

二氧化鈦奈米材料應用於 甲醛氣體感測

Application of Nanomaterial TiO_2 for the Gaseous HCHO Sensing

吳仁彰、賴曉芳、鄭創元

Ren-Jang Wu, Hsiao-Fang Lai, Chung-Yun Cheng

本研究合成出自製奈米二氧化鈦 TiO_2 、 Au/TiO_2 及 Pd/TiO_2 感測材料，並利用 X 光繞射 (X-ray diffraction, XRD) 及穿透式電子顯微鏡 (transmission electron microscope, TEM) 儀器將這些材料進行定性之研究，以了解其微結構，並將此材料應用於甲醛氣體感測研究。研究項目有感測信號 (sensor response)、反應時間 (response time)、回復時間 (recovery time) 與重覆性測試 (repeatability test)。研究中發現添加 Au 與 Pd 於 TiO_2 表面可以增加 TiO_2 之感測信號約三倍，並降低反應時間及回復時間。本研究提出了甲醛感測之反應機構 (sensing reaction mechanism)，期望未來能研究出學術創新及實用性高的新材料高靈敏度甲醛氣體感測技術。

In this study, homemade nano-titania TiO_2 , Au/TiO_2 and Pd/TiO_2 were prepared as sensing materials, and using X-ray diffraction (X-ray diffraction, XRD) and transmission electron microscopy (transmission electron microscope, TEM) instrument to characterize the materials. The purpose is to understand its microstructure and sensing properties of HCHO gas. Research items are including sensor response, response time, recovery time and repeatability test. We found that the addition of Au and Pd on TiO_2 can promote the sensor response of TiO_2 about three times, and reduce the response time and recovery time. A sensing mechanism was proposed in this study. It can be expected in the future academic innovation and practicality developed the new materials with high sensitivity of formaldehyde gas sensing technology.

一、前言

近年來室內空氣品質漸漸成為公眾關心問題，國人每人每天約有 80－90% 的時間處於室內環境中，室內空氣品質 (indoor air quality, IAQ) 的好壞，會直接影響居家品質及工作效率，這些污染

物是由於室內裝修等因素導致之病態屋 (甲醛、甲苯、等氣體)，或是室外機動車輛污染物因光化學反應產生之臭氧，會嚴重危害國人身體健康，因此室內空氣污染物對人體健康影響應當受到重視。配合行政院環境保護署空保處所制定的「室內空氣品質管理法」，從民生居家角度訂定此一辦法，

辦法中明訂了室內空氣品質 (如表 1)，目的為共同注重室內空氣品質之重要性⁽¹⁾。甲醛樹脂常被用於各種建築裝飾材料，包括膠合板、毛毯、隔熱材料、木製產品、地板、煙草、裝修和裝飾材料，一般甲醛會從建築材料慢慢釋出，新製產品在最初數月內所釋出的甲醛量最高，因此甲醛被視為主要的室內揮發性有機化合物 (volatile organic compounds, VOC)。當空氣中甲醛 (HCHO) 濃度在 0.1–0.3 ppm 時，甲醛就可能對較敏感的族群產生呼吸道刺激，並可能誘發氣喘。當濃度達 0.3–0.8 ppm 時，絕大多數人都會聞到甲醛的刺鼻味道；1–2 ppm 的濃度則會對所有人產生輕度刺激。當濃度達 2–3 ppm 時，會產生鼻及咽背刺痛；濃度達 4–5 ppm 時，則會產生更明顯的黏膜刺激症狀，一般人約可忍耐 10 至 30 分鐘。濃度在 10 ppm 時，一般人多半僅能忍受幾分鐘；而當濃度

升高至 10–30 ppm 時，會造成更明顯的呼吸道刺激，產生咳嗽、胸悶、呼吸困難及哮喘呼吸音。當濃度 50–100 ppm 時，甲醛可以在數分鐘內造成肺水腫、肺炎、支氣管刺激、胸悶、頭痛、心悸、眼睛灼傷^(2, 3)。因而發展快速分析甲醛氣體濃度之技術是極為重要的研究題目^(3, 4)。

分析目前國內外之研究，對一般的感測技術可區分為下列幾種方法：電化學 (electrochemical) 法、電阻 (resistance) 法、功函數 (work function) 法、光學 (optical) 法。表 2 列出上述方法之相關原理及優缺點。由表 2 可以看出電阻法有快速反應，靈敏度高，低價位的優點，只要可以克服選擇性差，工作溫度高的缺點，是值得在國內發展的研究題目。

許多研究團隊針對甲醛氣體的偵測，是利用一些厚膜及薄膜式半導體式奈米材料作為感測材

表 1.
室內空氣品質標準。

項目	標準值		單位
二氧化碳 (CO ₂)	八小時值	1000	Ppm (體積濃度百萬分之一)
一氧化碳 (CO)	八小時值	9	Ppm (體積濃度百萬分之一)
甲醛 (HCHO)	一小時值	0.08	Ppm (體積濃度百萬分之一)
總揮發性有機化合物 (TVOC, 包含：十二種揮發性有機物之總和)	一小時值	0.56	Ppm (體積濃度百萬分之一)
細菌 (bacteria)	最高值	1500	CFU/m ³ (菌落數/立方公尺)
真菌 (fungi)	最高值	1000、但真菌濃度室內外比值小於等於 1.3 者，不在此限。	CFU/m ³ (菌落數/立方公尺)
粒徑小於等於十微米 (μm) 之懸浮微粒 (PM ₁₀)	二十四小時值	75	μg/m ³ (微克/立方公尺)
粒徑小於等於二·五微米 (μm) 之懸浮微粒 (PM _{2.5})	二十四小時值	35	μg/m ³ (微克/立方公尺)
臭氧 (O ₃)	八小時值	0.06	Ppm (體積濃度百萬分之一)

