

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 工程學(一)科

052303

超低頻物質波感測系統

學校名稱：開南學校財團法人臺北市開南高級中等學
校

作者： 職二 林韋伶 職二 李侑叡 職二 徐顥文	指導老師： 張丕白 許良村
---	-----------------------------

關鍵詞：感測器、類比訊號、複合材料

摘 要

最近國內外災害頻傳，因此我們自製超低頻物質波感測器。融合類比訊號處理電路、數位化的分析系統。擷取外界環境或人體微弱的訊息，匯入電腦存入資料庫，加以辨識，將分析結果傳輸至筆記型電腦，供相關人員處理。提供災害預警與諮詢，達到遠端監控、現場搜救、守護國民安全之目的，本研究系統包含下列功能：

一、偵測超低頻物質波

研發超低頻物質波感測器，能偵測到微弱的超低頻物質波。

二、類比訊號處理電路

利用運算放大器，組合成多階濾波器，去除雜訊。

三、自動化檢測介面

全自動訊號取樣，並進行訊號處理與分析，並立即顯示時域、頻域訊號的波形。可以即時偵測地震，或災難時偵測生命跡象。

壹、研究動機

我國已步入高齡社會，老年人口比率逐年攀升[1]。面對高齡化社會，老年人的安全、健康，成為大家特別關注的課題。並且臺灣位於板塊交界處，地震頻仍，災後救難與搜救非常艱困。我們研究本系統，藉由筆記型電腦，偵測人體呼吸、脈搏。可以搜尋生命跡象，與健康預警。能隨時得知民眾的健康狀況，達成關懷人群的淑世目標，讓人免於病痛的折磨。(表 1) 為本研究與《技術高級中學電機與電子群》，課程相關性之說明。

表 1 技術高級中學課程學習相關內容

科目名稱	年級	內 容	作品應用部分
基本電學	高一	直流暫態	電源濾波、交連電容器的設計
		交流電波形	振動、呼吸、脈搏波形辨識
		非諧振電路	訊號處理、高低通濾波
物 理	高一	物理量及單位	各種物理量級單位的換算
		波 動	震動、呼吸、脈搏波形分析
		力 學	自動量測系統結構設計
化 學	高一	溫度與熱	測裝置之比熱、溫差、熱傳、熱平衡
計算機概論	高一	程式設計	電腦程式設計
		資 料 庫	震動、呼吸、脈搏波形資料庫
		多 媒 體	自動量測系統的語音報知系統
基本電學實習	高一	配線	系統機內配電
數 學	高一 高二	指數與對數	電路中電容器與電感器暫態分析
		三角函數	震動、呼吸、脈搏波形辨識
		機率與統計	震動、呼吸、脈搏分析
電子學	高二	二極體	電源電路、繼電器的保護裝置
		電晶體	訊號放大與控制電路
		運算放大器	儀表放大電路與主動濾波電路
電子實習	高二	電子儀器	系統實作之量測、校正、檢修
		二極體	電源電路、繼電器保護裝置
		電晶體	訊號處理電路
		運算放大器	儀表放大電路與主動濾波電路

貳、研究目的

本研究目的係運用所學，將材料科學融合固態物理學研究，避免誤差過大影響實驗結果。將自行研發之導電複合材料，運用於感測器。由於必須具備良好的能量轉換曲線、頻率響應與溫度特性。因此我們進行了下列六項實驗：

實驗一：直流阻抗

實驗二：摻雜濃度與電阻係數

實驗三：電阻溫度特性

實驗四：交流特性

實驗五：能量轉換特性

實驗六：電子顯微鏡結構分析

叁、研究設備及器材

本研究所用之設備及器材，可分為三類：

一、研究設備：參閱（表 2）所列。

表 2 研究設備一覽表

研究設備	規 格	數 量	備 註
函數信號產生器		1	產生標準訊號提供校正與測試
電源供應器		1	
數位示波器		1	生理訊號波形觀測
三用電表	類比與數位	2	

二、研究器材：參閱（表 3）所列。

表 3 研究器材一覽表

研究器材	規 格	數 量	備 註
音效卡	USB	1	
筆記型電腦		2	
印表機		1	
曝光機		1	製作感光電路板
類比資料擷取卡	USB	1	
變壓器		1	
氯化鐵		3	每瓶 500 毫升（ml）

三、工具機：參閱（表 4）所列。

表 4 研究工具機一覽表

工具機	規 格	數 量	備 註
電烙鐵	40W	2	具有恆溫控制
尖嘴鉗	電子用	2	無牙
斜口鉗	電子用	2	
剝線鉗	電子用	1	
螺絲起子組	電子用	2	
麵包板	電子用	3	
IC 拔取器		1	
IC 整腳器		1	
電鑽		1	
銼刀		1	
電動砂輪機		1	
鋸子		1	

肆、研究過程或方法

一、吸附與導電性

將本研究自製的導電複合材料加熱，熔點較低的聚合物完全蒸發後，只剩下石墨微粒。這些石墨微粒的質量、粒徑並沒有改變，因此碳與聚合物材料為「物理吸附」(physisorption) 又稱「凡得瓦吸附」(van der Waals adsorption)，非「化學吸附」(chemisorption)，沒有產生化學反應(chemical reaction)，碳與橡膠性聚合物材料吸附，產生的導電特性如下：

(一) 聚合物與石墨微粒的吸附反應

吸附是指物質的界面，吸引周圍介質的質點，使它暫時停留的現象。物質能將周圍介質，吸引在自己表面稱為「吸附劑」。被吸附劑吸附的物質，則稱為「吸附物」。本研究以石墨微粒，與活性碳微粒，作為導電複合材料的吸附劑。石墨微粒的表面，能吸引聚合物分子。使聚合物受到內部分子的吸引力，又增加與石墨微粒之間的吸引力。這兩種力互相抵銷，減弱石墨微粒表面分子，受內部分子的引力，降低表面吸附能力。

吸附反應取決一個熱力學函數，此為「吉布士函數」(Gibbs function)，又稱為「吉布士能」(Gibbs energy)，以符號 G 表示。

$$G \equiv H - TS \quad (1)$$

定溫時，吉布士方程為

$$dG = dH - TdS \quad (2)$$

由式(2)得知於定溫定壓的條件下，物理吸附反應的平衡條件為式(3)

$$dG = 0 \quad (3)$$

因此本吸附反應平衡條件，以熱力學原理可簡略表示為式(4)：

$$dH - TdS = 0 \quad (4)$$

式(4)中的 S ，為系統的「熵值」(entropy)， dH 為熱量變化。本研究導電複合材料的吸附反應，於定壓下的開放容器中進行。定壓下反應等於 H (焓，enthalpy) 的變化，式(4)於此條件下，可表示為式(5)

$$dH - TdS = 0 \quad (5)$$

函數 G 由 H 、 T 與 S 等狀態函數所組成，所以 G 也是狀態函數。定溫定壓的狀態，達到平衡的示意圖（圖 1）所示。可知系統向最小吉布士能之狀態移動。石墨微粒表面的質點，位於不平衡的力場。具有多餘的吸引力，所以分子有過剩的表面吉布士函數，能吸引降低表面吉布士函數的物質。石墨碳的表面張力下降，會降低吉布士函數。當吉布士函數小於零時，是自發過程。因此石墨能吸附其他物質的分子，到自己的表面。簡略表示為式（6）

$$dG_{\text{face}} = Ad\sigma < 0 \quad (6)$$

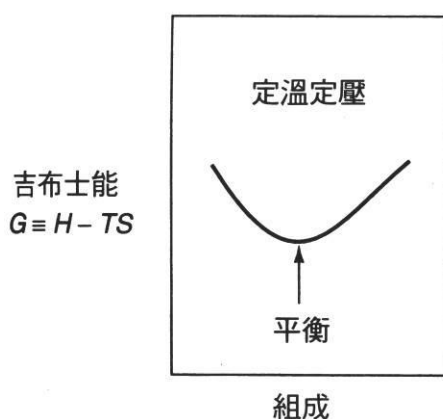
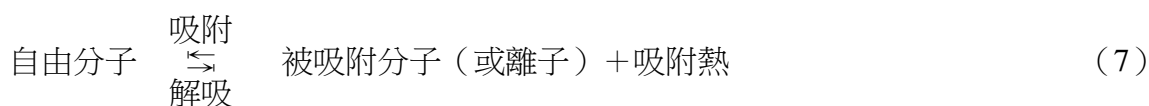


圖 1 化學平衡之條件，與定溫定壓下，系統朝向最小吉布士能狀態移動[2]。

式（6）中 $dG_{\text{face}} < 0$ ，表示為自發性過程，由式（6）得知，當石墨微粒導電聚合物，吸附在表面時。聚合物分子由三維空間運動，變成限制在二維平面運動。亂度（ S ）升高，會降低熵值，即 $dS > 0$ 。則 $-TdS < 0$ ， $dG < 0$ ，物理吸附是放熱反應，故 $\Delta G < 0$ 。

石墨微粒表面吸附在聚合物分子，並非靜止不動。它們受熱擾動、彈性碰撞，離開吸附劑表面，重新回到周圍的介質，這種現象稱為「解吸」。吸附與解吸為可逆反應，物理吸附具有表面吸附飽合的特性，在固定溫度時，隨反應時間達到平衡的穩定狀態，稱為「吸附平衡」，吸附平衡可由基本的動力學模型與統計力學方法求得。可用下式做最簡單的表示：



(二) 碳摻雜濃度與導電係數

聚合物分子的「堆積方式」(molecular packing)，影響對物理特性深遠。石墨微粒的物理吸附作用，縮減聚合物的分子距離，大幅增加分子間的吸引力。以 SEM 電子顯微鏡，觀測不同摻雜濃度的聚氨脂橡膠(polyurethane rubber)，其吸附作用的影像如(圖 2)至(圖 6)所示。這幾張圖顯示聚合物的第二級「鍵結力」(bonding forces)，與高分子量，造成分子內的「殘餘力」(high residual force)很高。石墨微粒摻雜濃度過高，產生極大的吸引力。使分子緊密堆積在一起，排列出高度規則性結構。然而聚合物有高分子量，與結構的缺陷，無法平行地排列。

