

SOI MOSFET 氣體微感測器之設計與發展

本文主要介紹近代氣體感測技術及新世代 SOI MOSFET 氣體微感測器之發展概況。因應半導體產業的大規模量產，應用成熟的 CMOS 或 Bi-CMOS 標準製程技術來製造以往無法大量生產的氣體感測器已非難事，而微小化之 SOI MOSFET 氣體微感測器亦可在成本及感測性能等方面凌駕前世代的氣體感測器，適時提供了儀器與相關工業界更先進的感測發展技術。

呂志誠、J. W. Gardner、F. Udrea

一、前言

自 1950 年代以來 各式各樣的生化感測器 (biochemical sensor) 陸續地被研究開發，並且應用於生化醫學、科學儀器、環境監測與工業控制等領域。顧名思義，生化感測器乃是一種可偵測特定或非特定待測生物物質成分，藉由氣敏材料 (gas-sensitive or active material) 觸發化學反應，最後轉換成電子輸出訊號的精密裝置。這些生化待測元通常為 pH 值、濕度、水溶液離子濃度、毒性氣體或各種混合氣體濃度，或是特定生物分子及酵素濃

度。而在生化感測器中專門用來偵測特定揮發性氣體或氣相分子的感測器則被視為氣體感測器 (chemical gas-sensor)。氣體感測器的偵測原理相當多元，包括熱量效應 (calorimetric)、導電效應 (electrically conductive)、比重效應 (gravimetric) 或是光效應 (photonic)，均被廣泛地研究與應用當中。而氣敏材料也從半導體金屬氧化物、觸媒金屬及其氧化物，進而擴大至高分子有機物的使用。近十年來，隨著微電子工業的迅速發展及微機電系統 (micro-electromechanical systems, MEMS) 觀念的倡導下，不但可以利用互補式金氧半導體 (complementary metal-oxide semiconductor, CMOS) 的標準製程技術來大量製造氣體感測器，大幅降低生產成本，而且更進一步地將氣體感測器予以微小化至數百微米以下的尺度，直接增強了感測器的敏感性 (sensitivity) 與系統設計的整合性 (integration)。本文將對氣體感測器的基本原理、種類及發展沿革，做一系統化的介紹。另外，也將探

呂志誠先生為國立中興大學機械工程碩士，現為英國劍橋大學工程系電子工程組博士候選人。

J. W. Gardner 先生為英國劍橋大學物理博士，現任英國華威大學 (University of Warwick) 電子工程系教授。

F. Udrea 先生為英國劍橋大學電子工程博士，現任英國劍橋大學工程系助理教授。

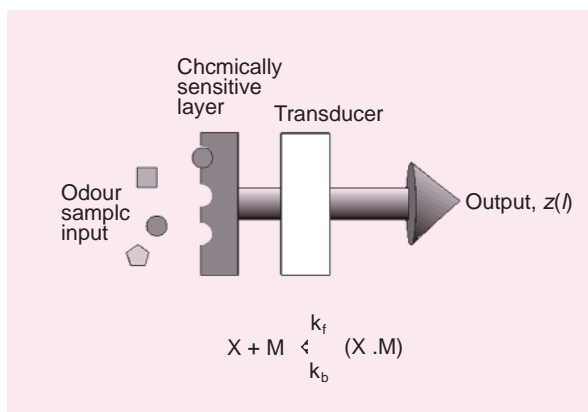


圖 1. 氣體感測器的基本化學反應。

討一種新發展中的 MOSFET 氣體微感測器設計概念。此種微感測器應用了絕緣體矽 (silicon-on-insulator, SOI) 的新材料技術，可以有效地以低耗損功率 (< 50 mW) 將微感測器維持在 300 °C 的高操作溫度，非常適合攜帶式 (portable) 氣體感測儀器的開發與應用。

二、基本原理

圖 1 說明了氣體感測器的基本化學反應原理。待測物質 X 與氣敏材料 M 發生化學反應，其中 k_f 與 k_b 分別代表正向與反向反應速率常數，伴隨著化學反應通常會有焓 (enthalpy) 值的變化，也就是熱量的吸收與散逸。當測量反應前後焓值的明顯變化時，那麼這就是熱量型感測原理 (colorimetrically)。同樣地，如果化學反應導致了物質中電載

子的產生或消失，那麼這可作為導電型感測原理 (conductometrically)、電位型感測原理 (potentiometrically) 與電流型感測原理 (amperometrically)，以此類推。表 1 列出了依據感測原理、受測物理量 (measurand) 與感測器型式所區分的氣體感測器。

一般來說，一個理想的氣體感測器應該只與單一特定的化學物質產生反應，縱然有多種類似的化學物質同時存在。此時，我們通常要仔細評估化學物質 M 與特定化學物質 X 之間的選擇性 (selectivity) 是否能達到一定之測量水準。表 2 列舉了多種氣體感測器所經常採用的氣敏材料。然而在實際上，生生物質仍然存在著交互敏感性 (cross-sensitivity) 的問題⁽¹⁾，意即感測器仍會和一些非感測對象之生化分子產生反應，造成不少困擾。通常可利用某些物理或化學手段來提高選擇性，例如在生物感測器上使用一過濾器 (filter)，運用分子形狀辨認 (molecular shape recognition) 技術，可濾除許多非必要之物質；抑或使用觸媒 (catalyst) 物質來促進反應的進行，譬如在一些半導性的金屬氧化物中摻雜 (dope) 了少量 Pd、Pt 或 Rh 金屬，即可增加其選擇性。此外，與其他機械或熱量感測器不同之處是，由於裝置本身必須開放與介質接觸，無法全面封裝與外界隔絕，極易受到光線、熱源或污染物侵蝕等因素的影響，使得感測器的敏感性及可靠性 (reliability) 均會受到相當變化。最後，氣體感測器也面臨到長期漂移 (long-term drift) 與氣敏材料老化 (aging) 的問題，這些都是發展氣體感測器時所要面對的基本問題。

Principle	Measurand	Typical sensor
Conductometric	Resistance/conductance	Tin oxide gas sensor
Potentiometric	Voltage/e.m.f.	Ion selective FET for pH
Capacitive	Capacitance/charge	Polymeric humidity sensor
Amperometric	Current	Electrochemical cell
Calorimetric	Heat/temperature	Pellistor gas sensor
Gravimetric	Mass	Piezoelectric or SAW sensors
Optical	Path length/absorption	In fra-red detector for methane gas
Resonant	Frequency	Surface plasmon
Fluorescent	Intensity	Fibre-optic

表 1. 氣體感測器的簡要分類。

Active material	Examples	Sensing principles	Measurands
Thin oxide layer	SnO ₂ , ZnO	Surface conductance	Combustible gases
Thin porous oxide layers	SnO ₂ , ZnO, TiO ₂	Bulk conductance	Combustible gases
Catalytic metals	Pb-TiO ₂ , Pd-MOS, Pb-MOSFET	Surface potential Threshold voltage	H ₂ , CO H ₂ , NH ₃ , CO
Ion-selective devices	AgCl, AgBr	Electrochemical potential	Cl ⁻ , Br ⁻
Catalytic coating	ThO ₂ /Al ₂ O ₃	Heat of combustion	H ₂ , CH ₄
Organic films	Substituted phthalocyanines	Bulk conductance	NO _x
Langmuir-Blodgett films	Steric acid	Piezoelectric/SAW	Variouspolar molecules
Conducting polymers	Poly (pyrrole)	Bulk conductance /mass	Polar compounds, NH ₃

表 2. 氣體感測器常用的氣敏材料一覽表。

三、氣體感測技術的發展

限於篇幅，筆者將把重點集中在氣體感測器的技術發展，藉由介紹其中幾種常見的氣體感測器，可讓讀者對於近期的氣體感測技術有一個基本而清楚的概念。

1. 導電型感測器

導電型感測器是氣體感測器中最簡單而且常用的一種，也被稱為化阻式感測器 (chemoresistor)。圖 2 是使用金屬氧化物為氣敏材料的化阻式感測器基本架構。除了金屬氧化物之外，多孔質陶瓷、有機晶體 (organic crystal) 及近來開發的導電聚合物材料 (conducting polymer) 均可被做為氣敏材料，稍後將有另一章節再詳細介紹。

