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。

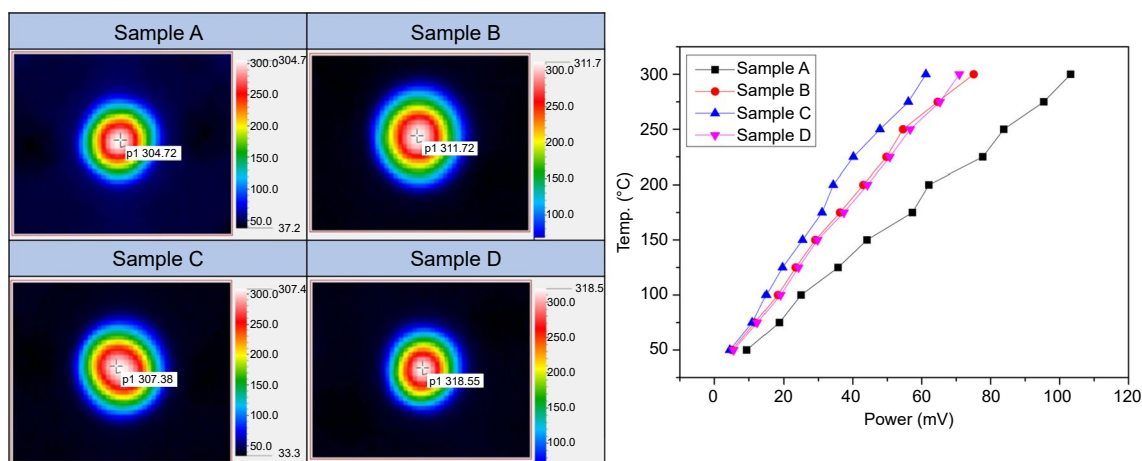


圖 8. 實際加熱溫度與耗能結果。

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.