

# 臺灣二〇〇三年國際科學展覽會

科 別：環境科學科

作品名稱：吸“氣”大法-QCM 對有機氣體之吸附與偵測

得獎獎項：環境科學科第一名

英特爾環境健康與安全獎

美國第五十四屆國際科技展覽會

學 校：國立桃園高級中學

作 者：林庭年、劉亭均

## 作者簡介



作者：林庭年

就讀學校：國立桃園高級中學

興趣：實驗、聽音樂、看課外書

從我有記憶以來，就常常看著爸媽以及公司的叔叔阿姨在實驗室裡忙進忙出，尤其是裡面五顏六色的瓶瓶罐罐最讓我感興趣，但實驗室卻總是瀰漫著一股難聞氣味令我吃不消，也擔心傷害家人的健康。所以利用這次科展的機會我們研究出這套偵測有機氣體的系統，組裝拆卸容易，操作方便，希望能令大家接受並將其發揚光大，讓各個熱愛科學的人都能安全且沒後顧之憂地享受實驗樂趣！

在此謹感謝我的好夥伴小綠、安強老師及老爸的幫助和指導，使我受益良多！

## 作者簡介



作者：劉亭均

就讀學校：國立桃園高級中學

興趣：做實驗、看書

從小我就生長在一個充滿化學藥品的家庭，家裡是開化學工廠的，所以從小就看著爸爸和叔叔做化學實驗，在潛移默化之下，漸漸的也對做實驗產生了興趣。因此，當有同學談起科展時，並邀請參加，我就毫不猶豫的答應了，於是我就一股腦地投進了科學研究的懷抱中，我們在科展投入了很多時間，老師也都很照顧我們，給了我們許多指導和建議。我們在科學研究中得到了許多知識和樂趣，希望以後能夠再做更多的科學研究。

# 吸“氣”大法—QCM 對有機氣體之吸附與偵測

中文摘要：

化學實驗中，常常會使用到各種具有揮發性的有機溶劑，如醇類、酸類、醛類及酮類等。當吸入過量的揮發性有機溶劑時，將會對人體造成嚴重的傷害，故使用時格外需要留意。有鑑於此，我們開始著手研究如何偵測氣相中的有機氣體分子。

本研究中，我們利用聚苯胺薄膜吸附氣體分子的特性並結合對質量變化極靈敏的石英晶體微天平，自行設計了一套簡單、藥品用量少且不需昂貴儀器的實驗系統。藉由此系統，我們有效的針對各種揮發性有機溶劑進行偵測，並進一步地探討不同氣體分子對於聚苯胺薄膜的吸附現象。

關鍵詞：聚苯胺、氣體感測

英文摘要：

Students usually use volatile organic solvent in laboratorys such as alcohols, carboxylic acids, aldehydes, ketones, etc. It will injure our body when we breathe in too much volatile organic solvent. For this purpose, we begin to study how to detect volatile organic compound in air.

In this work, we combine polyaniline membrane which can adsorb gas molecules and quartz crystal microbalance which is highly sensitive to mass changes to design a simple and inexpensive system which needs only little chemicals. With this system, we can effectively detect different volatile organic compounds. Furthermore, we can also study the adsorption of polyaniline membrane for different volatile organic compounds.

**keywords : polyaniline 、 gas detection**

## 壹、研究動機：

當我們進行化學實驗時，常常會使用到各種有機溶劑，如醇類、酸類、醛類及酮類等。這些揮發性有機溶劑通常會對人體造成傷害甚至導致癌症，因此使用時格外需要留意。然而常常因為同學的輕忽，使其置身危險而毫不自覺，無意中吸入了有害之有機物，影響健康甚巨。為此，我們希望能夠研究一套可以針對高中化學實驗室中常見有機溶劑進行偵測的系統，來防範實驗室中過量的揮發性有機溶劑可能造成的傷害。

## 貳、研究目的：

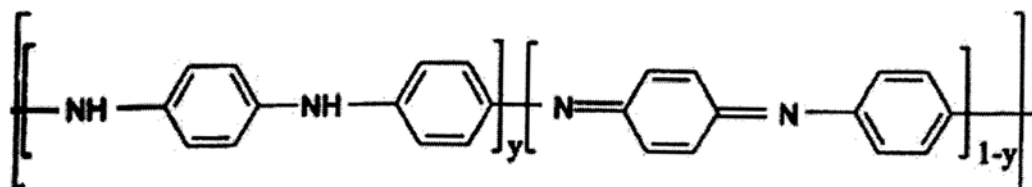
- 一、以電化學方法製備可感測揮發性有機分子之聚苯胺薄膜
- 二、自行建立石英晶體微天平（QCM）實驗系統
- 三、以聚苯胺薄膜結合 QCM 系統感測各種揮發性有機溶劑
- 四、藉由實驗數據探討聚苯胺薄膜與不同有機氣體分子之吸附現象

## 參、實驗原理：

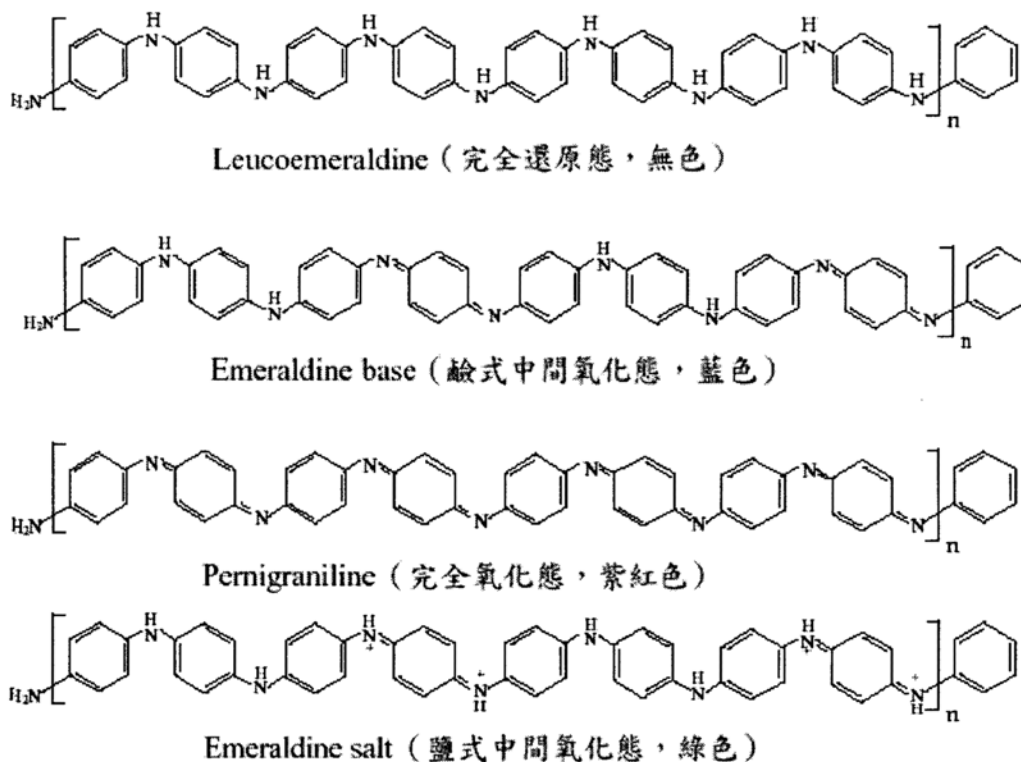
### 一、聚苯胺簡介：

聚苯胺在 1835 年就已被發現，但當時並未發現其重要性，直到發現其具有導電性質後，才開始引發學者們的興趣。由於這種導電性聚合物具備優異的機械性質及易加工性，更讓研究者積極投入研究工作。聚苯胺是用苯胺在酸性的條件下，加入氧化劑（ $K_2Cr_2O_7$  或  $(NH_4)_2S_2O_8$ ）或用等電位法，循環伏安法聚合而成的墨綠色產品（聚苯胺的化學結構通式如圖(1)所示）。聚苯胺一般可分為三種狀態，完全還原（無色）、中間氧化（藍色）、完全氧化（紫紅色），但是此三種狀態下聚苯胺均不具導電性，唯有經過質子酸摻雜後產生氧化態的鹽類（綠色）時，才會導電。此四種型態之結構，如圖(2)所示。

導電高分子通常被用來作為吸附型氣體感測器，其原理為當氣體分子吸附在導電高分子薄膜時，會改變原有導電高分子之電子組態而影響膜的電性，因此可藉由薄膜的電性變化來測知所吸附之氣體分子含量，聚苯胺即為其中的一例。本實驗中，我們嘗試利用聚苯胺吸附氣體的性質，改以偵測薄膜吸附氣體分子時所造成的質量變化來瞭解聚苯胺薄膜之吸附特性，並進一步探討其實用價值。



圖(1) 聚苯胺的化學結構通式

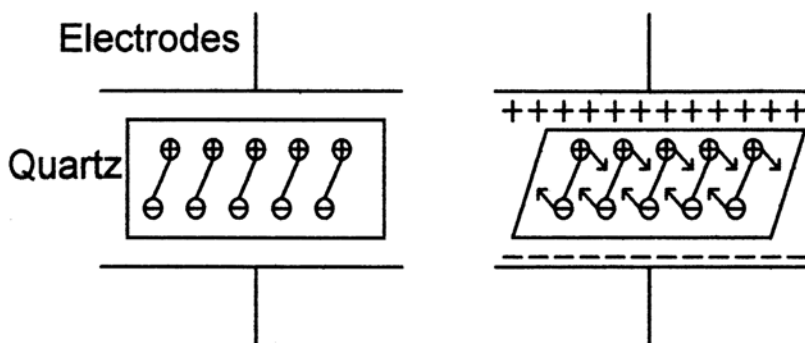


圖(2) 不同狀態之聚苯胺結構

二、QCM 原理：

1. 石英振盪器之壓電性質：

壓電效應是在 1880 年時由 Jacques 和 Pierre Curie 所發現。他們發現某些晶體（如石英）的表面施加壓力會得到一回應的電壓跨過晶體，這種現象就是壓電效應。而至於反壓電效應則是壓電效應的一體兩面，壓電效應是藉壓力產生電壓；反壓電效應則是施加電壓在晶體的表面，由晶體產生相對應的張力（如圖(3)所示）。



圖(3) 石英晶體之反壓電效應圖

1920 年代，Cady 證明此反壓電效應能被應用於製造一穩定的振盪回路，即利用外加電場使晶體產生一機械應變，再測量其形變所產生之振盪頻率。由於石英在振盪時有最小的能量耗損，故可視為一理想的振盪器，再者，其售價低廉、材質堅固、易於製造及對化學物質反應性低，故石英振盪器被廣泛的用於頻率控制及濾波電路（filter circuit）上。此外，因為晶體基板的晶體對稱性、切割角度的不同，因此在一定電場下，晶體會不同之應變，因而可設計出不同的元件。

## 2. 石英晶體微天平簡介：

石英晶體微天平（Quartz Crystal Microbalance，簡稱 QCM）最早是由 Sauerbrey 所發展，因石英本身具有反壓電效應的特性，當在石英晶體的表面施加電場時，石英晶體便會因此而振盪。而振盪的頻率會隨著吸附在石英晶體表面的質量多寡而改變；頻率的改變量與吸附的質量成正比，吸附的質量愈多，頻率下降的也愈多。而且頻率的變化對吸附質量的變化是很靈敏的。根據 Sauerbrey equation，當使用 10 MHz 的石英晶體時，吸附質量每增加  $4.41 \text{ ng} / \text{cm}^2$ ，就會使振盪頻率下降 1 Hz，十分靈敏，因此常被應用於偵測氣態分子吸附在石英晶體表面造成的質量變化。本實驗即是利用 QCM 的特性，將聚苯胺修飾於石英晶體上，藉由有機氣體吸附於聚苯胺薄膜時所造成的頻率變化（質量變化），來偵測各類揮發性有機溶劑，並研究不同分子與聚苯胺薄膜的吸附性。

Sauerbrey equation :

$$\Delta f = -2.3 \times 10^{-6} f_0^2 \left( \frac{M}{A} \right)$$

其中， $\Delta f$ ：振盪頻率變化

M：吸附質量

$f_0$ ：基頻（10 MHz）

A：電極表面積

## 肆、研究方法：

### 一、實驗藥品與器材：

#### 1. 實驗藥品：

- ① 苯胺
- ② 濃鹽酸
- ③ 乙醇
- ④ 丁醇
- ⑤ 異丁醇
- ⑥ 第三丁醇
- ⑦ 正己烷
- ⑧ 環己烷
- ⑨ 環己烯
- ⑩ 丙醛
- ⑪ 丙酮
- ⑫ 乙醚
- ⑬ 甲苯

- ⑭乙酸
- ⑮高純度氮氣
- ⑯乾燥劑

## 2.實驗器材：

- ①旋轉加熱器
- ②烘箱
- ③溫度計
- ④電源供應器
- ⑤鉑絲
- ⑥三用電表
- ⑦石英晶體
- ⑧玻璃注射針
- ⑨頻率計數器
- ⑩自製壓克力電解容槽
- ⑪自製振盪器
- ⑫恆溫水槽

## 二、QCM 前處理：

本實驗所使用的石英晶體（購自一般之電子材料店，價格為新台幣 15 元，較一般研究機構所使用的石英晶體，價格便宜 15 倍以上）為 AT-Cut 10 MHz，以鋸子鋸開其外圍之金屬殼，取出其內部之石英晶片以供實驗使用。石英晶片的雙面覆有銀電極，電極的直徑為 0.44 公分。取出之晶片先以氮氣吹拂其表面，除去表面金屬雜質，接著在測完其基頻後，便可在其中一面的銀電極上，以電化學方法製備感測薄膜（聚苯胺）。

## 三、振盪器製作：

欲建立石英晶體微天平系統，最重要的關鍵就在於振盪器的製作。因此我們搜尋文獻資料，參考了 D. A. Butty 所發表的電路圖，自行於電子材料店中購得所需元件，並自行焊接製作振盪電路。

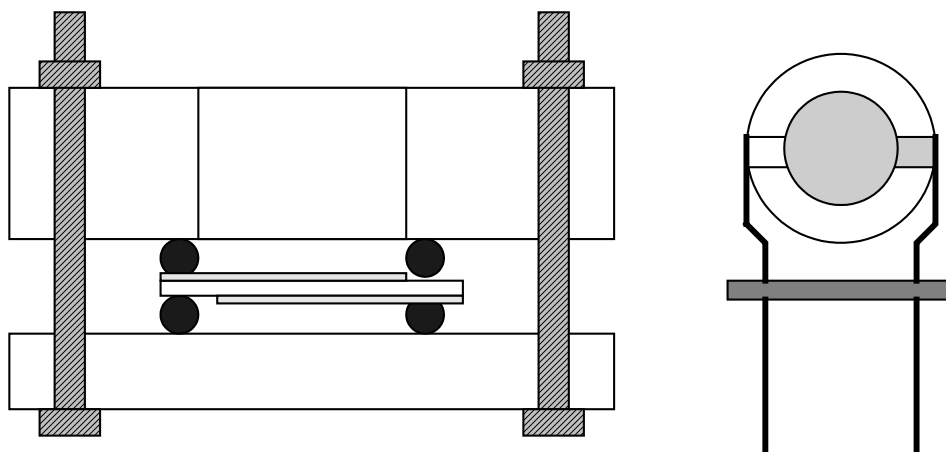
## 四、壓克力容槽製作：

為了進行聚苯胺的電化學實驗，我們自行使用壓克力製作了一個電化學實驗容槽。容槽的設計如圖(4)所示，此容槽以兩片壓克力所組成，厚度為 0.8 公分，四周並以鑽頭鑽孔，便於使用螺絲固定。上方的壓克力中央，再以鑽頭鑽孔，直徑約 0.4 公分，實驗時可將苯胺溶液裝入，進行電化學實驗。

## 五、薄膜製備：

用燒杯取 10 mL 之蒸餾水再以量筒取 1 mL 之苯胺倒入水中，再加入 12 M 鹽酸 2 mL（苯胺難溶於水，需加酸以幫助溶解），以磁石加以攪拌，使其完全溶解。待苯胺溶液配製完成後，將已測過基頻的石英晶片裝於自製的壓克力電解容槽中，添加苯胺溶液後，以石英晶片其中一面的銀電極為正極，鉑金屬絲為負極，接上直流電源供應器，並施加

0.8 伏特的電壓，直至銀電極上有一淺綠色之薄膜出現，即停止電源之供應，並取出石英晶片。薄膜製備完成後，先以蒸餾水沖洗電極表面，除去殘餘電解液，再以氮氣吹乾，而後測量其頻率。藉由頻率的變化，我們即可換算出所鍍上去的聚苯胺薄膜質量。由於實驗所使用的電解容槽體積甚小，故每次進行電解實驗所需之苯胺溶液不到 1 mL，消耗藥品量非常小，可減少藥品的浪費，且實驗產生之廢液相當少。



