

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

佳作

051811

歐姆的「液」想世界～液態可變電阻物理特性
之探討

學校名稱：新竹市私立曙光女子高級中學

作者： 高二 王姝融	指導老師： 張鈞豪
---------------	--------------

關鍵詞：液態可變電阻、訊號控制

摘要

半導體物理的發展已漸趨成熟，本研究討論液體擾動與電阻之關係，進一步利用液態可變電阻作為電路中的訊號表徵，期望能應用於半導體產業中。

本實驗將液態電阻內溶液以靜止與給定固定速率(v)分別測試，發現溶液的擾動與電阻值成正相關，並用不同濃度的電解溶液測量不同自由載子濃度的液態可變電阻之電阻值與導體擾動之關係。接著對液態可變電阻的其他物理性質做測量，得知液態可變電阻為負溫度係數之導體，且測得電極距離越長，電阻值越大。

結論得出，將傳統半導體模型變化應用在液態可變電阻上是可行的，且各項物理性質之趨勢與電阻幾何模型相符。使用液態可變電阻之擾動特性製作出穩定的 01 表徵訊號，近似於目前半導體物理使用的數位訊號概念。

壹、研究動機

在這科技發達的時代裡，智慧型手機、電腦等各項電子產品訊號的讀取與邏輯運算上仰賴著許多的電子元件，在上述電路及訊號轉換中存在一個非常重要的電子元件—可變電阻。在一次科學營隊中，我嘗試透過 arduino 控制晶片與可變電阻串聯關係執行調整 LED 燈具模組的明暗程度、以可變電阻改變七段顯示器數值，激發了我對可變電阻天馬行空的想像。

固態電路已廣泛使用於生活當中，從傳統可變電阻至邏輯運算的場效應電晶體電阻變化發展，因摩爾定律的說明，可能將要走到人類科學認知的極限，人們也在 21 世紀中不斷的尋找替代對應的電阻改變方式與電路設計。

從國高中物理化學課程所學到有關電解溶液、基本電阻知識，以及離子的傳導關係，書本中提到因電解溶液種類不同而有著不同的導電表現。其中液態溶液的導電表現可否以物理方式改變，使我非常好奇，想探究液態溶液導電狀況，並尋找物理模型控制液態溶液導電，即可製作液態可變電阻的可行性，期望以此打開人類科技發展史上新的篇章。

貳、研究目的

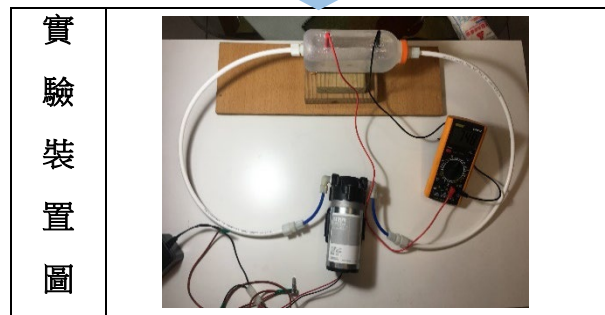
- 一、透過改變液體其濃度(carrier concentration, n)以觀察電阻穩定性並探討其物理準度。
- 二、歐姆定律 $V = IR$ 及電阻幾何關係 $R = \rho \frac{L}{A}$ 觀察其液態電阻設計之物理變化。其中 ρ 為材料之電阻率($\Omega \cdot m$)、 L 為電阻長度(m)、 A 為截面積大小(m^2)。

三、嘗試觀察半導體物理電阻定義 $R = \frac{V}{neA\mu E}$ 觀察液態介質流動是否影響載子遷移率狀況，進而改變液態電阻表現。 μ (mobility, $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) 為載子遷移率、 n (carrier concentration) 為自由載子濃度、 A 為導體面積 (m^2)、 e 為電子帶電量、 E 為電場 (V/m)、 V 為電壓 (伏特)。

四、控制液態電阻溫度觀察是否符合： $R = Ae^{\frac{B}{T}}$ 之電阻與溫度關係。 A, B 為常數， R_0 為溫度 T_0 的電阻值， T 為絕對溫度， R 為電阻。

參、研究設備及器材

<p>三用電表： 在改變各變因的情況下，測量電阻值與溫度。</p>	<p>探棒： 觀察液態電阻變化之電極</p>	<p>熱電偶： 觀察液態電阻溫度之電極</p>	<p>精密磅秤： 測量食鹽重量</p>
			
<p>流水馬達： 改變液態電阻介質之流動表現 最大流量：1.2LPM 輸出：1.2A、24V、20R</p>	<p>900ml 瓶罐： 液態可變電阻之液態介質腔體</p>	<p>燒杯： 量測液態電阻介質之量測容器</p>	<p>食鹽： 調配可導電之介質成為電解溶液</p>
			



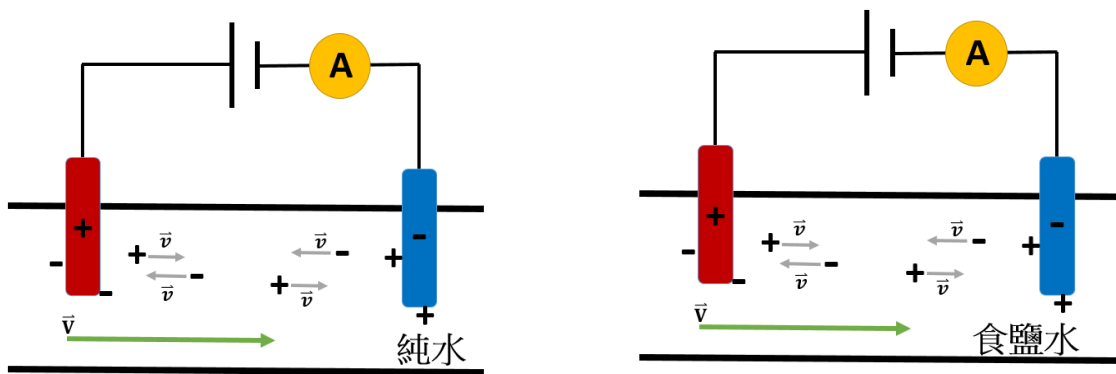
肆、研究過程或方法

一、液態可變電阻可行性及穩定度評估

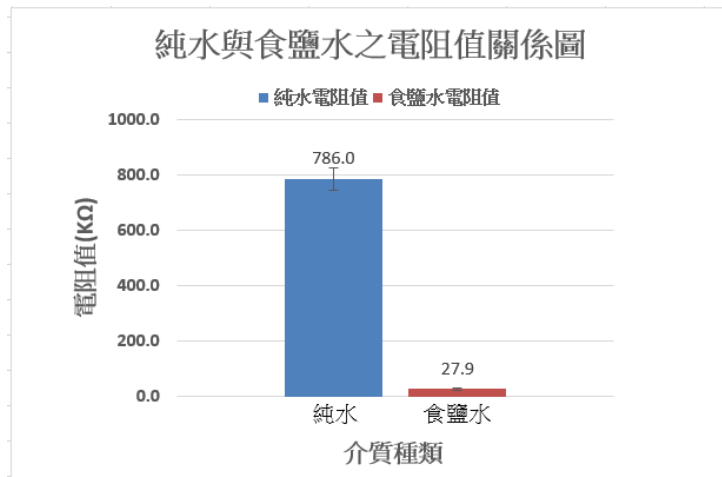
(一)介質種類之實驗穩定度評估：

導電溶液為液態可變電阻中不可或缺的介質，正、負離子在介質中自由移動，其為固態電阻中自由電子概念。加入電場後正負電極進行氧化還原反應(能量交換)，負極導出電子，由下方正離子吸收，正極將負離子的電子傳遞回電路，形成電流迴路。