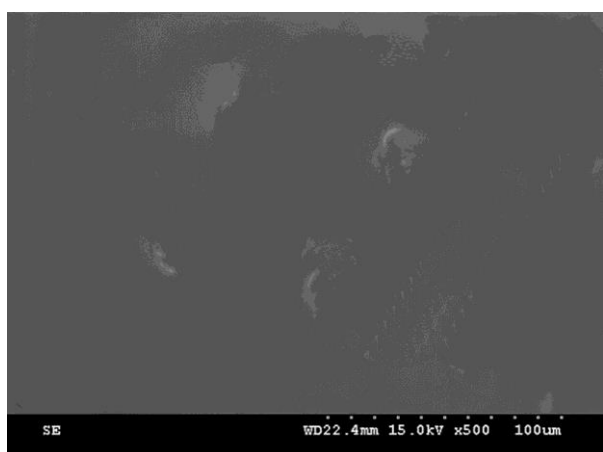


圖 2 聚氨脂橡膠

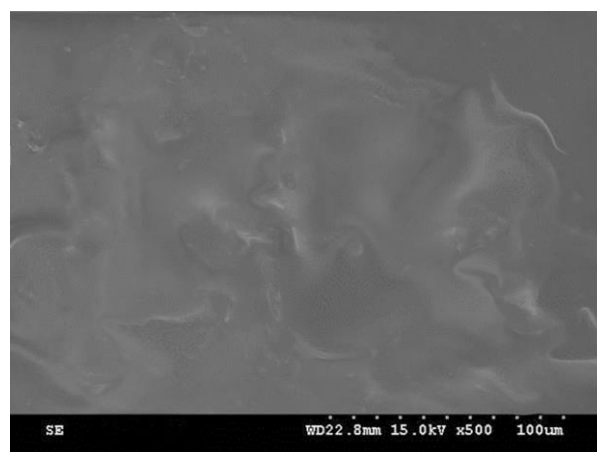


圖 3 聚氨脂橡膠摻雜 4M 濃度的石墨微粒

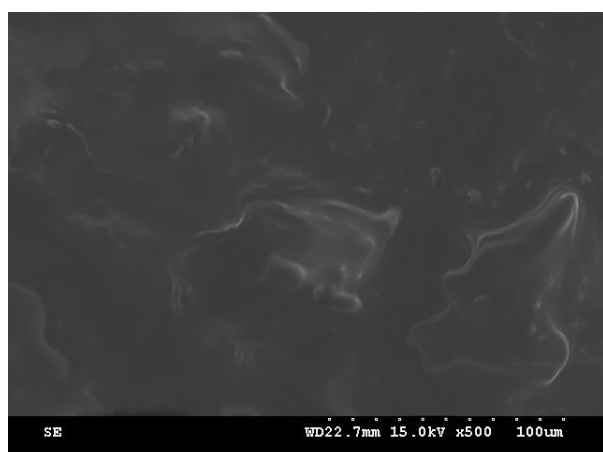


圖 4 聚氨脂橡膠摻雜 20M 濃度的石墨微粒

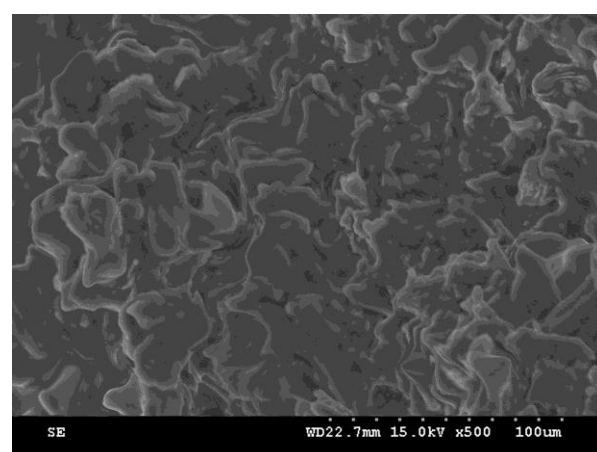


圖 5 聚氨脂橡膠摻雜 40M 濃度的石墨微粒

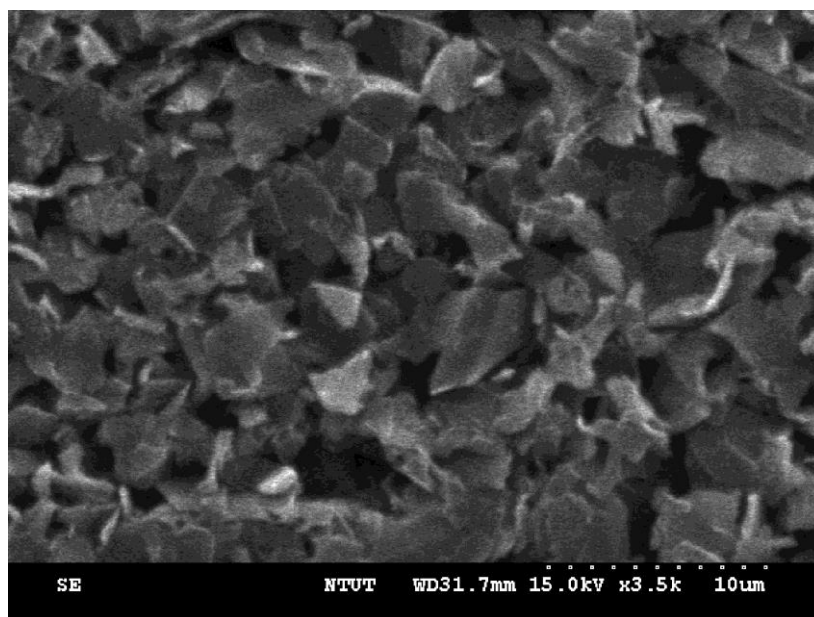


圖 6 聚氨脂橡膠摻雜 40M 濃度的石墨微粒，噴印於 PET 的樣品

碳原子排列成「石墨結構」(graphite structure)時，由三個「 sp^2 混成軌域」(sp^2 hybridized orbits)組成。原子靠近時會互相影響，電子狀態 (electronic state) 為 $2s-2p$ 。每層的原子以 σ 鍵，結合鄰近的三個碳原子，形成很強的共價鍵。各層之間的垂直方向，由許多未混成 p 軌域 (unhybridized p orbits) 形成「 π 鍵」(π bond)。由於共振關係， π 鍵的能隙很窄。價電子 (valence electrons) 容易在 π 軌域中移動，導電性良好。由 (圖 2) 至 (圖 6)，SEM 電子顯微鏡觀測的影像，顯示增加石墨微粒的濃度，能提升物理吸附作用，石墨微粒間的距離，接近「凡得瓦半徑」($0.3354 \pm 0.000001\text{nm}$)。價電子在分子間交疊，電阻大幅降低。

有足夠的碳原子互相接近，如 (圖 7) 所示，會形成連續能階。使原本固定於價電帶的電子，可以在原子間移動。這些電子無法區分屬於那個原子，稱為「電子的共有化」(electron sharing)。它們既有圍繞原子運動的特性，又有共有化運動的特性，分裂成多組「能階」(energy level)。每一組的能階很接近，近似連續。組成一個具有特定寬度的帶 (band)，這種能階緊密排列的帶狀，稱為「能帶」(energy band)。

孤立的單一原子，電子被束縛在特定的能階 (energy levels)。另一個原子非常接近時，原子的交互作用，使能階分裂成二個，產生簡併狀態 (degenerate state)。再多一個原子靠近，會分裂成三個能階。因此 N 個原子形成一個固體，會分裂成 N 個能階，且這些能帶彼此接近。每一個獨立的碳原子，電子結構都是 $1s^2 2s^2 2p^2$ 。因此單獨的碳原子，

有二個 1s 狀態；二個 2s 狀態；6 個 2p 狀態與較高的能量狀態。N 個碳原子，則有 $2 \times N$ 個 1s 狀態； $2 \times N$ 個 2s 狀態與 6 個 2p 狀態。

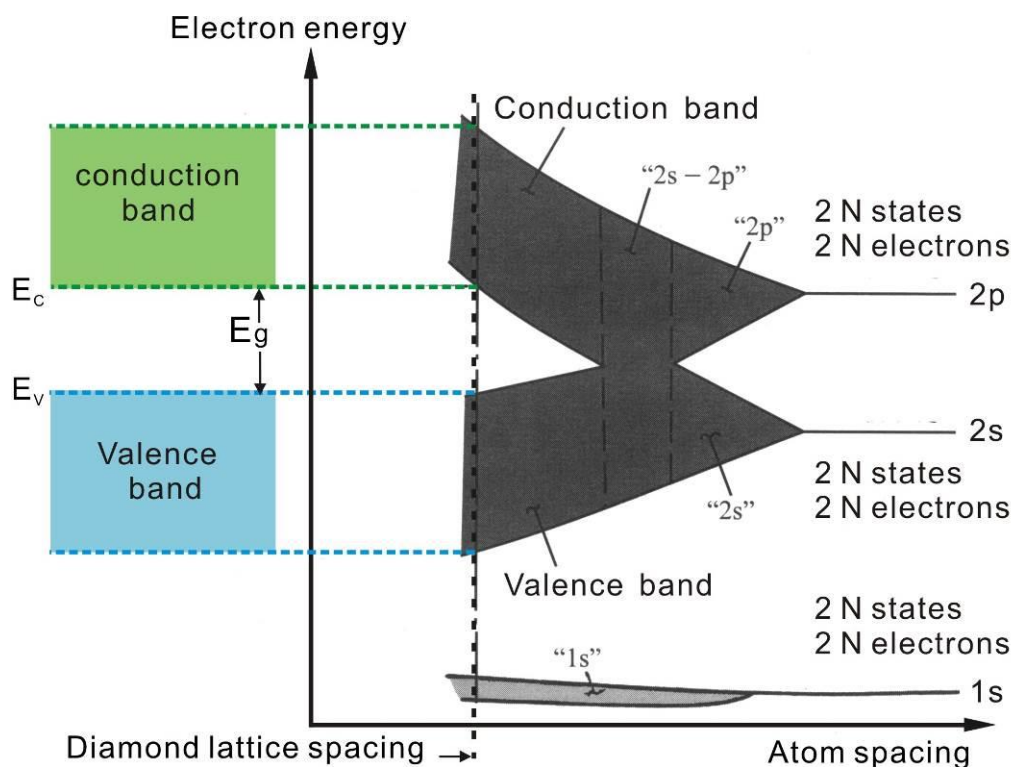


圖 7 碳原子的電子結構[3]

(圖 8) 為固體能隙模型 (solid energy gap model)，不同能階 (energy level) 間區域，沒有任何電子，稱為能隙 (energy gap) 或禁止帶 (forbidden band)。能隙寬度是區別絕緣體、半導體與導體的指標。石墨微粒的碳原子，能隙很窄，所以電阻值很低。

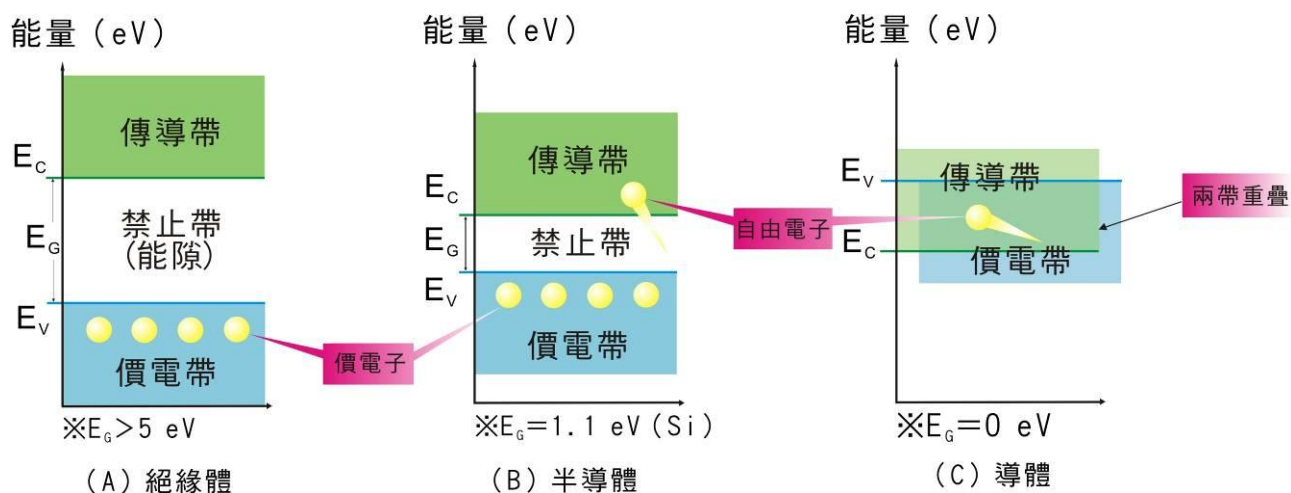


圖 8 固體的能隙模型

碳原子之間的距離再拉近，碳原子就會形成為鑽石晶格（diamond lattice）（圖 9）， $2S-2P$ 能階分散成二個能階，具有 $8 \times N$ 個狀態。上面的能階稱為導帶（conduction band），有 $4 \times N$ 個狀態，下面的能階稱為價帶（valence band），也有 $4 \times N$ 個狀態。這兩個能階被很寬的能隙（energy gap）分開，所以鑽石晶格的碳為絕緣體[4]。

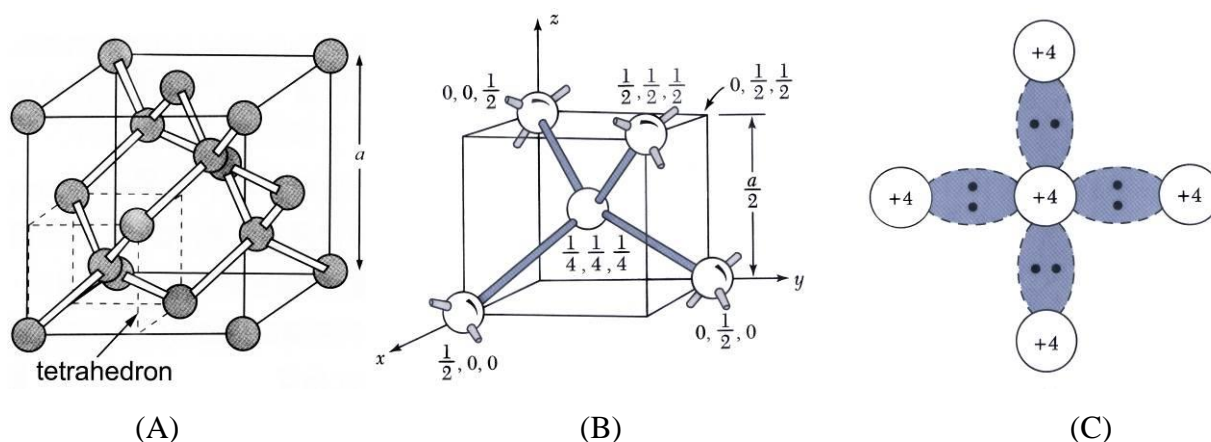


圖 9 鑽石晶格（diamond lattice，例如：Si、Ge、C 等）(A) 四面體鍵結組成的鑽石晶格(B) 四面體鍵結(tetrahedron bond)(C) 四面體鍵結的二度空間示意圖[5]。

二、導電複合材料的製作

運用彈性聚合物材料柔軟、保溫、耐用的特性，設計出貼身的感測器。雖然彈性聚合物材料不具導電性，但石墨微粒能強力吸附有些彈性聚合物。將聚合物加溫熔化，添加高濃度極細的石墨微粒，即可導電。搜尋相關資料並反覆實驗，選擇聚氨脂橡膠作為基材。其重複結構單元如（圖 10）所示，為熱塑性橡膠（TPR，Thermoplastic Rubber），沒有毒性兼具橡膠與熱塑性的材料特性。常溫時具有硫化天然橡膠的黏彈性，加熱後就有熱塑性加工特性。

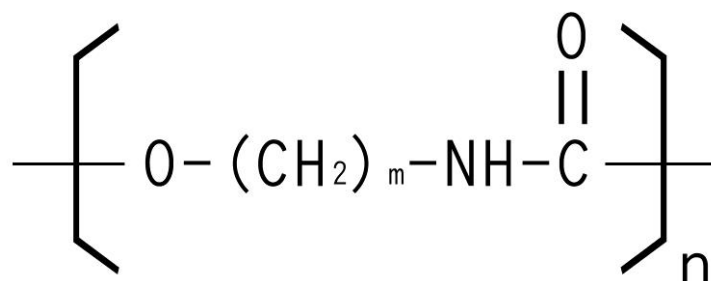


圖 10 聚氨脂的重複結構單元

熱塑性橡膠有兩個分離的聚合物相，常溫時為一相流體（溫度高於 T_g —玻璃化溫度），

另一相為固體（使溫度低於 T_g 或等於 T_g ），兩者相互作用。具有柔軟的觸感，加熱溶解添加互溶的物質，能調整物理特性。可以注模鑄造，或擠壓成型。邊料溢料可以 100% 回收，符合環保。無須硫化就有硫化橡膠的特性，能防止空氣污染，防水性佳且耐低溫（212K）。