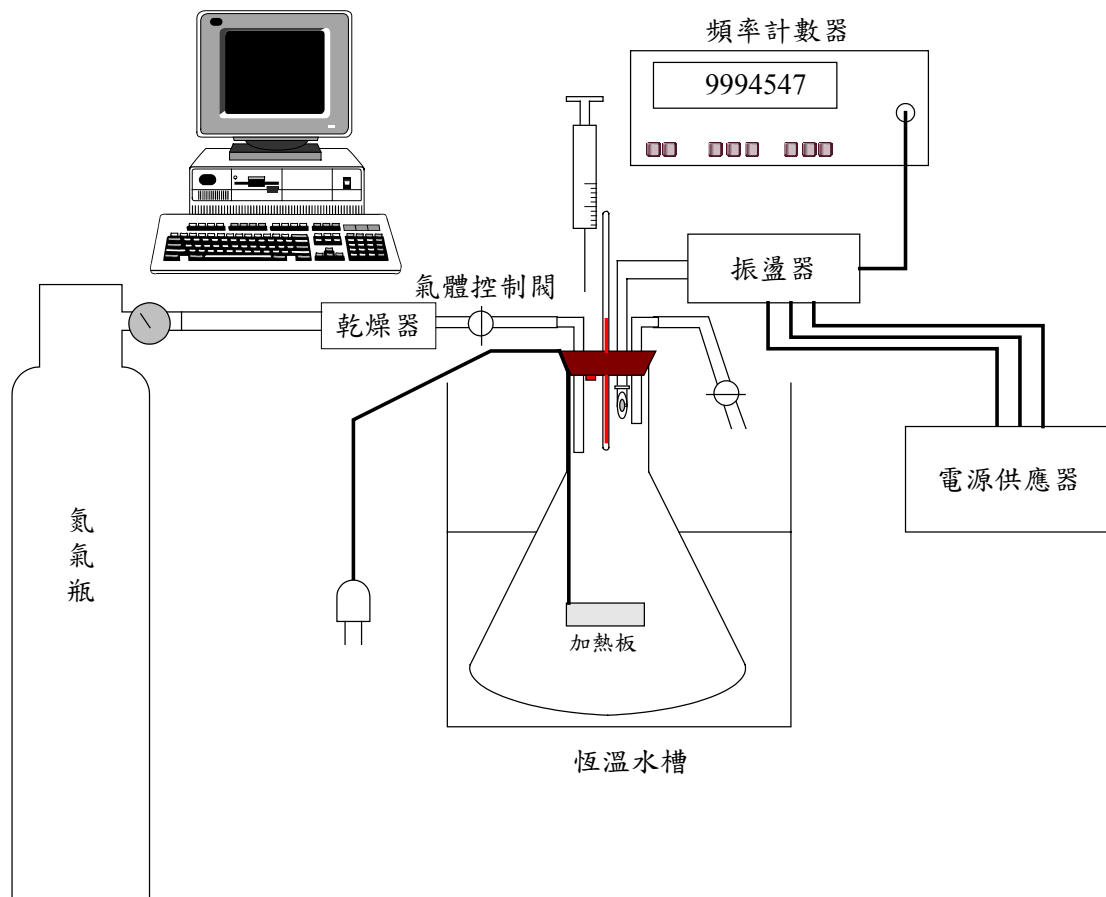
圖(4) 自製壓克力電解容槽

#### 六、實驗裝置：

本實驗之裝置設計如圖(5)所示，系統所使用的背景空氣為除水後的氮氣，偵測室則為 2L 之錐形瓶，瓶外並以恆溫水槽控制實驗溫度。封口的橡皮塞上，鑽上六個洞，其中兩個用於控制背景氣體的流進與流出、兩個用於連接導線、一個用於放置溫度計，最後一個則用於玻璃注射針注射口（此洞末端另以一小橡皮塞封住，使氣體不致外洩）。

#### 七、實驗步驟：

1. 打開恆溫水槽，將偵測室溫度控制在 30°C。將切割好的石英晶片與振盪器相連接，放置於偵測室內。通入氮氣，待頻率穩定後，記錄其基頻。
2. 將空白石英晶片裝置於壓克力容槽中，以直流電源供應器施加 1 伏特的電壓，待表面產生一薄膜後，停止通電，並取出石英晶片。
3. 以蒸餾水清洗電極表面，並以氮氣吹拂，待石英晶片完全乾燥後，將其放置於偵測室內，通入氮氣，待其頻率穩定後，記錄鍍膜後的晶片基頻。
4. 關閉氣體控制閥及氮氣，注入分析物進行感測，待訊號達穩定平衡後，記錄吸附氣體之晶片的頻率。
5. 打開氣體控制閥及氮氣，進行分析物的脫附，待頻率穩定且恢復至接近原先之基頻時，則可進行下一次的分析。

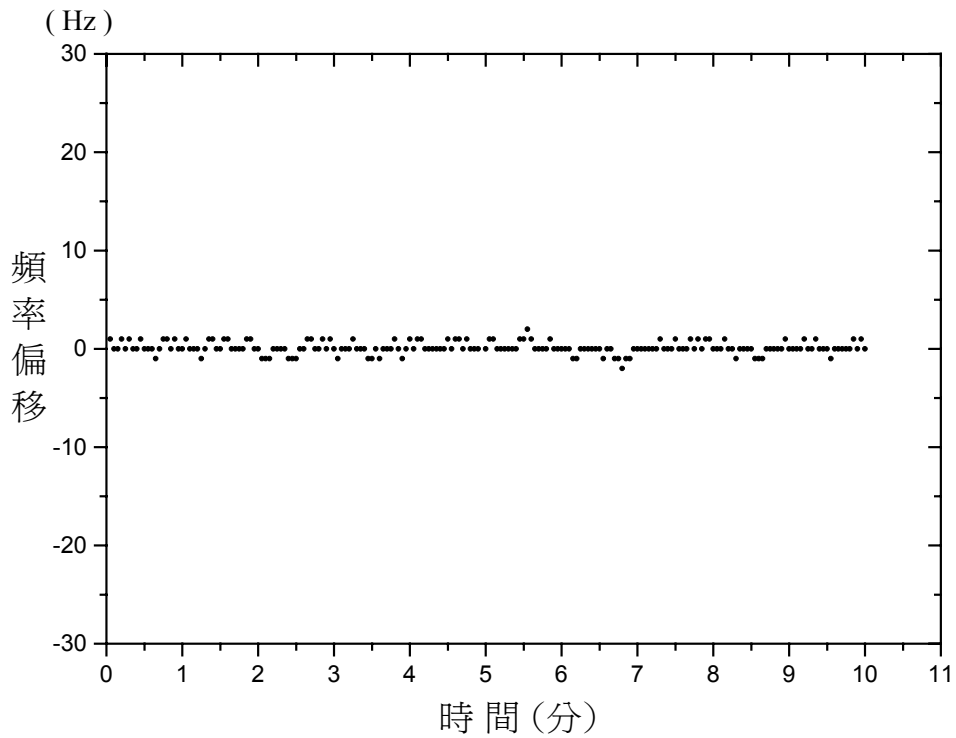


圖(5) 實驗裝置圖

## 伍、研究結果與討論：

### 一、穩定性測試：

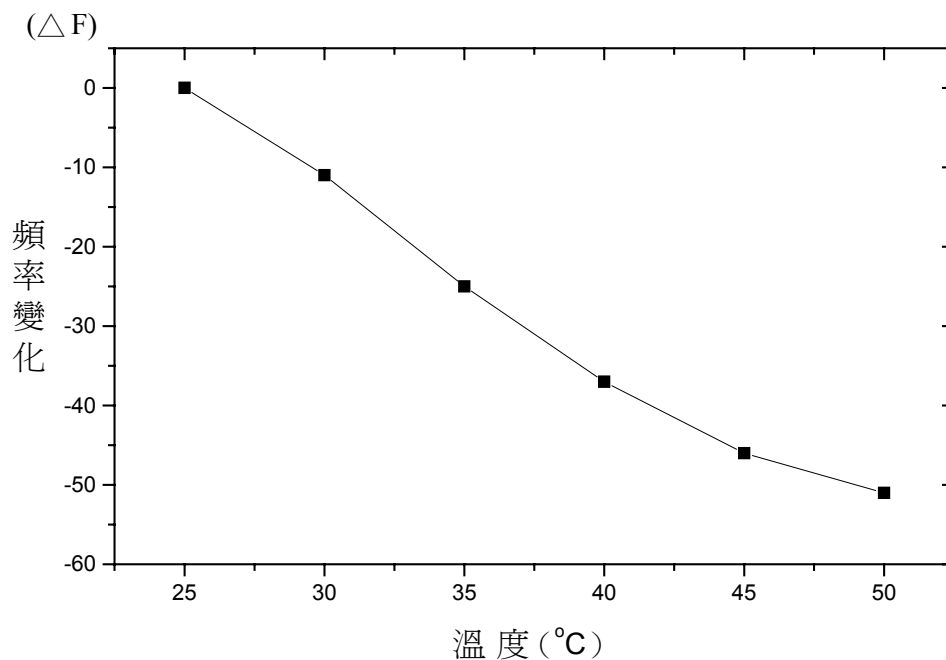
因為 QCM 是非常靈敏的儀器，在系統建立完成之後，首先需進行其穩定性的測試。實驗的方法是將一片剛切割完成的石英晶片，裝置於系統中並同時通入氮氣，十分鐘後，將氣體控制閥關閉，使石英晶片頻率逐漸穩定。當頻率穩定時，每 3 秒鐘記錄一次頻率數據，連續記錄十分鐘，所得的結果如圖(6)所示。縱軸為頻率變化（將所得的頻率扣除初始頻率所得之值），橫軸為時間，由圖中可看見在 10 分鐘內其頻率的變化（最大及最小頻率差值）約為 $\pm 2\text{Hz}$ 。



圖(6) QCM 之穩定性測試

## 二、溫度效應：

因為本實驗所採用的是 AT-cut 的石英晶片，理論上溫度的影響較小，僅在較高溫度或較低溫度之下，才會有基頻不穩的現象。為了實際瞭解溫度對本偵測系統的影響，因此我們將一片剛處理過的空白石英晶片裝置在系統中，藉由改變恆溫水槽的溫度，讀取頻率的變化。空白石英晶片之基頻與溫度之關係如圖(7)所示，當溫度升高，石英晶片的基頻會隨之而降低。由於溫度會影響石英晶片的頻率，因此進行實驗時，我們以恆溫水槽將溫度控制在 30°C，避免因溫度的改變而影響實驗準確性。



圖(7) 溫度效應：對空白晶片之影響

### 三、氣體感測參數定義：

針對本實驗所得的實驗數據，我們引用參考文獻 1 中的參數定義，來研究聚苯胺感測薄膜對揮發性有機溶劑 (VOC) 之氣體分子的吸附現象。實驗中，以吸附靈敏度 ( $A_{cv}$ ) 來解釋感測薄膜對 VOC 之吸附特性，亦即為每一莫耳的感測薄膜能吸附多少莫耳的 VOC 氣體，以消除不同分子量之影響。實驗參數定義如下：

吸附靈敏度 (adsorptivity)， $A_{cv}$ ：感測薄膜吸附 VOC 氣體之能力。

$$A_{cv} = \frac{\text{VOC 吸附的莫耳數}}{\text{感測薄膜的莫耳數}}$$
$$= \frac{\Delta n_v}{\Delta n_c} = \frac{\Delta m_v / M_v}{\Delta m_c / M_c} = \frac{\Delta f_v}{\Delta f_c} \frac{M_c}{M_v}$$

其中  $\Delta f_c = f_c - f_o$

$\Delta f_v = f_v - f_c$

$f_o$ ：未鍍上聚苯胺的空白石英晶體之頻率

$f_c$ ：鍍上聚苯胺後之石英晶體之頻率

$f_v$ ：吸附 VOC 氣體後之石英晶體頻率

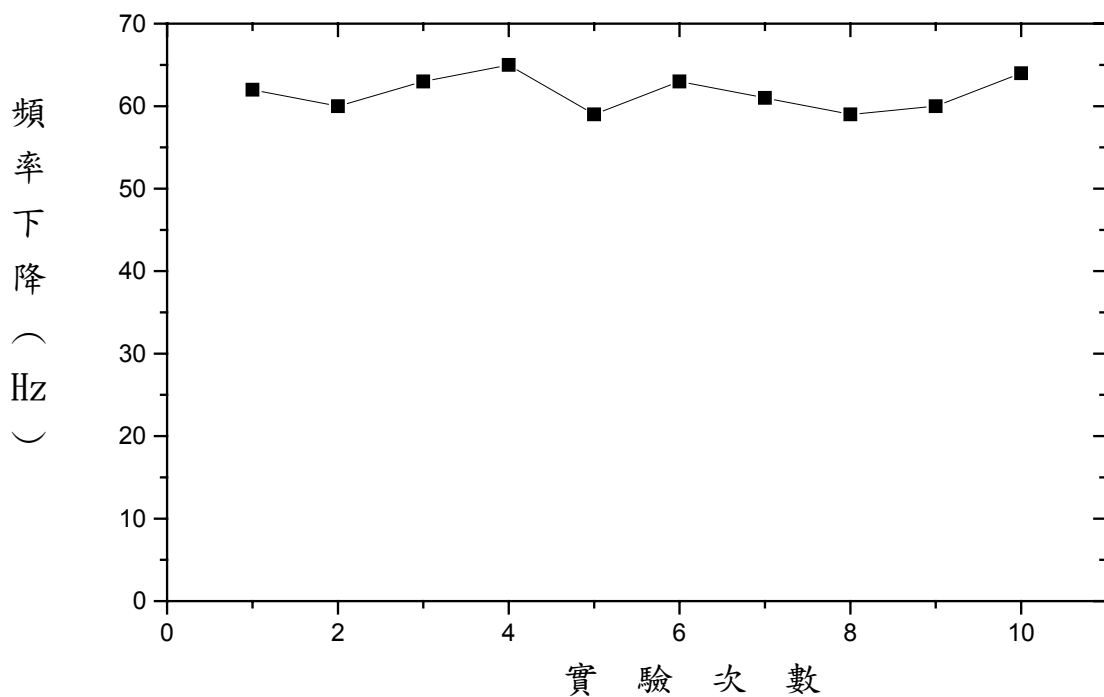
$M_c$ ：聚苯胺成分單體分子量

$M_v$ ：VOC 之分子量

爲了進一步瞭解聚苯胺感測薄膜對不同的揮發性有機溶劑之氣體分子的吸附效應，我們選擇了 12 種實驗室中常見的有機溶劑分別進行氣體的吸附實驗，並對實驗數據進行分析、討論。

#### 四、系統之再現性：

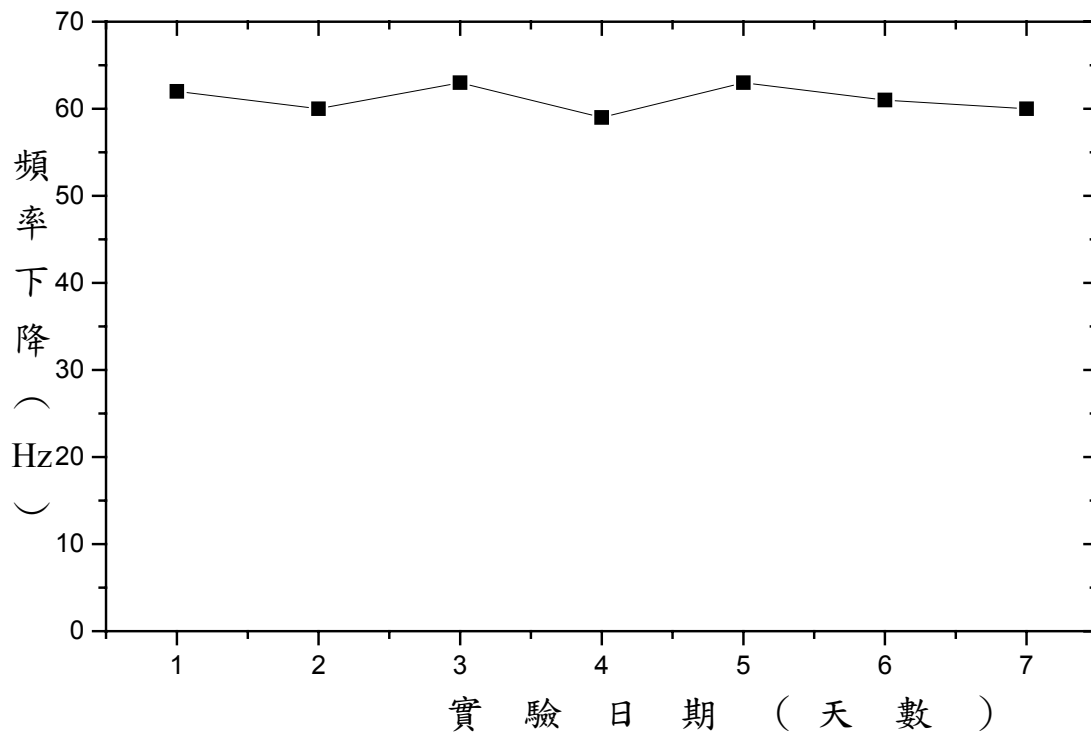
在恆溫 30°C 的條件下，利用同一片聚苯胺石英晶片連續進行十次實驗，每次均注射正丁醇 0.2 mL，並計算各實驗所得之頻率變化，以瞭解本系統之再現性。圖(8)為連續分析十次的結果。將這些結果做統計處理後，得其頻率下降平均值為 61.6 Hz，相對標準偏差 (RSD) 為 3.44 %，再現性尚可。分析誤差最主要原因在於人為操作部分，包含對刻度的判斷是否精確，以及注射之技巧等。