此研究以純水及重量百分濃度 7.5% 的食鹽水為液態可變電阻介質，進行實驗及穩定度評估，實驗示意圖及結果如圖一、表一、圖二。將電極固定於相距 11.5 公分處，每經一分鐘後交換流水馬達電源開關，使介質流動與靜止，進行實驗，測得電阻值單位為 $K\Omega$ 。



(圖一)介質種類之實驗穩定度評估，實驗測試之示意圖



(圖二)純水與鹽水電阻值關係圖

(表一)純水與食鹽水之電阻值

次數	純水(KΩ)	食鹽水(KΩ)
1	740.0	28.5
2	790.0	26.0
3	830.0	22.4
4	820.0	29.0
5	750.0	33.5
AVG.	786.0	27.9
STD.	40.4	4.1

由實驗測試中明顯觀察到純水與食鹽水之電阻值差異。量測純水介質之電阻值平均為 $786K\Omega$ ，其標準差為 40.4。由文獻資料得知，純水在 $25^{\circ}C$ 時的理論電阻率為 $100M\Omega$ 。食鹽水介質之電阻值平均為 $27.9K\Omega$ ，其標準差為 4.1。表一說明純水之電阻平均值約為食鹽水電阻值 30 倍，標準差也有 10 倍差異。後續液態可變電阻實驗測試之介質需電阻變化穩定以減

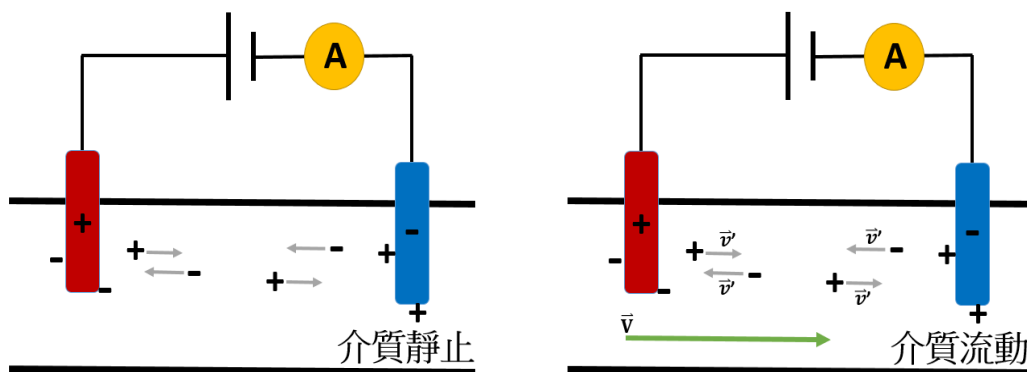
少實驗誤差變因，因此選用固定濃度之食鹽水為液態可變電阻自由離子之液態介質。

(二)介質流動對液態可變電阻之影響

當正負離子的移動形成電流，進而測得電壓及電阻。自由離子會依循電場方向而移動，但液態介質若有流動而介質帶有速度是否會造成整體系統電阻差異。在探討電子元件電流與電壓關係的電路學—歐姆定律 $V = IR$ 中，可得知導體兩端電位差(V)與導體之電阻(R)及通過該導體之電流成正比。由電阻定義帶入歐姆定律計算可得知半導體物理學門中，電阻定義 $R = \rho \frac{L}{A} = \frac{V}{I} = \frac{V}{neA\mu E}$ (量化結果)。在此方程式中，載子遷移率主要為帶電粒子移動時，敘述其運動表現的重要物理量。亦指載子遷移率越大，自由電子移動越快，測電阻越小。相反的，載子遷移率越小，電阻越大。

在半導體物理中已明確說明載子遷移率(μ)與電阻關係。想了解以半導體物理公式 $R = \frac{V}{I} = \frac{V}{neA\mu E}$ 中，載子遷移率表示一個材料受電場作用下，內部載子的移動狀態。電場提供電子加速以減低電阻，以上述半導體物理模型預測液態介質流動，進而影響載子遷移率表現並改變液態電阻值。

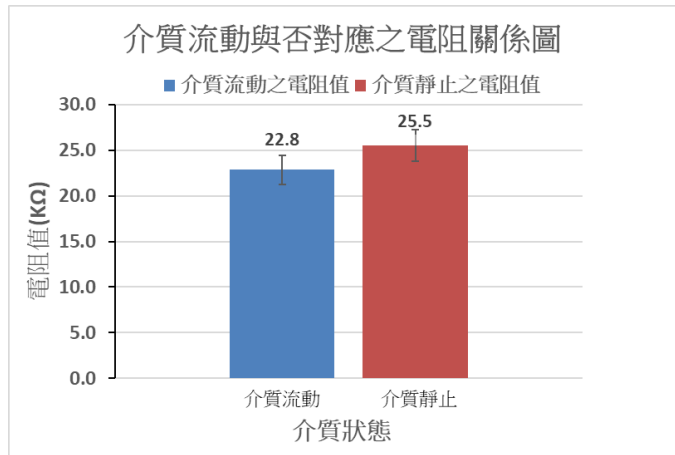
此研究藉由改變載子遷移率，探討介質流動對電阻值的影響，實驗示意圖及結果如圖三、表二、圖四。將電極固定於相距 11.5 公分處、以重量百分濃度 7.5% 的食鹽水溶液為介質，每經一分鐘交換流水馬達電源開關，使介質流動與靜止，進行實驗並觀察介質流速變化對電阻之影響，測得電阻值以 $K\Omega$ 為單位。



(圖三)介質流動對液態可變電阻之影響，實驗測試之示意圖

(表二)介質流動與否對應之電阻

次數	介質流動 (K Ω)	介質靜止(K Ω)
1	26.5	28.2
2	24.7	28.2
3	22.7	26.5
4	22.0	25.1
5	22.3	24.1
6	22.9	25.8
7	21.4	25.7
8	21.9	24.5
9	22.2	24.1
10	21.8	23.2
AVG.	22.8	25.5
STD.	1.6	1.7



(圖四)介質流動與否對應之電阻關係圖

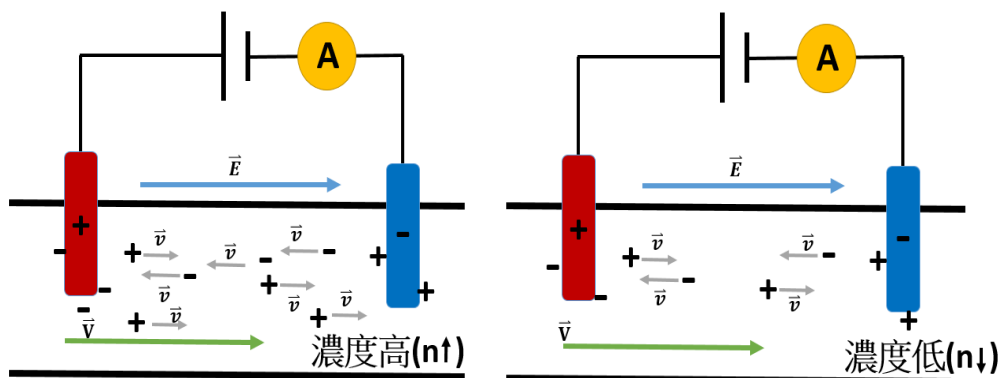
由此實驗測試中，量測介質靜止之平均電阻值為 25.5K Ω ；介質流動時平均電阻值為 22.8K Ω 。表二說明介質為流動與靜止狀態，電阻值標準差分別為 1.6 與 1.7。可觀察到介質靜止之平均電阻值較介質流動之平均電阻值高出 2.7 K Ω 。