為了增加延展性，加入長鏈單鍵結構。將符合 F.D.A（醫療良品級）的聚氨脂樹脂，加熱後添加 15% 醫療用石蠟油（Liquid petrolatum）。石蠟油是原油分餾、無色無味的混合物，含有 16~35 個碳原子的正烷烴，有少量的異構烷烴和環烷烴。將聚氨脂添加石蠟油加熱至 393K，攪拌配製而成高分子化合物（圖 11）。將高分子化合物加溫熔化，添加高濃度極細的石墨粉，灌入模型後取得導電複合材料軟片。本材料清潔衛生，不會飛散、不滴落、不污染環境，不會刺激眼睛或皮膚。



圖 11 高分子化合物加溫熔化實驗

三、導電複合材料電學特性實驗

（一）電阻

電荷（ Q ）移動形成電流，任何材料對電荷移動，都有阻力。抵抗電荷移動的阻力，稱為電阻（簡寫 R ）。其單位為歐姆（Ohm），簡稱 Ω 。決定電阻有以下三個因素：

1. 材料：每種材料的電阻係數（ ρ ）不同，電阻係數與電阻成正比。
2. 材料長度（ l ）：電阻值與材料長度成正比。
3. 材料截面積（ A ）：電阻值與材料截面積成反比。

以上關係可以用（8）式表示：

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (8)$$

(8) 式中， ρ 為材料的電阻係數，SI 制單位為 $\Omega \cdot m$ 。 l 的單位為公尺， A 的單位為平方公尺。

(二) 導電複合材料的能量轉換實驗

將導電複合材料切割成適當大小，兩端貼上銅箔，形成歐姆接觸，依(8)式產生電阻值。將電源供應器輸出的穩定電壓，連接導電複合材料兩端的銅箔，產生固定電流(圖12)。接著測試導電複合材料是否依據動能壓力、電功率、歐姆定律，產生合理的變化(圖13)、(圖14)，再進行以下相關實驗。

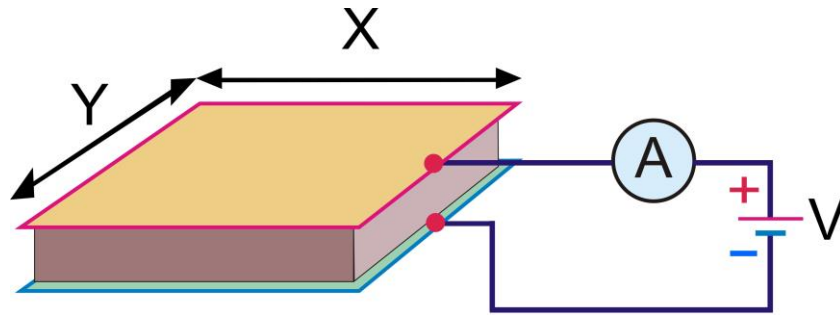


圖12 導電複合材料歐姆定律測試圖

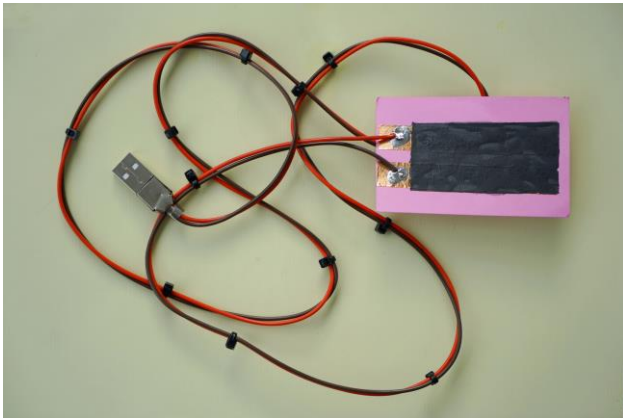


圖13 導電複合材料與接線

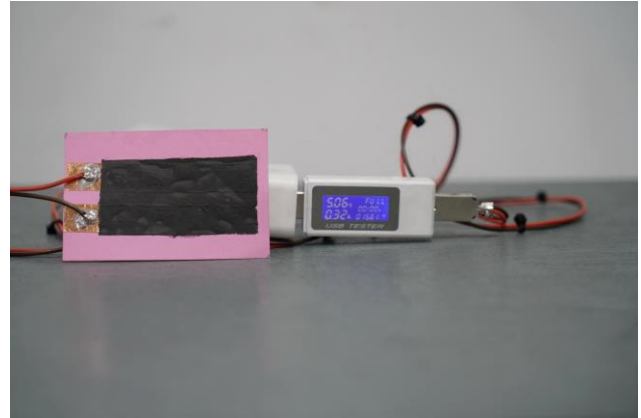


圖14 歐姆定律實驗

(三) 交流特性實驗

由於交流電為目前供電主要來源，許多電子裝置必須藉由交流電源維持運作，因此進行交流特性的相關實驗。

(四) 電阻溫度係數實驗

為了研究橡膠性聚合物材料的電阻受溫度的影響，藉由國立臺北科技大學化學工程

系的恆溫箱，模擬不同的溫度環境（圖 15）。將導電複合材料樣品放入箱中，通電加熱記錄電阻的變化數值。

（五）電子顯微鏡結構分析

物質結構決定了橡膠性聚合物材料的物理特性，因此與國立臺北科技大學化學工程系進行研究交流，以掃描式電子顯微鏡（Scanning Electron Microscope，簡稱 SEM）進行測試。利用電子槍產生電子束，透過電磁透鏡所組成的電子光學系統，使其聚集成微小的電子束照射至試片表面，並將表面產生的訊號加以收集，經放大處理後，輸入到同步掃描之陰極射線管，以顯示試片的表面影像。



圖 15 電阻溫度係數實驗

伍、研究結果

一、導電複合材料特性方程式

為了研究石墨微粒摻雜濃度的電學特性，製作不同摻雜濃度的橡膠性聚合物材料，選擇對碳吸附性很強的聚氨脂（polyurethane）橡膠作為試料。

（一）石墨微粒摻雜濃度與電阻係數

試料的石墨微粒摻雜濃度（doping concentration, C_D ）與電阻係數（resistivity, ρ ）的關係如（圖 16）所示，其電阻係數與摻雜濃度成反比。溫度 300K 石墨微粒摻雜濃度 35M，導電性急遽增加；石墨微粒摻雜濃度增加至 40M，即進入導電的穩定狀態（steady state）；石墨微粒摻雜濃度至 55M，石墨微粒吸附太強，導致試料（specimen）的彈性降低；石墨微粒摻雜濃度至 60M 已達吸附飽和（saturation），使得試料硬化，表面出現許多裂痕，65M 吸附過度飽和，石墨微粒會從試料表面解吸（desorption）。經多次實驗，推導出石墨微粒摻雜濃度的電阻特性方程式如下：

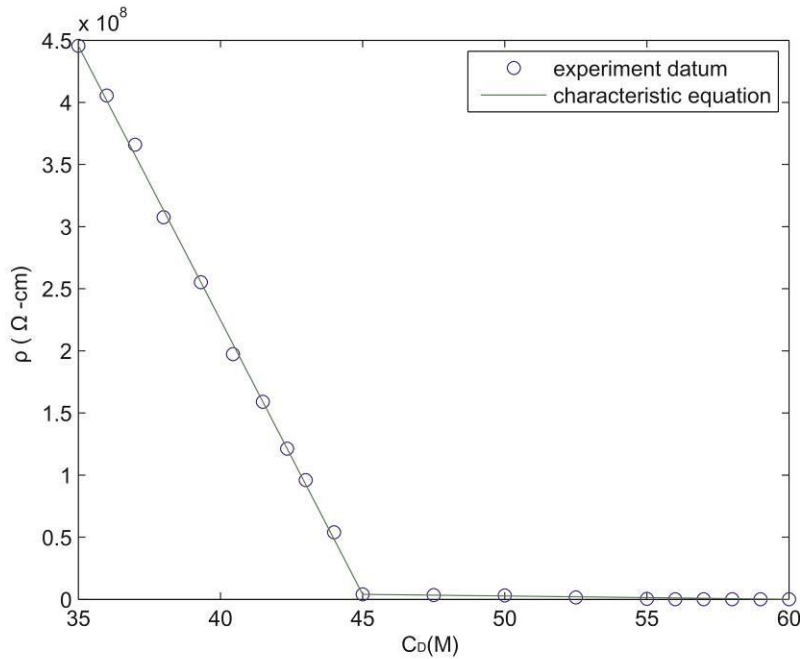


圖 16 石墨微粒摻雜濃度與電阻係數

$$\rho = \begin{cases} (\rho_c - \rho_s) \frac{C_s - C_c}{C_D - C_c} & , \text{ if } C_D > C_c \\ (\rho_0 - \rho_c) \frac{C_c - C_D}{C_c - C_0} & , \text{ if } C_D < C_c \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中， C_0 為聚合物成為電阻材料 (resistance material) 所需要的最低摻雜濃度； ρ_0 是最低摻雜濃度 C_0 之電阻係數； C_c 為導體穩定狀態的臨界摻雜濃度 (critical doping concentration)； ρ_c 為臨界摻雜濃度之電阻係數； C_s 為吸附飽和摻雜濃度 (Saturated doping concentration)； ρ_s 為吸附飽和摻雜濃度之電阻係數。溫度 300K 時，聚氨脂橡膠摻雜石墨微粒之 $C_0=35M$ 、 $C_c=45M$ 、 $C_s=60M$ 、 $\rho_0=4.456 \times 10^8 \Omega\text{-cm}$ 、 $\rho_c=4 \times 10^6 \Omega\text{-cm}$ 、 $\rho_s=1.12 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$ 。

(二) 活性碳摻雜濃度與電阻係數

(圖 17) 為導電複合材料的活性碳摻雜濃度 (C_D)，與電阻係數 (ρ) 的關係。活性碳摻雜濃度至 75M，導電性急遽增加，活性碳摻雜濃度 79M 時，即進入導電的穩定狀態 (steadystate)。摻雜濃度至 90M，活性碳的吸附飽和，聚合物的彈性開始劣化，所以試料的邊緣有微小的裂縫。

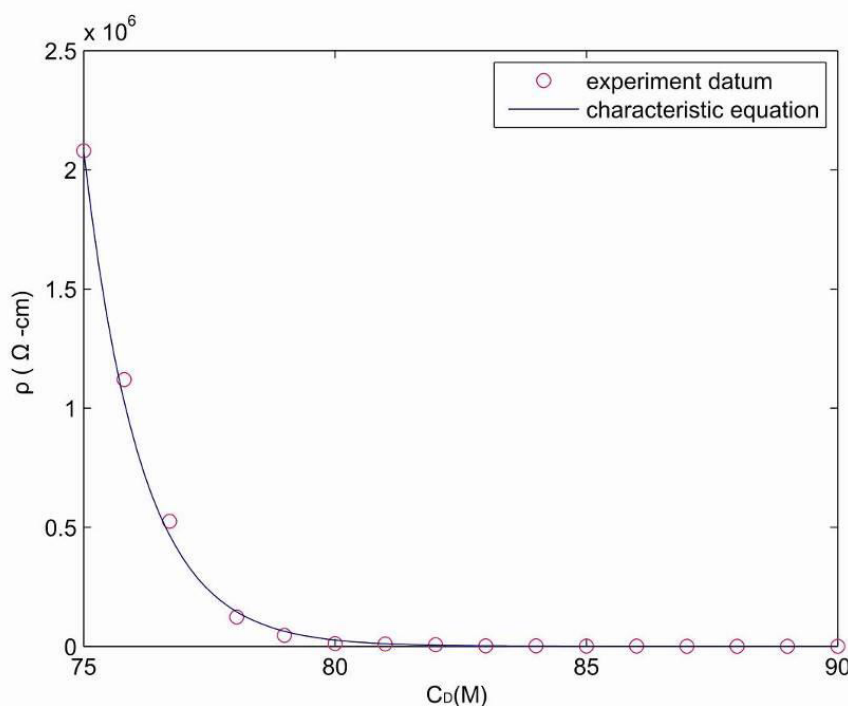


圖 17 活性碳摻雜濃度與電阻係數

經由多次實驗，推導出活性碳摻雜濃度的電阻特性方程式如下：

$$\rho = \rho_s + \rho_0 \cdot e^{-Q_m \frac{C_D - C_0}{C_c - C_0}} \quad (10)$$

式(10)中， C_0 為聚合物成為電阻材料 (resistance material) 所需要的最低摻雜濃度； ρ_0 為最低摻雜濃度 C_0 之電阻係數； C_c 為導電穩定狀態的臨界摻雜濃度 (critical

concentration)； C_s 為吸附飽和摻雜濃度 (Saturation concentration)； ρ_s 為吸附飽和摻雜濃度之電阻係數； Q_m 為材料的品質因素 (quality factor)，為無因次 (dimensionless)，石墨粉的 Q_m 值為 4。溫度 300K 時，聚氨脂橡膠摻雜活性碳之 $C_0=75M$ 、 $C_c=80M$ 、 $C_s=90M$ 、 $\rho_0=2.08 \times 10^6 \Omega\text{-cm}$ 、 $\rho_s=3.04 \times 10^2 \Omega\text{-cm}$ 。當 C_D 小於 C_c 時，式 (10) 可簡化如下：