圖(8) 連續進行十次相同實驗之結果

### 五、修飾石英晶體使用期限測試：

爲了進一步瞭解製備出的聚苯胺石英晶片是否會很容易的失去效用，我們利用同一片聚苯胺石英晶片，以一週爲單位，每天進行一次實驗，每次實驗均注射正丁醇 0.2 mL，並計算各實驗所得之頻率變化，其結果如圖(9)所示。由圖可知，本研究所製備之晶片在一週的時間內，並未出現明顯的退化現象。



圖(9) 連續一週進行相同實驗之結果

## 六、薄膜對醇類的感測：

醇類是實驗室中最常被使用到的有機溶劑，因此我們選擇了乙醇、正丁醇、異丁醇及第三丁醇進行實驗，並探討其吸附性。

### 1. 乙醇（密度為 0.789）：

由於購得的玻璃注射器，其最小刻度為 0.2 毫升，因此我們以 0.2 毫升為一個單位，依序注射 0.2 毫升、0.4 毫升、0.6 毫升、0.8 毫升及 1.0 毫升，並記錄其頻率的變化，其結果記錄於表 1。

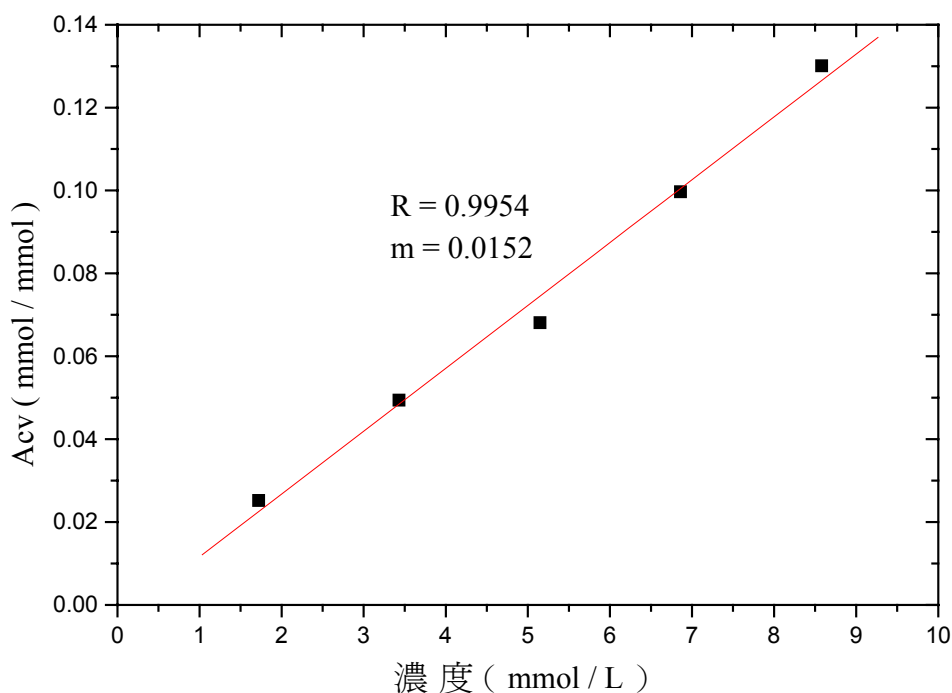
表 1 不同注射量之乙醇感測結果：

注 射 量	0.2 mL	0.4 mL	0.6 mL	0.8 mL	1.0 mL
基 頻	9988358	9988359	9988360	9988362	9988354
偵 測 頻 率	9988276	9988198	9988138	9988037	9987930
頻 率 變 化	82	161	222	325	424

根據上表，我們可以換算出乙醇濃度並根據參數定義求出其吸附量，並整理如表 2 及圖(10)。

表 2 不同乙醇濃度之吸附量：

乙 醇 濃 度 (mmol / L)	1.72	3.43	5.15	6.86	8.58
吸 附 量	0.0252	0.0494	0.0681	0.0997	0.1301



圖(10) 聚苯胺薄膜對乙醇的感測結果

由圖中可以看出，乙醇對於聚苯胺感測薄膜有不錯的感測結果。

2.正丁醇（密度為 0.810）：

對於正丁醇，同樣注射 0.2 毫升、0.4 毫升、0.6 毫升、0.8 毫升及 1.0 毫升，並記錄其頻率的變化，其結果記錄於表 3。

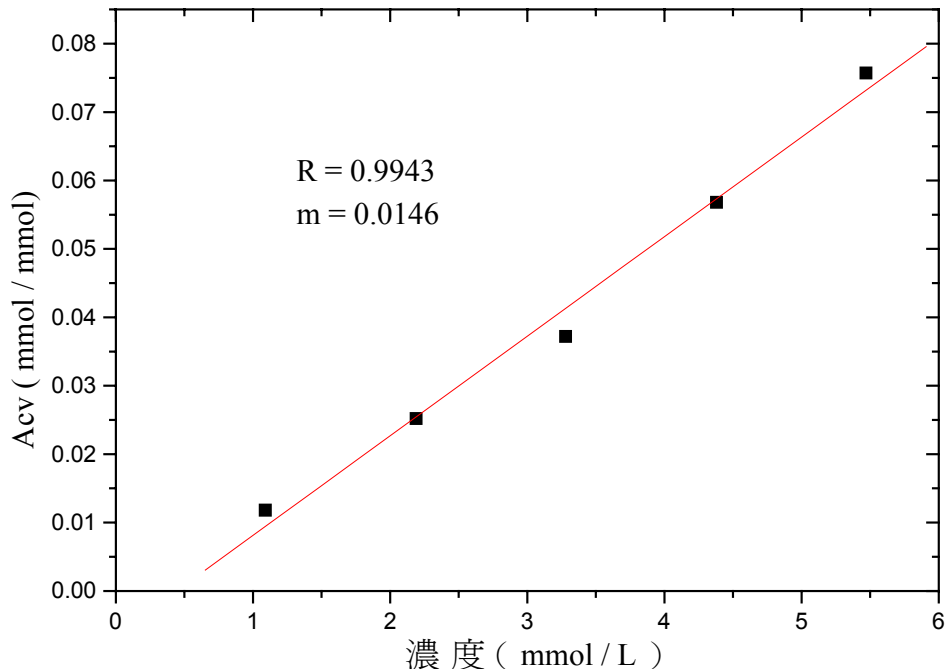
表 3 不同注射量之正丁醇感測結果：

注 射 量	0.2 mL	0.4 mL	0.6 mL	0.8 mL	1.0 mL
基 頻	9988362	9988357	9988360	9988359	9988357
偵 測 頻 率	9988300	9988225	9988165	9988061	9987960
頻 率 變 化	62	132	195	298	397

根據上表，我們可以換算出正丁醇濃度並根據參數定義求出其吸附量，並整理如表 4 及圖(11)。

表 4 不同正丁醇濃度之吸附量：

正 丁 醇 濃 度 (mmol / L)	1.09	2.19	3.28	4.38	5.47
吸 附 量	0.0118	0.0252	0.0372	0.0568	0.0757



圖(11) 聚苯胺薄膜對正丁醇的感測結果

由實驗結果觀察，正丁醇也有不錯的感測結果，但和乙醇相較，則正丁醇的感測結果不如乙醇。

3.異丁醇（密度為 0.802）：

對於異丁醇，同樣注射 0.2 毫升、0.4 毫升、0.6 毫升、0.8 毫升及 1.0 毫升，並記錄其頻率的變化，其結果記錄於表 5。

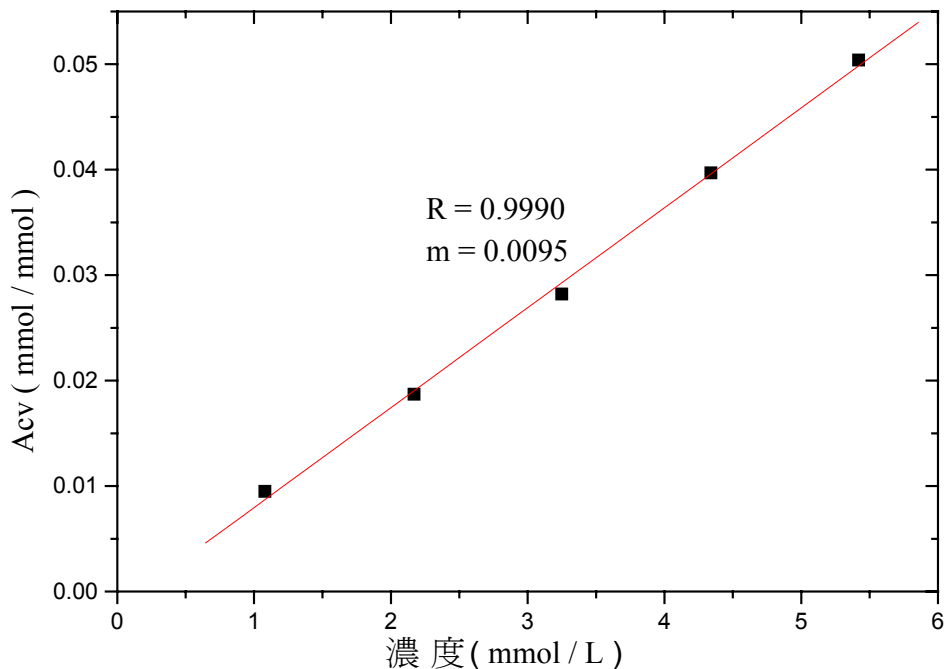
表 5 不同注射量之異丁醇感測結果：

注 射 量	0.2 mL	0.4 mL	0.6 mL	0.8 mL	1.0 mL
基 頻	9988361	9988360	9988359	9988357	9988359
偵 測 頻 率	9988311	9988262	9988211	9988149	9988095
頻 率 變 化	50	98	148	208	264

根據上表，我們可以換算出異丁醇濃度並根據參數定義求出其吸附量，並整理如表 6 及圖(12)。

表 6 不同異丁醇濃度之吸附量：

異 丁 醇 濃 度 (mmol / L)	1.08	2.17	3.25	4.34	5.42
吸 附 量	0.0095	0.0187	0.0282	0.0397	0.0504



圖(12) 聚苯胺薄膜對異丁醇的感測結果

觀察實驗結果，異丁醇仍有不錯的吸附感測，但比之丁醇，則其吸附性較丁醇為差。

4.第三丁醇（密度為 0.789）：

對於第三丁醇，同樣注射 0.2 毫升、0.4 毫升、0.6 毫升、0.8 毫升及 1.0 毫升，並記錄其頻率的變化，其結果記錄於表 7。

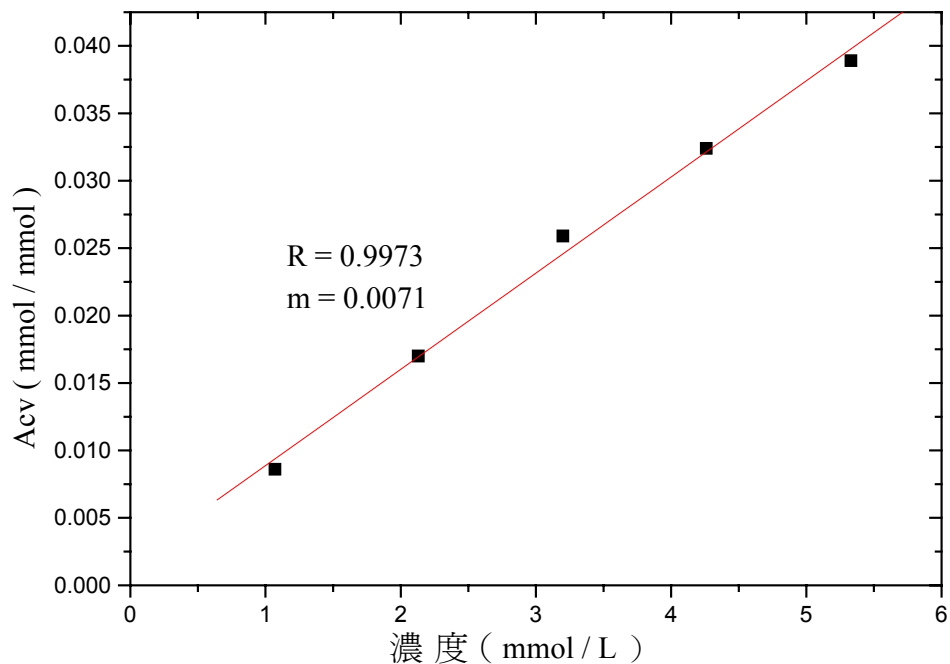
表 7 不同注射量之第三丁醇感測結果：

注 射 量	0.2 mL	0.4 mL	0.6 mL	0.8 mL	1.0 mL
基 頻	9988356	9988355	9988359	9988360	9988357
偵 測 頻 率	9988311	9988266	9988223	9988190	9988153
頻 率 變 化	45	89	136	170	204

根據上表，我們可以換算出第三丁醇濃度並根據參數定義求出其吸附量，並整理如表 8 及圖(13)。

表 8 不同第三丁醇濃度之吸附量：

第三丁醇濃度 (mmol / L)	1.07	2.13	3.20	4.26	5.33
吸 附 量	0.0086	0.0170	0.0259	0.0324	0.0389



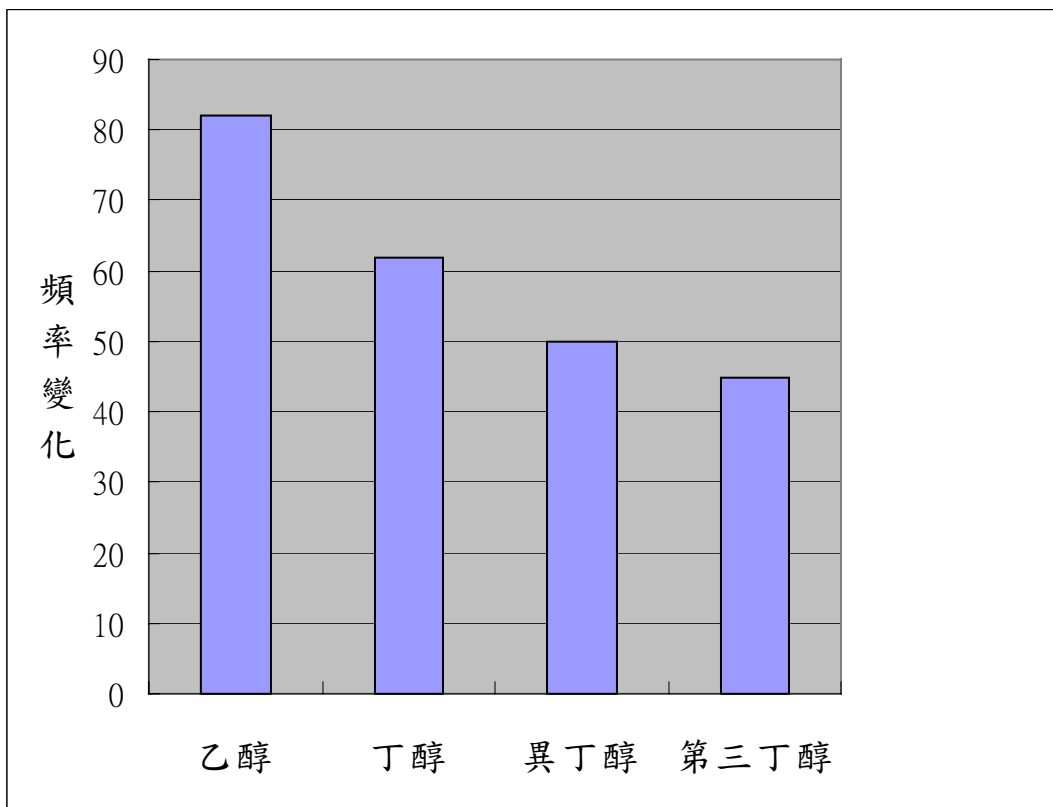
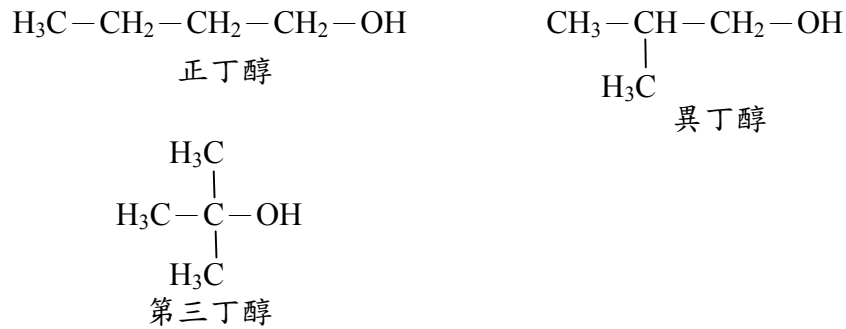
圖(13) 聚苯胺薄膜對第三丁醇的感測結果