二、濃度對電阻之影響

在半導體物理學門中，自由載子濃度亦指介質中自由移動且帶有電荷的微粒物質多寡。本篇主要探討自由離子的部分。自由載子濃度將影響電阻量值，當載子濃度越高，其自由離子較多，因此可得電阻較小；相反的，載子濃度越低，自由離子較少，得到之電阻值較大。

電阻與自由載子濃度之關係，曾解釋於半導體物理中。透過改變液態可變電阻介質中的離子濃度，探討可否藉由半導體物理模型及概念觀察其物理量變化，成為此液態可變電阻實驗中極為重要的課題。以上述半導體物理模型預測液態介質濃度高低，影響自由載子濃度，達到改變液態電阻值是這章節探討的主題。

此研究探討改變自由電子濃度對電阻值之影響，實驗示意圖及結果如圖五、表三、圖六。將電極固定於相距 11.5 公分處、以重量百分濃度 7.5%、15%、22.5% 的食鹽水溶液為介質。定溫下，每經一分鐘交換流水馬達電源開關，使介質流動與靜止，進行實驗並觀察載子濃度對電阻之影響，測得電阻值以 K Ω 為單位。

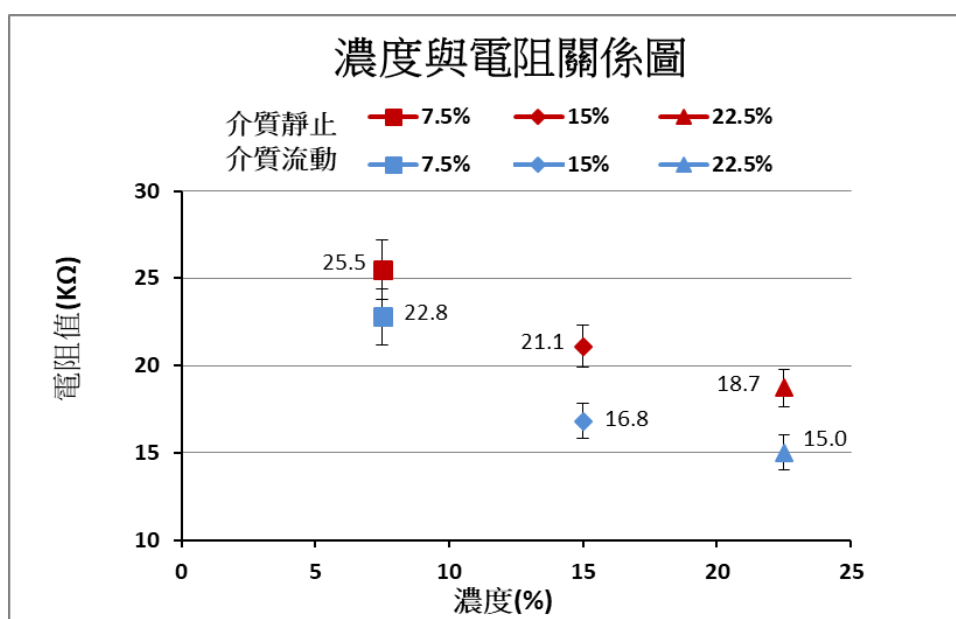


(圖五)濃度對液態可變電阻之影響，實驗測試之示意圖

(表三)不同濃度的電阻值

次數	介質流動(KΩ)			介質靜止(KΩ)		
	7.5%	15.0%	22.5%	7.5%	15.0%	22.5%
1	26.5	17.3	15.1	28.2	21.5	18.6
2	24.7	17.5	15.6	28.2	21.5	19.7
3	22.7	18.5	14.3	26.5	23.1	18.7
4	22.0	18.1	14.1	25.1	22.4	17.6
5	22.3	15.9	14.0	24.1	19.8	17.7
6	22.9	15.5	14.0	25.8	19.3	17.4
7	21.4	17.2	15.3	25.7	21.3	19.0
8	21.9	16.4	14.6	24.5	21.6	17.8
9	22.2	15.9	15.8	24.1	20.0	19.9
10	21.8	15.9	17.0	23.2	20.8	20.5
AVG.	22.8	16.8	15.0	25.5	21.1	18.7
STD.	1.6	1.0	1.0	1.7	1.2	1.1

當介質流動時，重量百分濃度 7.5% 的食鹽水溶液為介質所對應的平均電阻值為 22.8KΩ，而重量百分濃度為 15%、22.5% 時，平均電阻值分別為 16.8KΩ、15.0KΩ。測試介質靜止時，重量百分濃度 7.5% 的食鹽水溶液所對應的平均電阻值為 25.5KΩ，而溶液重量百分濃度為 15%、22.5% 時，電阻值分別為 21.1KΩ、18.7KΩ。由此實驗測試中觀察到，介質濃度越高，電阻值越低。

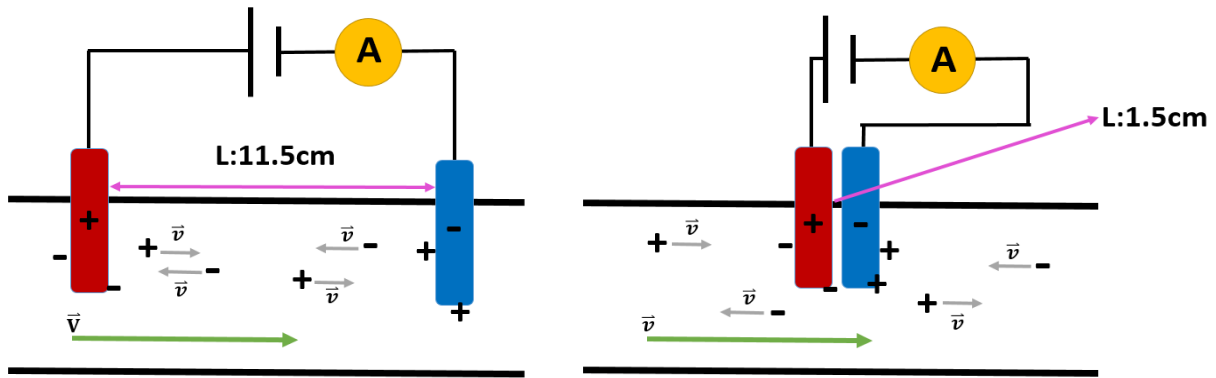


(圖六)濃度對電阻關係圖

三、電極擺放位置與電阻關係

在一般固體導線上，假設通過電流與導線截面積不變，串聯兩個電阻使長度成為兩倍，使新電阻值成為原來的兩倍，故電阻隨長度增加，電阻與截面積長度公式為 $R = \rho \frac{L}{A}$ 。可得知半導體物理學門中，當長度越長、電阻值越高；長度越短、電阻值越低。電阻與半導體距離關係之解釋僅限於半導體物理中。本篇透過改變液態介質腔體中之探棒距離，探討電極擺放位置與電阻的關係可否藉由半導體物理模型及其概念觀察物理量之變化。

此研究藉由改變電極擺放位置，探討其對於電阻值之影響，實驗示意圖及結果如圖七、表四、圖八、圖九。使用兩種不同濃度討論電極遠近對電阻值之影響，將電極各別擺放於短距離與長距離，分別探討兩種狀況。本篇短距離相距 1.5 公分、長距離相距 11.5 公分。以兩種重量百分濃度 7.5%及 22.5%食鹽水溶液測量，每經一分鐘交換流水馬達電源開關，使介質流動與靜止，進行實驗並觀察電極擺放位置與電阻的關係，測得電阻值以(KΩ)為單位。