1953 年 Brattain 與 Bradeen 發現了某些材料如 ZnO、TiO₂ 和 SnO₂ 等能在材料表面吸收氣體並繼而使該材料產生電阻的變化，在這其中 SnO₂ 乃是至今最常被使用的一種金屬氧化物。SnO₂ 表層在大氣環境中有如 *n*-type 之半導體特性，此乃由於大氣中的氧氣分子與 SnO₂ 中的組織空隙所產生之可逆反應與電子載子濃度 *n'* 的降低有所關連。材料的電傳導性 *G* 與電位障礙 ϕ_b 有關，由下式來表示：

$$G = G_0 \exp\left(\frac{\phi_b}{kT}\right) \quad (1)$$

G_0 是一個與溫度相關的常數，電位障礙的改變值則與載子的初始濃度 *n'* 與最終濃度 *n''* 相關連：

$$\Delta\phi_b \approx \ln\left(1 + \frac{n''}{n'}\right) \quad (2)$$

假設氣敏材料決定其電傳導性，則電傳導性的改變可以下式來求出：

$$\Delta G \propto \frac{k_2}{k_1} [X]^r \quad (3)$$

k_1 與 k_2 是反應速率常數，[X] 是待測物濃度，常數 *r* 則是在 0.5 與 1 之間變化。

除了以上的化學反應模式外，SnO₂ 感測器的敏感性與選擇性亦由上式中的反應速率常數比

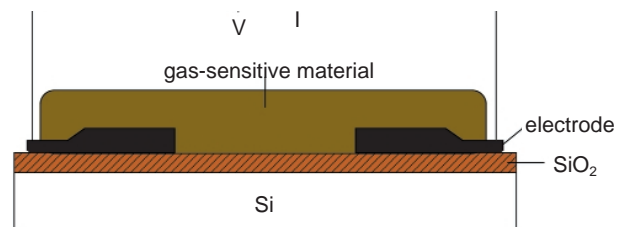


圖 2. 化阻式感測器構造。

Model	Category	Measurand	Range (ppm)
TGS 815	Combustible gases	Methane	500 to 10,000
TGS 821	Combustible gases	Hydrogen	50 to 1,000
TGS 824	Toxic gases	Ammonia	30 to 300
TGS 825	Toxic gases	Hydrogen sulphide	5 to 100
TGS 822	Organic solvents	Alcohol, toluene	50 to 500
TGS 830	CFCs	R-113, R-22	100 to 3,000
TGS 800	Air quality	Cigarette smoke	<10
TGS 550	Odour	Sulphur compounds	0.1 to 10

表 3.
常見之 Taguchi SnO₂ 感測器。

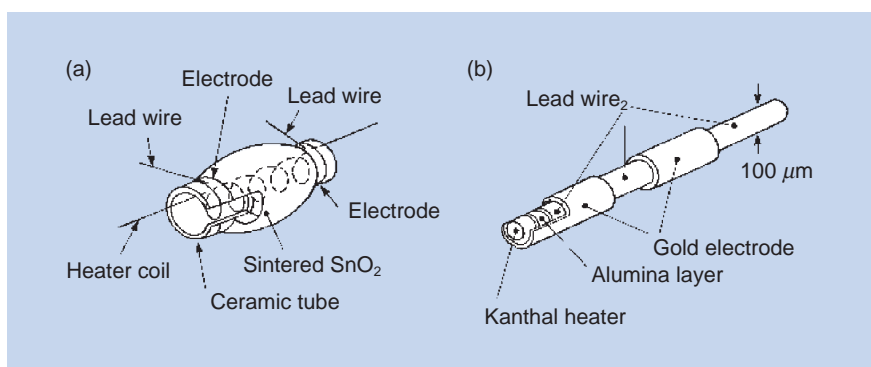


圖 3.
Taguchi SnO₂ 感測器的不同設計。

(k_2/k_1) 所控制，而這些反應常數又與溫度息息相關。因此 SnO₂ 感測器通常必須保持在高於常溫 (約 250 - 350 °C) 之間運作，才能保持最佳之感測動態特性。

1970 年代日本 Figaro 公司成功地製造並銷售了數以萬計的 SnO₂ 感測器，習稱為 Taguchi 感測器。這些量產型的 SnO₂ 感測器 (請參閱表 3) 可感測 ppm 範圍極為廣泛的各種氣體，然而大體積與高溫度運作所產生之高消耗功率 (~1 W) 卻是其第二大缺點。圖 3 顯示了 Taguchi 感測器的不同設計，圖 4 則是 Taguchi 感測器對照於 1000 ppm 甲烷氣體下對於各種氣體的濃度 - 電阻反應曲線。

2. 熱量型感測器

此種感測計係依據反應作用前後焓值的變化，亦即偵測熱量的原理來獲悉氣體的濃度。焓值變化 ΔE 造成溫度的改變 ΔT 二者之間的關係為：

$$\Delta T = \frac{-\Delta E}{C_p} \quad (4)$$

C_p 代表熱容量。因此理論上只要夠可靠穩定，各式的溫度感測計也能作為此型之感測器。但是，本文的討論範圍著重在微感測器，所以在此僅以 pellistor 來探討。

Pellistor 在 1970 年代初期由英國 EEV 公司所設計開發，主要結構鍍覆了 Pd 或 Pt 觸媒金屬的多孔質 Al₂O₃ 粒狀物，其內包含了 Pt 的加熱線圈，其原理乃是氣體在感測器表面的氧化作用所釋放的熱量改變了感測器的溫度，也導致了 Pt 線圈的電阻發生變化。此可經由惠氏電橋 (Wheatstone bridge) 加以測出，Pt 線圈除了是加熱器之外，一方面亦是惠氏電橋的一部分。圖 5 分別是傳統與矽微型 pellistor 之相異構造。Pellistor 使用電阻溫度係數 (temperature coefficient of resistance, TCR) 的線性關係來獲知溫度的變化，並需要使用另一參考感測器做為相互比較，如圖 6 所示為 silicon pellistor 對 H₂ 與 CO 的溫度反應曲線。一般來說，pellistor 擁有偵測許多可燃性氣體的優點，並能偵測從低爆炸限 (lower explosion limit, LEL) 至高爆炸限 (higher explosion limit, HEL) 範圍的氣體濃度。但是，如同

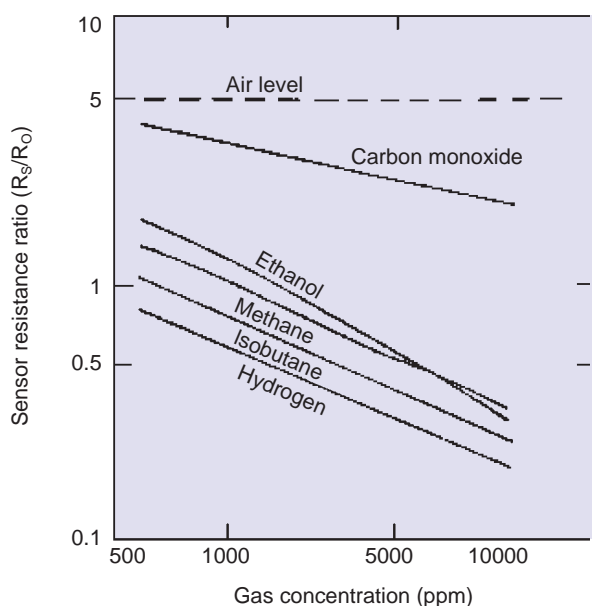


圖 4. SnO₂ 感測器對照於 1000 ppm 甲烷氣體下對於各種氣體的濃度 - 電阻典型反應曲線。

SnO₂ 感測器一樣，pellistor 也必須保持高溫運作，從 300 °C 至 600 °C 不等，高功率消耗是相當大的負擔。另外，多孔質觸媒的劣化 (poisoning) 也是極待解決的課題之一。

3. 比重型感測器

除了前述兩種常見的效應之外，化學反應通常也會產生質量的變化。因此用以感測微小質量變化的壓電晶體 (piezoelectric) 或表面聲波 (surface acoustic wave, SAW) 裝置也可用來做為氣體感測器。微小的質量變化通常可以振盪電路轉化成振動頻率的變化來得知，在這些裝置上塗覆以氣敏材

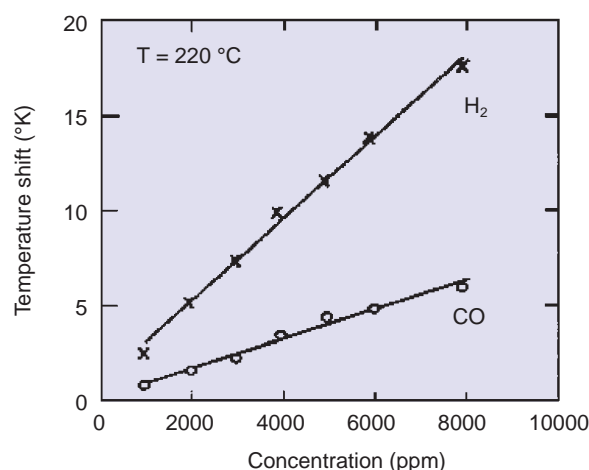


圖 6. silicon pellistor 對 H₂ 與 CO 的溫度反應曲線。

質，如 polystyrene、keratin 或 DMPE，與特定氣體反應後，將會產生前後比重的變化。對於壓電裝置 (如 quartz microbalance)，Sauerbrey 方程式以質量變化 Δm 及振動頻率變化 Δf 表示如下⁽²⁾：