1. 參考行政院環境保護署空保處所制定的「室內空氣品質管理法」室內空氣品質標準。
2. 總揮發性有機化合物 (TVOC, 包含十二種揮發性有機物之總和)：指總揮發性有機化合物之標準值係採計苯 (benzene)、四氯化碳 (carbon tetrachloride)、氯仿 (三氯甲烷) (chloroform)、1,2-二氯苯 (1,2-dichlorobenzene)、1,4-二氯苯 (1,4-dichlorobenzene)、二氯甲烷 (dichloromethane)、乙苯 (ethyl benzene)、苯乙烯 (styrene)、四氯乙烯 (tetrachloroethylene)、三氯乙烯 (trichloroethylene)、甲苯 (toluene) 及二甲苯 (對、間、鄰) (xylenes) 等十二種化合物之濃度測值總和者。

感測技術	原理/偵測參數	優點	缺點
電化學法	電化學／電流變化	可以偵測低濃度氣體	壽命限制，易受其它氣體干擾，價格高
電阻法	金屬氧化物半導體／電阻變化	快速反應，靈敏度高，工作溫度高，低價位	選擇性不佳，易受濕度及溫度變化干擾，工作溫度高
功函數法	場效電晶體／電流或電壓	微小化的感測系統，反應快速，大量製造成本低	信號容易漂移
光學法	光學／光吸收或穿透	選擇性高	老化後信號漂移，價格高

表 2.
氣體感測技術比較。

料⁽⁵⁾，常見的有 ZnO ⁽⁶⁾、 SnO_2 ⁽⁷⁾、 NiO ⁽⁵⁾、 In_2O_3 ⁽⁵⁾ 及 Ag-LaFeO_3 ⁽⁸⁾ 等，將感測信號較佳者羅列如後。Choi 等人⁽⁶⁾ 對甲醛氣體進行感測實驗，他們使用的感測材料為改良過的 Al-ZnO 材料，在 0.8 ppm 的 HCHO 濃度下其感測信號 ($S = (R_{\text{gas}} - R_{\text{air}}) \times 100\%/R_{\text{gas}}$) 為 60%，不過，其感測器之工作溫度則是高達 350 °C。Xu 等人使用分層孔洞型 SnO_2 材料⁽⁷⁾，在 1.0 ppm 的 HCHO 濃度下其感測信號 ($S = R_{\text{air}}/R_{\text{gas}}$) 為 3.86，反應時間非常快速，可以達 4.3 s，不過，其感測器之工作溫度則是高達 330 °C。Zhang 等人使用 Ag-LaFeO_3 材料⁽⁸⁾，在 1.0 ppm 的 HCHO 濃度下，其感測信號 ($S = R_{\text{air}}/R_{\text{gas}}$) 為 25，反應時間及回復時間可以達 60 s 及 65 s，不過，其感測器之工作溫度則是 90 °C。

上述的 HCHO 氣體感測材料，若是使用金屬氧化物，則需加高溫度，需消耗很多能源。二氧化鈦依其結晶構造可分成三種型態，分別為正方晶系的金紅石 (rutile) 與銳鈦礦 (anatase)，以及屬於斜方晶系的板鈦礦 (brookite)，其中又以正晶系金紅石 (rutile) 與銳鈦礦 (anatase) 的結構有較佳的活性。由於鍵結方式的差異，其銳鈦礦 (anatase) 的結構通常具有最高之光觸媒及感測氣體活性。Zeng 等人研究改良過的 TiO_2 可以在室溫下氧化 HCHO ⁽⁹⁾，因此本研究群利用奈米 TiO_2 應用於 HCHO 感測器，並添加 Au 及 Pd，預期達到不需加熱就能準確且快速測量到 HCHO 濃度的感測結果。

二、實驗部份

1. 樣品製備

本研究使用含浸法製備鈀／二氧化鈦感測材料，首先製備二氧化鈦，使用鈦酸四丁酯作為二氧化鈦的前驅物，配製鈦酸四丁酯濃度 $2 \times 10^{-2} \text{ M}$ 的無水乙醇溶液，攪拌加熱煮沸至乾，即完成二氧化鈦的材料製備。取 1.55 ml 硝酸鈰溶液 (0.325 g/500 ml) 加入 20 ml 的無水乙醇及 0.1 克二氧化鈦粉末中，加熱煮至乾即完成鈰／二氧化鈦 (1.0% Pd/TiO_2) 感測材料，其他不同比例含量的鈰／二氧化鈦及金／二氧化鈦 (Au/TiO_2)，依此法製備。感測器的製備為將商用氧化鋁金電極基板浸泡於 95% 的乙醇中，先以超音波震盪器震盪以除去基板上雜質，接著以去離子水洗淨後置於烘箱中烘乾保存備用即。配製 5% 聚乙醇 (polyvinyl alcohol) 的水溶液作為塗附劑，取適量已製備好的二氧化鈦粉末與聚乙醇溶液混和均勻後，塗附在印有金電極氧化鋁基板上，再將塗附好的基板放入烘箱中烘乾一小時，在高溫煅燒爐中先以 100 °C 煅燒一個小時後，再以 450 °C 煅燒兩個小時，即完成二氧化鈦感測器 (TiO_2) 的製備。將二氧化鈦更換成前置好的鈰／二氧化鈦末，步驟與方法相同即可完成鈰／二氧化鈦 (Pd/TiO_2) 及金／二氧化鈦 (Au/TiO_2) 感測器的製備。