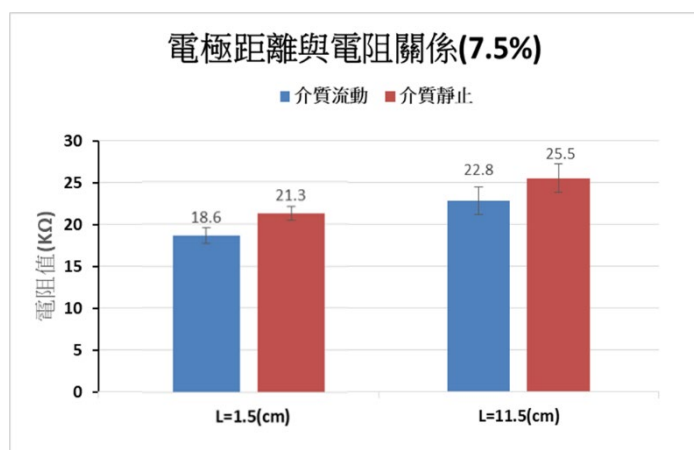
(圖七)電極擺放位置與電阻關係，實驗測試之示意圖

(表四) 電極擺放位置所對應之電阻

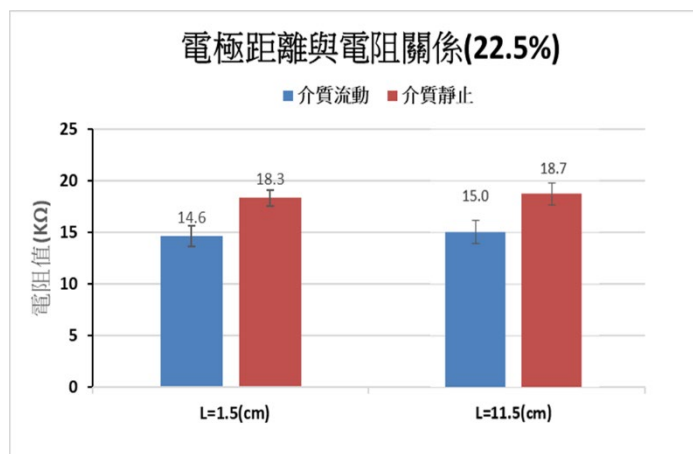
次數	介質流動 7.5% (KΩ)		介質靜止 7.5% (KΩ)		次數	介質流動 22.5% (KΩ)		介質靜止 22.5% (KΩ)	
	L=11.5(cm)	L=1.5(cm)	L=11.5(cm)	L=1.5(cm)		L=11.5(cm)	L=1.5(cm)	L=11.5(cm)	L=1.5(cm)
1	26.5	18.5	28.2	21.7	1	15.1	14.9	18.6	18.9
2	24.7	17.9	28.2	21.5	2	15.6	13.8	19.7	17.4
3	22.7	19.4	26.5	23.1	3	14.3	13.5	18.7	17.3
4	22.0	18.2	25.1	20.5	4	14.1	15.3	17.6	16.9
5	22.3	17.8	24.1	21.0	5	14.0	15.2	17.7	19.7
6	22.9	17.6	25.8	20.7	6	14.0	15.2	17.4	17.3
7	21.4	17.9	25.7	21.9	7	15.3	15.6	19.0	18.8
8	21.9	18.8	24.5	20.8	8	14.6	14.6	17.8	19.9
9	22.2	20.2	24.1	21.0	9	15.8	14.0	19.9	17.4
10	21.8	19.8	23.2	20.4	10	17.0	13.8	20.5	19.3
AVG.	22.8	18.6	25.5	21.3	AVG.	15.0	14.6	18.7	18.3
STD.	1.6	0.9	1.7	0.8	STD.	1.0	0.8	1.1	1.1

介質在靜止狀態時，低濃度介質在長距離與短距離的平均電阻值分別為 25.5K Ω 與 21.3K Ω ，高濃度則為 18.7K Ω 與 18.3K Ω 。兩濃度因距離產生的電阻差各別為 4.2K Ω 與 0.4K Ω 。當介質為流動狀態時，低濃度介質在長距離與短距離的平均電阻值分別為 22.8K Ω 與 18.6K Ω ，高濃度則為 15.0K Ω 與 14.6K Ω 。兩濃度因距離產生的電阻差各別為 4.2K Ω 與 0.4K Ω 。

上述實驗觀察可看出，無論是否溶液有擾動，電極距離都對電阻值有明顯的影響，且兩者為正相關。



(圖八)電極擺放位置與電阻關係(濃度 7.5%)



(圖九)電極擺放位置與電阻關係(濃度 22.5%)

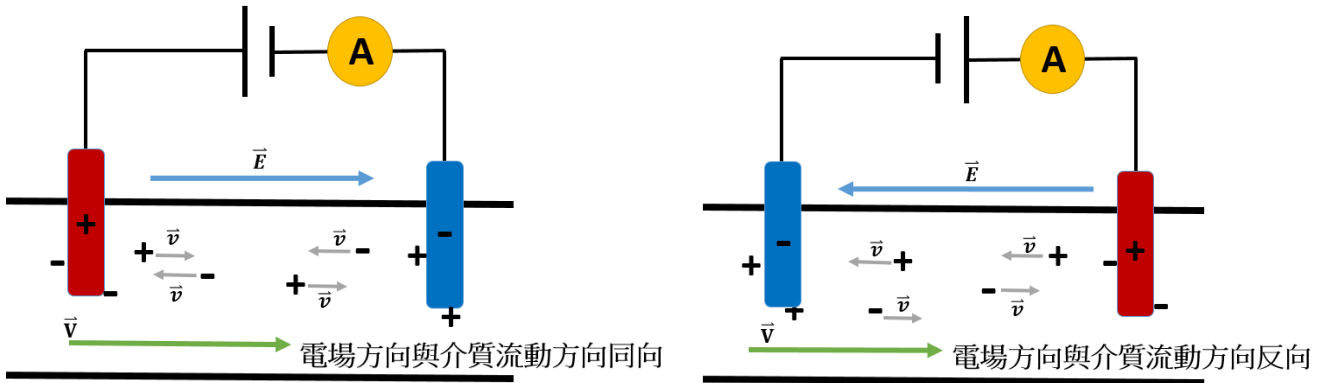
如圖八、圖九觀察，不論溶液流動與否，以重量百分濃度 7.5% 的食鹽水溶液為介質時，電阻值差異較大，當濃度升高時，其電阻值較沒有明顯差異。電極距離越遠，電阻值越高；相反的，電極距離越近，電阻值越低。並且觀察到溶液濃度越高，電阻值較低的情形。無論為實驗濃度為何，可觀察出介質流動時較介質靜止之電阻較小，電極擺放距離短，有較低的電阻。

四、改變電場方向對電阻值之影響

電極位於電解溶液時發生氧化還原的位置，分為正極及負極，正極為電勢較高的一端，而負極為電勢較低的一端。電解溶液時，會因正負極的電勢差，造成正離子移向負極、負離子移往正極的現象。由於食鹽水為導電溶液，電解後兩端電極之正負離子會移動，能夠在探棒上進行氧化還原的反應。推測離子移動速度會因電場及介質流動方向改變，進而改變電阻值。藉由此實驗探討介質流動方向與電場方向和電阻值之關係。