觀察實驗結果，雖然第三丁醇有不錯的感測結果，但其吸附性在四種醇類是最差的。

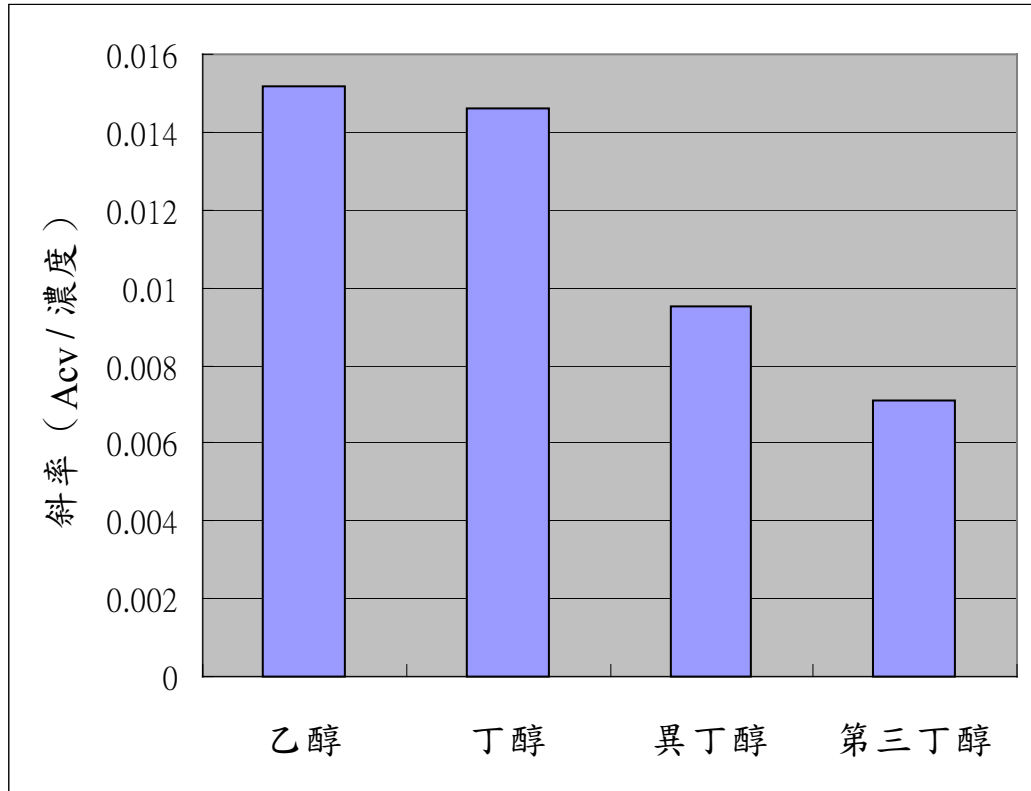
針對四種醇類的感測結果，我們依相同注射量（0.2 mL）及斜率（Acv / 濃度）分別整理如圖(14)及圖(15)。由圖中可以清楚看出，聚苯胺薄膜對於醇類有不錯的感

測結果。對此，我們認為應是醇類帶有極性，與薄膜性質較為接近所致，此外，由於聚苯胺薄膜上具有 N 原子，因此可能與醇類產生氫鍵，使其吸附性大為增加。

同時我們發現不論是以相同的注射量，或是不同醇類之斜率來觀察，實驗結果均是：乙醇 > 正丁醇 > 異丁醇 > 第三丁醇。根據這個結果，我們認為吸附性與醇類的分子結構有關。首先比較乙醇及正丁醇，乙醇分子較小，且其極性大於正丁醇，故其較為容易吸附在感測薄膜上。至於正丁醇、異丁醇及第三丁醇，雖然其分子量相同，但是正丁醇極性較強、接觸面積大，故吸附較強。此外，我們認為異丁醇及第三丁醇之分子結構接觸面積較正丁醇小，且立體阻礙比正丁醇大，使其分子較正丁醇不易吸附於聚苯胺薄膜（正丁醇、異丁醇及第三丁醇結構如下所示）。



圖(14) 相同注射量 (0.2mL) 之不同醇類感測結果



圖(15) 不同醇類之斜率 (Acv / 濃度) 比較

七、薄膜對烷類的感測：

針對烷類的感測研究，我們選擇正己烷及環己烷進行吸附感測實驗。

1. 正己烷（密度為 0.659）：

對於正己烷，同樣注射 0.2 毫升、0.4 毫升、0.6 毫升、0.8 毫升及 1.0 毫升，並記錄其頻率的變化，其結果記錄於表 9。

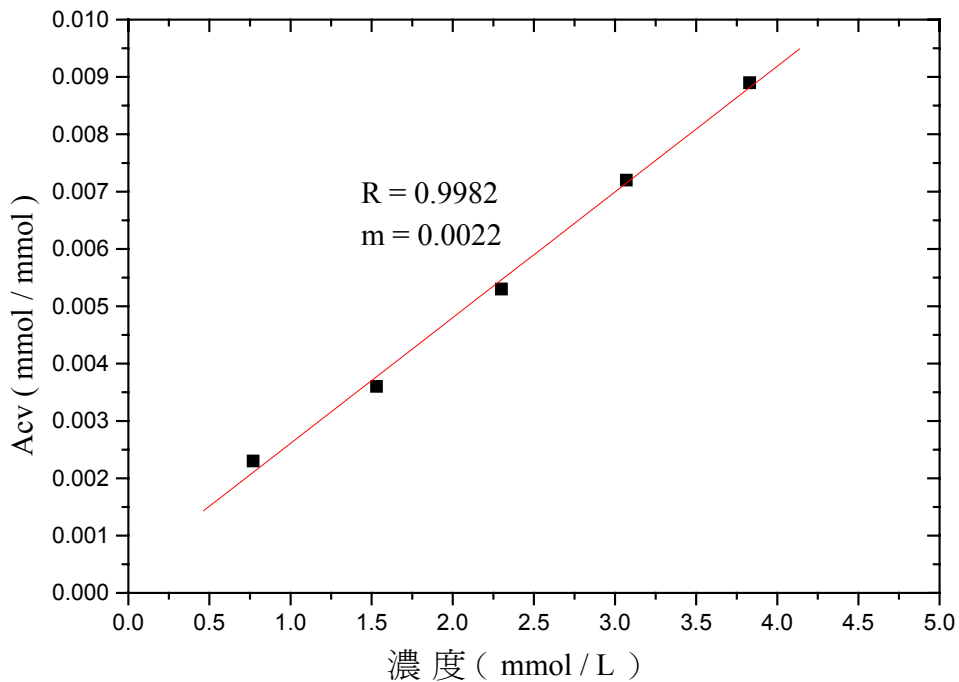
表 9 不同注射量之正己烷感測結果：

注射量	0.2 mL	0.4 mL	0.6 mL	0.8 mL	1.0 mL
基頻	9988357	9988356	9988355	9988358	9988355
偵測頻率	9988343	9988334	9988323	9988314	9988301
頻率變化	14	22	32	44	54

根據上表，我們可以換算出正己烷濃度並根據參數定義求出其吸附量，並整理如表 10 及圖(16)。

表 10 不同正己烷濃度之吸附量：

正己烷濃度 (mmol / L)	0.77	1.53	2.30	3.07	3.83
吸 附 量	0.0023	0.0036	0.0053	0.0072	0.0089



圖(16) 聚苯胺薄膜對正己烷的感測結果

觀察實驗結果，正己烷的吸附感測結果比醇類小了许多。

2.環己烷（密度為 0.778）：

對於環己烷，同樣注射 0.2 毫升、0.4 毫升、0.6 毫升、0.8 毫升及 1.0 毫升，並記錄其頻率的變化，其結果記錄於表 11。

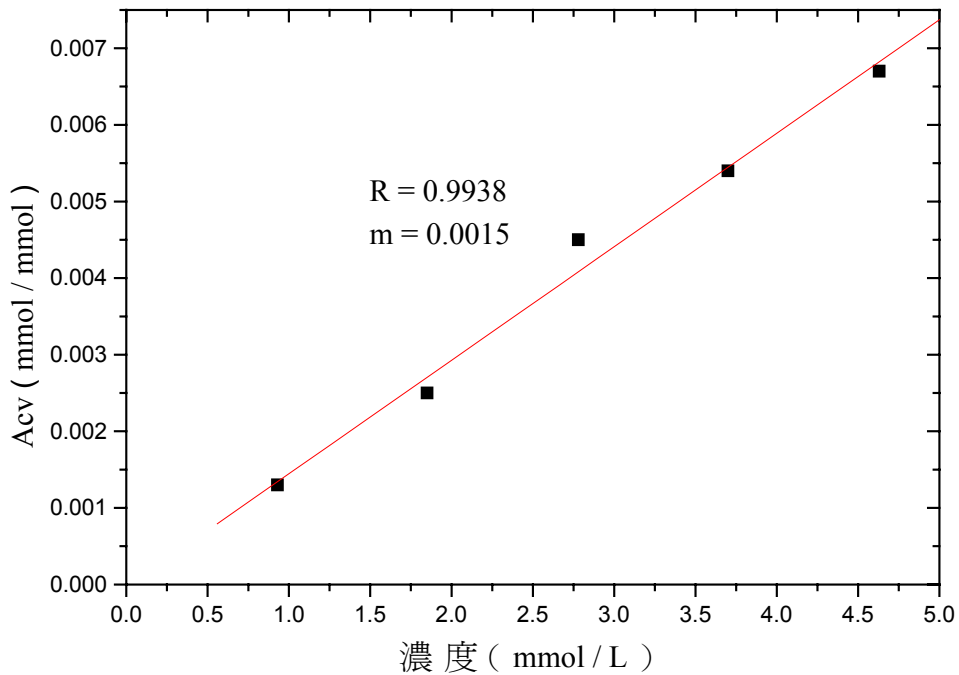
表 11 不同注射量之環己烷感測結果：

注 射 量	0.2 mL	0.4 mL	0.6 mL	0.8 mL	1.0 mL
基 頻	9988355	9988360	9988354	9988357	9988357
偵 測 頻 率	9988347	9988345	9988327	9988325	9988317
頻 率 變 化	8	15	27	32	40

根據上表，我們可以換算出正己烷濃度並根據參數定義求出其吸附量，並整理如表 12 及圖(17)。

表 12 不同環己烷濃度之吸附量：

環己烷濃度 (mmol / L)	0.93	1.85	2.78	3.70	4.63
吸 附 量	0.0013	0.0025	0.0045	0.0054	0.0067



圖(17) 聚苯胺薄膜對環己烷的感測結果

觀察實驗結果，環己烷的吸附感測結果比正己烷還差。

#### 八、薄膜對烯類的感測：

環己烯（密度為 0.810）：

對於環己烯，同樣注射 0.2 毫升、0.4 毫升、0.6 毫升、0.8 毫升及 1.0 毫升，並記錄其頻率的變化，其結果記錄於表 13。

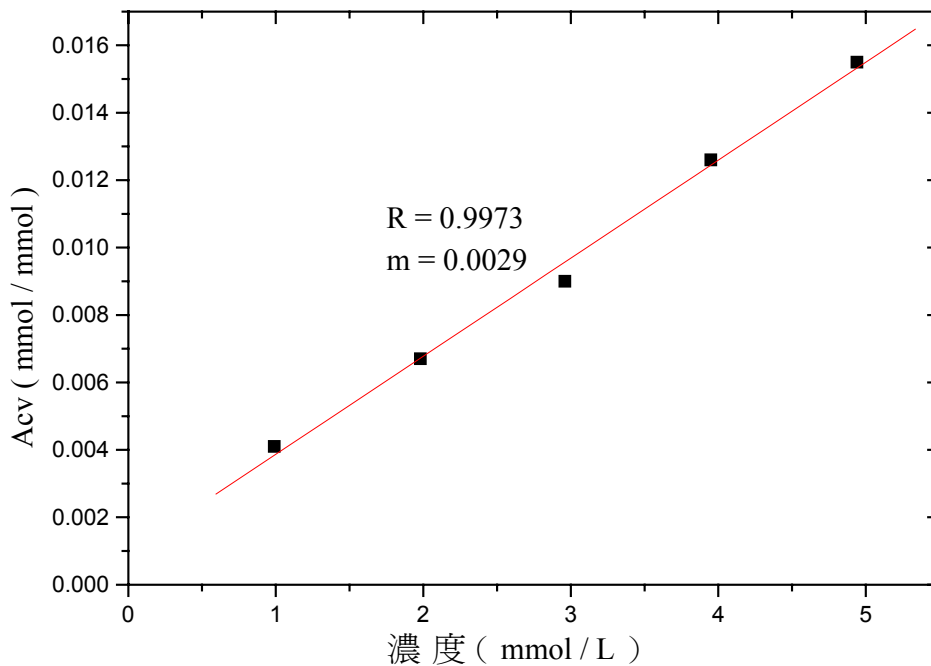
表 13 不同注射量之環己烯感測結果：

注 射 量	0.2 mL	0.4 mL	0.6 mL	0.8 mL	1.0 mL
基 頻	9988357	9988360	9988356	9988354	9988355
偵 測 頻 率	9988333	9988321	9988304	9988281	9988265
頻 率 變 化	24	39	52	73	90

根據上表，我們可以換算出環己烯濃度並根據參數定義求出其吸附量，並整理如表 14 及圖(18)。

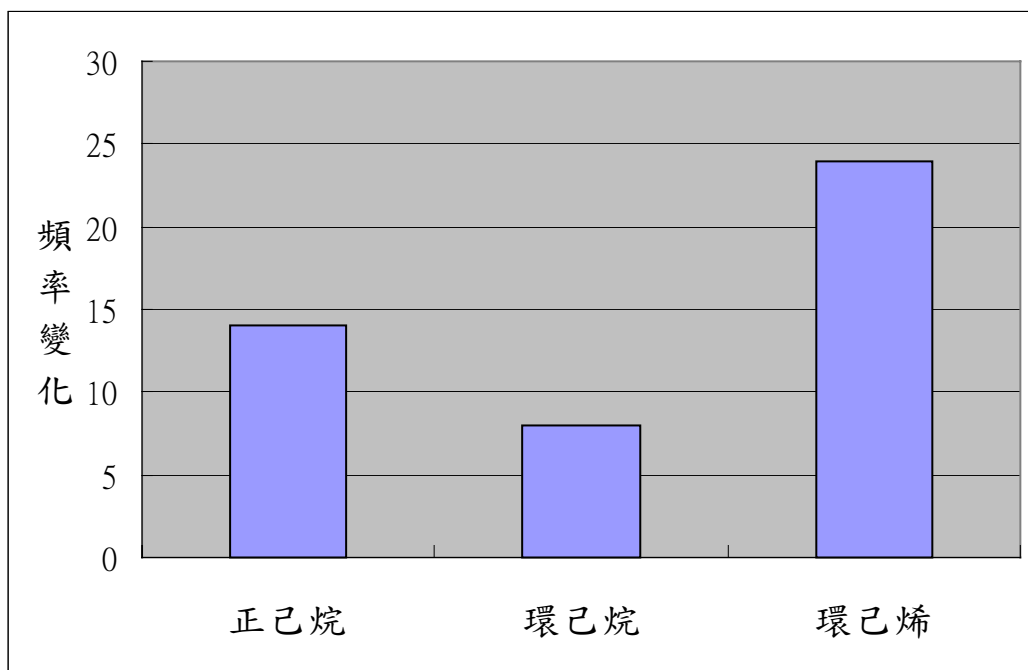
表 14 不同環己烯濃度之吸附量：

環己烯濃度 (mmol / L)	0.99	1.98	2.96	3.95	4.94
吸 附 量	0.0041	0.0067	0.0090	0.0126	0.0155