2. XRD 與 TEM 量測

本實驗所使用 X 光繞射分析儀為靜宜大學貴儀中心的儀器，其型號為 XRD-6000，廠牌是

SHIMADZU X-RAYDIFFRACTOMETER，光源為 X-RayTube：Cu (15.4060 nm)，操作電壓 (voltage) 為 40.0 keV，操作電流 (current) 為 30.0 mA，實驗時將待測粉末壓實於鋁片模組中，再將鋁片放入 XRD 腔體中，掃描範圍為 $2\theta = 10^\circ - 80^\circ$ ，掃描速率為 $2^\circ/\text{min}$ 。本實驗所使用的穿透式電子顯微鏡為中興大學奈米科技中心所提供，其型號為 (JEM-2010 TEM)，處理 TEM 樣品之程序為將樣品做稀釋，比例為 10：1 (無水乙醇：樣品)，將稀釋好之樣品放入 185 W 功率、40 kHz 頻率之超音波震盪器中，振盪約 10 分鐘。從超音波震盪器取出後，用滴管取出適當容量，然後滴下 5 滴在 TEM 用的碳膜銅網上，藉以利用碳膜承載粉末樣品。之後樣品經烘箱 100°C 烘乾 24 小時，以清除乙醇溶劑，將經過一天乾化處理之樣品放入 TEM 中開始進行觀察。

3. 氣體測試系統

在進行甲醛氣體感測時，首先將製備好的氣體感測器插在感測電路板上，並開啟泵通入空氣，使用數據擷取系統接收訊號，並用電腦記錄感測器的

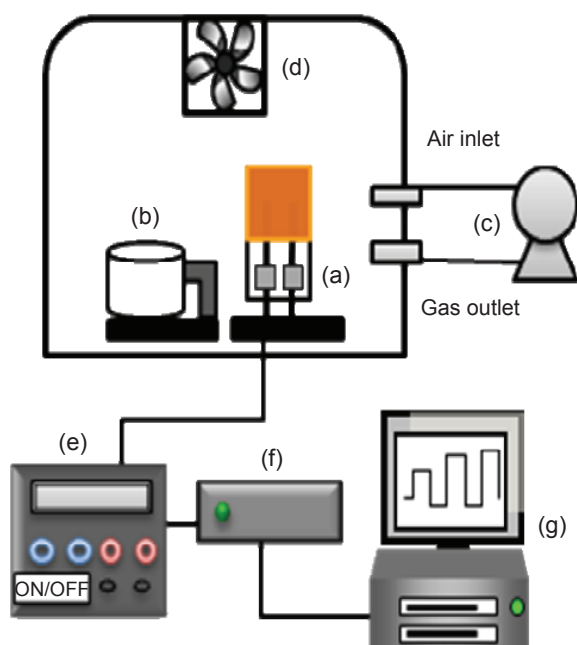


圖 1. 感測甲醛氣體裝置圖，(a) 感測基板、(b) 加熱器、(c) 空氣泵、(d) 風扇、(e) 電源供應器、(f) 數據擷取系統與 (g) 電腦。

電壓值變化，等待電壓值趨於穩定達平衡後，停止空氣通入。將計算好濃度的甲醛液體由樣品注入口注入至加熱器上，藉由加熱形成甲醛氣體，經由風扇裝置均勻擴散至整個密閉裝置後，隨即獲得氣體感測器的電壓變化，感測完畢後再度把泵打開，並通入空氣，使電壓值回復至原來平穩值，裝置如圖 1。感測信號 (sensor response, $S = R_{\text{Air}}/R_{\text{HCHO}}$) 其定義為通入空氣感測訊號達平穩時其電阻值 (R_{Air}) 除以通入甲醛氣體感測訊號達平穩時其電阻值 (R_{HCHO}) 所得的值，而反應時間 (response time, T_{90}) 的定義，為通入甲醛氣體後，電阻訊號由基線 (指通入空氣達平穩時) 至最低電阻訊號強度 90% 所需的時間，而回覆時間 (recovery time, Tr_{90}) 為通入空氣後最低電阻訊號回覆至基線訊號強度 90% 所需的時間。