此章節主要以水流方向為基準，改變電場方向並探討其對電阻值之影響。實驗示意圖及結果如圖十、表五、圖十一。以電場方向與介質流動方向同向，每經一分鐘後交換流水馬達

電源開關，使介質流動與靜止。取得 5 個實驗數據後，交換左右電極，使電場方向與介質流動方向反向，觀察其電阻值變化，測得電阻值以(KΩ)為單位。

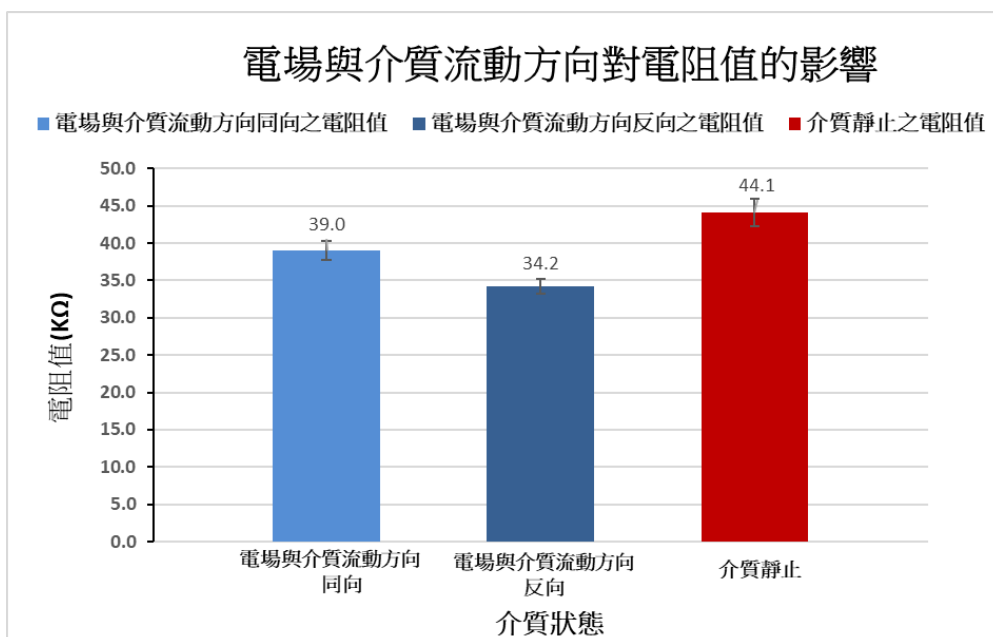


(圖十)改變電場方向對電阻值之關係，實驗測試之示意圖

由實驗測試說明，當介質流動且電場方向與介質流動方向同向時，其電阻平均值為 39KΩ；電場與介質流動方向反向時，電阻平均值為 34.2KΩ，其電阻平均值相差 4.8KΩ。介質靜止之情況，電阻平均值為 44.1KΩ。表五說明電阻在電場方向與介質流動方向同向時較高，觀察到無論介質流動方向與電場方向是否同向，介質靜止之電阻值皆較流動時高。

(表五)電場與介質流動方向對電阻值的影響

次數	介質流動(KΩ)		介質靜止(KΩ)
	電場與介質流向同向	電場與介質流向反向	
1	38.1	33.7	43.3
2	39.5	35.9	45.9
3	41.0	34.3	46.0
4	39.0	33.8	43.2
5	37.6	33.2	42.0
AVG.	39.0	34.2	44.1
STD.	1.3	1.0	1.8



(圖十一)改變電場方向對電阻值之關係圖

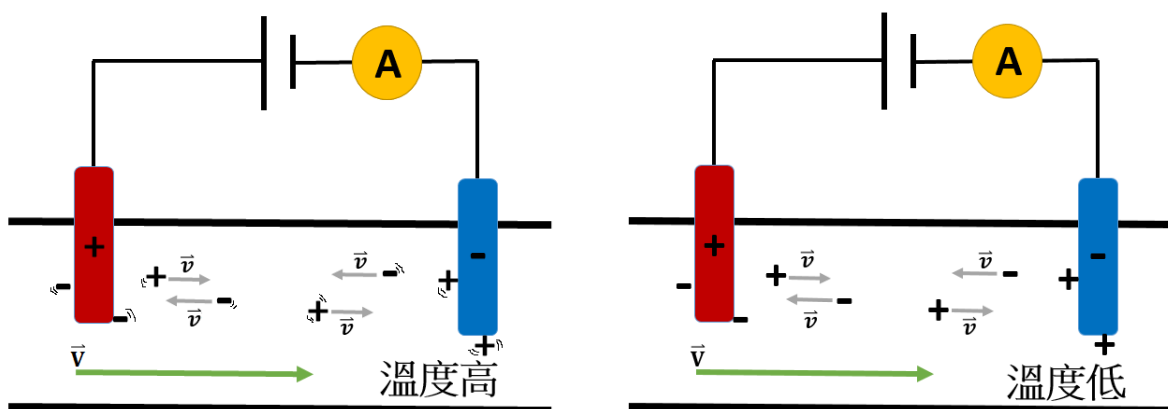
五、溫度對電阻之影響

溫度改變時，物質會因其結構及特性使其改變電阻值。物質的電阻值會隨溫度改變而有所變化，可分成正溫度係數及負溫度係數兩類。金屬材料中具有許多排列緊密的自由電子，每當溫度升高，金屬中的離子會因吸收能量而震動得更加劇烈，阻礙自由電子移動，在傳導電流時增加阻力。由於一般的金屬材料的電阻值會隨著溫度升高而增加，因此稱此類材料具有正溫度係數 (positive temperature coefficient, PTC)。相反的，在一般絕緣體或半導體中，自由電子較少，當溫度升高時，此類物質中的離子因吸收能量產生自由電子，減少傳導電流的阻力，使導電能力增加。絕緣體或半導體，此類材料為負溫度係數 (negative temperature coefficient, NTC)。

在電阻溫度方程式中，溫度與物理量呈曲線關係。此章節在了解液態可變電阻的溫度與電阻關係後，利用數據計算出相關方程式，並進一步推算其係數是否符合溫度物理模型 $R = Ae^{\frac{B}{T}}$ 。A, B 為常數， R_0 為溫度為 T_0 的電阻值， T 為絕對溫度， R 為電阻。

在半導體物理中電阻與溫度關係已被解釋且證實。可否藉由半導體物理模型解釋溫度對液態可變電阻之物理性質，是值得去探討的問題。此實驗測量溫度對液態可變電阻的影響，觀察此可變電阻之溫度係數關係，以驗證是否符合半導體物理模型。

研究探討介質溫度對電阻值之影響，實驗示意圖及結果如圖十二、表六、圖十三。在重量百分濃度 7.5% 的食鹽水溶液情況下，將食鹽水加熱至 70°C 並每經一分鐘後交換流水馬達電源開關，使介質流動與靜止。測量其溫度與電阻值，觀察其關係，測得電阻值以 (K Ω) 為單位。

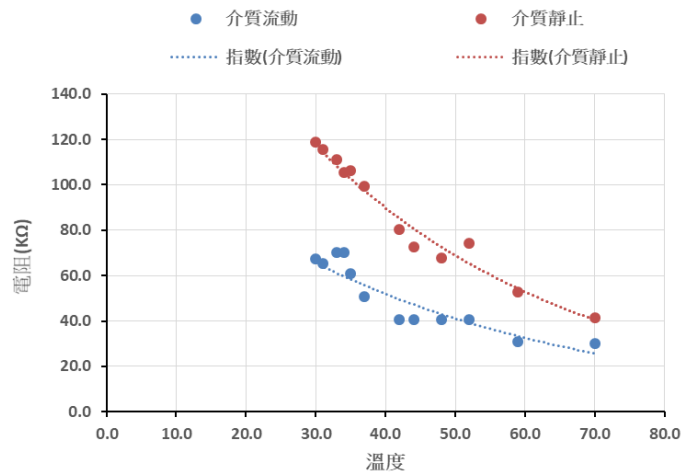


(圖十二)介質溫度與電阻值之關係，實驗測試之示意圖

(表六)溫度對電阻值的影響

溫度	介質流動	介質靜止
70.0	30.2	41.4
59.0	31.0	52.9
52.0	40.5	74.1
48.0	40.8	67.9
44.0	40.4	72.5
42.0	40.6	80.5
37.0	50.6	99.5
35.0	60.8	106.2
34.0	70.0	105.5
33.0	70.1	111.3
31.0	65.4	115.5
30.0	67.3	118.7