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{-Q \frac{C_D - C_0}{C_c - C_0}} \quad (11)$$

(三) 物理吸附的電阻溫度係數

物理吸附沒有進行化學反應，所以需要能量較小，容易進行反應，因此低溫就能快速反應。吸附是放熱反應，因此聚合物的物理吸附所產生的電阻與溫度成正比。物理吸附的主要作用力為微弱的凡得瓦力 (van der Waals force)，容易受到溫度影響，因此電阻溫度係數變化很大 [6,7]。摻雜 80M 濃度活性碳的聚氨脂橡膠，其電阻溫度特性如 (圖 18) 所示。其中電阻係數 (ρ) 與溫度的特性方程式如下：

$$\rho = \begin{cases} \rho_0, & \text{if } T_e < T_0 \\ \rho_0 + (\rho_l - \rho_0) \cdot e^{\frac{Q_{Td} \cdot D_m (T_e - T_0)}{T_l - T_0}}, & \text{if } T_e < T_l \\ (\rho_c - \rho_{pl}) \frac{T_c - T_e}{T_c - T_l}, & \text{if } T_{pl} < T_e < T_c \\ (\rho_{nl} - \rho_c) \frac{T_{nl} - T_e}{T_{nl} - T_c}, & \text{if } T_c < T_e < T_{nl} \\ \rho_c \cdot e^{-\frac{Q_{Td} (T_e - T_c)}{T_m - T_c}}, & \text{if } T_e > T_c \end{cases} \quad (12)$$

式 (12) 中， T_0 為開始解吸的溫度； ρ_0 為溫度 T_0 時的電阻係數； T_{pl} 為正溫度係數線性區的起始溫度； ρ_{pl} 為溫度 T_{pl} 時的電阻係數； T_c 為彈性聚合物的正負溫度係數的臨界溫度 (critical temperature)； ρ_c 為溫度 T_c 時的電阻係數； T_{nl} 為負溫度係數線性區的截止溫度； ρ_{nl} 為溫度 T_{nl} 時的電阻係數； T_m 為彈性聚合物的溶解 (melt) 溫度； ρ_m 為溫度 T_m 時的電阻係數； T_e 為測試的環境 (environment) 溫度； Q_{Td} 為材料的熱力學 (thermodynamics) 特性，為無因次 (dimensionless)，活性碳的 Q_{Td} 為 2； D_m 為材料的熱解吸特性，為無因次 (dimensionless)，活性碳的 D_m 為 3。聚氨脂橡膠摻雜 80M 濃度的活性碳，其 $T_0=267K$ 、 $T_{pl}=312K$ 、 $T_c=319K$ 、 $T_{nl}=322.5K$ 、 $T_m=343K$ 、 $\rho_0=1.296 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$ 、 $\rho_{pl}=4.88 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$ 、 $\rho_c=5.712 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$ 、 $\rho_{nl}=4.936 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$ 、 $\rho_m=7.04 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$ 。

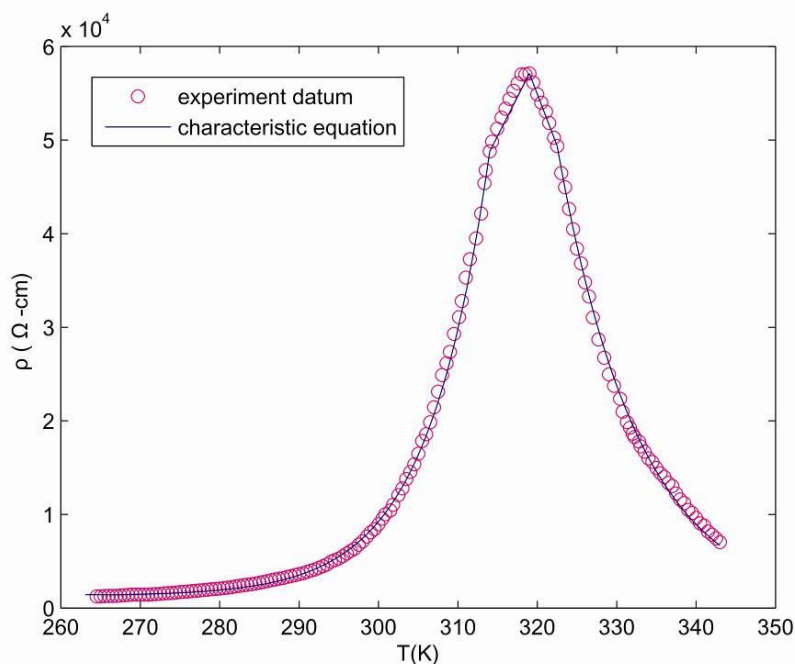


圖 18 聚氨脂橡膠摻雜 80M 濃度活性碳的電阻溫度特性

聚氨脂橡膠摻雜石墨微粒，其電阻溫度特性如（圖 19）。其中電阻係數（ ρ ）與溫度的特性方程式，也符合式（5）。聚氨脂橡膠摻雜濃度 40M 的石墨微粒，其 $Q_{Td}=1.3$ 、 $D_m=7.7$ 、 $T_0=277K$ 、 $T_{pl}=333K$ 、 $T_c=335K$ 、 $T_{nl}=337K$ 、 $T_m=343K$ 、 $\rho_0=2.856 \times 10^6 \Omega\text{-cm}$ 、 $\rho_{pl}=9.384 \times 10^6 \Omega\text{-cm}$ 、 $\rho_c=9.912 \times 10^6 \Omega\text{-cm}$ 、 $\rho_{nl}=7.696 \times 10^6 \Omega\text{-cm}$ 、 $\rho_m=2.088 \times 10^6 \Omega\text{-cm}$ 。

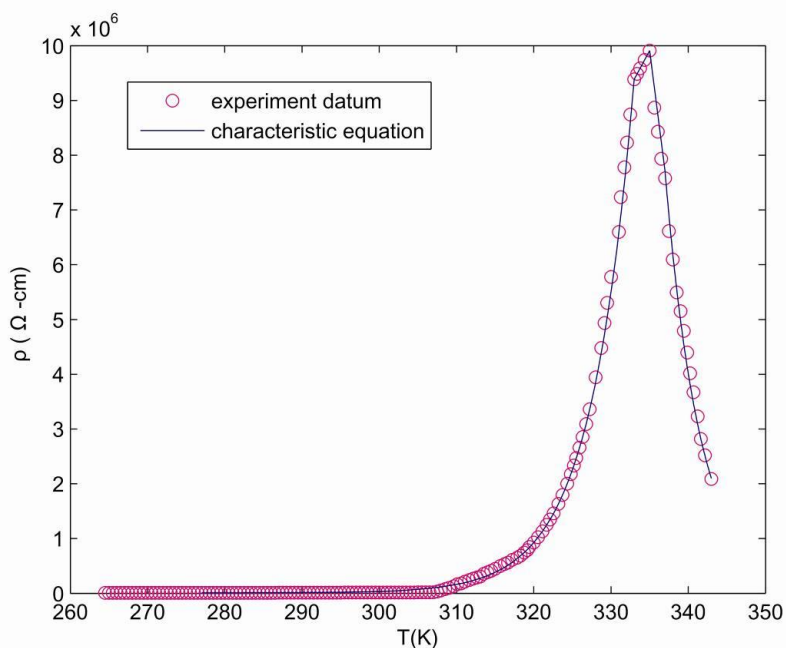


圖 19 聚氨脂橡膠摻雜 40M 濃度石墨微粒的電阻溫度特性

由於 ρ_m 比 ρ_0 高出很多，導電複合材料的電阻值，為物理吸附所產生。環境溫度 T_e 高於 T_c 時，價電帶的電子動能增加，使能隙變小。此時導電複合材料的電阻溫度特性，

與半導體相同。因此導電複合材料的電阻溫度係數，具有金屬導體，與半導體的雙重特性。

彈聚合物摻雜石墨粉或活性碳，產生物理吸附的電阻溫度係數，其特性方程式相同，物理特性相同。只是石墨微粒的表面積較大，因此材料的熱力學特性（ Q_{Td} ）及材料的熱解吸特性（ D_m ）的數值不同，使得石墨微粒的溫度特性曲線較為尖銳。

二、超低頻物質波感測器

（一）超低頻物質波測器設計與製作

本研究藉由薄膜的形變，而改變電阻值。接上固定的電壓源，通電後依據歐姆定律，產生電流變化。以厚度只有 $100\ \mu\text{m}$ 的 PET（化學名詞為 positron emission tomography，聚對苯二甲酸乙二酯）薄膜作為基底材料，裁切成 A4 的尺寸。在表面噴塗自行研發的導電複合材料，於薄膜兩端貼上雙面銅箔膠帶，作為感測器的兩個電極。位移與薄膜垂直的集中力為 F 施加在隔膜上，電極位移改變了電阻抗（圖 20）。將 PET 薄膜兩側黏貼柔軟的銅箔，在銅箔間噴塗導電彈性聚合物，形成導電薄膜。薄膜位於待測位置，待測面的位移與薄膜垂直，將動能視為集中力 F 持續的施加在隔膜上，電極產生位移變化改變了電阻抗。感測器的等效電路如（圖 21）所示，圖中 $Z_{12}(x)$ ：阻抗隨 x 微動改變。

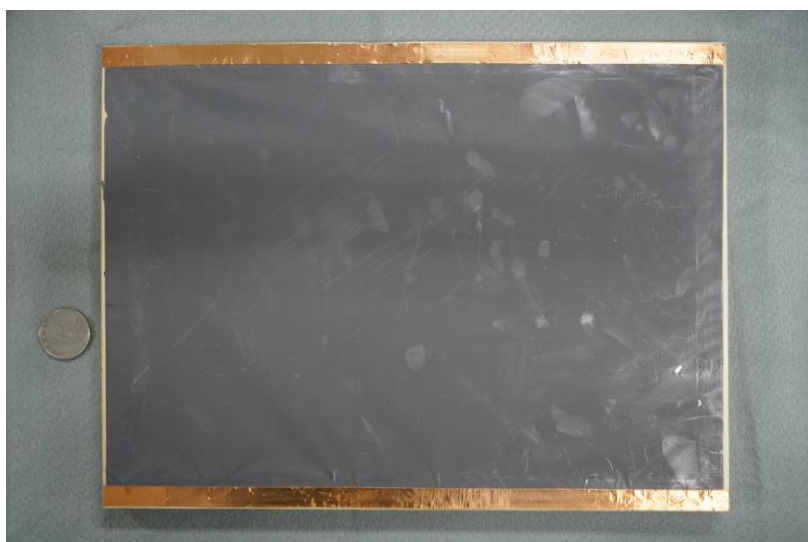


圖 20 超低頻物質波感測器

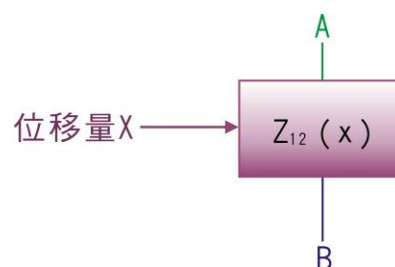


圖 21 感測器等效電路

（二）超低頻物質波感測器特性測試

1. 直流阻抗，測試圖（圖 22）

為分析超低頻物質波感測器理想的直流工作區間，研發多種結構的感測器，經長

時間連續測試其輸入電流與輸出電壓之關係曲線，以找出接近線性關係的條件。

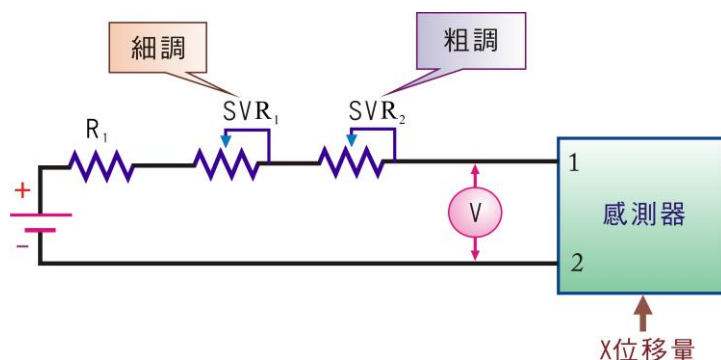


圖 22 超低頻物質波感測器直流阻抗測試圖

2. 能量轉換特性曲線

超低頻物質波感測器兩端輸出電壓與薄膜位移量（X）之能量轉換，經（圖 23）之量測架構多次實驗，探索更接近線性的能量轉換曲線感測器架構。（圖 24）則為微動量位移量具設計圖。