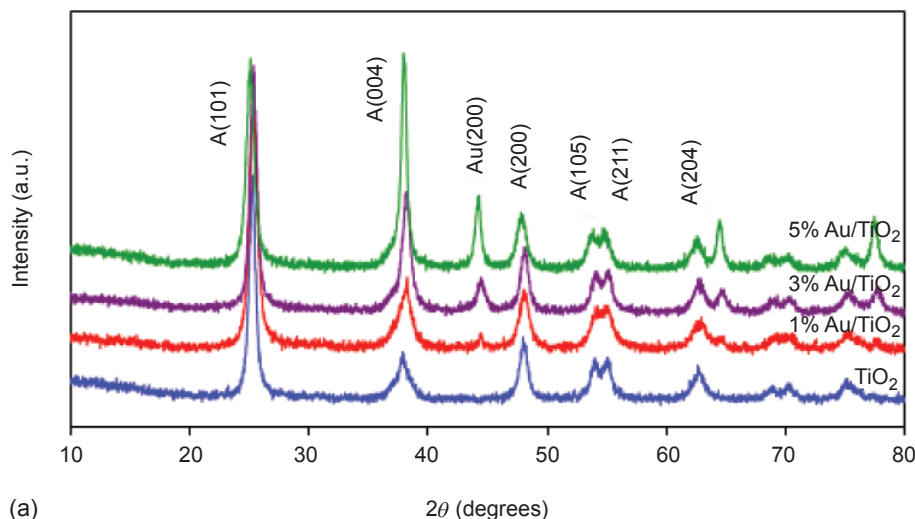
三、結果與討論

1. XRD 結果

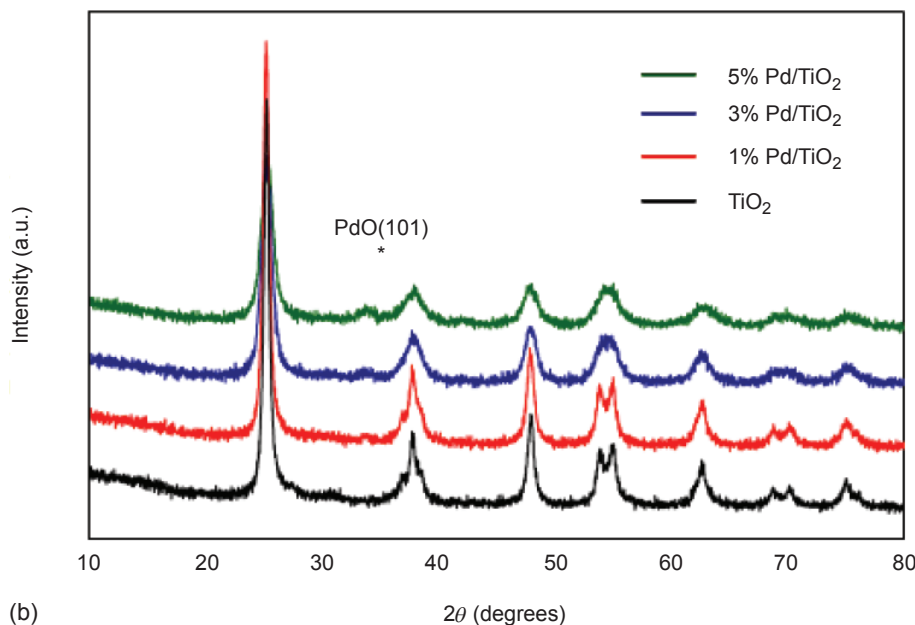
在圖 2(a) 中，分別為二氧化鈦 (TiO_2) 與不同摻金比例作 XRD 繞射分析，而透過 TiO_2 之 XRD 繞射分析，將數據與文獻⁽¹⁰⁾ 相比較，可得知此二氧化鈦為銳鈦礦相 (anatase, A) 晶型，偵測到的特徵峰分別有 25.12° 、 37.82° 、 47.84° 、 53.82° 、 54.98° 與 62.68° 分別為 A(101)、A(004)、A(200)、A(105)、A(211)、A(204)⁽¹¹⁾。另外，將 Au/TiO_2 作 XRD 繞射分析後，從數據中證明貴重金屬金確實摻雜於二氧化鈦中，與文獻相比較後，在圖譜上特徵峰 44.5° 為 Au(200) 晶面確實出現在 XRD 繞射分析圖中。在圖 2(b) 中為二氧化鈦 (TiO_2) 與不同摻 Pd 比例作 XRD 繞射分析，而透過 TiO_2 之 XRD 繞射分析，將數據與文獻⁽¹⁰⁾ 相比較，我們可從中得知，此二氧化鈦為銳鈦礦相 (anatase, A) 晶型，而 PdO 主要以 (101) 的晶相存在。

2. TEM 結果

圖 3(a)、(b) 及 (c) 顯示了 TiO_2 、1% Au/TiO_2 與 1% Pd/TiO_2 之穿透式電子顯微鏡之影像，由圖 3(a) TiO_2 的分析我們與文獻⁽¹⁰⁾ 相對照，證實本研究所自製合成的二氧化鈦其晶型結構為銳鈦礦相，



(a)



(b)

圖 2.

(a) TiO_2 及 Au/TiO_2 之 XRD 圖譜，(b) TiO_2 及 Pd/TiO_2 之 XRD 圖譜。

$\text{TiO}_2(101)$ 晶格間距為 $d = 0.35 \text{ nm}$ 。而在圖 3(b)中可以看到有兩種不同的晶格線清晰的呈現，透過計算與文獻比對後，確實在此圖可以同時發現，銳鈦礦相的 $\text{TiO}_2(101)$ 晶格間距為 $d = 0.35 \text{ nm}$ ，與 $\text{Au}(200)$ 晶格間距 $d = 0.22 \text{ nm}$ ，從圖中晶格線的分佈與排列，說明貴重金屬 Au 確實覆蓋於二氧化鈦之上。圖 3(c) 中可以看到有兩種不同的晶格線清晰地呈現。透過計算與文獻比對後，確實在此圖可以同時發現，銳鈦礦相的 $\text{TiO}_2(101)$ 晶格間距為 $d = 0.35 \text{ nm}$ ，與 $\text{PdO}(101)$ 晶格間距 $d = 0.26 \text{ nm}$ ，從圖中晶格線的分佈與排列，說明貴重金屬 PdO 覆蓋於二氧化鈦之上。