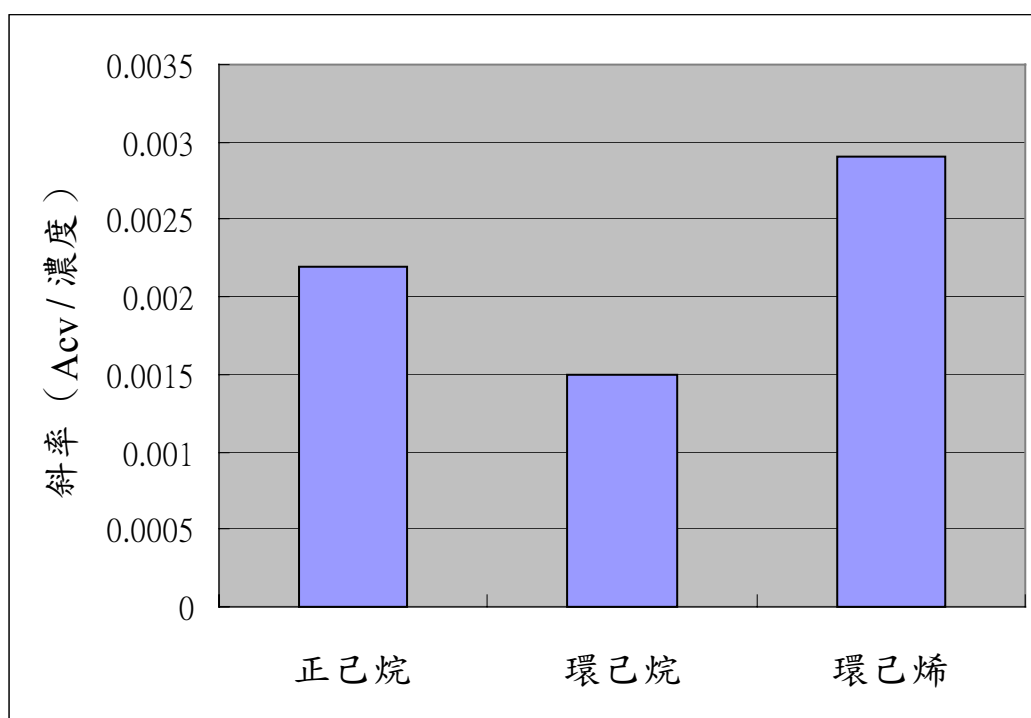


圖(17) 聚苯胺薄膜對環己烯的感測結果

觀察實驗結果，環己烯的吸附感測結果比正己烷好。針對正己烷、環己烷及環己烯的感測結果，我們依相同注射量 (0.2 mL) 及斜率 (Acv / 濃度) 分別整理如圖 (18)及圖(19)。綜合正己烷、環己烷及環己烯的結果，我們發現對聚苯胺薄膜而言，烷類及烯類的吸附很差，這可能是因為這些分子多為非極性分子，與薄膜性質差異較大，因此不易吸附。此外，我們發現不論是以相同的注射量，或是不同醇類之斜率來觀察，實驗結果均是：環己烯 > 正己烷 > 環己烷。比較正己烷及環己烷，兩者皆為非極性分子，但環己烷有較大的立體障礙，因此比正己烷更不容易被薄膜吸附。至於環己烯的實驗結果則較令我們意外，雖然其立體障礙比正己烷大，但其吸附感測卻較好，對此我們認為應是烯類分子帶有  $\pi$  電子，因此會與聚苯胺上的苯環之  $\pi$  電子有某些程度的作用力，因此使其比正己烷更容易吸附在薄膜上所致。



圖(18) 相同注射量 (0.2mL) 之不同烷、烯感測結果



圖(19) 不同烷、烯類之斜率 (Acv / 濃度) 比較

九、薄膜對醛、酮的感測：

針對醛、酮類的感測研究，我們選擇丙醛及丙酮進行吸附感測實驗。

1.丙醛（密度為 0.81）：

對於丙醛，同樣注射 0.2 毫升、0.4 毫升、0.6 毫升、0.8 毫升及 1.0 毫升，並記錄其頻率的變化，其結果記錄於表 15。

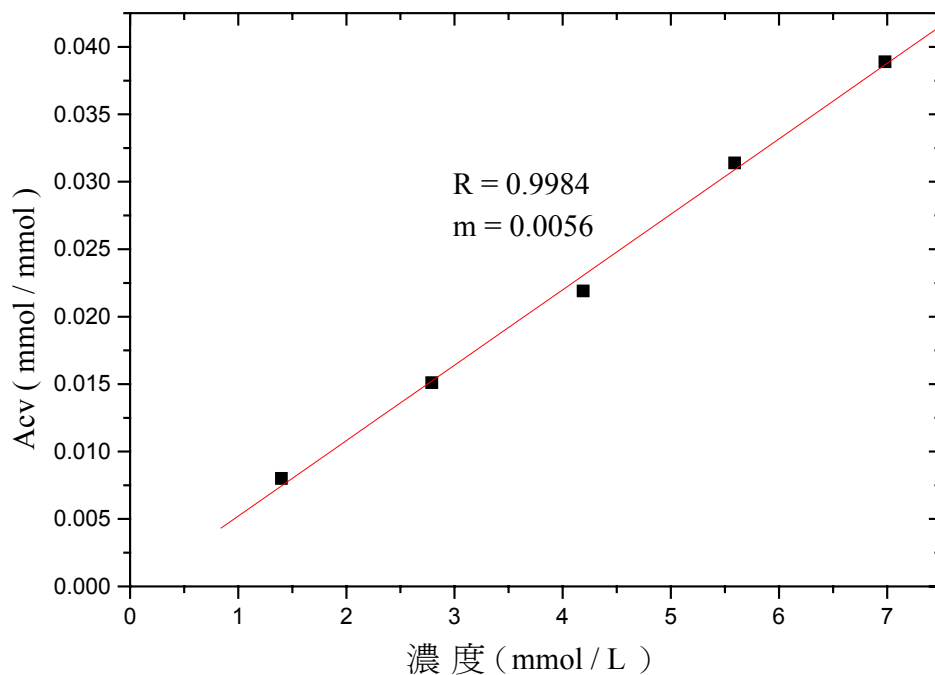
表 15 不同注射量之丙醛感測結果：

注 射 量	0.2 mL	0.4 mL	0.6 mL	0.8 mL	1.0 mL
基 頻	9988357	9988356	9988357	9988361	9988355
偵 測 頻 率	9988324	9988294	9988267	9988232	9988195
頻 率 變 化	33	62	90	129	160

根據上表，我們可以換算出丙醛濃度並根據參數定義求出其吸附量，並整理如表 16 及圖(20)。

表 16 不同丙醛濃度之吸附量：

丙 醛 濃 度 (mmol / L)	1.40	2.79	4.19	5.59	6.98
吸 附 量	0.0080	0.0151	0.0219	0.0314	0.0389



圖(20) 聚苯胺薄膜對丙醛的感測結果

觀察實驗結果，丙醛的吸附感測結果比烷、烯類佳，但比醇類來的差。

2.丙酮（密度為 0.79）：

對於丙酮，同樣注射 0.2 毫升、0.4 毫升、0.6 毫升、0.8 毫升及 1.0 毫升，並記錄其頻率的變化，其結果記錄於表 17。

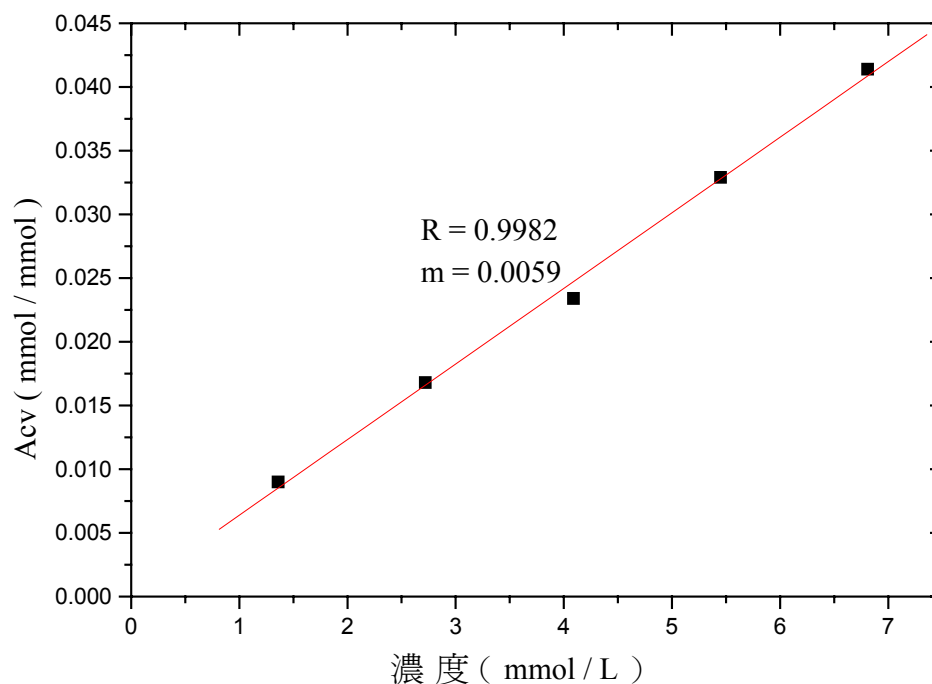
表 17 不同注射量之丙酮感測結果：

注 射 量	0.2 mL	0.4 mL	0.6 mL	0.8 mL	1.0 mL
基 頻	9988360	9988354	9988356	9988355	9988357
偵 測 頻 率	9988323	9988285	9988260	9988220	9988187
頻 率 變 化	37	69	96	135	170

根據上表，我們可以換算出丙酮濃度並根據參數定義求出其吸附量，並整理如表 18 及圖(21)。

表 18 不同丙酮濃度之吸附量：

丙 酮 濃 度 (mmol / L)	1.36	2.72	4.09	5.45	6.81
吸 附 量	0.0090	0.0168	0.0234	0.0329	0.0414



圖(21) 聚苯胺薄膜對丙酮的感測結果

觀察實驗結果，丙酮的吸附感測結果與丙醛相當（但丙酮略大一些）。

十、薄膜對醚類的感測：

乙醚（密度為 0.71）：

對於乙醚，同樣注射 0.2 毫升、0.4 毫升、0.6 毫升、0.8 毫升及 1.0 毫升，並記錄其頻率的變化，其結果記錄於表 19。

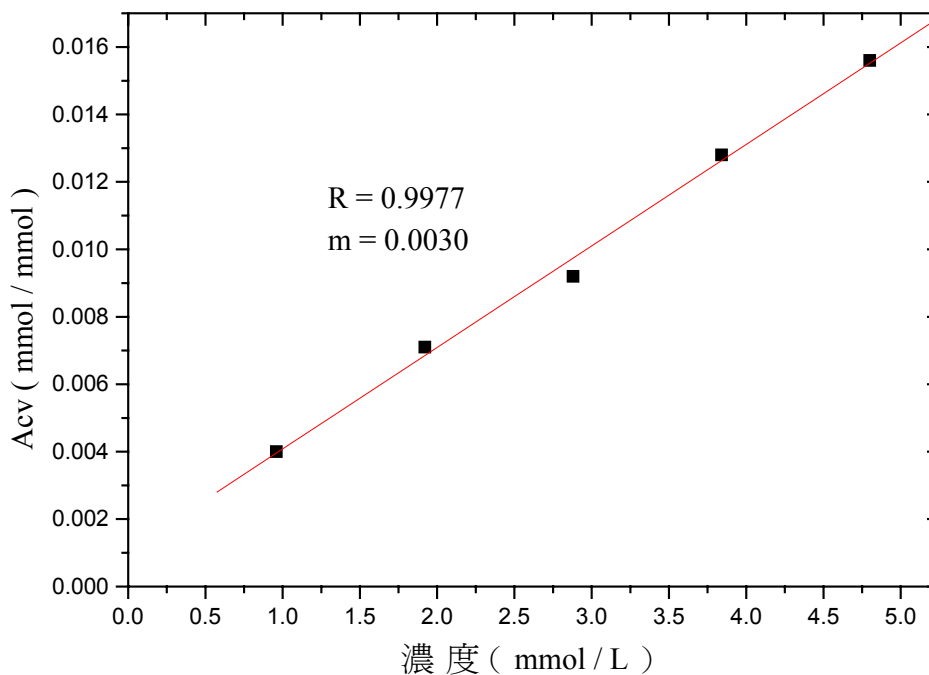
表 19 不同注射量之乙醚感測結果：

注 射 量	0.2 mL	0.4 mL	0.6 mL	0.8 mL	1.0 mL
基 頻	9988353	9988356	9988357	9988355	9988356
偵 測 頻 率	9988332	9988319	9988309	9988288	9988274
頻 率 變 化	21	37	48	67	82

根據上表，我們可以換算出乙醚濃度並根據參數定義求出其吸附量，並整理如表 20 及圖(22)。

表 20 不同乙醚濃度之吸附量：

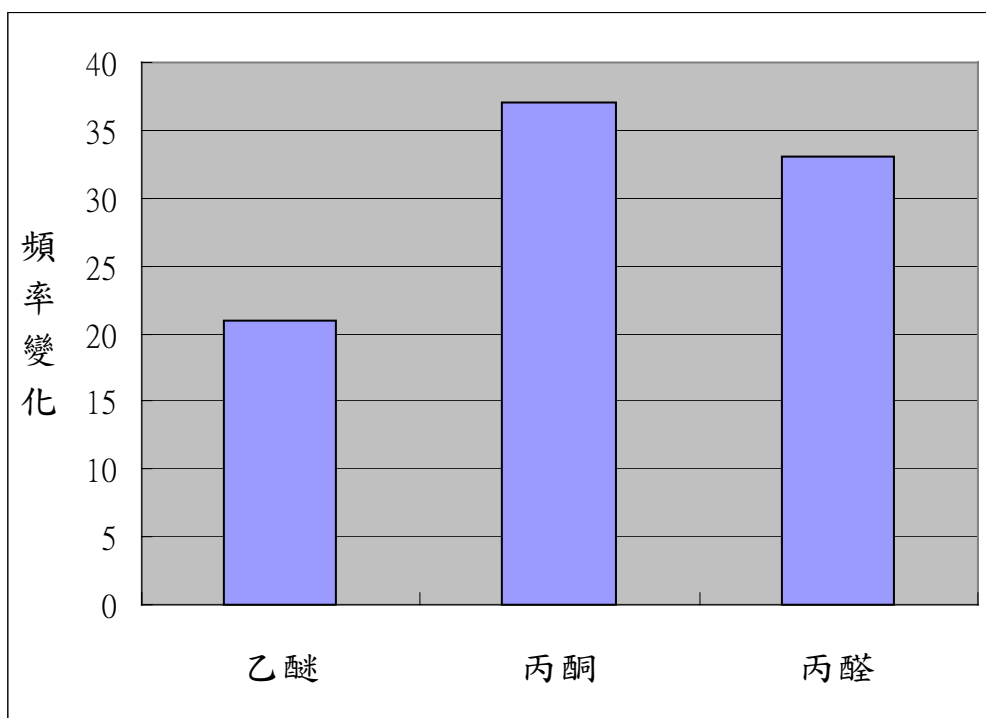
乙 醚 濃 度 (mmol / L)	0.96	1.92	2.88	3.84	4.80
吸 附 量	0.0040	0.0071	0.0092	0.0128	0.0156