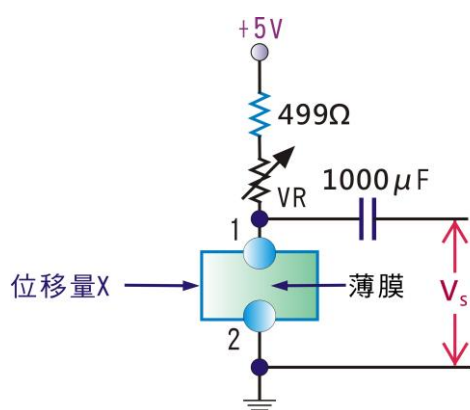


圖 23 能量轉換實驗接線圖

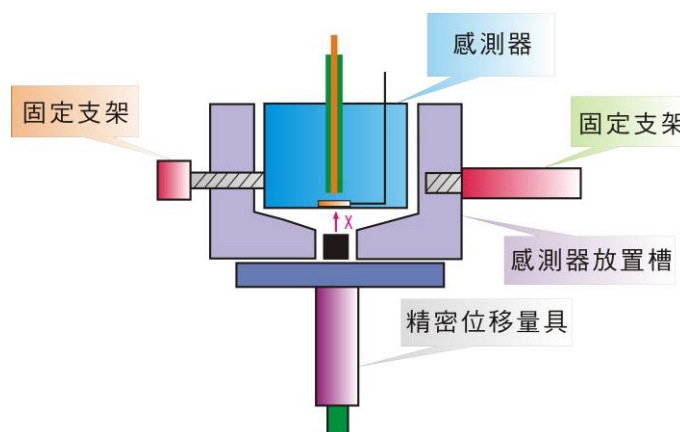


圖 24 超低頻物質波位移量具設計圖

3. 交流特性測試（圖 25）

交流電為目前供電主要來源，許多裝置以交流電源運作，因此進行交流特性實驗。

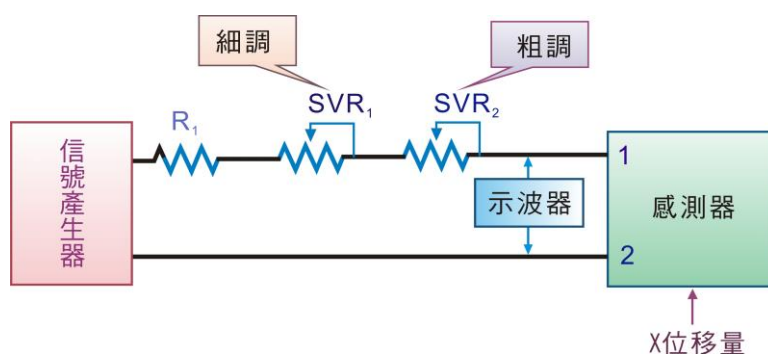


圖 25 超低頻物質波感測器交流特性實驗

二、系統整合

(圖 26) 為超低頻物質波感測系統方塊圖，將固定直流電壓串聯一個電阻，連接導電彈性聚合物的兩個電極，依分壓定律隨著感測器接點的位移，使輸出電壓產生相對變化，藉由電容交連濾除直流偏壓。以緩衝級放大器將電壓加大，再以濾波器將高頻雜訊去除，最後將訊號轉換成數位訊號匯入電腦。

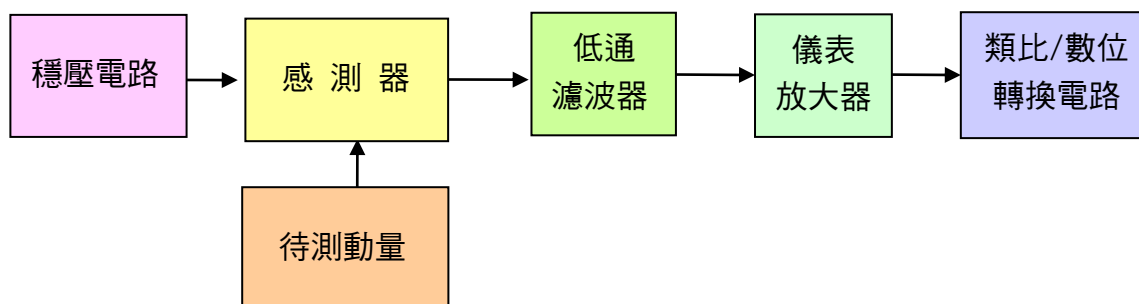


圖 26 超低頻物質波感測系統方塊圖

(一) 儀表放大器

人體呼吸所產生的壓力較弱，必須將感測器擷取的訊號放大才能進行後續處理。(圖 27) 為儀表放大器電路。由於各種量測對象的動量不同，所以放大電路的增益為可調式，其增益為 30dB 至 60dB。由於電壓放大倍率很高，提升 S/N 比（訊號對雜訊比）為此電路之核心，主動元件採用低雜訊運算放大器將雜訊大幅降低。

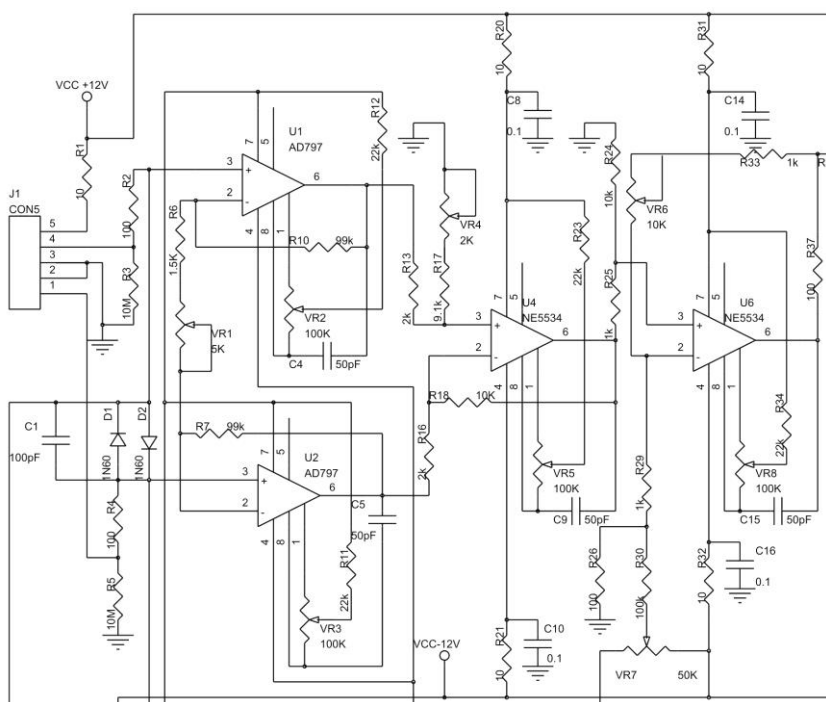
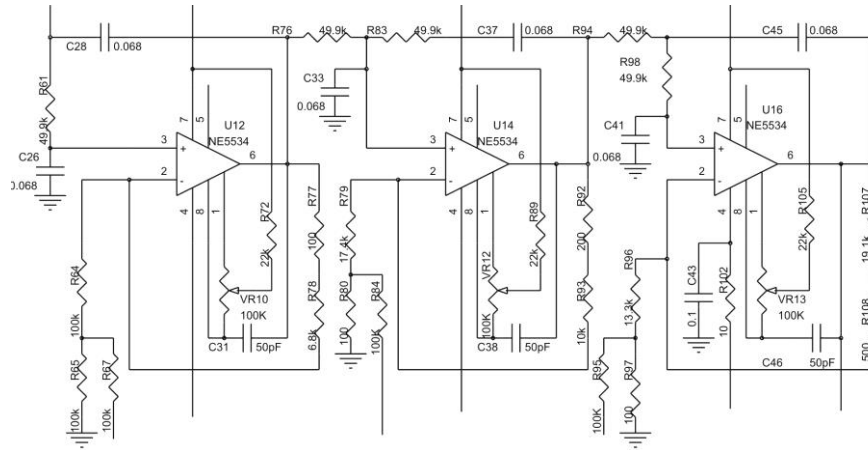


圖 27 超低頻物質波感測器系統儀表放大器

(二) 濾波電路

濾波電路係由一階 0.01Hz 被動高通濾波器（圖 28），以及六階巴特霍斯低通主動濾波器（Butterworth low pass filter）組成。高通截止頻率 0.01Hz 濾波器，可降低直流漂移所造成的干擾。低通截止頻率為 30Hz ，訊號增益為 4 倍。濾掉高於 30Hz 的頻率成分，主要目的在將一般市電 60Hz ，與振盪電路產生的載波都濾掉。確保所擷取到的訊號沒有上述雜訊。



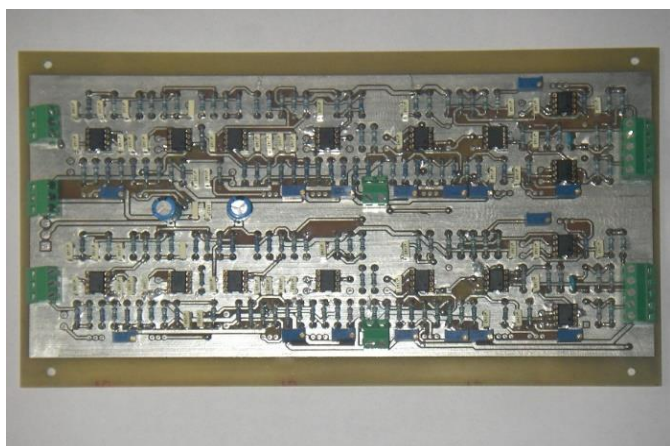


圖 30 初期純手工製作的類比系統電路板

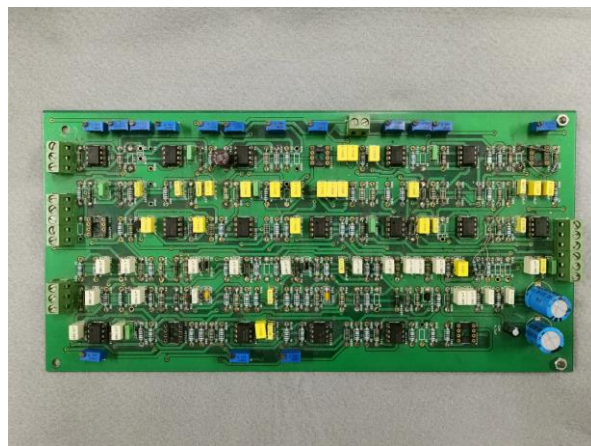


圖 31 委託工廠製作的類比系統電路板

(四) 數位化分析系統

將超低頻物質波感測器的輸出訊號，轉換成數位訊號。再用 USB 介面匯入電腦，撰寫應用程式，其人機介面如（圖 32）所示，能隨時進行訊號分析，並且兼具遠端監控功能。從電腦螢幕顯示的數位化呼吸波形（圖 33），證實我們自製的超低頻物質波感測器，能在老人身旁一公尺，感測到他們的呼吸動量。並且可以從波形與頻率，分析健康的差異性。