由 TEM 圖譜中，我們可以估算其二氧化鈦晶粒大小約為 12.3 nm ，而摻雜於其中的金晶粒大小約為 13.2 nm ，而與 XRD 圖譜中 (圖 2) 使用 Scherrer 方程式計算之二氧化鈦晶粒大小約為 10 nm ，而摻雜於其中的金晶粒大小約為 $10 - 16 \text{ nm}$ 之數據相近。

3. 氣體感測結果

在感測甲醛氣體實驗中，如圖 4 是典型的感測器電阻信號對時間變化曲線，圖 4 顯示 10 ppm 甲醛氣體在 $1\% \text{ Au/TiO}_2$ 材料之感測電阻對時間變化，在空氣中電阻信號較高，通入甲醛氣體後，信

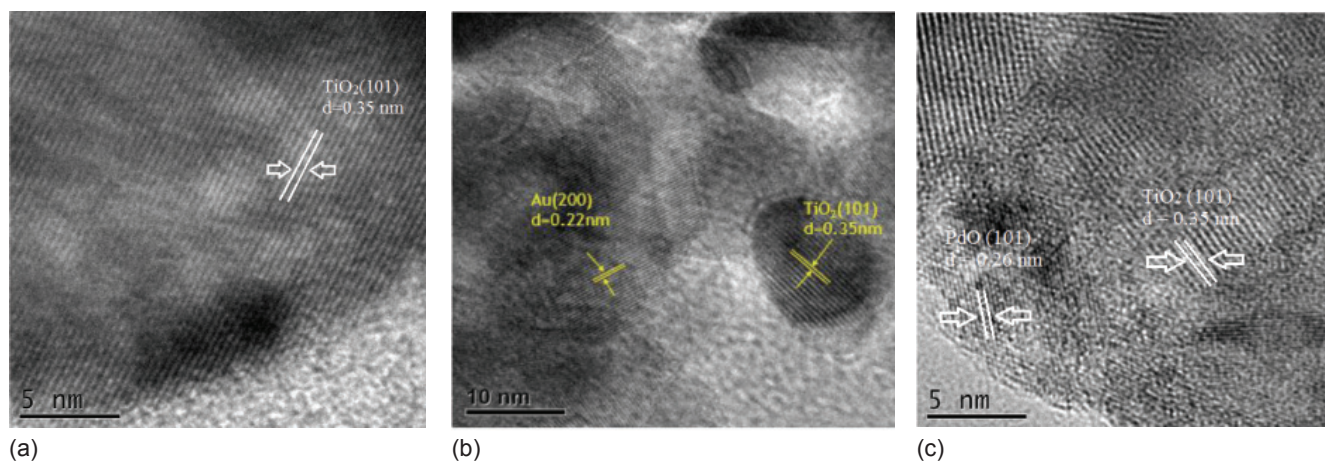


圖 3. (a) TiO_2 、(b) 1% Au/TiO_2 、(c) 1% Pd/TiO_2 之 TEM 圖譜。

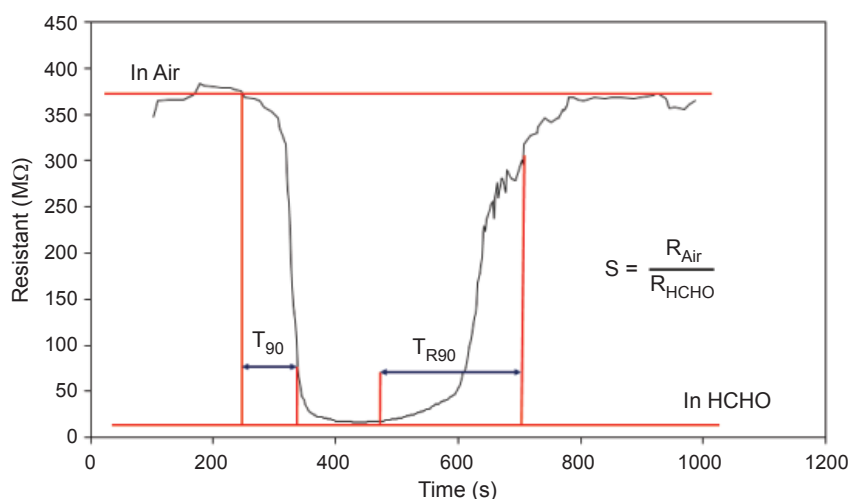


圖 4.
10 ppm 甲醛氣體在 1% Au/TiO_2 材料之感測電阻對時間變化。

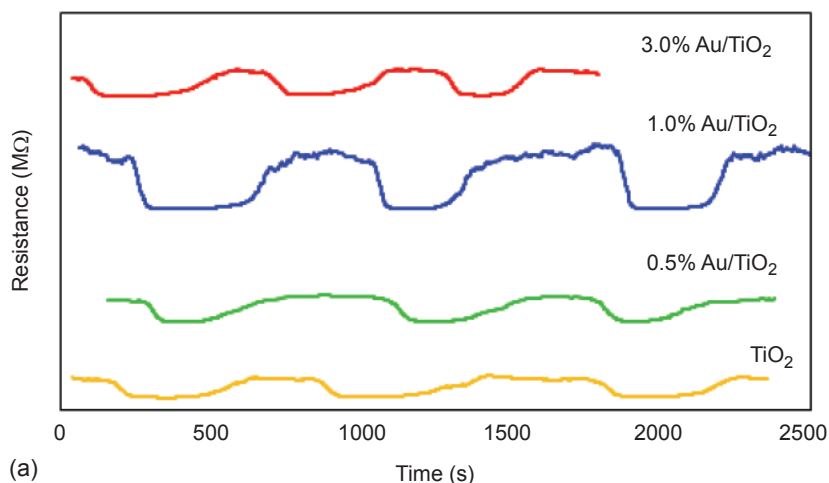
號會降低至平穩值。移除甲醛氣體後，信號又回到空氣中電阻信號值。我們將不同金屬摻雜於二氧化鈦作，分別有金 (Au)、銀 (Ag)、鉑 (Pt)、鈀 (Pd) 與未摻雜的二氧化鈦針對 10 ppm 甲醛氣體感測實驗，如表 3 所示。表 3 顯示 TiO_2 材料之感測訊號為 6.1，反應時間及回復時間分別為 164 秒及 275 秒。添加重量百分比 1% 的 Au、Ag、Pt 及 Pd 感測信號皆增加，其中以 Au 及 Pd 增加較多，分別為 20.7 及 20.6、Au 及 Pd 提升感測信號約 3 倍。

以貴金屬金 (Au) 摻雜於二氧化鈦中，探討摻雜不同比例下對偵測甲醛氣體有何影響，摻雜的比例分別有 0.5%、1%、3% Au/TiO_2 ，偵測條件在室溫條件下以 10 ppm 的甲醛作測試，由圖 5(a) 中可以看到感測訊號曲線都是由上至下，即通入甲醛氣