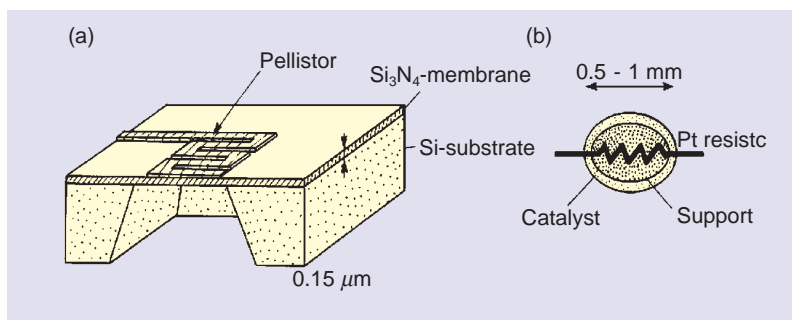
$$\Delta f = -\frac{\Delta m}{A\rho_m k_f} f_0^2 \quad (5)$$

A 是晶體表面積， f_0 是晶體的共振頻率， ρ_m 是氣敏材質薄層密度，而 k_f 則代表一頻率常數。對於 SAW 感測器，則 Sauerbrey 方程式可被修正如下：

$$\Delta f = (k_1 + k_2) f_0^2 \Delta(p_m d) \quad (6)$$

d 是氣敏材質薄層厚度，而 k_1 與 k_2 代表材料常數。

圖 5. (a) 矽微型 pellistor，(b) 傳統型 pellistor。



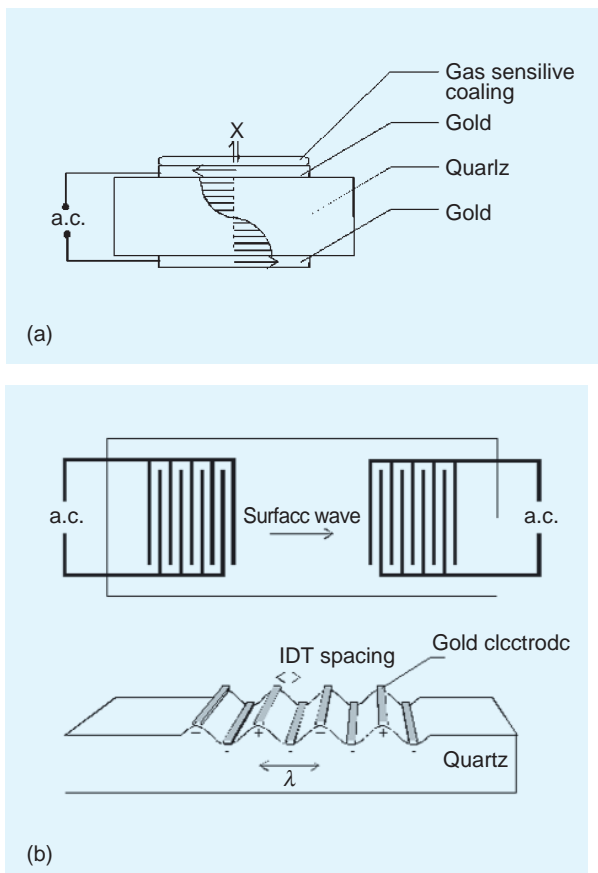


圖 7. (a) quartz microbalance, (b) SAW。

圖 7 列出了 quartz microbalance 與 SAW 的結構圖示。一般說來，比起前面討論過的感測器，比重型感測器擁有較高的敏感度及微小化之優點，特別是 SAW 感測器運作在較高的頻率範圍 (~GHz)，可擁有較好的解析度，然而這類型的感測器也有易受溫濕度影響以及長期穩定性不佳的缺點存在。

4. MOSFET 感測器與矽基微感測器

1960 年代 MOSFET 首次製造問世，直至 1975 年，Lundstrom 等人首次提出了以 Pd 金屬為閘極 (gate) 的 MOSFET 做為感測氫氣的氣體感測器，揭開了 MOSFET 氣體感測器的研究序幕⁽³⁾。從此，吾人可定義以 MOSFETs 來感測氣體的裝置稱為 chemotransistor 或 GasFETs，請參閱圖 8。

其原理為氫氣分子在 Pd 表面分解為氫原子並被吸收，然後經由擴散至金屬與絕緣體交界處，在

此被極化 (polarized)，最終與氣體界面形成平衡狀態。此偶極層於是產生一順向電位並進而影響閘極電壓，產生電位偏移，當大氣中的氫氣消失時，氫原子重新結合為氫氣分子被釋放回大氣，偶極層與閘極電壓偏移隨之消失，回復正常偏壓狀況。此反應已被發現為一種可逆反應，但可耗時數小時之久。MOSFET 之門極電壓 (threshold voltage) 偏移量 ΔV_T 已被驗證與氣體濃度相關，如下式所示⁽³⁾：

$$\Delta V_T = \frac{\Delta V_{\max}}{1 + \frac{k}{\sqrt{[H_2]}}} \quad (7)$$

ΔV_{\max} 代表門極電壓的最大偏移量，圖 9 說明了 I-V 特性曲線中的門極電壓偏移效應。除了鈦之外，其他的觸媒金屬如鉑 (Pt) 與銱 (iridium, Ir) 也經常地被用於 GasFETs 上，可用以感測 NH_3 、 H_2S 和乙醇 (ethanol) 等氣體，惟因為此型感測器易受溫度影響，故在裝置特性及穩定性上仍有許多改善的空間。

隨著近代固態電子技術的蓬勃發展，以矽為主的半導體科技工業已位居積體電路 (integrated circuits, ICs) 的主導地位。所以，矽基型的氣體微感測器便自然地成為現今發展的主流。以矽為基板的各種感測器也配合了微製造技術 (micromachining technology)，利用其中的體型蝕刻 (bulk etch) 技術，大量採用薄膜式 (membrane 或 diaphragm) 的設計在氣體微感測器上，這些薄膜可由矽、二氧化矽 (SiO_2)、氮化矽 (Si_3N_4) 或其混合薄層組成，Pt 與

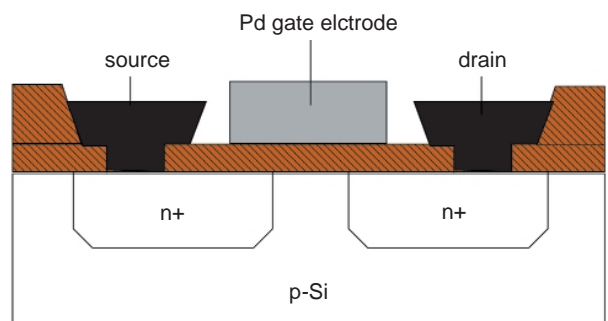


圖 8. MOSFET 氣體感測器。

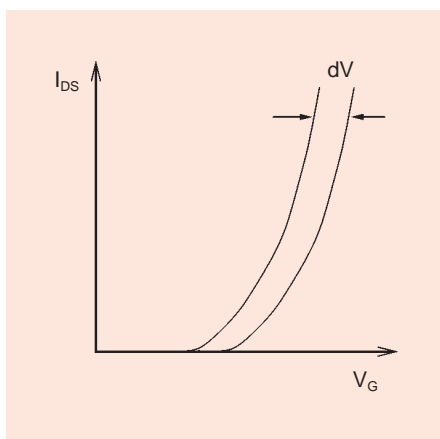


圖 9. I-V 特性曲線中的門檻電壓偏移效應。

polysilicon 則常被鍍於薄膜內或外部做為加熱器。除了電子方面的考量之外，這些薄膜物質本身亦扮演了蝕刻時所必須的蝕刻終止 (etch-stop) 機構，用以阻止蝕刻的繼續進行。使用薄膜結構的優點乃在於其減少許多熱傳質量 (thermal mass)，明顯地減低了電功率的消耗至毫瓦級而仍可以高溫運作，從圖 10 的數據曲線可以得知薄膜結構的電功率損耗明顯較低。因此利用半導體的相關技術，除了能把感測器與相關積體電路進行整合之外，也顯著地將傳統型氣體感測器微小化至微米級尺寸。最重要的是，這樣的發展將促使智慧型氣體微感測器 (smart gas-sensor) 的早日問世，稍後的章節將對此有更多的討論。