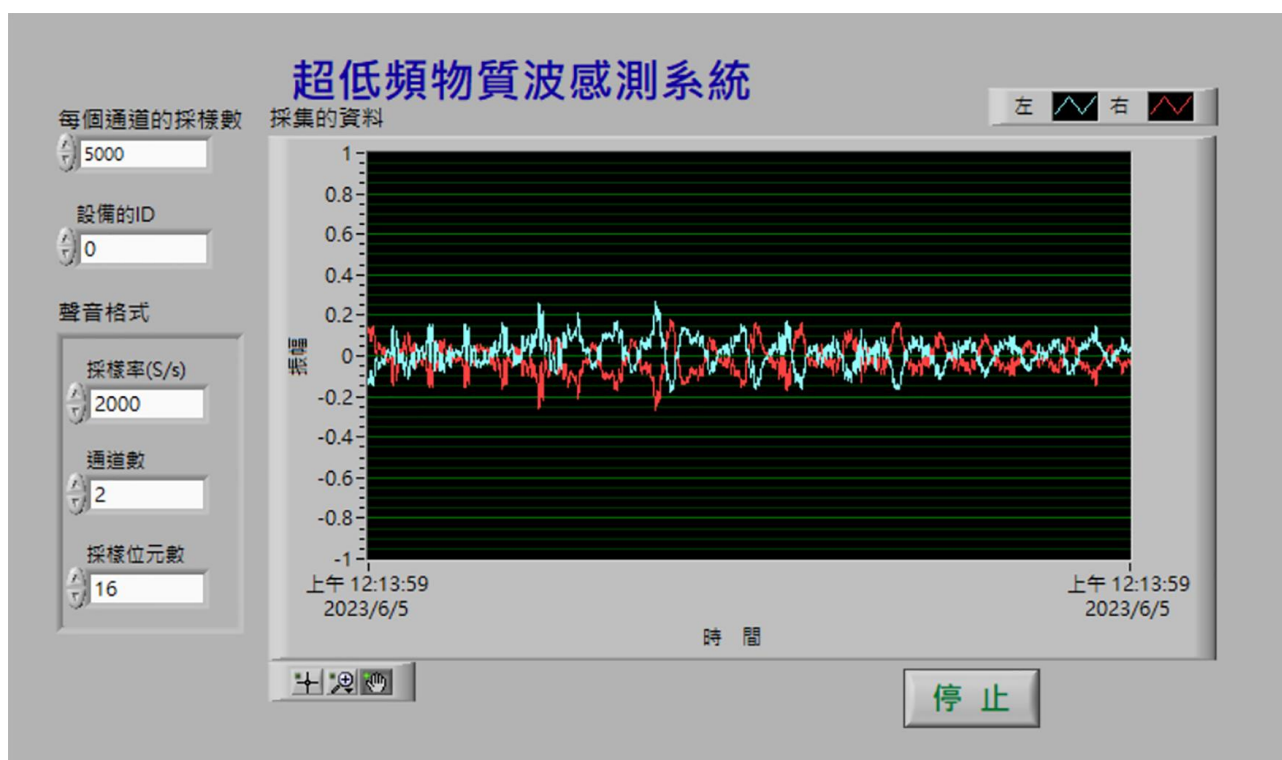


圖 32 本系統的人機介面

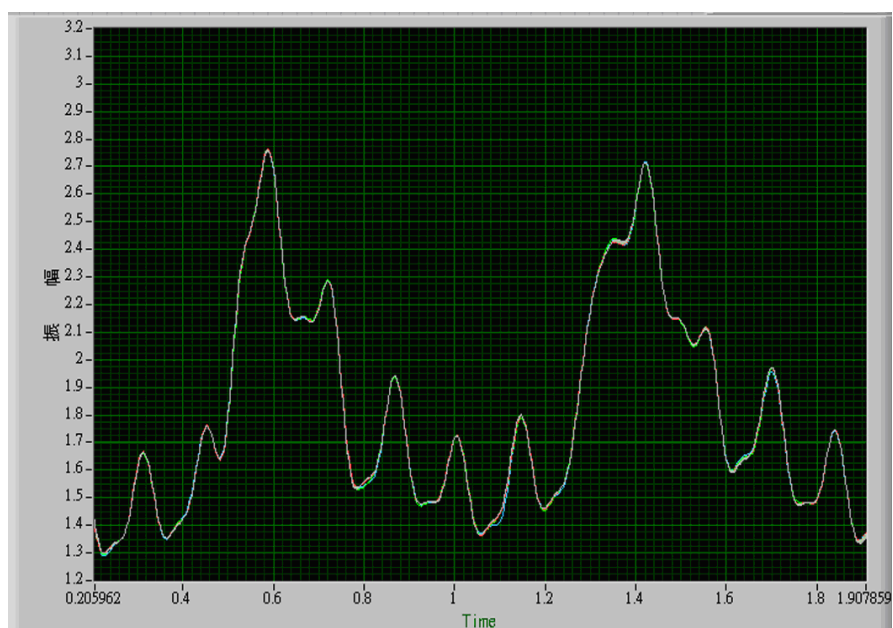


圖 33 本系統顯示的老人呼吸波形

陸、討論

一、問題：導電複合材料相關電路的電子訊號，對於人體、生物與醫療器材有無影響？

討論：本系統傳送的訊號，為導體傳送之直流與低頻交流電訊號。不是無線電所用的電磁波，或是會震動物體的物質波，因此沒有電磁波造成的干擾，亦無超音波干擾之疑慮。

解決方案：請教醫生，醫生表示不會有影響。

二、問題：本研究如何大量生產？

討論：本研究導電複合材料，能用界面活性劑、有機溶劑溶解。可以用網版印刷的方式，印製在絕緣的底材，如 PET 薄膜或布面。也可以用自動化噴塗設備，就能大量生產。

三、問題：OPA 會有直流偏移，無訊號時會有直流輸出，應如何調整？

討論：將 OPA Off-set 的兩支接腳，接上可變電阻 $20K\Omega$ 兩端，可變電阻中間可變端，接至 OPA 的負電源。調整可變電阻後，雖然沒有直流輸出，卻使輸出波形失真。

解決方案：經過多次實驗，發現設定放大倍率的兩顆電阻，將接地端改接 $10\mu F$ 電解質電容器至地端。即交流訊號浮接接地；直流則以運算放大器虛接地，自動平衡。達成沒有直流偏移，且波形不失真的目標。

柒、結論

一、結論

石墨微粒由碳原子組成，能藉由物理吸附，改變彈性聚合物的分子堆積方式（molecular packing），縮短分子間的距離，造成分子內很高的殘餘力（high residual force）。石墨微粒能將分子緊密地堆積在一起，減少能隙寬度，使聚合物具有半導體的物理特性，並且沒有電感性，十分適合無線電射頻之運用。因此，近十年來有機電子學蓬勃發展，深具電子科技的實用價值 [8]。

石墨微粒的摻雜濃度，與電阻係數為線性關係。因此石墨微粒的表面積與粒徑（particle size）比例，會影響導電特性。石墨微粒的表面積，與粒徑之比例甚大時，摻雜濃度與電阻係數為線性關係。比例較低則為指數關係，這個特性有深入研究之價值。

二、電子顯微鏡的研究

（一）聚合物的物理力學特性

物質的凝聚狀態包括晶態、液態、玻璃態與液晶態。高分子聚合物也包含了這些凝聚狀態。然而高分子化學鍵既長又柔軟，形成有秩序或無秩序的排列，使結構具有特殊的複雜性。每個高分子的化學鍵，是由成千上萬個結構單元所組成。每個結構單元等於一個小分子，所以每一條高分子化學鍵，有可能存在獨特的鍵結狀態。

藉由電子顯微鏡的觀察，得知高分子聚合物的凝聚狀態結構，是加工過程所形成的，也是決定物理力學特性的關鍵因素。因此，理解凝聚態結構，與形成的條件，合理地調整加工條件，進而控制凝聚態結構，是提升研究系統十分重要的環節。

（二）固體型式

非晶（amorphous）、多晶（polycrystalline）及單晶（single crystal）為固體的三種普遍型式。每一種型式可由材料中，具有規律性區域的尺寸大小來界定。所謂規律性區域，表示原子或分子在此空間上，具有整齊的週期性排列方式。非晶材料僅具有數個原子，或分子大小的規律性區域。而多晶材料則具有數十、百個原子或分子的規律性區域。這些尺寸不一致的規律性區域（可視為局部的單晶區）的原子，或分子之排列方向，並不相同。此等尺寸、方向互不一致的局部性規律性區域，稱為「晶粒」（grain）。晶粒之間，

以所謂的「晶界」(grain boundary) 相互分離。理想上，單晶材料具有完整的原子或分子的週期性排列。亦即其規律性區域，擴及至整個材料空間。由於晶界會降低電子特性表現，一般而言，單晶材料比非單晶的材料具有較佳的電性。(圖 34) 顯示非晶、多晶及單晶材料中，其原子或分子在二維空間排列的型式。

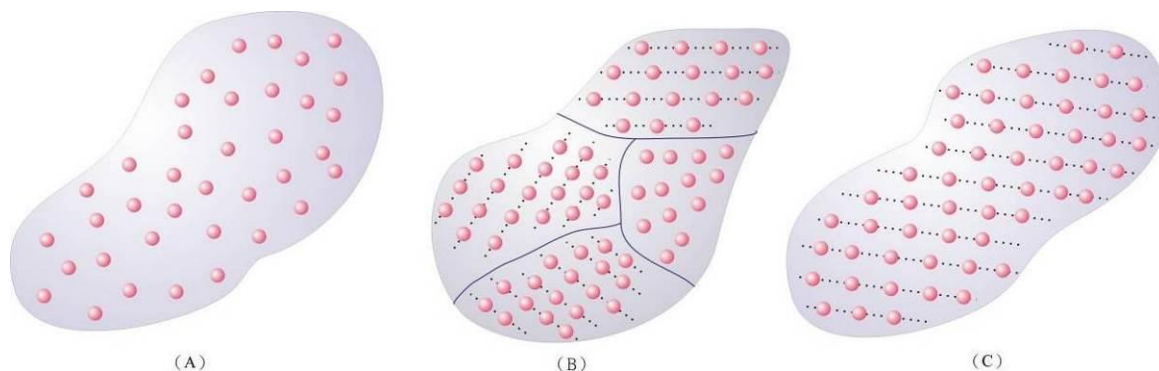


圖 34 (A) 非晶 (B) 多晶 (C) 單晶

體積莫耳濃度 4M 的導電複合材料，其側邊撕裂處 SEM 電子顯微鏡攝影如 (圖 35) 所示。與丁二烯之斷面不同 (圖 36)，丁二烯加入異戊二烯，含量提升至 25% 時，共聚物的衝擊強度大幅提升，進而發生「脆韌轉變」。以 SEM 電子顯微鏡觀察，呈現出剪切帶。以電子顯微鏡的觀察得知，導電複合材料側邊撕裂處無此現象，因此介於多晶與非晶之間的結構，並且比較偏向非晶結構。而半導體與金屬，十分接近單晶。因此電阻特性、比熱、可塑性、彈性等，都有很大的差異，值得深入研究。

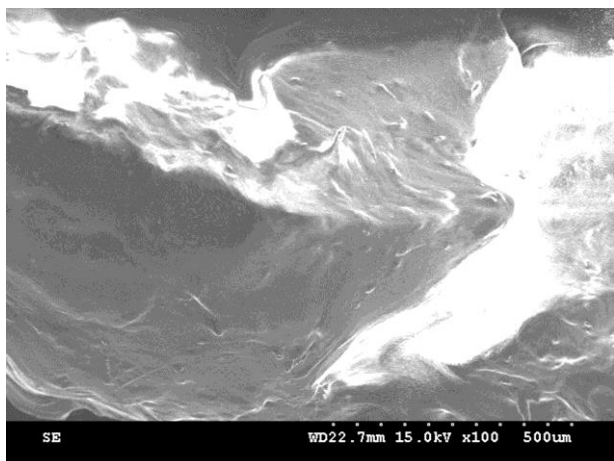


圖 35 添加碳 4M 的導電複合材料側邊撕裂處

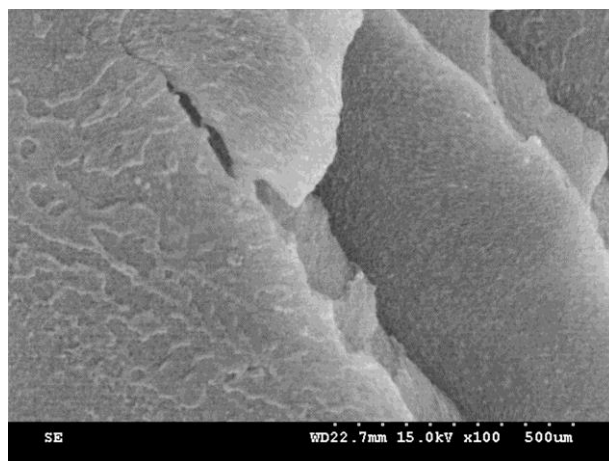


圖 36 丁二烯之斷面撕裂處

捌、參考資料及其他

- [1] 內政部戶政司（2021）。人口政策資料彙集。作者出版。
- [2] Laidler&Meiser原著，郭冠麟、王榮英、陳寶祺合譯（2006）。物理化學（初版，頁153）。學富文化。
- [3] Alexander Kraft, Int. J. (2007), *Electrochem. Sci.*, 2 , 355-385.
- [4] Iwasita, T.; Schmickler, W. Ber. Bunsen-Ges, (1985), *Electron transfer at different electrode materials: Metals, semiconductors*, 89, 138-42.
- [5] Iwasita, T.; Schmickler, W. Ber. Bunsen-Ges, (1985), *Electron transfer at different electrode materials: Metals, semiconductors*, 89, 138-42.
- [6] Royea, W. J.; Hamann, T. W.; Brunschwig, B. S.; Lewis, N. S. J. (2006) *Phys. Chem. B*, 110, 19433-19442.
- [7] C.D. Dimitrakopoulos, P.R.L. Malenfant, Adv. Mater. 14, (2002), *Organic thin film transistors for large area electronics*, 99-117.
- [8] C.D. Dimitrakopoulos, P.R.L. Malenfant, Adv. Mater. 14, (2002), *Organic thin film transistors for large area electronics*, 99-117.
- [9] 曾國輝（2002）。化學。藝軒圖書出版社。
- [10] 林敬二等（2007）。高中物質科學化學篇（下冊）。三民書局。
- [11] 中華民國科學教育館（1990）。中小學科展作品專輯。豐山彩色印書有限公司。
- [12] 劉省宏（1999）。醫用電子實習（二版）。全華科技圖書。
- [13] 施威銘主編（2016）。Android App 程式設計教本之無痛起步（初版）。旗標。
- [14] Arthur C. Guyton（1998）。蓋統生理學上冊（初版）。華杏書局。

【評語】 052303

1. 作品自製超低頻電阻式感測器，可偵測微弱的超低頻震動訊號，如呼吸波形，希望能應用於偵測地震，或災難時偵測生命跡象，有應用價值。
2. 物質波通常用在量子力學中，描述物質具波動性時使用。在這裡可以考慮使用其他的名稱，避免混淆。
3. 作者可以對作品相關研究做更深入的了解，並說明作品的創新性或進步性，同時說明感測元件設計的原理及其架構的由來。
4. 對於感測元件的使用及限制可以更仔細的探究，並詳實說明測試感測元件、電路、及如何裝設，對於得到訊號可以做更多分析，例如做頻譜分析及背景雜訊的比較。

作品海報

超低頻

物質波感測系統

● 壹、研究動機

我國已步入高齡社會，老年人口比率逐年攀升，面對此一高齡社會，安全與健康成為特別關注之課題。並且臺灣位板塊交界處地震頻仍，災後要搜尋生還者是一大難題。我們研究本系統，藉由電腦與手機遙測方式，進行人體呼吸、脈搏之偵測，達成生命跡象偵測，與病理預警之功能，並隨時得知民眾健康狀況，達成關懷人群的淑世目標，使人們免於病痛的恐懼。。