溫度與電阻關係圖



(圖十三)溫度與電阻關係圖

由實驗測試說明，當介質流動，溫度由 70°C 下降至 30°C 時，電阻值從原本的 30.2KΩ 逐漸升高到最後為 67.3KΩ，增加 37.1KΩ，平均電阻值為 49.7KΩ。當介質靜止、溫度由 70°C 下降至 30°C 時，電阻值從原本的 41.4KΩ 逐漸升高到最後為 118.7KΩ，增加 77.3KΩ，平均電阻值為 70.0KΩ。表六說明在液態可變電阻中溫度越大、電阻值越小；溫度越小電阻值越大。圖十三說明液態可變電阻中不論介質流動與否，溫度與電阻呈現凹向上曲線關係，且為負溫度係數。

伍、研究結果

一、液態可變電阻可行性及穩定度評估

(一)介質種類之實驗穩定度評估：

由實驗測試中，觀察純水之電阻平均值與食鹽水電阻值 30 倍差異，了解到純水與食鹽水之電阻值差異極大。由於純水之電阻值極高，只要受到輕微波動或雜訊干擾，標準差也大很多，電阻值變化猛烈。純水電阻值標準差與食鹽水有 10 倍差異，因此以純水當作液態可變電阻介質觀察物理模型探討物理變化亦極度不穩定。後續液態可變電阻實驗物理模型之介質需電阻變化穩定以減少實驗誤差變因，故選用固定濃度之食鹽水為液態可變電阻自由離子之液態介質。

(二)介質流動對液態可變電阻之影響：

半導體物理模型中，電阻定義 $R = \frac{V}{neA\mu E}$ ，表示載子遷移率(μ)越大，則電阻越小；相反的，載子遷移率越小，電阻值越大。

介質流動與否對電阻值影響甚大。量測介質靜止與流動的電阻值，可測得介質靜止時電阻較高，了解到當介質流動速度慢(靜止)時，自由離子移動越慢，電阻值較大；介質流動速度快時，自由離子移動越快，電阻值較小。此液態可變電阻量測現象符合半導體物理模型趨勢。固態半導體在不同材料的情況下會影響 μ 值，將此模型移至液態水溶液中，流動的食鹽水溶液相較於靜態，離子遷移率更快。因此 μ 值會因流速增加而上升，得到電阻值下降的結論。在液態可變電阻中，介質流動可影響載子遷移率表現並改變液態電阻值。

二、濃度對液態電阻之影響

由此實驗測試中觀察到，介質濃度越低，電阻值越大；介質濃度越高，電阻值越小。液態可變電阻藉由電解介質來改變離子移動的狀態。在濃度高的電極兩端，有較足夠的離子可進行電解作用；在濃度低的介質中，電極周圍的帶電離子較少，需透過遠處離子移動進行電解。在介質濃度低的情況下，電流及電量較小，因此電阻較大。對低濃度介質來說介質擾動與否對電阻值差異甚大，此實驗藉由介質擾動幫助離子移動至電極；濃度高的介質內有較多帶電離子，故其流動與否對電阻值差異不明顯。

電阻與自由載子濃度之關係，未曾解釋於液態可變電阻中。由半導體電阻定義 $R = \frac{V}{neA\mu E}$ ，了解自由載子濃度會影響電阻量值。載子濃度越高，其自由離子較多，電阻較小；載子濃度越低，自由離子較少，得到之電阻值較大。由實驗結果，介質靜止時之電阻值較流動時高，可再次證明改變載子遷移率會影響電阻值，且符合半導體電阻模型 $R = \frac{V}{neA\mu E}$ 的趨勢。

三、電極擺放位置與電阻關係

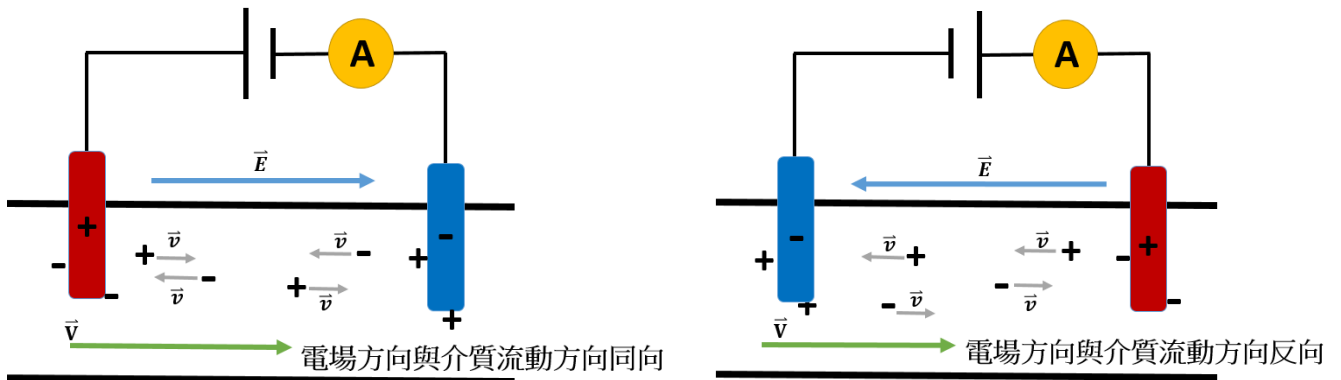
由實驗結果觀察，無論介質濃度及介質速度為何，電極相距 11.5 公分之電阻值較大、電極相距 1.5 公分之電阻值較小。無論介質為流動或靜止狀態，兩濃度液體內電極放置距離影響電阻值變化的趨勢相同。此研究也觀察到，介質濃度越高者，電阻值越低，因此液態可變電阻符合物理方程式趨勢。

透過改變液態介質腔體中之探棒距離，了解到半導體物理模型及其概念觀察物理量之變化。得出兩電極相距越長，電阻值越高；電極距離越短，電阻值越低。其符合電阻公式 $R = \rho \frac{L}{A}$ 趨勢。由此證明電阻與半導體距離關係不只僅限於半導體物理，在液態可變電阻中也能看到

此現象。

四、改變電場方向對電阻之影響

由實驗結果觀察，不論介質流動或靜止，當電場方向與介質流動方向同向時，測得電阻值較高。相反的，電場方向與介質流動方向相反，電阻值較低。電場方向改變後，能明顯的改變電阻值。



(圖十四)改變電場方向對電阻值之關係，原理說明之示意圖

實驗中藉由改變電場方向測得不同電阻值。從實驗數據可得出，當電場方向與介質流動方向同向時，可得出電阻值高於反向的情況。由於電解溶液為 NaCl ， Cl^- 的原子量大於 H^+ ，(Cl^- 較重)，當兩者同向時， Cl^- 隨著水流方向移動，又因電場效應影響欲往正極方向移動，相較於反向時，較輕的 H^+ 離子，移動困難，因此電阻值較大。由此證明，離子移動速度會因電場方向的改變而影響電阻值。