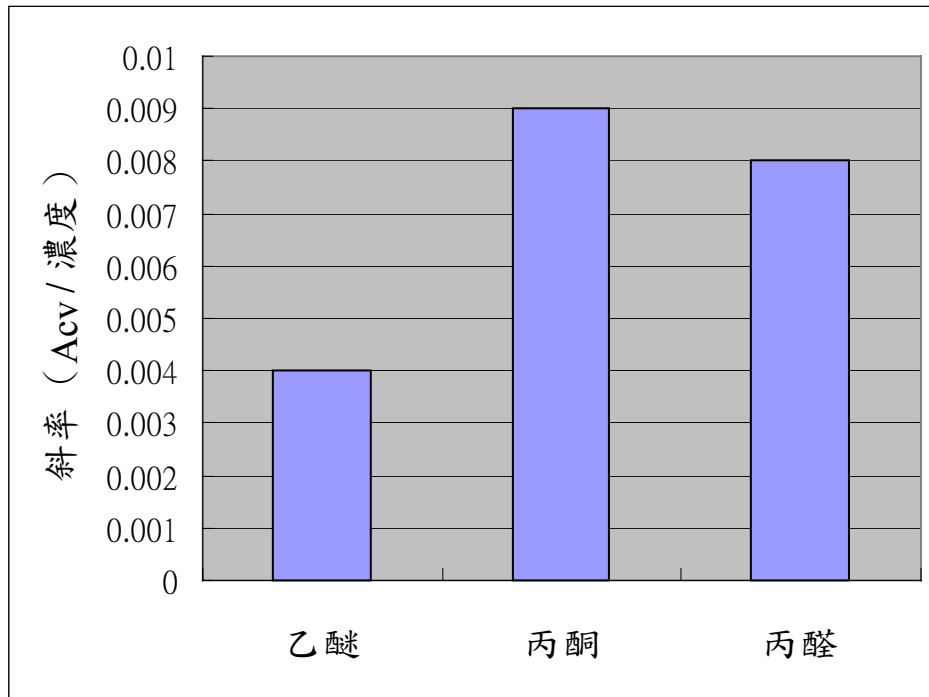
圖(22) 聚苯胺薄膜對乙醚的感測結果

觀察實驗結果，乙醚的吸附感測結果比烷、烯類佳，但比醛、酮類來的差。

針對丙醛、丙酮及乙醚感測結果，分別依相同注射量(0.2 mL)及斜率(Acv / 濃度)整理如圖(23)及圖(24)。綜合丙醛、丙酮及乙醚的實驗結果，我們發現不論是以相同的注射量，或是斜率來觀察，實驗結果均是：丙酮>丙醛>乙醚。這可能是因為乙醚略帶極性，故乙醚比非極性的烷、烯類分子易吸附於薄膜。至於丙酮和丙醛，其極性大於乙醚，故有比乙醚還要大的頻率感測。不過由於丙酮及丙醛的極性不若醇類，且丙醛與丙酮與聚苯胺薄膜不易形成氫鍵，故其感測比醇類差。



圖(23) 相同注射量(0.2mL)之乙醚、丙酮及丙醛感測結果



圖(24) 乙醚、丙酮及丙醛之斜率 (Acv / 濃度) 比較

十一、薄膜對苯類的感測：

甲苯 (密度為 0.87)：

對於甲苯，同樣注射 0.2 毫升、0.4 毫升、0.6 毫升、0.8 毫升及 1.0 毫升，並記錄其頻率的變化，其結果記錄於表 21。

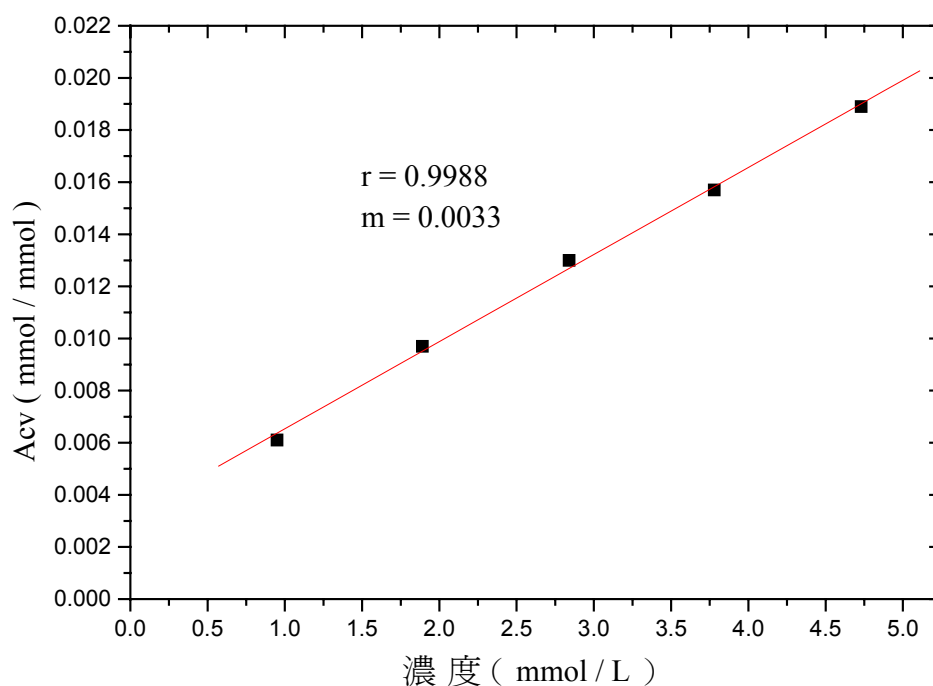
表 21 不同注射量之甲苯感測結果：

注射量	0.2 mL	0.4 mL	0.6 mL	0.8 mL	1.0 mL
基頻	9988356	9988354	9988357	9988360	9988355
偵測頻率	9988316	9988291	9988272	9988258	9988232
頻率變化	40	63	85	102	123

根據上表，我們可以換算出甲苯濃度並根據參數定義求出其吸附量，並整理如表 22 及圖(25)。

表 22 不同甲苯濃度之吸附量：

甲苯濃度 (mmol / L)	0.95	1.89	2.84	3.78	4.73
吸附量	0.0061	0.0097	0.0130	0.0157	0.0189



圖(25) 聚苯胺薄膜對甲苯的感測結果

觀察實驗結果，甲苯的吸附感測結果比乙醚、烷、烯類佳，但比醛、酮類來的差（根據斜率）。這個結果可能是因為甲苯為一具有苯環之平面分子，而苯環上的 $\pi$ 電子可能和聚苯胺薄膜的 $\pi$ 電子彼此作用，故甲苯較乙醚或烷、烯類更易吸附於薄膜上。

## 十二、薄膜對酸類的感測：

乙酸（密度為 1.05）：

對於乙酸，同樣注射 0.2 毫升、0.4 毫升、0.6 毫升、0.8 毫升及 1.0 毫升，並記錄其頻率的變化，其結果記錄於表 23。

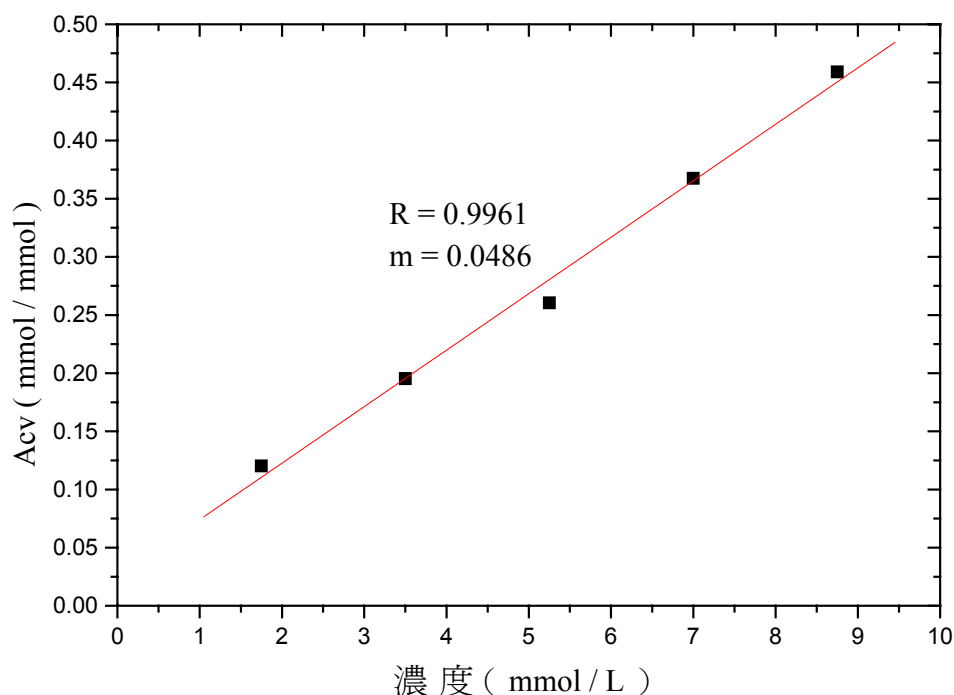
表 23 不同注射量之乙酸感測結果：

注射量	0.2 mL	0.4 mL	0.6 mL	0.8 mL	1.0 mL
基頻	9988359	9988356	9988352	9988353	9988350
偵測頻率	9987848	9987526	9987245	9986791	9986399
頻率變化	511	830	1107	1562	1951

根據上表，我們可以換算出乙酸濃度並根據參數定義求出其吸附量，並整理如表 24 及圖(26)。

表 24 不同乙酸濃度之吸附量：

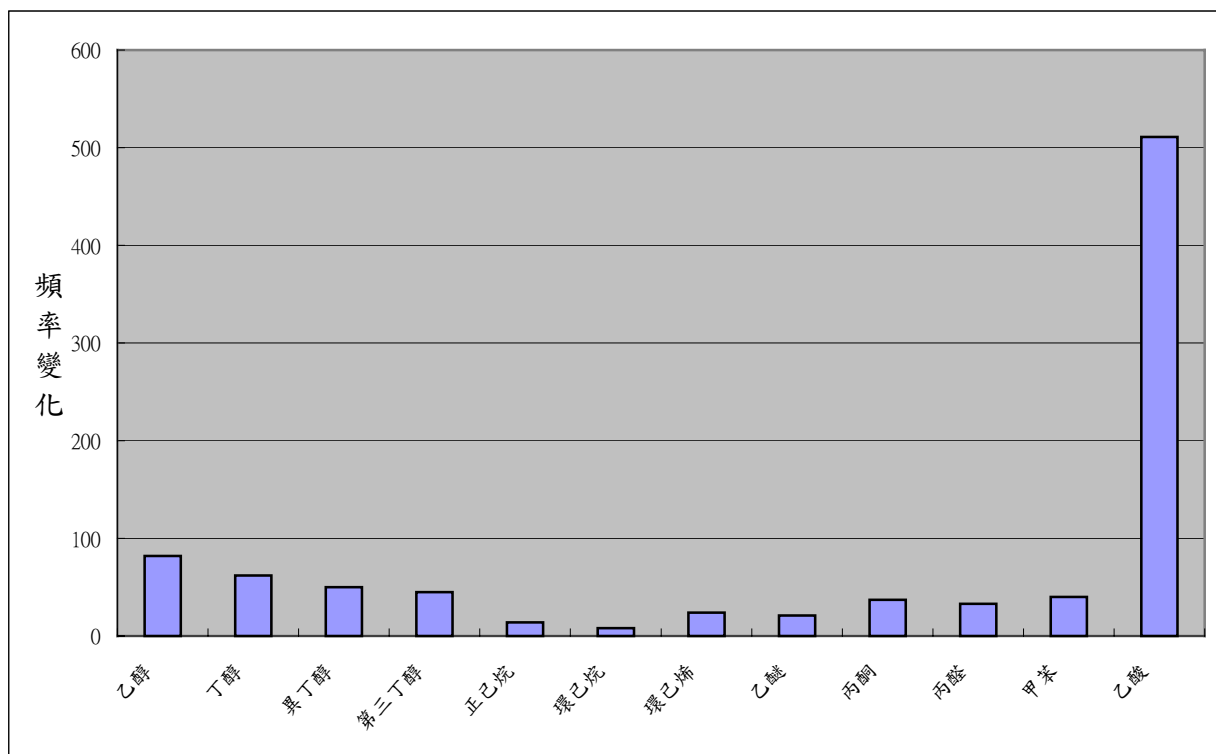
乙 酸 濃 度 (mmol / L)	1.75	3.5	5.25	7	8.75
吸 附 量	0.1202	0.1953	0.2605	0.3675	0.4590



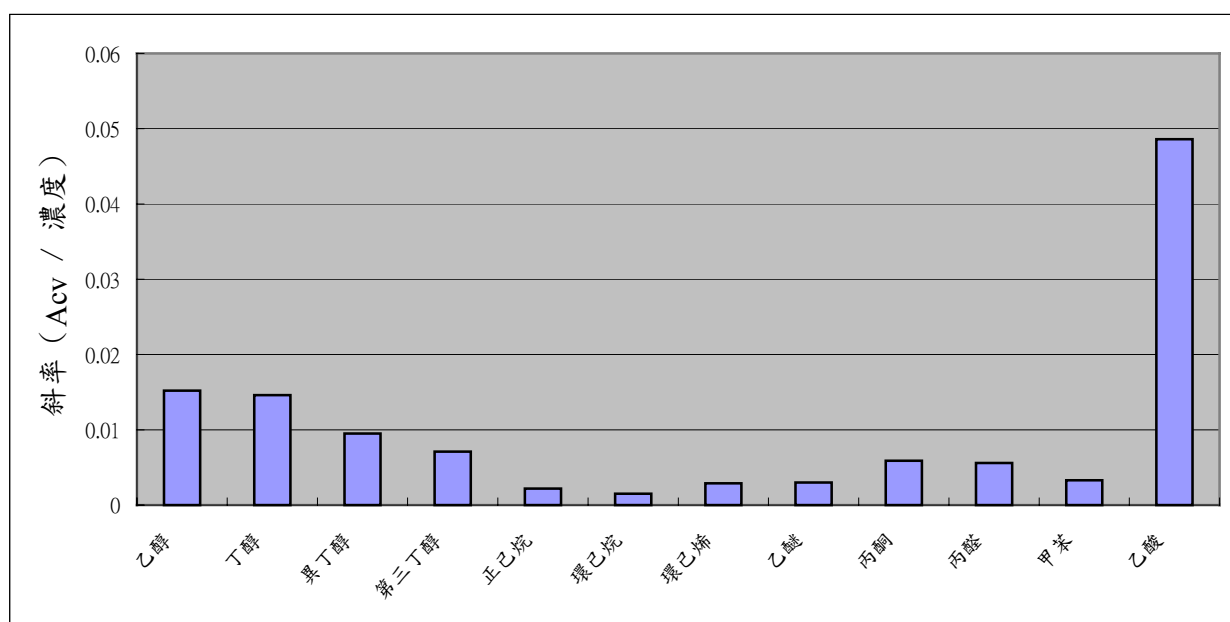
圖(26) 聚苯胺薄膜對乙酸的感測結果

根據實驗結果，我們發現乙酸有不尋常的感測結果，頻率變化非常大。我們推論，在實驗所使用的有機溶劑中，乙酸是極性最大的，且乙酸比乙醇更容易與聚苯胺上的 N 原子產生氫鍵，故乙酸的頻率感測特別明顯。

綜合以上 12 種溶劑的實驗數據，我們將結果分別依相同注射量 (0.2 mL) 及斜率 (Acv / 濃度) 整理如圖(27)及圖(28)。由圖中可知揮發性有機溶劑之氣體分子對聚苯胺薄膜的吸附性為：酸類 > 醇類 > 醛、酮 > 甲苯 > 醚類 > 烯類 > 烷類 > 環烷類。這樣的結果，可以從分子的結構與聚苯胺薄膜的性質來加以說明。對於能產生氫鍵、分子極性較大或是具有  $\pi$  電子的分子，會有較大的吸附性，其感測到的頻率下降愈明顯。此外，分子的立體障礙會阻礙氣體分子吸附於感測薄膜上，造成分子吸附性下降，頻率變化較小。



圖(27) 相同注射量 (0.2mL) 之不同揮發性有機溶劑感測結果

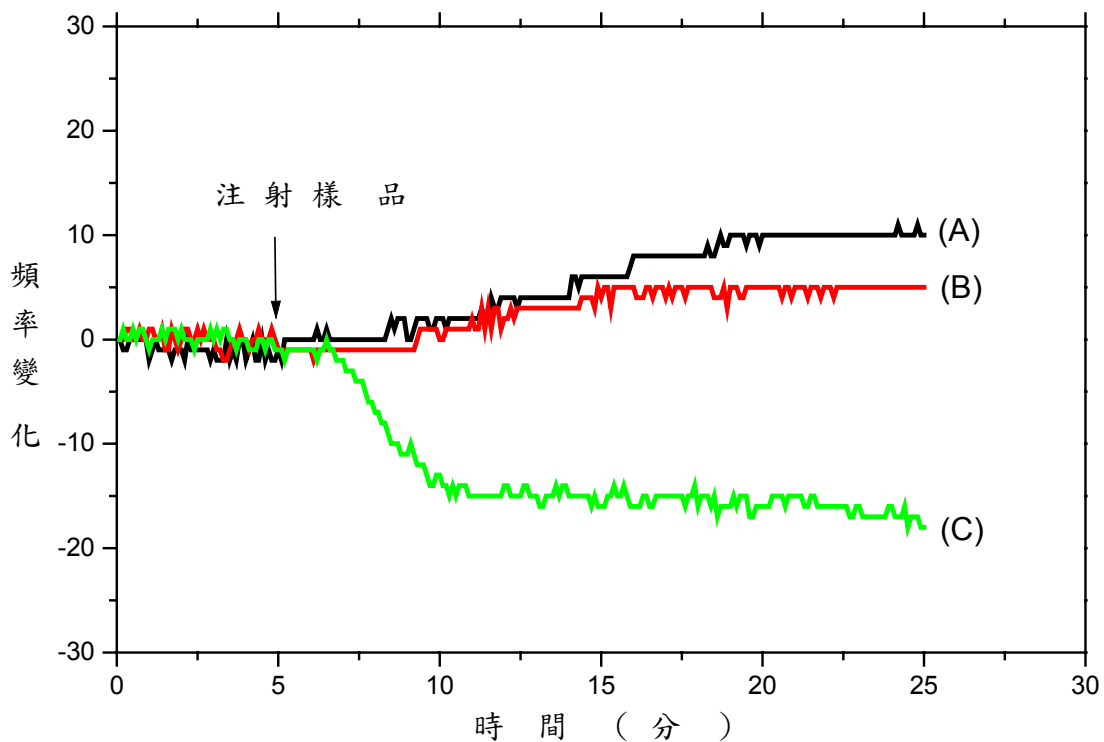


圖(28) 不同揮發性有機溶劑之斜率 (Acv / 濃度) 比較

### 十三、實驗室氣體偵測：

爲了實際瞭解本系統的實用性，我們嘗試抽取不同環境的氣體進行偵測。實驗的方法爲取一 50 mL 注射針（內含吸濕劑），在欲偵測地點抽取該處空氣，取完後立即密封，並以本實驗裝置進行偵測。