● 貳、研究目的

本研究目的係運用所學，將材料科學融入固態物理學研究的範疇，避免過多的誤差影響實驗結果。如果將導電複合材料運用於感測器，必須具備良好的能量轉換曲線、頻率響應與溫度特性。因此我們進行相關實驗，探究設法加以改善。

● 參、研究過程或方法

一、吸附與導電性

將摻雜碳粉的橡膠性聚合物材料加熱，熔點較低的聚合物完全蒸發後剩下碳粉，這些碳粉的質量與粒徑並沒有改變，因此碳與橡膠性聚合物材料為物理吸附（physisorption）又稱凡得瓦吸附，沒有化學反應，碳與橡膠性聚合物材料吸附所產生的導電特性如下：

（一）聚合物與活性碳的吸附反應

吸附是指物質的界面，吸引周圍介質的質點，使其暫時停留的現象。物質能將周圍介質，吸引在自己表面上的物質稱為吸附劑，被吸附劑吸附的物質則稱為吸附物，本研究以石墨與活性碳粉末作為固體導電性吸附劑。

（二）碳摻雜濃度與導電係數

聚合物的分子堆積方式對物理特性有重大影響。碳的物理吸附作用，縮減聚合物分子間距離，使分子間的吸引力大幅增加。不同摻雜濃度的聚氨脂橡膠，其吸附作用以SEM電子顯微鏡觀測的影像如圖（1）至圖（4）所示，顯示聚合物的第二級鍵結力與高分子量，造成分子內很高的殘餘力，碳摻雜濃度過高則會有極大的吸引力，分子會緊密地堆積在一起，分子緊密地排列呈現高度的規則性結構。因為聚合物具有高分子量與結構的缺陷，無法平行地排列。



圖1 聚氨脂橡膠

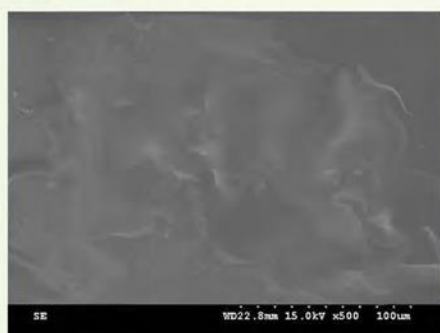


圖2 摻雜4M的活性碳



圖3 摻雜20M的活性碳

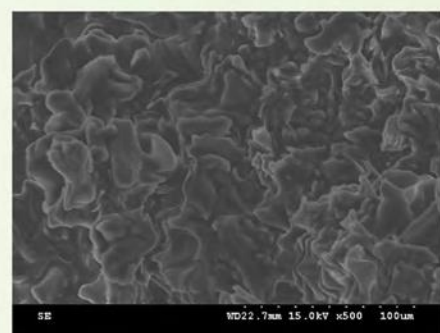


圖4 摻雜40M的活性碳

當碳原子排列成石墨結構時，碳原子由三個sp²混成軌域組成，彼此靠近會互相影響。電子狀態為2s-2p。每層的原子以σ鍵與鄰近的三個碳原子結合，形成很強的共價鍵鍵結，各層之間垂直方向的聯結，由許多未混成p軌域形成π鍵，π鍵因共振的關係，所以能隙很窄，價電子很容易在π軌域中移動，有良好的導電性。圖（1）至圖（4）顯示增加活性碳的濃度，提升物理吸附作用，碳粉間的距離接近凡得瓦半徑（0.3354，價電子在分子間交疊，大幅提升導電性。

二、導電複合材料的製作

運用橡膠性聚合物材料柔軟、保溫、耐用的特性，但不具導電性。碳對有些聚合物的吸附性很強，將聚合物加溫熔化，添加高濃度極細的碳粉即可導電。搜尋相關資料並反覆實驗，選擇對石墨吸附性很強的聚氨脂橡膠作為主要材料。其重複結構單元如（圖5），為熱塑性橡膠，沒有毒性具橡膠與熱塑性，常溫時具有硫化天然橡膠的黏彈性，加熱後即有熱塑性加工特性。

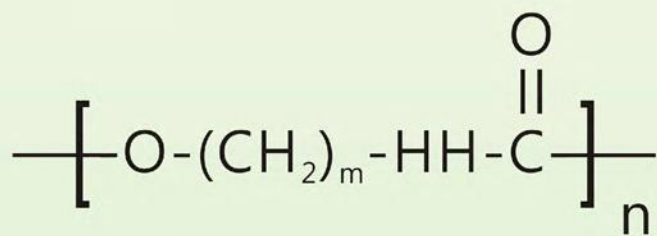


圖5 聚氨脂的重複結構單元



圖6 聚氨脂橡膠添加石蠟油



圖7 高分子添加細碳粉攪拌

為了增加延展性，加入長鏈單鍵結構，將符合F. D. A（醫療良品級）聚氨脂樹脂，加熱後添加15%醫療用石蠟油。石蠟油是原油分餾、無色無味的混合物，含有16~35個碳原子的正烷烴，有少量的異構烷烴和環烷烴。將聚氨脂添加石蠟油加熱至120℃攪拌成高分子化合物（圖6），將高分子化合物加溫熔化，添加高濃度極細的石墨（圖7），灌入模型後取得薄膜。此薄膜清潔衛生，不會飛散、不滴落、不污染環境，不會刺激眼睛或皮膚。

三、導電複合材料電學特性實驗

（一）電阻

電荷移動形成電流，任何材料對電荷移動一定具有阻力，反抗電荷移動的阻力稱為電阻。電阻單位為歐姆（Ohm），簡稱Ω。決定電阻的因素如下：1. 材料種類：不同材料電阻係數（ρ）不同，與電阻成正比。2. 導體的長度（l）：R值與l成正比。3. 導體截面積（A）：R值與A成反比。以上關係可以用式（1）表示，式（1）中ρ為電阻係數，SI制單位為Ω·m，l的單位為公尺，A的單位為平方公尺。

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \text{式（1）}$$

(二) 導電複合材料能量轉換實驗

將導電軟片剪裁適當大小，依（1）式產生電阻值。將定電壓連接軟片兩端，通電產生固定電流（圖8），再再測試軟片是否依據動能壓力、電功率、歐姆定律發出合理的電流變化（圖9），再進行下列相關實驗。

(三) 交流特性實驗

由於交流電為目前供電主要來源，許多電子裝置必須藉由交流電源維持運作，因此進行交流特性相關實驗。

(四) 電阻溫度係數實驗

為了研究導電複合材料特的電阻受溫度的影響，藉由恆溫低溫箱，模擬不同的溫度環境。將橡膠性聚合物導電軟片放入箱中，通電加熱記錄電阻的變化數值。

(五) 電子顯微鏡結構分析

物質結構決定了導電複合材料特的物理特性，因此與國立大學化學工程系進行研究交流，以掃描式電子顯微鏡（Scanning Electron Microscope，簡稱SEM）進行測試（圖10）。

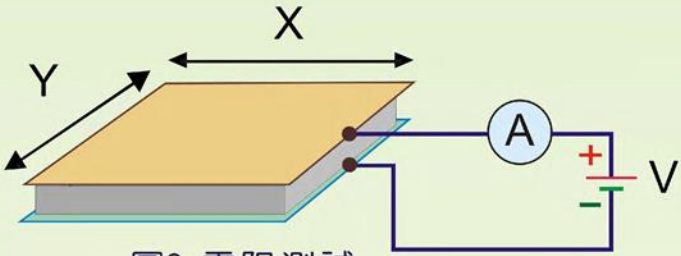


圖8 電阻測試

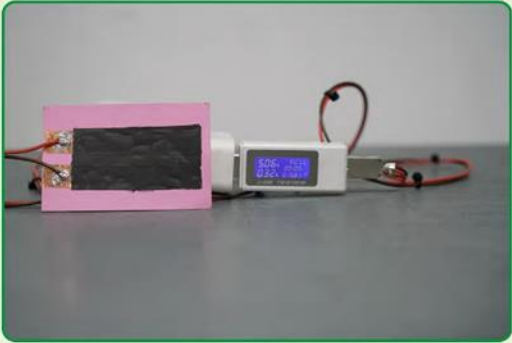


圖9 歐姆定律實驗



10 掃描式電子顯微鏡實驗系統

肆、研究結果

一、導電複合材料特性方程式

(一) 石墨粉摻雜濃度與電阻係數

試料的石墨粉摻雜濃度與電阻係數（ ρ ）的關係如圖（11），電阻係數與摻雜濃度成反比。溫度300K石墨粉摻雜濃度35M，導電性急遽增加；石墨粉摻雜濃度增加至40M，即進入導電的穩定狀態；石墨粉摻雜濃度至55M，石墨粉吸附太強，導致試料的彈性降低；石墨粉摻雜濃度至60M吸附飽和，使得試料硬化，表面出現許多裂痕，65M吸附過度飽和，石墨粉會從試料表面解吸。經多次實驗，推導出碳摻雜濃度的電阻特性方程式如下：

$$\rho = \begin{cases} (\rho_c - \rho_s) \frac{C_s - C_c}{C_D - C_c}, & \text{if } C_0 > C_c \\ (\rho_0 - \rho_c) \frac{C_c - C_D}{C_c - C_0}, & \text{if } C_0 < C_c \end{cases}$$

式(2) 式(2)中， C_0 為聚合物成為電阻材料所需要的最低摻雜濃度； ρ_0 是最低摻雜濃度 C_0 之電阻係數； C_c 為導體穩定狀態的臨界摻雜濃度； ρ_c 為臨界摻雜濃度之電阻係數； C_s 為吸附飽和摻雜濃度； ρ_s 為吸附飽和摻雜濃度之電阻係數。溫度300K，聚氨脂橡膠摻雜石墨粉之 $C_0=35\text{M}$ 、 $C_c=40\text{M}$ 、 $C_s=60\text{M}$ 、 $\rho_0=4.456 \times 10^8 \Omega\text{-cm}$ 、 $\rho_c=4 \times 10^6 \Omega\text{-cm}$ 、 $\rho_s=1.12 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$ 。

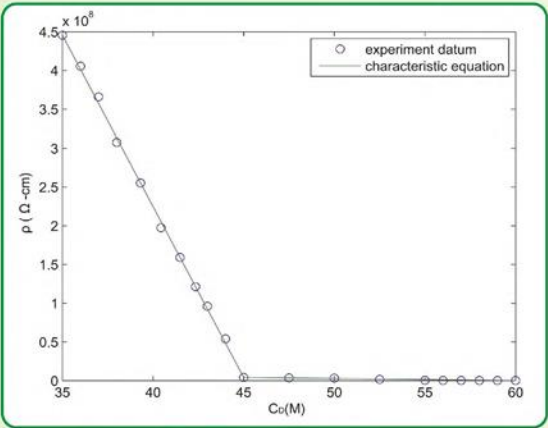


圖11 石墨粉摻雜濃度與電阻係數

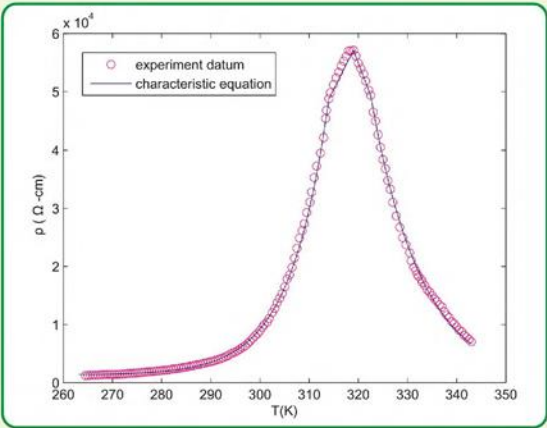


圖12 聚氨脂橡膠摻雜40M濃度石墨粉的電阻溫度特性

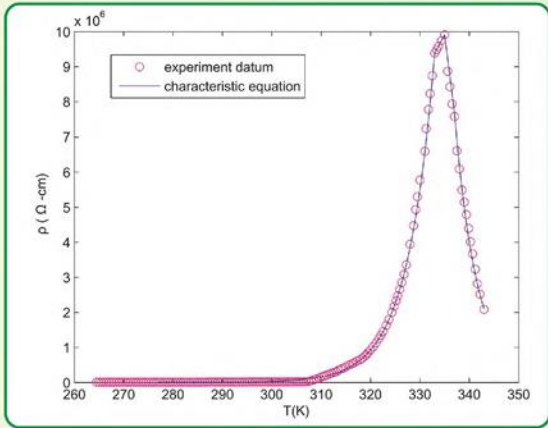


圖13 聚氨脂橡膠摻雜活性碳的電阻溫度特性

(二) 物理吸附的電阻溫度係數

物理吸附沒有進行化學反應，需要能量較小，容易進行反應，低溫就能快速反應。吸附是放熱反應，因此聚合物的物理吸附所產生的電阻與溫度成正比。物理吸附的主要作用力為微弱的凡得瓦力，容易受到溫度影響，電阻溫度係數變化很大。摻雜40M濃度石墨的聚氨脂橡膠，其電阻溫度特性如圖（12）。聚氨脂橡膠摻雜活性碳，電阻溫度特性如圖（13）。活性碳的表面積較大，材料的熱力學特性（QTd）及材料的熱解吸特性（Dm）不同，使活性碳的溫度特性曲線較尖銳。