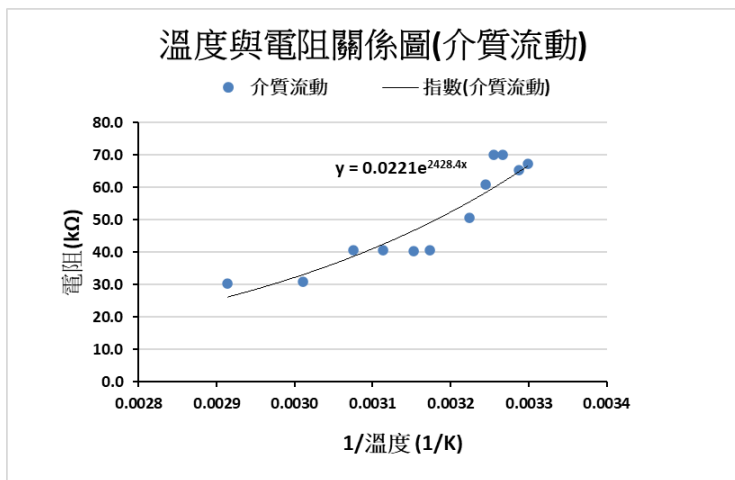
五、溫度對電阻之影響

由實驗結果觀察，無論介質有無流動，溫度越高時，電阻值越低；溫度越低，電阻值越高。因此在液態可變電阻中溫度與電阻呈現凹向上曲線關係，為負溫度係數。液態可變電阻類似於半導體、絕緣體以及其他非金屬材料，且具備(NTC)熱敏電阻的特性。

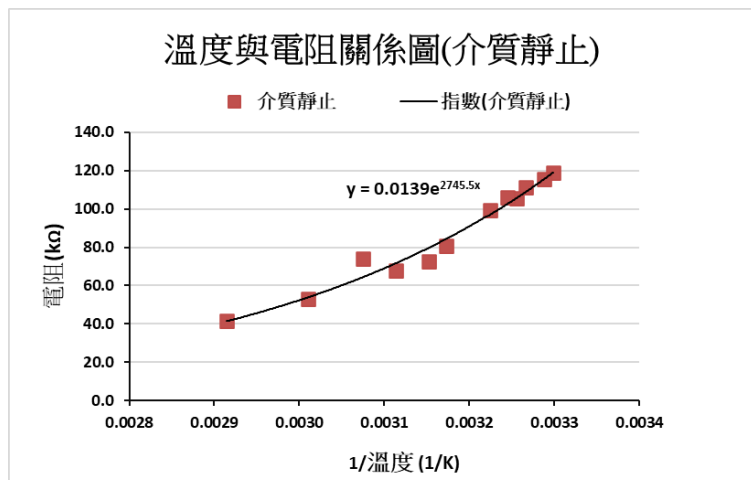
透過改變液態可變電阻之溶液溫度，且藉由觀察半導體物理模型及其物理量變化。了解液態可變電阻符合物理方程式 $R = Ae^{\frac{B}{T}}$ 之趨勢。 A, B 為常數， R_0 為溫度 T_0 的電阻值， T 為絕對溫度， R 為電阻。

由圖十五、圖十六觀察並代入電阻溫度係數模型進行比對，可得出常數 B ，觀察是否符合溫度係數模型。以下為結果及推導過程。當介質流動時溫度與電阻曲線模型為

$y = 0.0221e^{2428.4x}$ ，此時 x 為 $\frac{1}{\text{溫度}}$ ， y 為電阻值。欲取得介質流動之電阻溫度係數，將上述物理方程式 $R = Ae^{\frac{B}{T}}$ 帶入比對，並假設 A 為 0.0221 ，得 $R = 0.0221e^{2428.4\frac{1}{T}}$ 。令 $\frac{1}{T} = x$ ，得常數 $B = 2428.4$ 。當介質靜止時溫度與電阻線性模型為 $y = 0.0139e^{2745.5x}$ ，將物理方程式帶入比對，得常數 $B = 2745.5$ 。



(圖十五)溫度與電阻關係圖(介質流動)



(圖十六)溫度與電阻關係圖(介質靜止)

在介質靜止的情況下，電阻溫度係數小於介質流動時，且兩者狀態下溫度係數皆為負數。從實驗結果中，能清楚觀察，當介質流動，溫度由 70°C 下降至 30°C 時，電阻值增加 $37.1\text{K}\Omega$ 。溫度由高溫變低溫時，電阻值有明顯增加的趨勢。由計算出的常數證明，溫度與液態可變電阻之電阻值符合物理方程 $R = Ae^{\frac{B}{T}}$ 之趨勢。

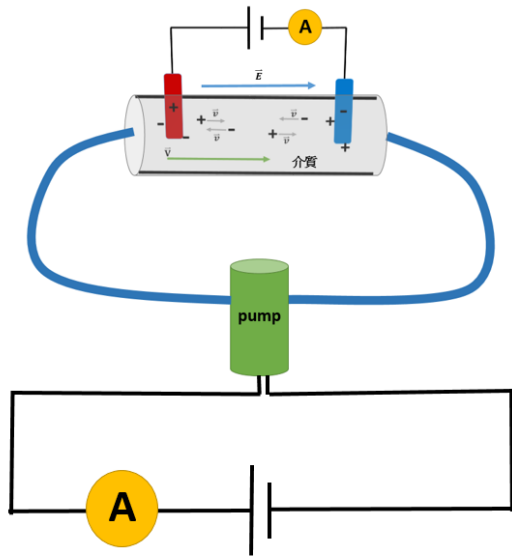
陸、討論

現今的可變電阻皆為標準的類比元件，可以透過旋轉旋鈕、滑動等方式使電阻值產生變化。以半導體物理的角度觀察，透過電路中電場的改變，能輸出數位訊號並發生變化，其訊號在導線中傳輸，最後透過讀取此數位訊號進行邏輯運算或儲存資訊等功能。

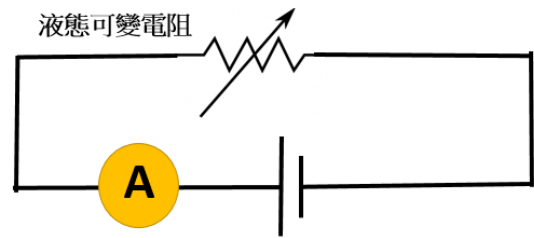
透過本研究探討液態可變電阻的物理準度及其物理變化關係，進一步探討液態可變電阻可應用範疇，期待能具有產生數位訊號之特性，並在未來運用於半導體產業。