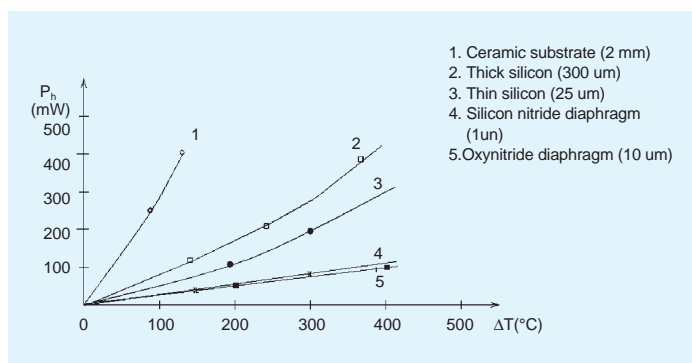


圖 10. 不同構造的感測器設計的溫度對電功率損耗關係。

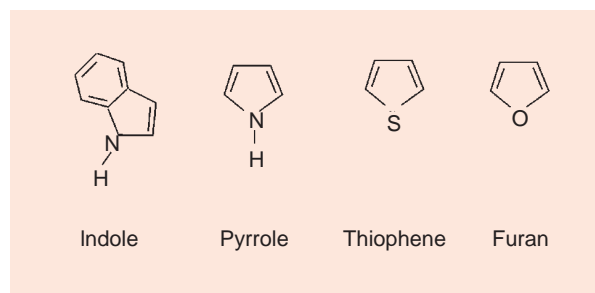


圖 11. pyrrole、thiophene、indole 和 furan 四種聚合體單體。

5. 有機材料感測器

近年來已有愈來愈多的研究顯示，有機物或導電聚合物可用來取代以往的化阻式金屬氧化物，以獲取較佳的感測特性與敏感性。此外，有機或導電聚合物可在低於攝氏 120 度下運作，也較其他高溫感測器消耗較少的功率，這些優勢使得使用有機材料在目前有逐漸取代金屬氧化物的趨勢。事實上，它目前已經初步地被應用在感測器陣列 (sensor array) 與人工嗅覺儀器 - 電子鼻 (electronic nose) 儀器之上。其感測原理與金屬氧化物類似，藉著與大氣中的氣體結合，晶體內部或聚合物發生局部反應，繼而使其電阻產生改變。在有機晶體中，phthalocyanine (Pc) 展現出對 NO₂ 氣體具有優良之感測特性；而導電聚合物由於其材料選擇性眾多、室溫運作與電化學成形等優點，更是已經成為應用漸廣的一種化阻式氣敏材料。例如 polypyrrole 被用於偵測 NH₃ 及 NO₂ 氣體，且對於環境的污染源與揮發物有較佳之敏感性，目前已經被用於攜帶型電子鼻上⁽⁴⁾。圖 11 列出了 pyrrole、thiophene、indole 和 furan 四種聚合物單體，可進行電化學氧化作用以組合產生導電聚合物薄膜。此外，一種新奈米結構的觸媒薄層已可以電鍍 (electroplating) 方式生產，擁有極大之表面積，並具有自行組合之結晶晶粒，可電鍍在薄膜式之氣體感測器上，如圖 12 所示。

6. SOI MOSFET 微感測器

近年來，許多的氣體微感測器研發已經著重在以 CMOS 半導體製程為考量的方向⁽⁵⁻⁷⁾。原因無

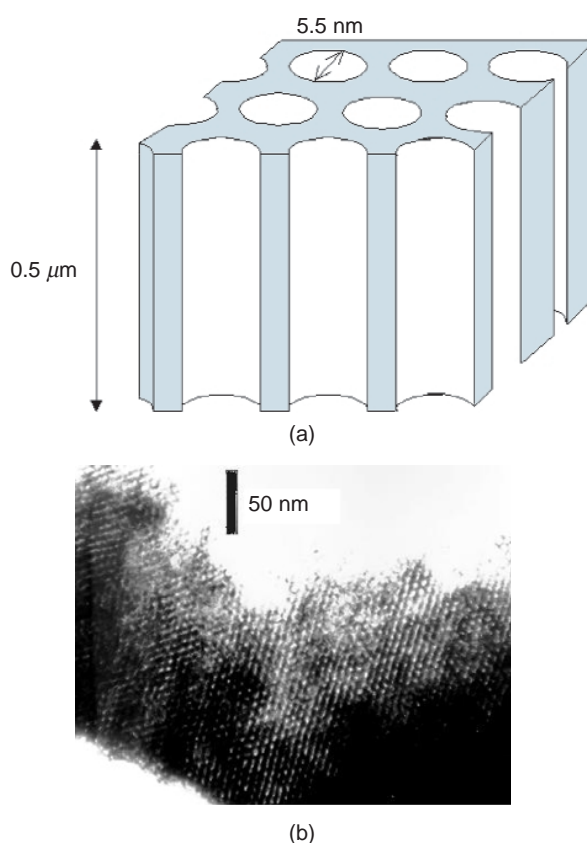


圖 12. (a) 奈米結構的觸媒薄膜，(b) 觸媒薄膜的 TEM 照片。

它，乃是著眼於其成熟的技術提供與試圖降低單位成本。否則，氣體感測器的價格將永遠居高不下，限制其市場的供給量與普及性。以 CMOS 製程為考量的氣體微感測器擁有的幾項優點：

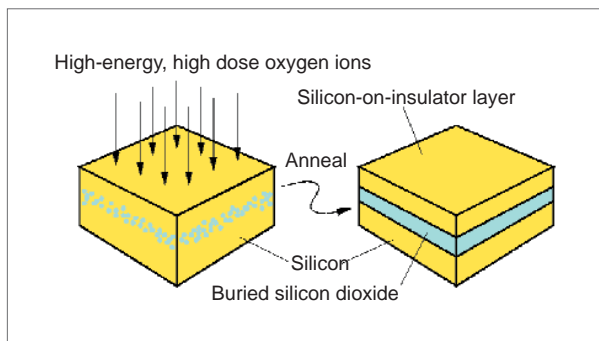
- (1) 低消耗功率 (通常可低於 1 W)。
- (2) 可滿足氣體感測器 200 °C 以下之操作溫度需求。
- (3) 製程較為簡化，並可大量生產。
- (4) 與相關電路進行單晶片 (on-chip) 整合。

但是仍然有以下的缺點與極待克服的問題：

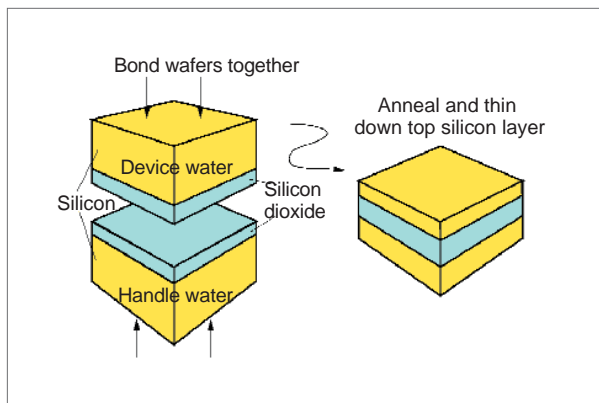
- (1) 相對來說，熱穩定性與重現性 (reproducibility) 較差，感測器反應時間 (response time) 亦慢。
- (2) 某些製程，如 Pt 及 NiFe 電阻加熱單元，與標準 CMOS 製程不相容。
- (3) 高溫影響相鄰電路的穩定性，因為電特性乃是隨溫度而變化的。

一般的 MOSFET 氣體感測器大約只能在 150 °C 的溫度上限工作，所以對氣體感測的敏感性也因而減低。有鑑於此，筆者所在之英國跨校性微感測器研究小組於 1998 年提出以絕緣體矽 - 亦即 SOI 製造技術 - 應用於新型氣體微感測器的設計概念⁽⁸⁻⁹⁾。絕緣體矽的概念成形於 1990 年代初期，乃是在一般的矽晶圓片上先建構一層二氧化矽絕緣體，其上再長以一薄層矽或磊晶 (epitaxy)，此矽層厚度可從數十奈米至數微米，吾人慣稱其為 SOI 矽層，目前主要應用於下世代的高電壓 IC 晶片。SOI 晶圓片的製造方式目前可分為三種：SIMOX (separation by implantation of oxygen)、wafer bonding 與 smart-cut (由 UNIBOND 公司研發生產，故亦以其公司名稱代表)，最後者結合了前二者的製程與產品優點，如圖 13 所示。