首先我們先對實驗室的空氣進行探討，實驗結果如圖(29)所示。圖中的(A)曲線爲室外新鮮空氣的頻率感測圖；(B)曲線爲實驗室空氣的頻率感測圖；而(C)曲線則爲進行實驗時（高一基礎化學實驗：肥皂的製備）抽氣櫃（內放置乙醇）中的頻率感測圖。由圖中可知，實驗室的空氣感測結果與室外空氣的感測結果相差不大，這是因爲實驗室的通風良好，再加上各化學實驗室均加置數部抽風扇，加速空氣流通，因此實驗室內空氣中的有機氣體含量不高。相較之下，抽風櫃中的空氣感測結果，有較大的頻率變化。分析其中的原因，主要是乙醇具有揮發性，且醇類對薄膜的感測十分靈敏，因此雖然抽氣櫃有抽氣的功能，仍可測到其中的乙醇氣體分子。

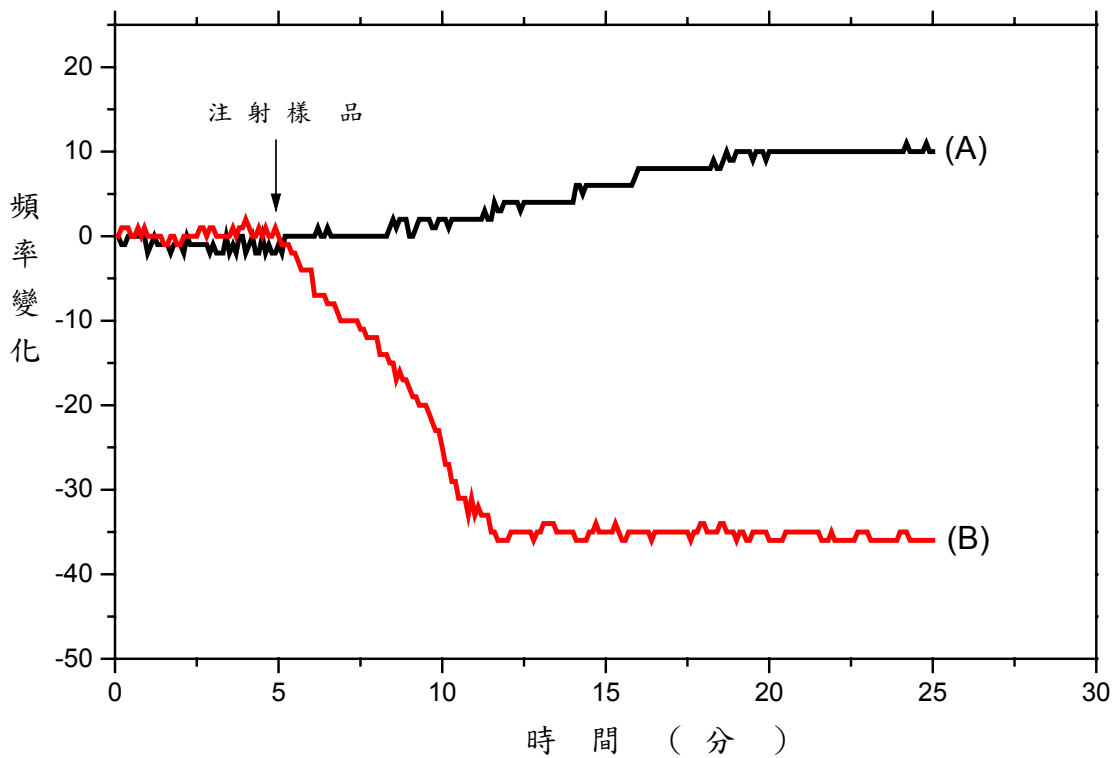


圖(29) 實驗室氣體偵測頻率感測圖

#### 十四、工廠氣體偵測：

除了對實驗室空氣進行偵測外，我們亦利用相同的方法偵測工業區工廠的空氣。實驗的結果如圖(30)所示。

圖中曲線(A)為室外新鮮空氣的頻率感測圖，而曲線(B)則為取自工業區某工廠廠房的空氣頻率感測圖。由圖中可知，工廠中的空氣之感測訊號較室外新鮮的空氣明顯，亦即工廠中的空氣比室外新鮮空氣含有較多的有機氣體分子。但由於不清楚工廠的實際作業情形，也不瞭解其使用的化學藥品，因此無法作進一步的分析。



圖(30) 工廠廠房氣體偵測頻率感測圖

## 陸、結論與應用：

根據我們對 12 種實驗室中常見之揮發性有機溶劑的實驗結果，我們發現各種氣體分子的吸附情形與氣體本身的分子結構及感測薄膜的性質有關。對於研究中各種氣體的感測結果，分述如下：

- 一、醇類的感測實驗中，醇類均顯現出大的頻率變化，這可歸因於醇類的極性及氫鍵的生成。醇類中若分子極性大且立體障礙小者會有較佳的吸附性，因此所選用的四種醇類其吸附性趨勢（頻率變化大小）為：乙醇 > 丁醇 > 異丁醇 > 第三丁醇。
- 二、乙醚、丙醛及丙酮的感測實驗中，因丙酮與丙醛分子量相同，且極性差異不大，故丙醛與丙酮的吸附感測差不多。此外，因丙醛及丙酮的極性較乙醚大，故乙醚之吸附感測較丙醛及丙酮差。此三種氣體分子其吸附性趨勢（頻率變化大小）為：丙酮 > 丙醛 > 乙醚。
- 三、正己烷、環己烷及環己烯的感測實驗中，因三種分子的極性均小，故其吸附性較其他極性分子為弱。三者中環己烷因立體障礙大，故其吸附感測最弱；相對地，環己烯雖有立體障礙，但因其結構中具有  $\pi$  電子，故其吸附性較佳。此三種氣體分子其吸附性趨勢（頻率變化大小）為：環己烯 > 正己烷 > 環己烷。
- 四、甲苯的感測實驗中，甲苯雖有立體障礙，但因其具有苯環結構，富含  $\pi$  電子，故提高其吸附性，其感測結果甚至優於乙醚。
- 五、乙酸的感測實驗中，其吸附性在所有研究的 12 種揮發性有機溶劑中是最好的，頻率變化非常明顯。這樣的結果可以歸因於乙酸的極性較大，且其比醇類更易於與聚苯胺中的 N 原子形成氫鍵，因此有很好的吸附感測。

綜合上述結果，可以整理出對聚苯胺感測薄膜而言，其吸附趨勢為：酸類 > 醇類 > 醛、酮 > 苯環 > 醚類 > 環烯類 > 烷類 > 環烷類。至於影響吸附性的因素，可以歸納如下：  
① 氣體分子是否可以與感測薄膜形成氫鍵：若可形成氫鍵，將大幅增加其吸附性。  
② 分子極性大小：極性愈大，吸附性愈強。  
③ 是否具有苯環結構或  $\pi$  電子：若有苯環結構或  $\pi$  電子，則可與聚苯胺感測薄膜之苯環相吸引，提昇其吸附性。  
④ 氣體分子是否有立體障礙：立體障礙愈大，吸附性愈差。  
⑤ 接觸面積：對異構物而言，接觸面積愈大，吸附性愈好。

目前，本實驗系統已能成功地對揮發性有機溶劑進行有效的偵測，也可應用於偵測各種不同環境的氣體。不過，在設備及經費缺乏的情況下，未能採用較佳的氣體取樣技術。未來若能結合適當的氣體取樣技術，將可實際應用於化學實驗室中，達到及早偵測過量有機氣體存在，避免意外發生的功效。唯實驗中所採用的聚苯胺感測薄膜僅對於能形成氫鍵或極性較大的氣體分子有較好的感測，至於非極性氣體分子，感測結果則較差。因此，未來的研究方向將著重於製備能對非極性氣體分子有較佳吸附感測的薄膜，用以偵測實驗室中的非極性有機氣體分子。

柒、參考文獻：

- 一、黃麒豪，民 89，石英晶體微天平之有機薄膜氣體感測研究，國立台灣科技大學研究所碩士論文
- 二、陳壽安，導電高分子：新世紀光電材料，物理雙月刊，二十三卷二期，2001
- 三、吳惠平譯述，大學化學，科技圖書有限公司
- 四、林敬二、林宗義編譯，儀器分析，亞美出版社
- 五、楊寶旺譯，有機化學，東華書局

## Abstract

Many volatile organic compounds accumulate easily in the laboratory and can have adverse impacts on students' health. In this study, a simple microbalance based on a commercial quartz crystal and polyaniline adsorbent was developed to detect volatile organic compounds. The experimental result show that the adsorptivity of the hydrocarbons is in the sequence: organic acids > alcohols > organic oxides > aromatic compounds > aliphatic compounds. The adsorptivity were found to be strongly affected by the chemical and physical properties of volatile organic compounds. In general, the adsorptivity increases with (1) the formation of hydrogen bond between the molecule and the adsorbent; (2) the higher polarity and (3) the higher abundance of pi electrons of the molecule. On the contrary, the adsorptivity decreases with higher steric hindrance because the contact area between molecule and adsorbent decreases. Due to its high polarity, the adsorptivity of acetic acid is the highest among the compounds studied. The utility of this simple device was demonstrated in detecting volatile organic compounds in chemistry laboratory.

## Introduction

Organic solvents such as methanol, acetone, etc., are often used in high school's chemistry laboratory. These solvents can be easily absorbed by human body through breathing and/or skin contact, and thus may cause serious adverse impacts on students' health.

Piezoelectric crystals such as quartz are known to be sensitive to pressure on their surface. The vibrational frequency of an oscillating piezoelectric crystal decreases on adsorption of a foreign substance onto its surface. As shown in Sauerbrey's equation:  $\Delta f = -2.3 \times 10^{-6} f_o^2 (M/A)$ , the variation of vibrational frequency is related to the mass of adsorption materials. This relationship and the theoretical excellent detection limit of oscillating quartz crystals make them ideal choices as gas sensors (1). Furthermore, the quartz based sensors are often inexpensive and easy to fabricate.

Piezoelectric quartz crystals coated with polymer, e.g., polystyrene and polyacrylamide have been extensively studied (2,3). In this study, a simple microbalance based on a commercial quartz crystal and polyaniline adsorbent was developed. The characteristics of the polyaniline coated quartz crystal and its utility in detecting organic vapor in chemistry laboratory are presented.

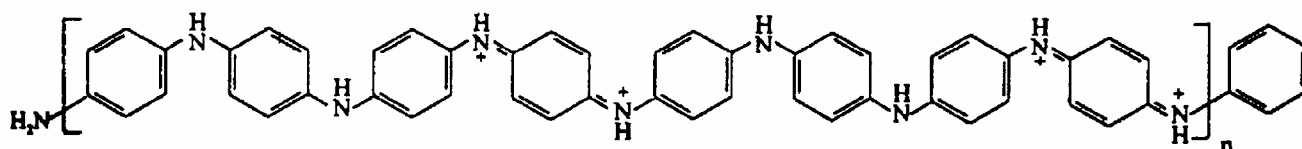
# Experimental

## 1. Chemicals

All chemicals were obtained from Shimakyu's pure chemicals (Japan).

## 2. Fabrication of polyaniline coated quartz crystals

Piezoelectric crystals used were commercial AT-cut spherical quartz crystals, radius 0.22 cm with a basic frequency of 10 MHz and silver-plated metal electrodes on both sides (Tai Then Electric Co., Ltd, Taiwan). The cost of such crystals is less than 0.5 US dollar each. The crystals were coated with polyaniline via electrochemical means. Before coating, the metal case of the quartz crystal was removed by using a handsaw (Fig. 1). Coating solution of aniline was prepared in 2 M HCl solution. Coating was conducted in a home made polyacrylic electrolysis cell as shown in Fig 2. The volume of the cell was less than 1 ml. The voltage was set at 0.8 volt during electrolysis and the reaction was stopped when a layer of green coating was observed.



Emeraldine salt of polyaniline

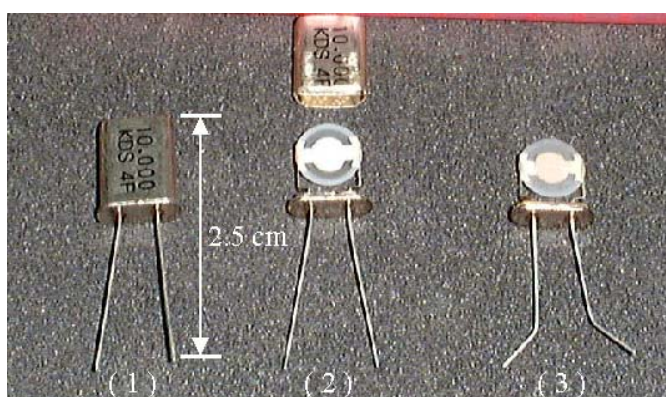


Fig. 1 Quartz crystals

- (1) Before removing the metal case
- (2) After removing the metal case
- (3) After coating with polyaniline

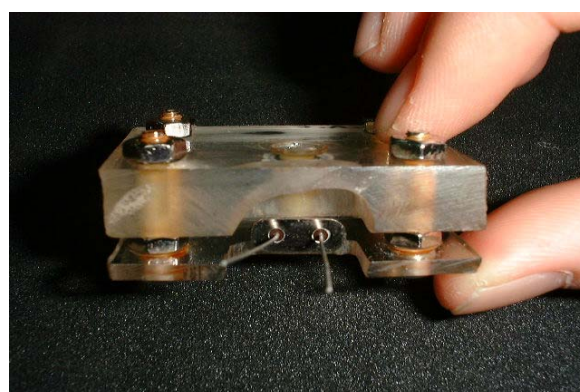


Fig. 2 A homemade polyacrylic electrolysis cell

### 3. Setup of the gas sensor

The apparatus of the piezoelectric quartz gas sensor is shown in Fig. 3. The working cell (2 L flask) was filled with nitrogen and sealed with a rubber cork. Volatile organic solvents were injected into the working cell through the rubber cork. To avoid the effects of temperature, the temperature of flask was maintained at 30°C by using a water bath. The coated quartz crystal was connected to an oscillator and a frequency counter. The frequencies were recorded and transferred to a personal computer for data processing.