二、超低頻物質波感測器

本研究藉由薄膜的形變，而改變電阻值。接上固定電壓源，通電後依據歐姆定律，產生電流變化。以厚度只有100μm的PET（化學名詞為positron emission tomography，聚對苯二甲酸乙二酯）薄膜作為基底材料，裁切成A4的尺寸。在表面噴塗自行研發的導電複合材料，於薄膜兩端貼上雙面銅箔膠帶，作為感測器的兩個電極。位移與薄膜垂直的集中力為F施加在隔膜上，電極位移改變電阻抗（圖14）。將PET薄膜兩側黏貼銅箔，在銅箔間噴塗導性聚合物，形成導電薄膜。薄膜位於待測位置，待測面的位移與薄膜垂直，將動能視為集中力F持續的施加在隔膜上，電極產生位移改變電阻抗。感測器的等效電路如（圖15）所示，圖中 $Z_{12}(x)$ ：阻抗隨x微動改變。



圖14 超低頻物質波感測器

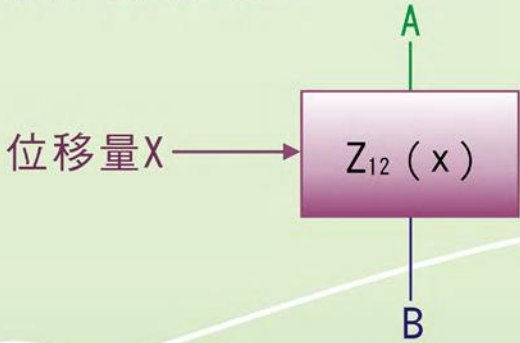


圖15 感測器等效電路

伍、討論

石墨粉由碳原子組成，能藉由物理吸附，改變橡膠性聚合物材料的分子堆積方式，縮短聚合物分子間的距離，造成分子內很高的殘餘力。石墨粉能將分子緊密地堆積在一起，減少了能隙的寬度，使聚合物具有半導體的物理特性，並且沒有電感性，十分適合無線電射頻之運用。因此，近十年來有機電子學蓬勃發展，深具電子科技的實用價值。石墨粉的摻雜濃度與電阻係數為線性關係，因此石墨粉的表面積與粒徑比例會影響導電特性，石墨粉的表面積與粒徑之比例甚大時，碳的摻雜濃度與電阻係數為線性關係，比例較低則為指數關係，這個特性有深入研究之價值。

體積莫耳濃度4M的導電彈性聚合物，其側邊撕裂處SEM電子顯微鏡攝影如（圖16）所示。與丁二烯之斷面不同（圖17），當丁二烯加入異戊二烯含量提升至25%時，共聚物的衝擊強度大幅提升，進而發生「脆韌轉變」，以SEM電子顯微鏡觀察，呈現出剪切帶。以電子顯微鏡的觀察得知，導電彈性聚合物側邊撕裂處則無此現象，因此介於多晶與非晶之間的結構，並且比較偏向非晶結構。而半導體與金屬十分接近單晶，因此電阻特性、比熱、可塑性、彈性等，都有很大的差異，值得深入研究。

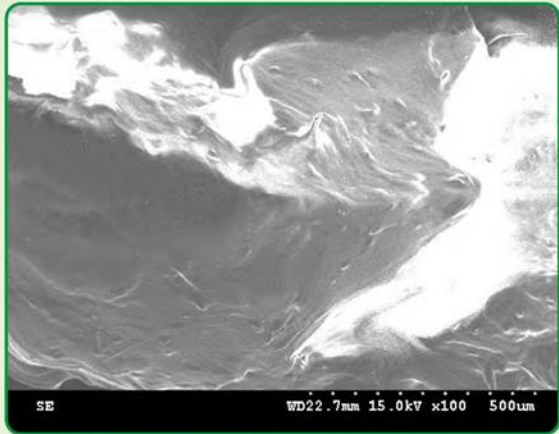


圖16 添加碳4M 的聚合物側邊撕裂處

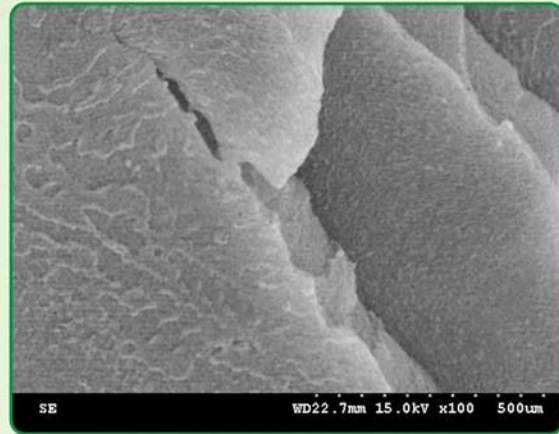


圖17 丁二烯之斷面撕裂處

陸、結論

一、感測器特性

（一）直流阻抗

為分析超低頻物質波感測器理想的直流工作區間，研發多種結構的感測器，經長時間連續測試其輸入電流與輸出電壓之關係曲線，研發出接近線性關係，並且直流阻抗很近似標準麥克風。

（二）能量轉換特性曲線

感測器兩端輸出電壓，與薄膜位移量（X）之能量轉換，經（圖18）之量測架構多次實驗，能量轉換曲線很接近線性變化。

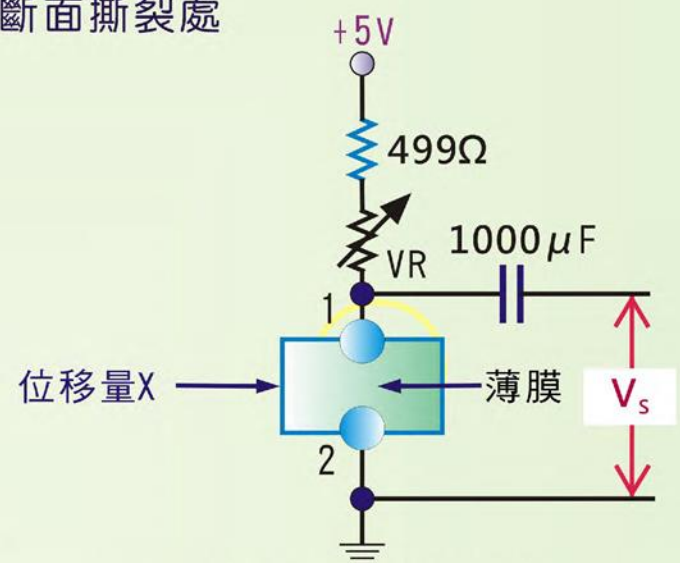


圖18 能量轉換測試電路圖

二、系統整合

（圖19）為本系統方塊圖，將固定直流電壓串聯一個電阻，連接導電彈性聚合物的兩個電極，依分壓定律隨著感測器接點的位移，使輸出電壓產生相對變化，藉由電容交連濾除直流偏壓。以緩衝級放大器將電壓加大，再以濾波器將高頻雜訊去除，最後將訊號轉換成數位訊號匯入電腦。

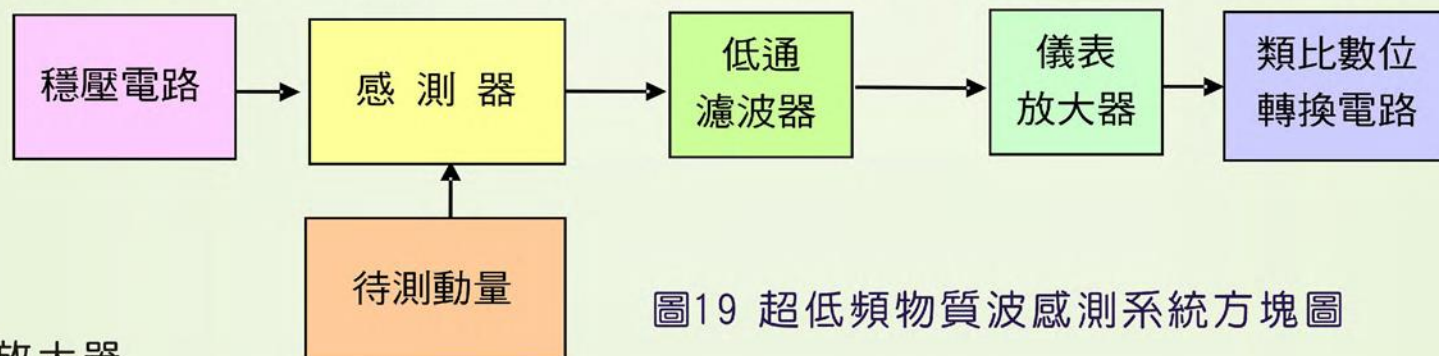


圖19 超低頻物質波感測系統方塊圖

（一）儀表放大器

人體呼吸所產生的壓力較弱，必須將感測器擷取的訊號放大才能進行後續處理。（圖20）為儀表放大器電路。由於各種量測對象的動量不同，所以放大電路的增益為可調式，其增益為30dB至60dB。由於電壓放大倍率很高，提升S/N比（訊號對雜訊比）為此電路之核心，主動元件採用低雜訊運算放大器將雜訊大幅降低，能偵測到兩公尺外微弱的超低頻物質波。

（二）濾波電路

濾波電路由一階0.01Hz被動高通濾波器（圖20），與六階巴特霍斯低通濾波器組成。高通濾波可降低直流漂移造成的干擾。低通截止頻率30Hz，訊號增益為4倍。濾掉高於30Hz的頻率成分，主要目的將一般市電60Hz，與振盪電路產生的載波都濾掉。確保所擷取到的訊號沒有上述雜訊。

（三）數位化分析系統

將超低頻物質波感測器的輸出訊號，轉換成數位訊號。再用USB介面匯入電腦，撰寫程式介面如（圖21）所示，能隨時進行訊號分析，並且兼具遠端監控、雲端運用與無線傳輸功能。從電腦螢幕顯示的數位化呼吸波形，證實我們自製的超低頻物質波感測器，能在老人身旁一公尺，感測到他們的呼吸動量。並且可以從波形與頻率，分析健康的差異性。

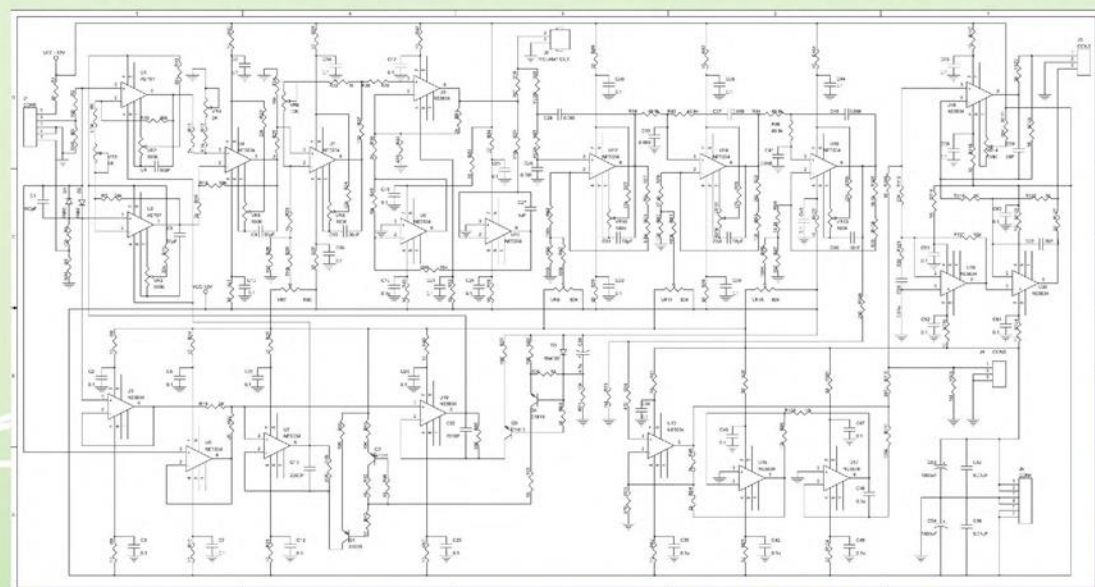


圖20 本系統類比訊號處理系統電路圖

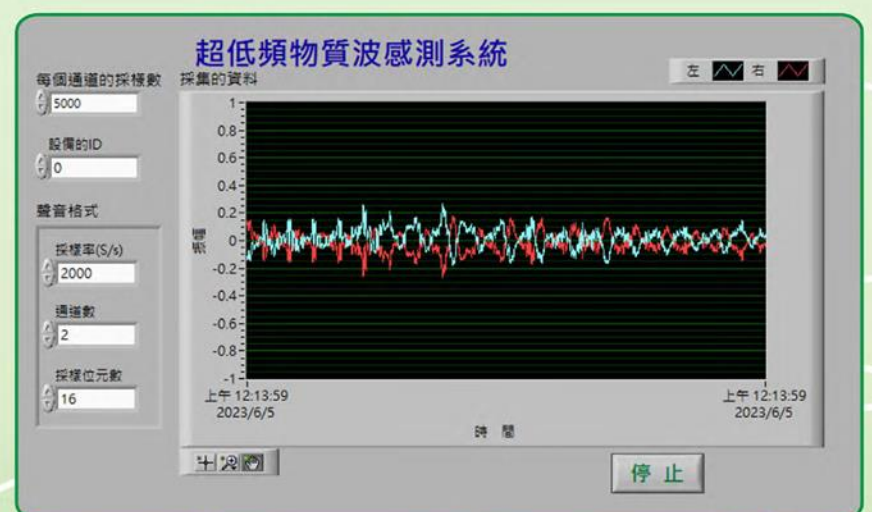


圖21 本系統顯示的老人呼吸波形