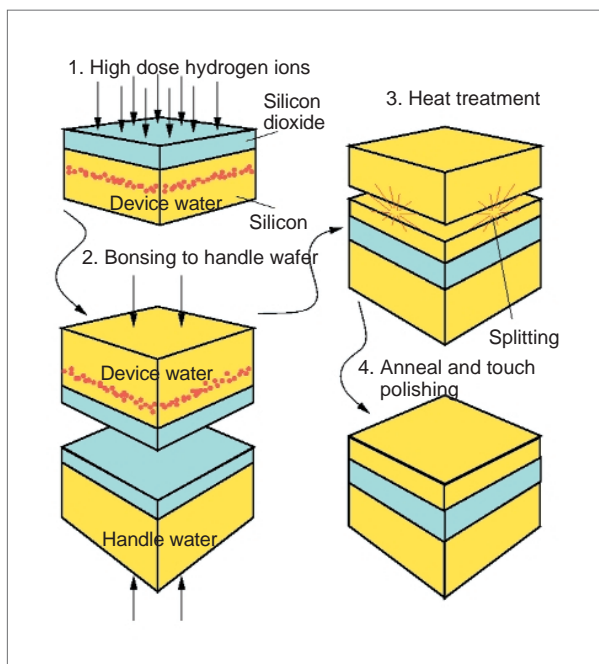
SOI 半導體元件的好處在於具有較好的電特性、垂直隔絕作用與高溫操作範圍 (~350 °C)。特別的是，由於具有一層熱傳性不良的 SiO₂ 絕緣體，所以 SOI 元件運作時會產生熱量累積的自熱 (self-heating) 效應，這當然不利於高電壓 ICs，然而卻迎合了高溫氣體感測器 - 如化阻型與熱量型 - 之操作需求。新設計的 SOI 氣體微感測器除了利用現 CMOS 或 Bi-CMOS 的製程技術之外，並配合了 KOH 濕蝕刻後製程技術，對 SOI 晶圓片的矽基板 (silicon substrate) 進行非等向性蝕刻 (anisotropic etch)，形成一個含 SOI 矽層與 SiO₂ 絕緣層的薄膜。並首次採用 MOSFETs - 即 MOS 場效電晶體 - 做為微感測器的加熱單元，並將之建構在 SOI 的薄膜結構內。當 FET 工作時，汲極 (drain) 與源極 (source) 為導通狀態，並在閘極加以一適當電壓，做為控制溫度的機制。藉由自熱效應達到加熱薄膜上的氣敏材料，估計可達 350 °C 的高溫，但是所消耗的電功率 (< 50 mW)，卻遠低於其他的 MOSFET 微感測器。這是因為薄膜式的設計減低了元件的熱傳導散失量，而 SOI 薄膜中的 SiO₂ 絕緣層也有效地阻絕了熱量的散失，間接地降低電功率的損耗。最重要的是，它的主要製程皆能完全與現有的 CMOS 或 Bi-CMOS 技術相容，使高性能而低成本的氣體微感測器之發展極具可行性。目前此研究計畫仍在英國劍橋大學與華威大學進行中，並



(a)



(b)



(c)

圖 13. SOI 的三種主要製造方法：(a) SIMOX，(b) wafer bonding 及 (c) UNIBOND。

且已由歐盟之跨國合作研發組織 EuroPractice (IMEC) 執行 SOI 微感測器之製造，預計近期內將有更多研究成果問世。

四、SOI 氣體微感測器之設計模擬與製造

筆者將簡要地介紹 SOI 氣體微感測器的元件電路設計、熱 - 電 - 機械耦合效應模擬 (thermo-electro-mechanical coupled-effect simulation) 與 CMOS 製程等方面的研究結果，並佐以各式圖表協助說明。

1. 感測器結構設計

在現階段 SOI 氣體微感測器的發展偏重於 chemoresistor、microcalorimeter 及 GasFETs 三種類型。其中 GasFETs 又分為金屬閘極與有機閘極兩類，分別以不同的觸媒金屬與有機材料進行研發中，請參閱圖 14 中各式感測器之剖面圖。SOI 薄膜厚度約為 2 至 5 μm ，面積從 500 μm^2 平方至 1200 μm^2 平方不等，氣敏材料則置於薄膜的中心部位。為了將 SOI 元件所產生的熱集中於氣敏材料下方，有效地達到加熱的效果，可利用半導體製程中的高溫氧化爐管在薄膜的氣敏材料周圍長出厚層的 SiO_2 ，稱為 LOCOS (local oxidation of silicon)，以隔絕側向熱傳，避免影響鄰近的其他元件。此外，還可利用製造 mesa 與 trench 兩種方式來達到隔絕的目的，圖 15 顯示出上述之隔絕方法與感測器元件的正面圖。

2. 相關元件電路設計

感測器中所需的各級電路，例如 op 放大器、驅動加熱單元的定額電流源 (constant-current source) 與溫控電路、測量溫度之電阻或二極體的基本電路，均需事先以電路應用軟體 Cadence 先行模擬，以驗證設計無誤。圖 16 為 op 放大器與 MOSFET 加熱單元的驅動電路設計範例。

3. 熱 - 電 - 機械耦合效應之模擬分析

在設計 SOI 感測器的薄膜結構時，必須慎重

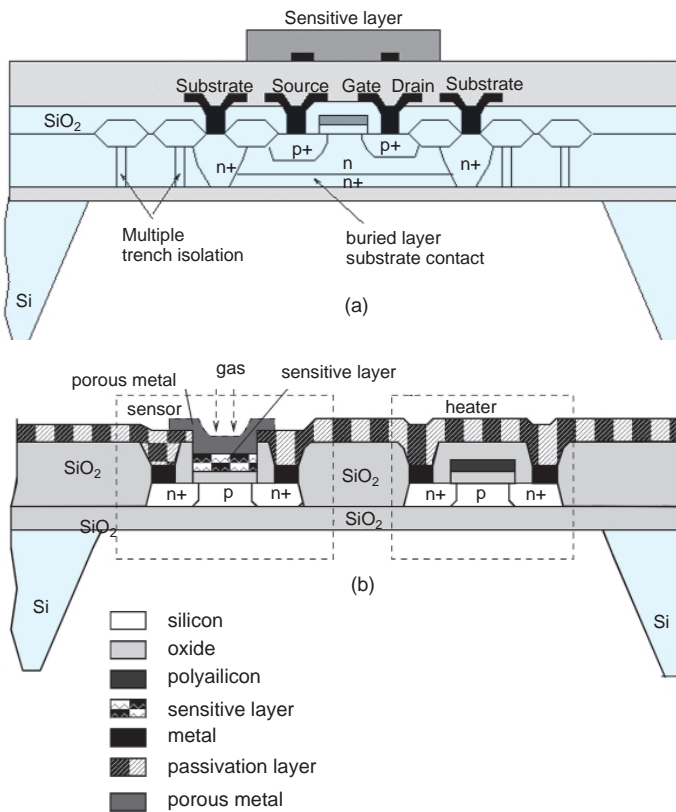
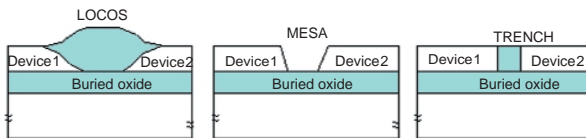
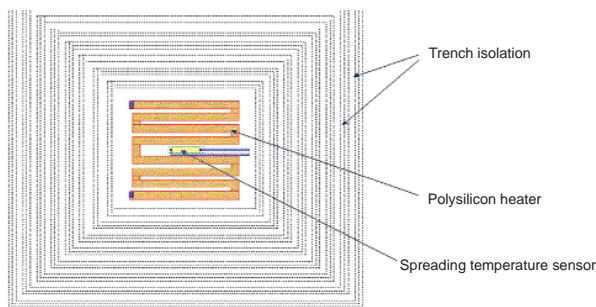


圖 14. 各式氣體微感測器：(a) chemoresistor，(b) catalytic metal gate GasFET。

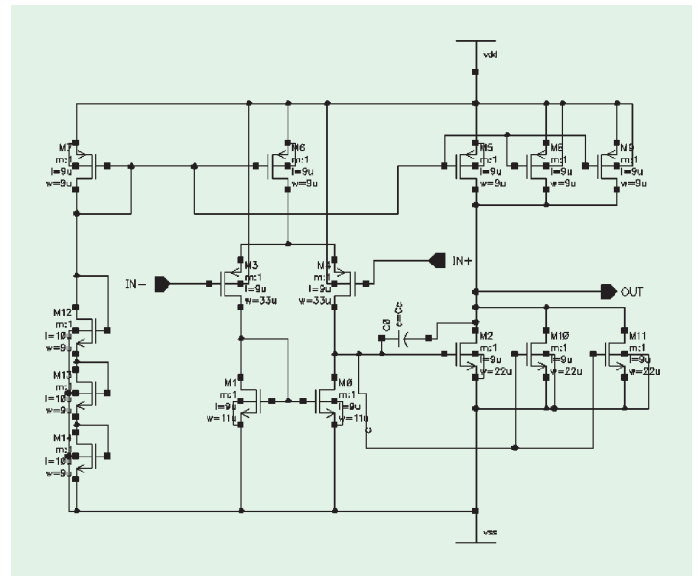


(a)