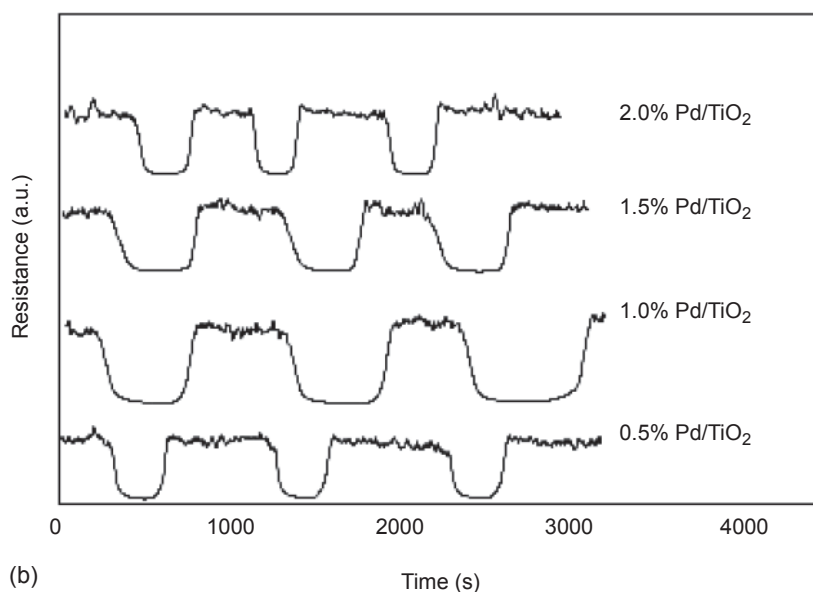
體後感測器電阻降低，由此可得知，此 TiO_2 感測器材料為一 n 型半導體氣體感測器。圖 5(a) 也顯示 3 重復性測試感測器基線平穩，因此短期再現性不錯。由表 4 所整理的數據中顯示，在不同摻雜比

表 3. 不同感測材料針對 10 ppm 甲醛氣體之感測特性。

感測材料	感測信號 (Sensor response, S)	反應時間 (response time, T_{90}) (s)	回復時間 (recovery time, T_{R90}) (s)
TiO_2	6.1	164	275
1% Au/TiO_2	20.7	66	250
1% Ag/TiO_2	15.3	124	168
1% Pt/TiO_2	13.5	288	234
1% Pd/TiO_2	21.9	88	167



(a)



(b)

圖 5.

(a) TiO_2 與不同含量 Au/TiO_2 之感測曲線，(b) 不同含量 Pd/TiO_2 之感測曲線。

例下，以 1% Au/TiO_2 有最好的感測訊號，在甲醛氣體 10 ppm 的條件下，感測信號可達 20.6， T_{90} 為 66 秒， T_{r90} 為 250 秒，反應時間及回復時間分別都較 TiO_2 為少。感測信號並沒有隨著摻金量的增加而遞增，摻雜過多的金反而讓金顆粒與二氧化鈦顆粒彼此堆疊，堵塞住了原有的微孔隙，降低了可吸附甲醛氣體的表面位置。

以貴金屬鈀 (Pd) 摻雜於二氧化鈦中，探討摻雜不同比例下對偵測甲醛氣體有何影響，摻雜的比例分別有 0.5%、1%、1.5%、2% Pd/TiO_2 ，偵測條件為在室溫條件下以 10 ppm 的甲醛作測試，由圖 5(b) 中可以看到感測訊號曲線都是由上至下，得知此感測器為一 n 型半導體氣體感測器。由表 4 所整