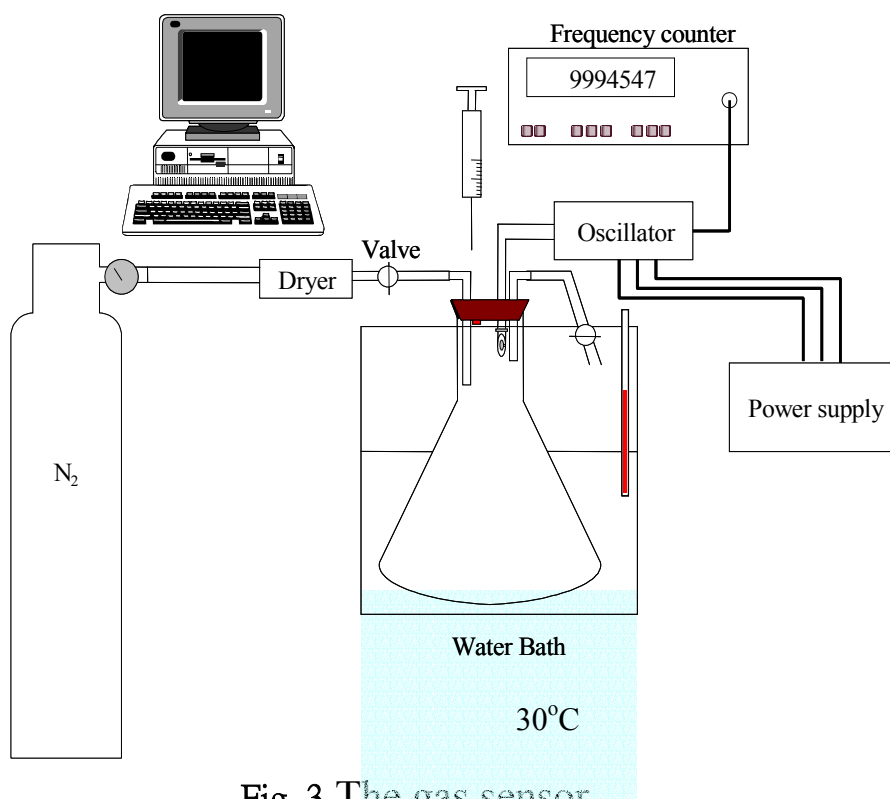
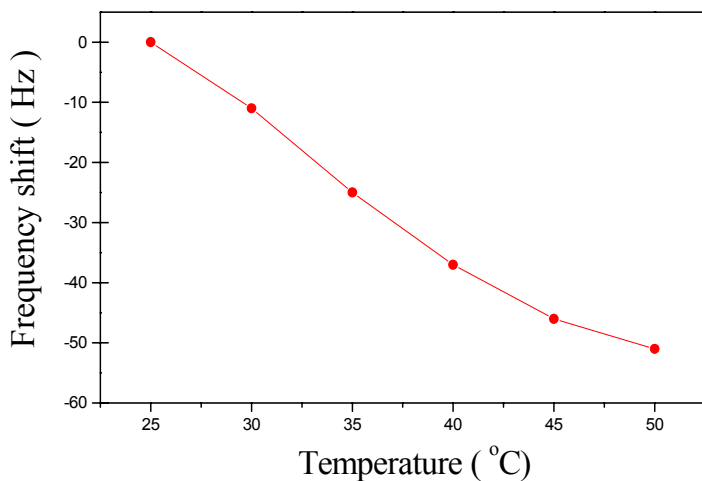


Fig. 3 The gas sensor.

# Results and Discussion

## 1. Piezoelectric system Effect of temperature



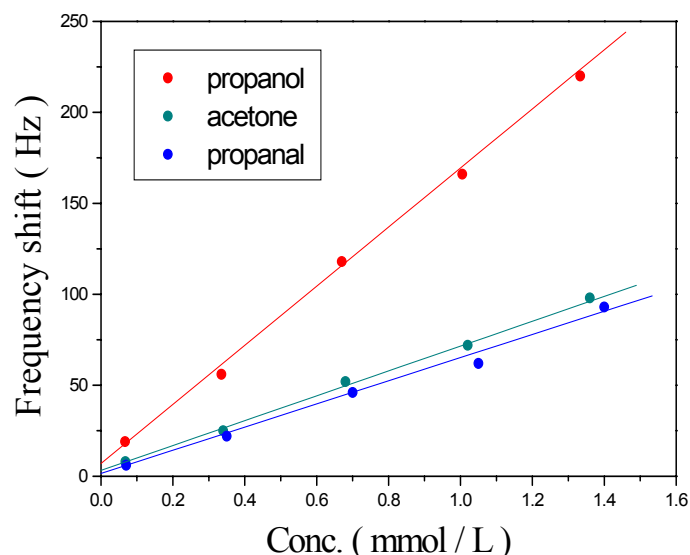
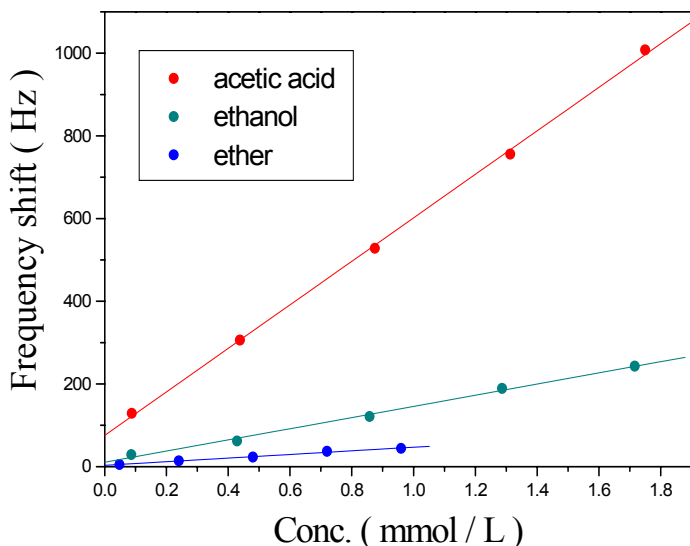
## Stability of the system

- With clean air, the variation was found to be 2Hz in a period of ten minutes at 30°C.
- Using n-butanol as the test solvent, the within- day and between-day reproducibility were found to be 2.6 % and 3.4 % respectively.

**Fig. 4** Various temperatures on frequency shift

- Frequency was found to be very sensitive to temperature.

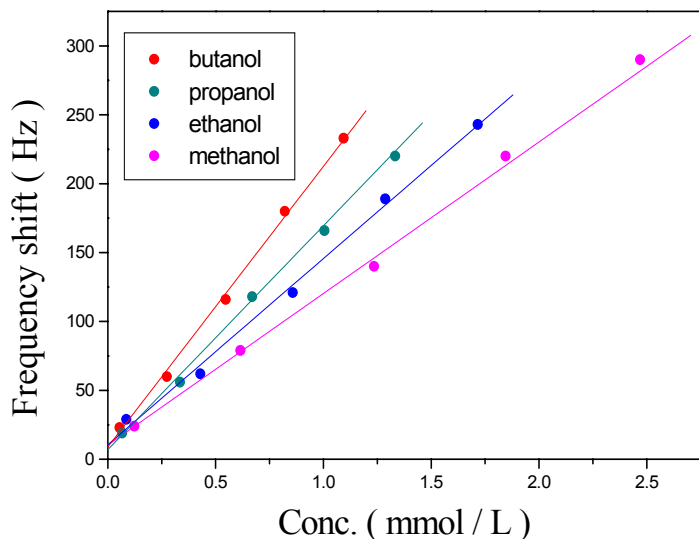
## 2. Effect of functional group



**Fig. 5** Various organic solvents on frequency shift

- Frequency shift is proportional to the polarities of the functional groups.
- Coulombic interaction and hydrogen bonding between polyaniline and the test molecules were the major reasons for the greater frequency shifts.

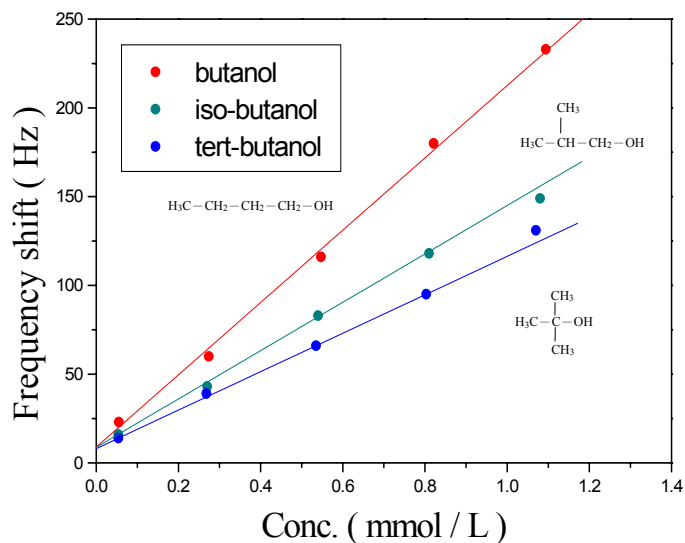
### 3. Effect of chain length



**Fig. 6** Alcohols of different chain length on

- Greater frequency shifts were observed for alcohols of higher molecular weight.
- Larger frequency shifts are most likely due to the greater mass per adsorbed molecule.

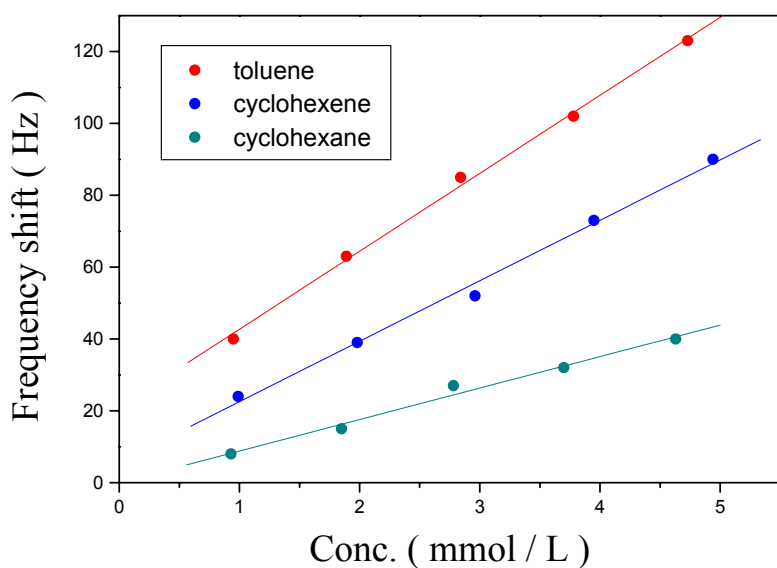
### 4. Effect of steric hindrance



**Fig. 7** Butanol isomers on frequency shifts

- Linear molecule exhibited a greater frequency shift than branched molecule.
- The horizontal adsorption of linear molecule provided more efficient adsorption and thus greater frequency shift.

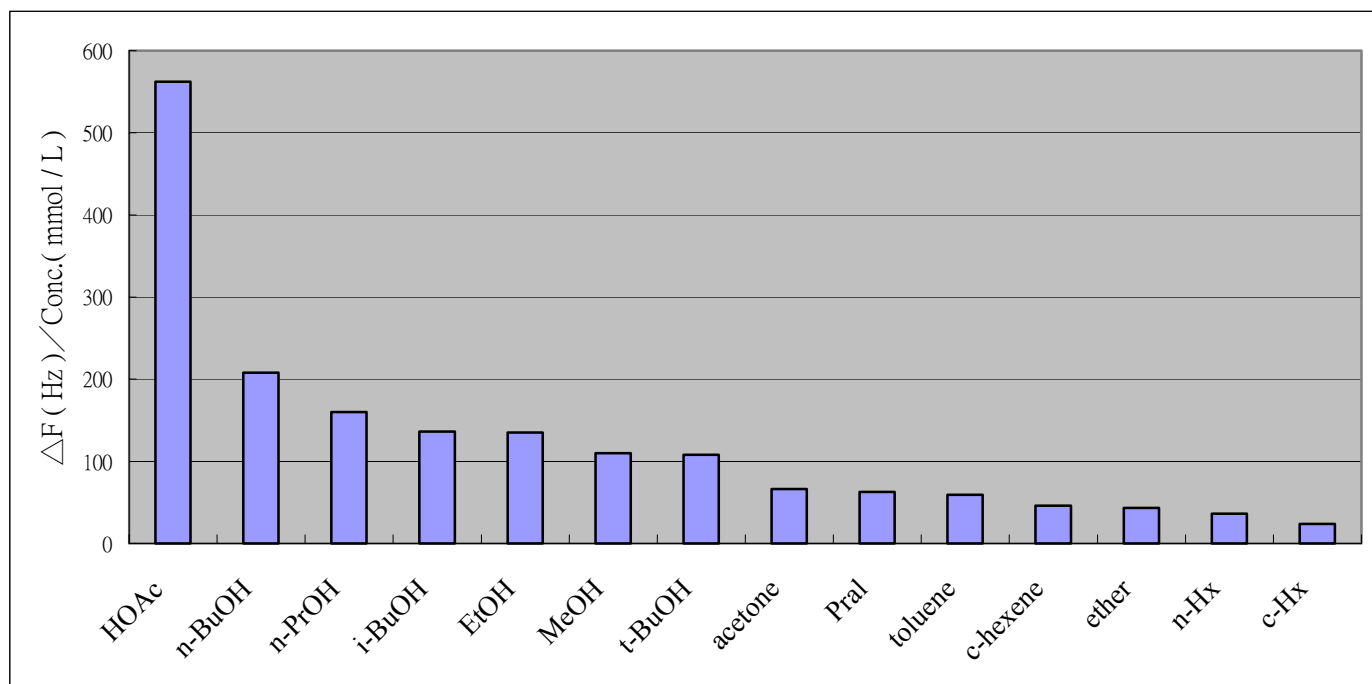
### 5. Effect of $\pi$ electrons



**Fig. 8** Organic solvents with different  $\pi$  electrons on frequency shifts

- $\pi - \pi$  interaction appeared to enhance the adsorption of alkene and aromatic

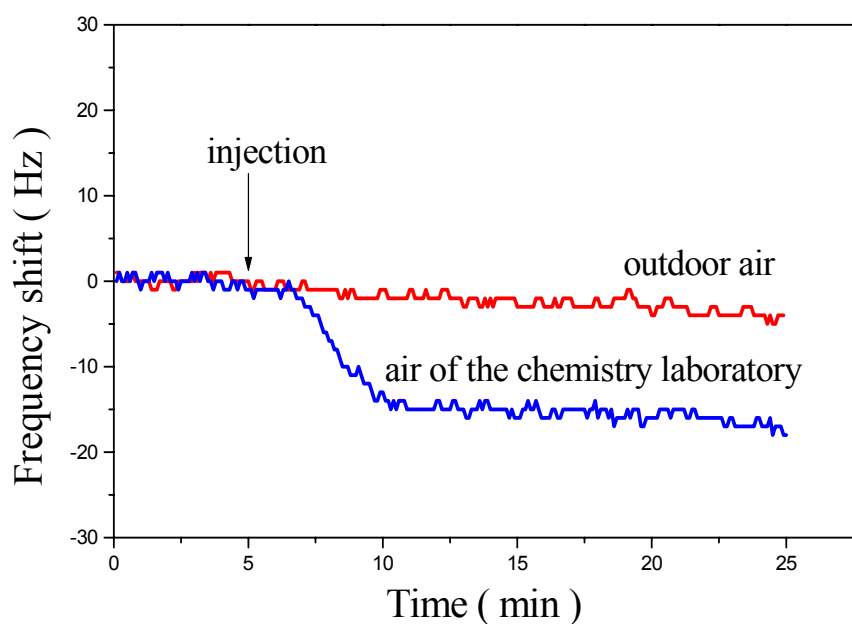
## 6. Relative response of fourteen organic solvents



**Fig. 9** Frequency shifts of fourteen organic solvents

- Among the compounds studied, acetic acid showed the greatest frequency shifts followed by alcohol, ketone, aldehyde, aromatic compound, alkene and alkanes.

## 7. Detection of organic vapors in the chemistry laboratory of our school



**Fig. 10** Frequency shift due to the ethanol vapor in the chemistry laboratory

- Concentration of ethanol vapor was about 0.055 mmol/L.

## **Conclusions**

- **A simple and inexpensive quartz crystal microbalance was developed for the detection of organic vapors.**
- **Acidic and polar compounds were more easily adsorbed onto the surface of the microbalance.**
- **Coulombic interaction and hydrogen bonding were the most important factors in the adsorption process.**
- **Smaller frequency shifts of nonpolar compounds were more likely due to the dipole-induced dipole interaction.**
- **Factors such as the size of molecule, steric hindrance and  $\pi$  electron also affect the adsorption of organic molecules.**
- **The gas sensor was found to be useful in the detection of organic vapor.**

## **Acknowledgments**

We would like to thank many people who have led and helped us to study the interesting and also environment-friendly project. Special credit should go to professor G-R Her, who patiently directed us to perform all the studies. We are also obliged to Mr. A-C Liu for his helping us to do this experiment and instruct us the QCM technique. Besides, we have gratitude for professor Lin, professor Li, professor Chan, professor Chuan, professor Ouyang and professor Liang for directing our project questions, proposal and poster presentation. And then, we want to be grateful to National Taiwan Science Education Centre for providing many resources for us, especially Ms. Feng and Ms. Chiu for their concern about us. At last, we also have to appreciate the assistance of our English teacher Ms. Lee, who teaches us English, particularly in conversation. And a million thanks to our daddies and mommies for their support with all their strength. Their help has made us get more confident as well as enthusiastic about this competition. We do really appreciate all of them.

We also thank you for your attention on our project, thanks a lot.

## **References**

- 1. Y. Tomita and G. Guilbault, *Anal. Chem.*, 52 (1982) 1484.**
- 2. G.G. Guilbault, S. S. Lu and A. W. Czanderna, *Application of Piezoelectric Quartz Crystal Microbalances*, Elsevier, New York, 1984.**
- 3. A.A. Suleiman and G.G. Guilbault, *Talanta*, 38 (1991) 541.**

## 評語

兩位同學動手研究導電高分子膜，並且深入建立高分子膜吸收有機氣體分子用 QCM 來定量分析之技術，研究之實用潛力和研究深度均屬上乘。