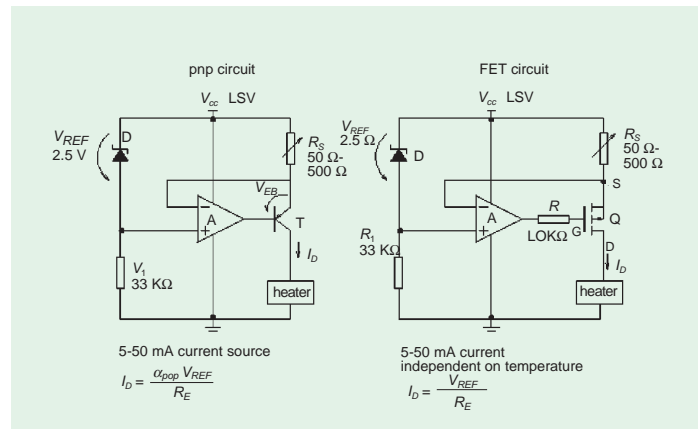


(b)

圖 15. (a) SOI 微感測器中各種隔絕機構，(b) 微感測器元件的正面圖。



(a)



(b)

圖 16. (a) op 放大器，(b) MOSFET 加熱單元的電路設計例。

考慮高溫運作時所引起的電特性漂移與應力問題。首先，電特性是深受環境溫度影響的，如矽半導體的導電性乃隨著溫度上升而增加，繼而影響汲極電流 I_D 的大小。須確定 MOSFET 微加熱單元 $p-n$ diode 測溫元件及各相關電路與溫度的變異關係，以求得適當之控制參數與方法。例如，控制 MOSFET 閘極電壓可以近乎線性關係求得薄膜中心區域的操作溫度(可參閱圖 18)，電功率消耗與操作溫度之相關性亦是重要的設計重點。此外，由 Si 與 SiO_2 組成的雙層薄膜應力亦是一值得研究之

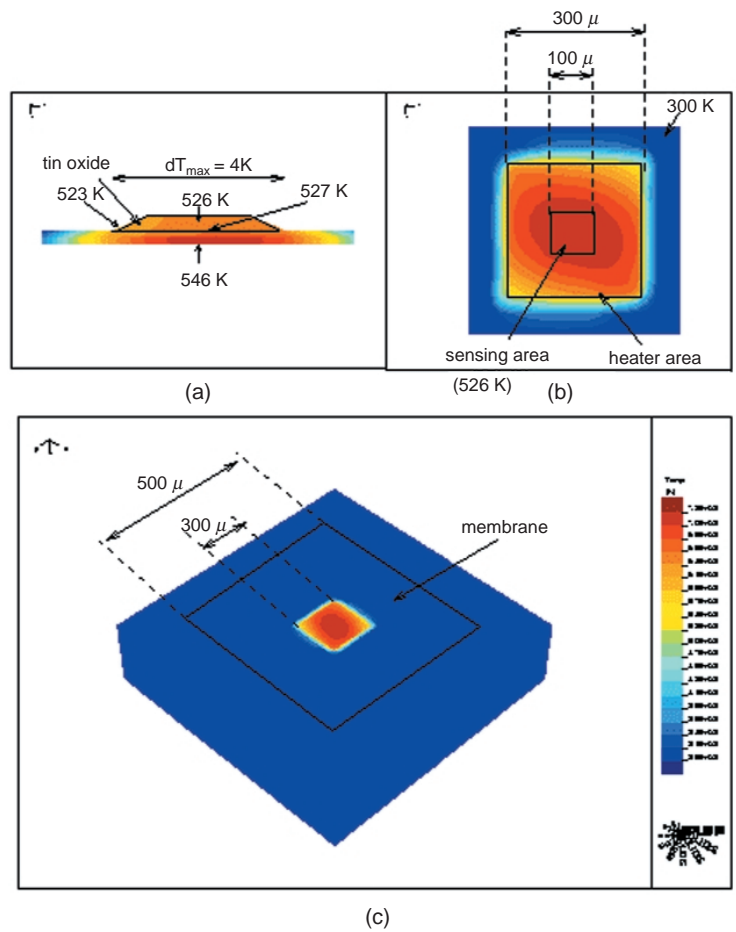


圖 17. SOI MOSFET 微感測器的三維溫度模擬分佈圖。

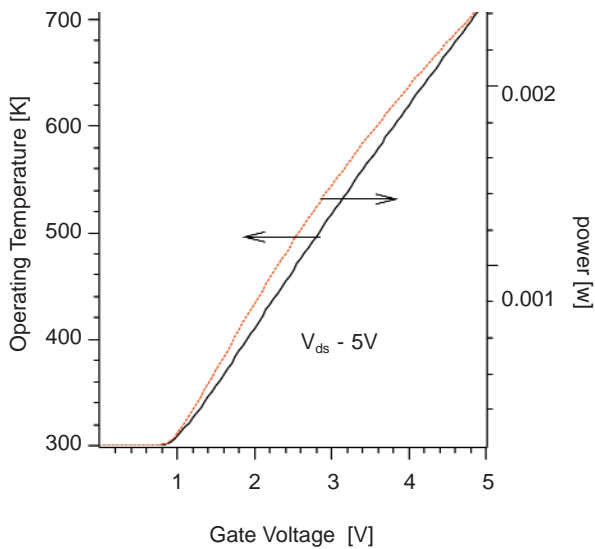


圖 18. MOSFET 的閘極電壓對溫度與消耗電功率的曲線關係圖。

課題。除了考慮熱應力之外，更可從薄板 (thin plate) 理論，透過薄膜邊長與薄膜厚度之寬深比 (aspect ratio, l/h) 求得主應力之變化情形，進而選擇一最低應力之設計參數⁽¹⁰⁾。

惟實際上，仍要進而考量薄膜殘留應力 (residual stress) 與本質內應力 (intrinsic stress) 對於細微薄膜的影響程度。這二種應力主要衍生自熱處理與加工製程，殘留應力目前可藉由精密儀器如 X 光繞射儀量取；本質內應力目前無法有效地達成理論估測，惟所有應力總合可以工程量測與統計方式推估而得。最終目的乃是 SOI 薄膜必須能承受所有總合應力及開 - 關過程導致之熱循環 (thermal cycle) 破壞，保持在其彈性限度內工作，使得薄膜不致破裂。而矽亦是一種良好的壓阻 (piezoresistive) 材料，薄膜應變也會影響矽的電阻值與 MOSFETs 的特性，因此，壓阻效應也須一併

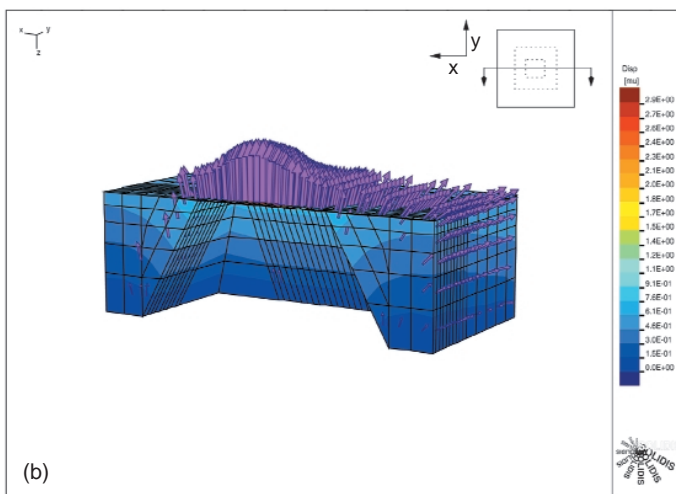
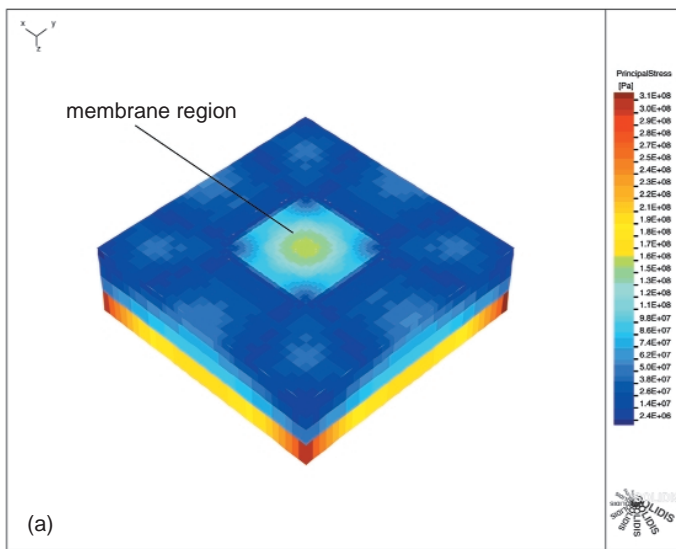