理的數據中顯示，在不同摻雜比例下，以 1% Pd/TiO_2 有最好的感測訊號，在甲醛氣體 10 ppm 的條件下，感測信號可達 21.9， T_{90} 為 88 秒， T_{r90} 為 167 秒，反應時間及回復時間分別都較 TiO_2 為少。感測信號並沒有隨著摻 Pd 量的增加而遞增，摻雜過多的 Pd 反而讓 PdO 顆粒與二氧化鈦顆粒彼此堆疊，堵塞住了原有的微孔隙，降低了可吸附甲醛氣體的表面位置。

圖 6 顯示不同濃度甲醛氣體感測實驗中，使用 TiO_2 1% Au/TiO_2 與 1% Pd/TiO_2 氣體感測材料作不同甲醛氣體濃度的感測實驗比較，分別是 1 至 35 ppm 的甲醛氣體在室溫條件下作感測實驗，其感測信號對濃度的變化圖中，可以得知氣體濃度的

表 4.
不同金屬添加量對 10 ppm 甲醛氣體
之感測特性。

感測材料	感測信號 (Sensor response, S)	反應時間 (response time, T90) (s)	回復時間 (recovery time, Tr90) (s)
0.5% Au/TiO ₂	5.9	60	134
1.0% Au/TiO ₂	20.6	66	250
2.0% Au/TiO ₂	7.8	118	298
3.0% Au/TiO ₂	5.4	102	156
0.5% Pd/TiO ₂	20.5	60	130
1.0% Pd/TiO ₂	21.9	88	167
1.5% Pd/TiO ₂	17.4	70	152
2.0% Pd/TiO ₂	17.0	94	132

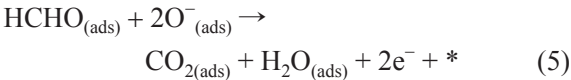
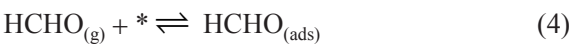
增加，感測信號也隨之增加，以 1% Pd/TiO₂ 及 1% Au/TiO₂ 材料作為氣體感測器材料，在不同 HCHO 濃度下有很好的促進效果。由此實驗可證明此 1% Au/TiO₂ 與 1% Pd/TiO₂ 材料用於偵側甲醛氣體有很好的效果。

4. 反應機構探討

如圖 7 甲醛氣體感測反應機構示意圖所示，在空氣環境中，氧氣會先吸附於感測材料表面的活性位置 (*) 如 (1) 式，再與感測材料表面的電子吸附形成亞氧離子，如 (2) 與 (3) 式，此時電子濃度下降，感測材料電阻值升高⁽¹¹⁾。

當通入甲醛氣體後，一部分的甲醛會吸附於感測材料表面上的活性位置，如 (4) 式所示，大部分的甲醛氣體分子與亞氧離子吸附，造成電子濃度上

升，此時感測材料電阻值下降，感測訊號向下直至平穩，反應式如 (5) 所示：



當感測訊號平穩後，通入空氣，其反應再回到 (1) 式至 (3) 式，大量電子與亞氧離子反應，造成電子濃度降低，感測材料電阻值升高，感測訊號曲線回覆至初始狀態^(10, 11)。甲醛氣體為一還原性氣體，當通入甲醛氣體時，以 Au/TiO₂ 材料的感測器，其

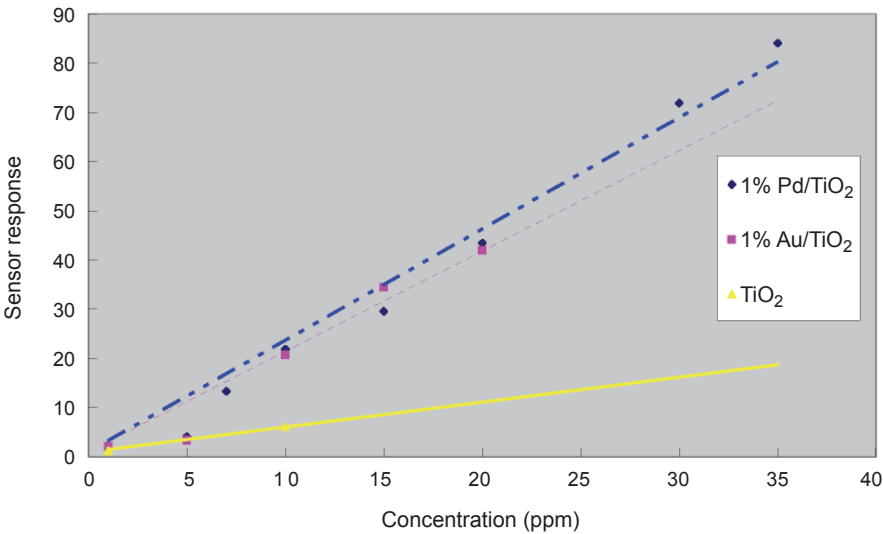


圖 6.
不同濃度甲醛氣體在 TiO₂，1%
Au/TiO₂ 與 1% Pd/TiO₂ 感測信號
的變化。

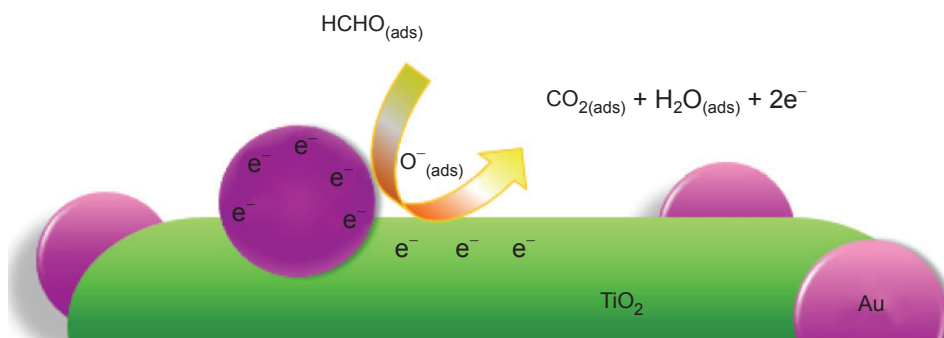


圖 7.
甲醛氣體感測反應機構示意圖。

電阻值開始下降，從前人的文獻，可以證明此材料為一 n 型金屬氧化物半導體感測材料，而其反應機制由圖 7 可清楚得知，當在空氣環境中，感測材料會先吸附空氣中的氧氣，使氧分子與空穴結合，使氧帶負電形成亞氧離子，如 (1) 式至 (3) 式。當甲醛氣體通入時，甲醛會吸附亞氧離子與其反應，如 (5) 式，將電子轉移回感測材料，此時電阻值下降，再將空氣通入後，感測材料會再吸附空氣中的氧氣，並回復至原來的電阻值。

而將 Au 或 Pd 摻雜於二氧化鈦中，目的是為了增加其電子傳導效應，根據前人文獻，也指出 Au 或 Pd 除了能夠幫助傳遞電子外，也能幫助吸附空氣中的氧分子，使其形成亞氧離子與更多的甲醛氣體反應，有效地提高感測信號的強度^(11, 13)。

四、結論

合成奈米二氧化鈦 TiO_2 、 Au/TiO_2 及 Pd/TiO_2 材料，並應用於甲醛氣體感測研究，發現在 10 ppm 甲醛氣體濃度下 TiO_2 材料之感測訊號為 6.1，反應時間及回復時間分別為 164 s 與 275 s。添加 1% Au 與 1% Pd 於 TiO_2 上可以增加 TiO_2 之感測信號，分別為 20.6 與 21.9，並降低反應時間及回復時間。本研究提出了甲醛感測之反應機構 (sensing reaction mechanism)，並解釋 Au 及 Pd 具有促進效果的原因。

參考文獻

1. (a) <http://iaq.epa.gov.tw/indoorair/> 台灣室內空氣品質資訊網，
(b) http://iaq.epa.gov.tw/indoorair/page/12_1.aspx 室內空氣品質

質管理法施行細則：中華民國 101 年 11 月 23 日行政院環境保護署環署空字第 1010106229 號令訂定。

2. S. Lin, D. Li, J. Wu, and X. Li, *Sensors and Actuators B Chemical*, **156**, 505 (2011).
3. H. Xie, C. Sheng, X. Chen, X. Wang, and J. Zhou, *Sensors and Actuators B Chemical*, **168**, 34 (2011).
4. J. Peng and S. Wang, *Journal of Physical Chemistry C*, **111**, 9897 (2007).
5. I. C. Hurtado, G. G. Mandayo, and E. Castano, *Thin Solid Films*, **548**, 665 (2013).
6. N. J. Choi, H. K. Lee, S. E. Moon, and W. S. Yang, *Sensors and Actuators B Chemical*, **175**, 132 (2012).
7. K. Xu, D. Zeng, S. Tian, S. Zhang, and C. Xie, *Sensors and Actuators B Chemical*, **190**, 585 (2014).
8. Y. M. Zhang, Y. T. Lin, J. L. Chen, J. Zhang, Z. Q. Zhu, and Q. J. Liu, *Sensors and Actuators B Chemical*, **190**, 171 (2014).
9. L. Zeng, W. Song, M. Li, D. Zeng, and C. Xie, *Applied Catalysis B: Environmental*, **147**, 490 (2014).
10. J. Xu, X. Ji, and X. Lou, *Sensors and Actuators B Chemical*, **120**, 694 (2007).
11. J. Fang, S. W. Cao, and Z. Wang, *International Journal of Hydrogen energy*, **37**, 17853 (2012).
12. S. Morrison, *Sensors and Actuators B Chemical*, **12**, 425 (1987).
13. P. Hu, N. Han, D. W. Zhang, J. C. Ho, and Y. F. Chan, *Sensors and Actuators B Chemical*, **169**, 74 (2012).



吳仁彰先生為國立清華大學化學博士，現任靜宜大學應用化學系教授。

Ren-Jang Wu received his Ph.D. in chemistry from National Tsing Hua University. He is currently a professor in Department of Applied Chemistry at Providence University.



賴曉芳小姐為靜宜大學應用化學博士。

Hsiao-Fang Lai received her Ph.D. in applied chemistry at Providence University.



鄭創元先生為靜宜大學應用化學碩士，現任九豪精密陶瓷股份有限公司工程師。

Chung-Yun Cheng received his M.S. in applied chemistry from Providence University. He is currently an engineer in Leatec Fine Ceramics Co., LTD.