圖 19. 於 670 K 高溫 寬深比 $l/h = 250$ 時 (a) 最大應力與 (b) 薄膜形變之模擬結果。

考量。由此觀之，在 SOI 薄膜內熱 - 電 - 機械三種領域的互相交聯，事實上是頗為複雜的一個物理問題。

吾人以 ISE-Solidis 模擬軟體執行熱 - 電 - 機械耦合效應的二維及三維模擬，圖 17 顯示了模擬真實尺寸的 SOI MOSFET 微感測器三維溫度分佈圖，可見其溫度梯度均勻而集中。圖 18 乃是 MOSFET 的閘極電壓對溫度與消耗電功率的關係圖，而 $500 \mu\text{m}$ 平方的方形薄膜於 670 K 高溫的最大應力與薄膜形變模擬結果則請參閱圖 19。

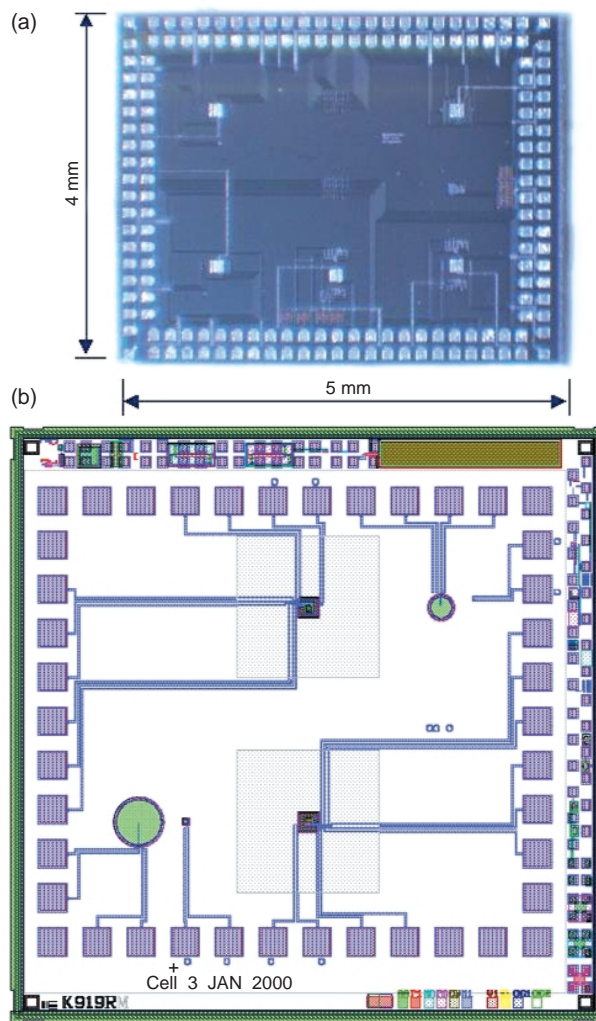


圖 20. (a) 顯微鏡下的第一個 SOI 微感測器晶片，(b) 第二代 SOI 氣體微感測器設計圖例。

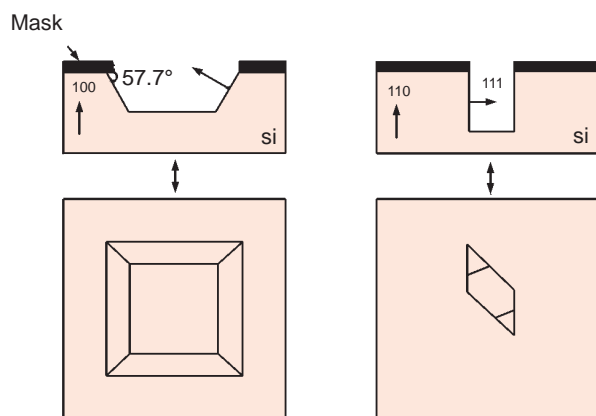


圖 21. KOH 對 100 與 110 矽晶格的蝕刻結果。

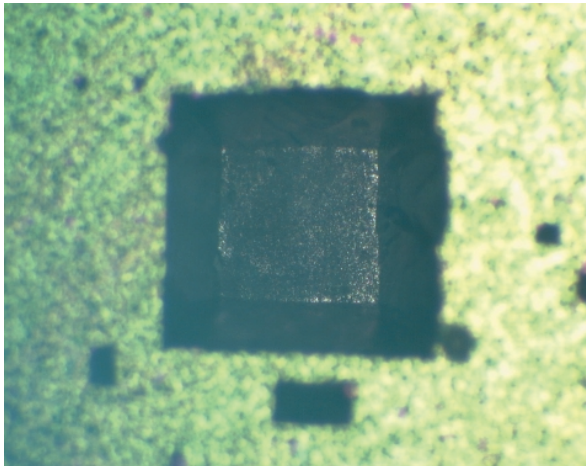


圖 22. 經 KOH 蝕刻後 SOI 薄膜的 50 倍放大影像 (背側)。

5. 微感測器的 CMOS 製程

以 Silvaco-Athena 模擬軟體進行 CMOS 製程的程序模擬，以驗證微感測器的設計外形、內部元件的 I-V 特性與攪雜濃度皆能符合設計所求。最後，繪製 CMOS 製程所需之顯影光罩 (mask)，送交生產線進行試產。在圖 20 中，可見在顯微鏡下由 EuroPractice (IMEC) 的 $0.8 \mu\text{m}$ DMILL-Matra 所製造的第一個 SOI 微感測器晶片與準備試產的第二代 SOI 微感測器設計 (於英國 Southampton 大學微電子中心製造)。

五、微製造技術 - 後 CMOS 製程

SOI 微感測器中的薄膜結構，係以 KOH 溶液對矽基板進行非等向性的背側溼蝕刻 (wet back-etch)。非等向性蝕刻長久以來已是微製造技術中常見的方式之一，經常用以製作各式的機械感測器，測量各種機械物理量如壓力、扭矩與加速度等。由圖 21 可見 KOH 對 100 與 110 矽晶格方向的不同蝕刻結果。用於抵擋 KOH 蝕刻的 mask 材料，通常可採用 Cr 或 Ag 金屬、 SiO_2 以及 Si_3N_4 等鍍覆於背側，蝕刻終止 (etch-stop) 的方式則有攪硼 (boron-doping)、外加電位 (electrochemically bias)、oxide/nitride 終止層與雷射照射法等⁽¹⁾，SOI 薄膜中的 SiO_2 薄層恰可做為一個理想的蝕刻終止層。圖

22 為經 KOH 蝕刻後 SOI 薄膜的 50 倍放大影像。最後，再將不同的氣敏材料，如 SnO_2 、Pd 及聚合物等，鍍覆或噴覆 (spray) 於薄膜的感測區內。

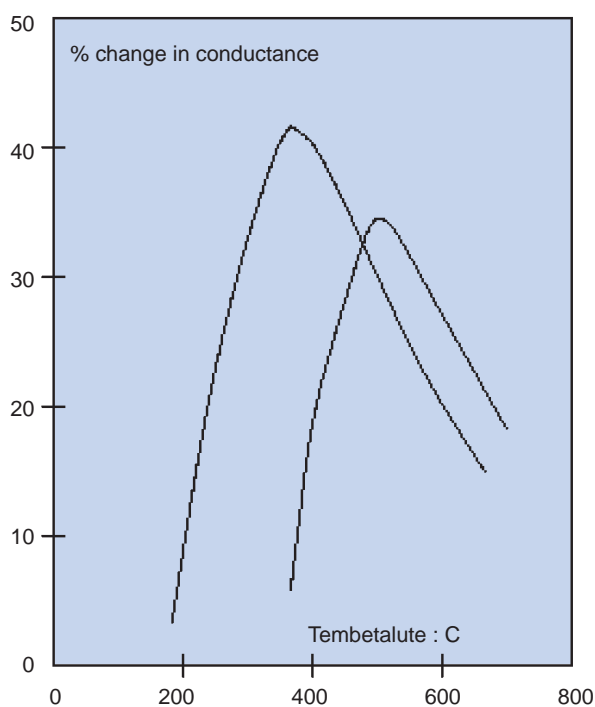
六、氣體測試

有關感測器對氣體的測試，必須考慮感測器種類的變化參數與受測氣體濃度的變異關係。例如，化阻型感測器中 SnO_2 或聚合物的 conductance 變化；熱量型感測器中測溫單元的電阻值變化或溫度變化；GasFET 感測器中 MOSFET 的門檻電壓 V_T 偏移或汲極電流 I_D 偏移 (因二者成一線性正比關係)。此外，汲極電壓與閘極電壓的變化量 ΔV_{DGS} 也常被使用。圖 23 中列出了一些常見氣體濃度的典型反應曲線。

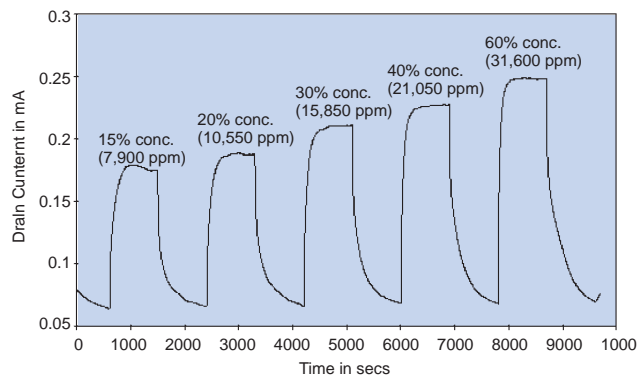
七、整合技術與智慧型感測器

由於現在的科技進展已能使感測器微小化，所以將感測器相關的附屬元件與訊號處理器 (signal processor 或 converter) 等予以積體化，並整合在同一矽晶片上，已不再是遙不可及的夢想。基本上，發展中的 SOI 微氣體感測器就是一個整合型的感測器，除了感測器本身之外，微加熱單元、溫度感測器與 op 放大器等電路設計亦能被製造於薄膜上抑或薄膜外之範圍，而不致遭受高溫與相鄰元件的電子雜訊影響。圖 24 所示為一 SOI 微熱量感測器 (microcalorimeter) 的差分傳感電路設計圖。

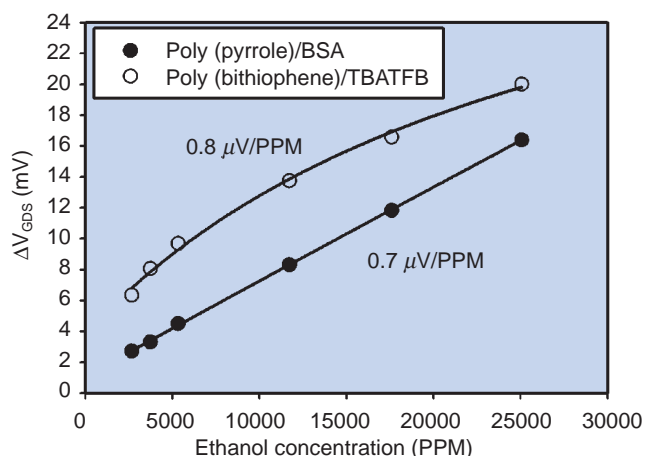
若進一步地能將邏輯微處理器 (logical microprocessor) 包含於微感測器內，則吾人可稱之為智慧型微感測器 (smart microsensor)。如圖 25 所示，它將能夠完成邏輯推理與演算，並具有某種程度的記憶功能；與外界之感測器系統達成訊息交換與聯絡之能力；具備判斷外界環境變化之時機，並進而採取適應之對策。若配合人工智慧的技術，不僅能增加產品的附加價值，亦對蓬勃發展中的微機電系統技術樹立一良好之應用典範。筆者認為，這樣的智慧型微感測器將會是新世代氣體感測技術的未來研發指標。



(a)



(b)



(c)

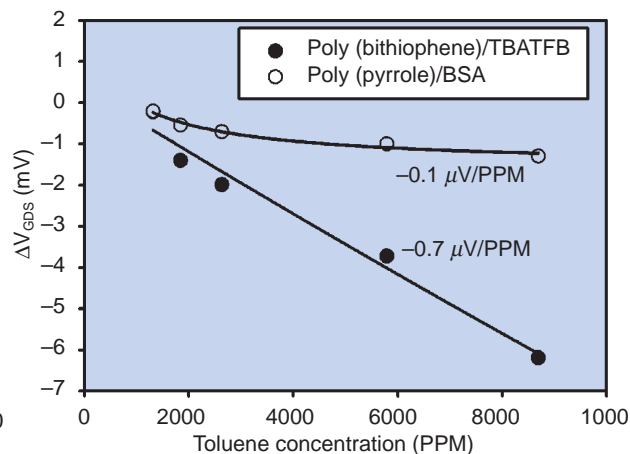


圖 23. (a) SnO_2 對 CO 與 CH_4 的敏感性變異；(b) Pd-gate MOSFET 對不同濃度乙醇之反應時間 - 電流圖；(c) Poly-gate MOSFET 對乙醇與甲苯之反應濃度 - 電壓 (V_{GDS}) 圖。

八、結論與展望

本文就氣體感測器的基本原理、分類與發展技術提供了一簡單而系統化的介紹。從半導體金屬氧化物、觸媒金屬及其氧化物，至近幾年來高分子有機物的蓬勃應用，均可被用於特定氣體的感測用

途。多年以來，氣體感測器被廣泛應用在居家及環境毒氣監測、實驗室與工廠安全規範、汽車的引擎與排氣系統、生化醫學分析與食品工業的嗅覺檢測等方面。隨著矽半導體產業提供的成熟技術，利用 CMOS 相容製程與微製造技術所發展的微氣體感測器，可有效地縮小感測器尺寸與改善其感測性

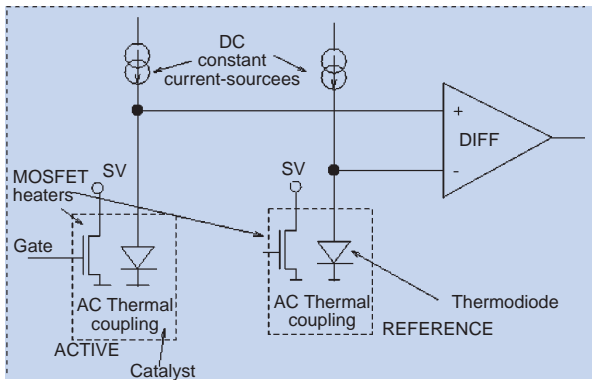


圖 24. SOI microcalorimeter 之差分傳感電路。

能。近幾年來，為增進電子產品的性能，以 SOI 科技結合目前 CMOS 半導體製程技術的需求不斷地增加。同樣地，它也能大幅地改良氣體微感測器的感測特性，減低功率損耗，並顯著地降低氣體感測器的生產成本。自前，SOI 矽晶片的價格仍非常昂貴，但依然供不應求。筆者相信，隨著其應用範疇之持續擴張，SOI 技術將會更具競爭力；未來 SOI 技術在 MEMS 領域的應用也勢必與日俱增。

展望未來，以 SOI CMOS 技術為主的智慧型微感測器將會是繼續研發的重點，而在應用系統的發展上，則以輕便小型的氣味偵測陣列或人工電子鼻為主要對象，繼而逐漸擴展至相關的人工味覺系統 - 電子舌 (electronic tongue) 的領域。目前市場上已有數種電子鼻產品問世，在下一期的文章裡，將繼續討論人工電子鼻嗅覺辨識系統的設計與發展，敬請期待。

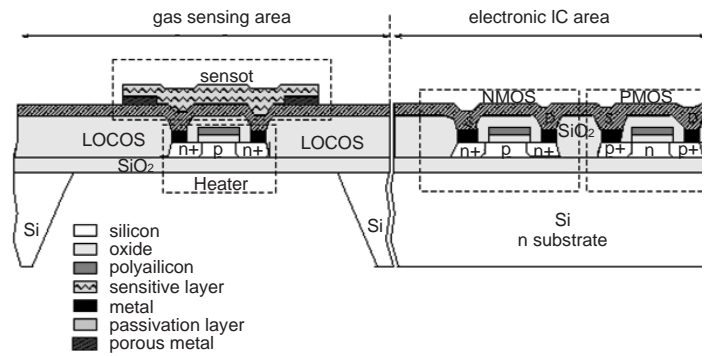


圖 25. SOI 智慧型氣體微感測器結構圖。

參考文獻

1. P. K. Clifford, *Proc. Int. Meeting on Chemical Sensors*, Fukuoka, 135 (1983).
2. J. Janata, *Principles of Chemical Sensors*, Plenum (1989).
3. I. Lundstorm et al., *Appl. Phys. Lett.*, **26**, 55 (1975).
4. Cyranco Sci. Inc., *Catalog of Hand-held Electronic Nose*, California, USA.
5. M. A. Gajda and H. Ahmed, *Sensors and Actuators A*, **49**, 1 (1995).
6. A. Pike and J. W. Gardner, *Sensors and Actuators, B*, **45**, 19 (1997).
7. H. Baltès and O. Brand, *ESSDERC '99*, Leuven, Belgium (1999).
8. F. Udrea and J. W. Gardner, *UK and World Patent Application GB2321336A and WO98/32009*.
9. J. W. Gardner and F. Udrea et al., *Proc. of SPIE Smart Electronics and MEMS*, **3673**, 104 (1999).
10. C-C. Lu, D. Setiadi et al., *Proc. of 3rd Modeling and Simulation of Microsystems (MSM'00)*, San Diego, 297 (2000).
11. J. W. Gardner, *Microsensors, Principles and Applications*, Wiley, 46 (1994).