液態可變電阻不同之數位訊號，實驗示意圖及研究結果如下：

一、欲測得兩段訊號：（實驗示意圖如圖十七，電路圖如圖十八）

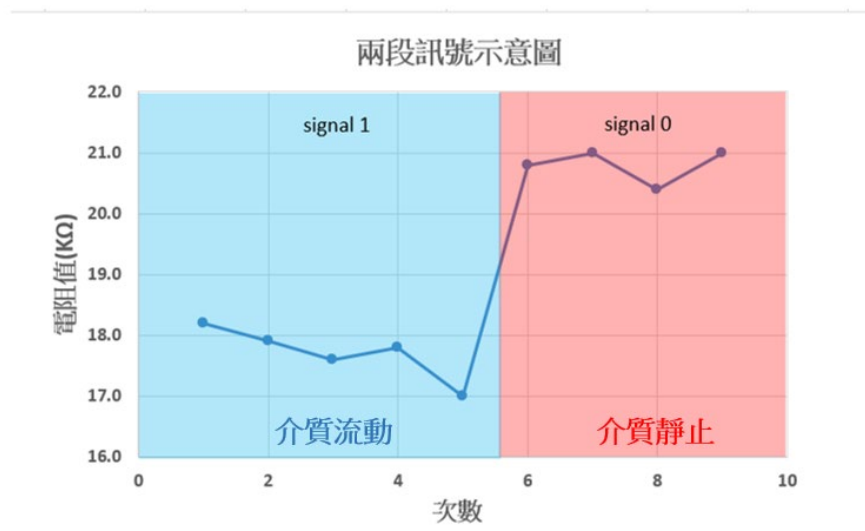


(圖十七)串聯一個液態可變電阻，欲求兩段訊號，實驗示意圖。



(圖十八)串聯一個液態可變電阻，欲求兩段訊號，電路圖。

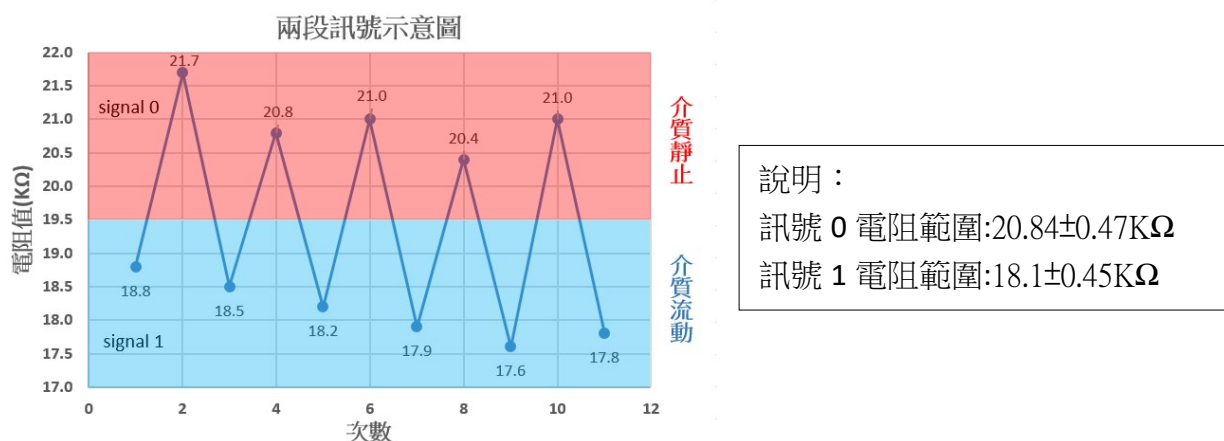
在重量百分濃度 7.5%食鹽水溶液的情況下，將兩端電極相距 1.5cm，經 50 秒後交換流水馬達電源開關，使介質流動與靜止，連續且重複量測 9 次，每 10 秒詳細記錄一次，觀察是否有 01 訊號的表徵差異。



(圖十九)兩段訊號示意圖(紀錄:10 秒一次)

由實驗結果(圖十九)觀察到,藍色部分電阻值較低,前五次測量電阻值為介質流動時;從第六次開始電阻值逐漸升高進入紅色部分,此時流水馬達為關閉狀態;後四次的電阻值較高,為介質靜止時測量電阻值之結果。從邏輯電路中,仍能觀察到明顯的 01 訊號差。

在重量百分濃度 7.5% 的食鹽水溶液情況下,兩端電極 1.5cm,每經一分鐘後交換流水馬達電源開關,使介質流動與靜止,連續且重複量測 11 次,觀察此電路的重複性的 01 訊號表徵差異。

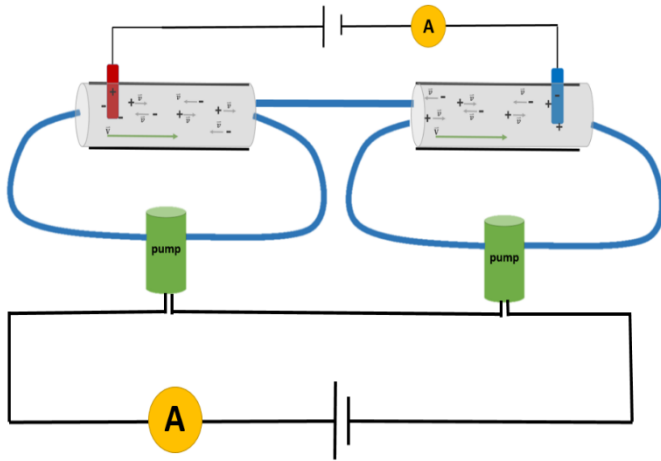


(圖二十)兩段訊號示意圖(紀錄:60 秒一次)

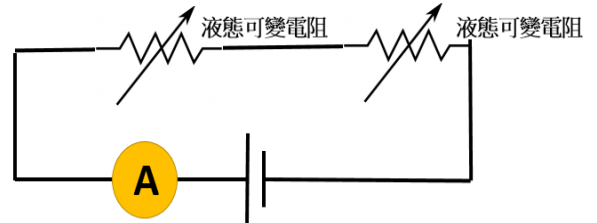
由實驗結果(圖二十),紅色部分為介質靜止時,電阻值較高,定義端點為訊號 0;藍色部分為介質流動時,電阻值較低,將端點定義為訊號 1。若將此電阻串輸出成為訊號,則會接收到 01010101010 此訊號。從此邏輯電路中,能觀察到明顯重複的訊號表徵差異。

從求得兩段訊號的實驗,觀察液態可變電阻具有重複且明顯的 01 訊號表徵差異。場效應電晶體(FET, Field Effect Transistor),是透過改變閘極來控制電子流動路徑,也就是透過電壓的改變來產生邏輯訊號。此裝置如同半導體物理中的場效應電晶體,利用介質流動與否控制,產生電阻值差異性,進而控制電流通,形成不同邏輯訊號,可具備數位邏輯運算等能力。

二、欲測得三段訊號：(實驗示意圖如圖二十一，電路圖如圖二十二)

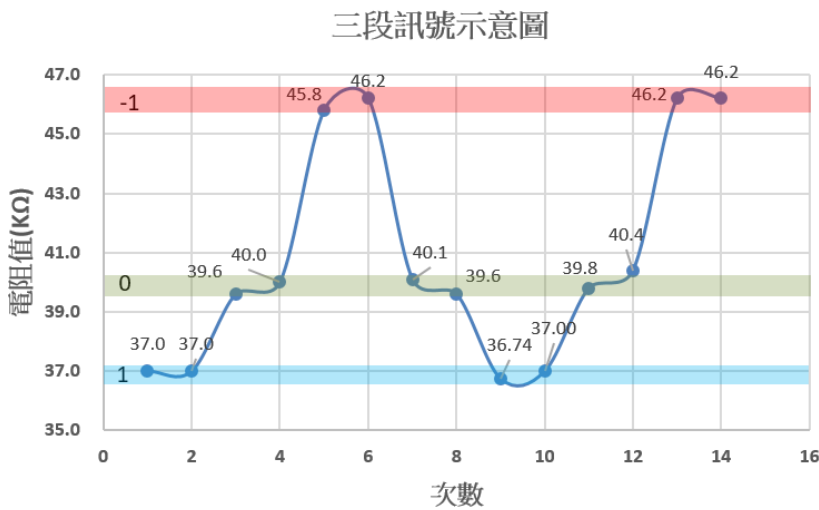


(圖二十一)串聯兩個液態可變電阻，欲求三段訊號，實驗示意圖。



(圖二十二)串聯兩個液態可變電阻，欲求三段訊號，電路圖。

在重量百分濃度 7.5% 食鹽水溶液中，每經一分鐘後交換流水馬達電源開關，使介質流動與靜止，連續且重複量測 14 次，觀察其電阻值變化。



(圖二十三)三段訊號示意圖

說明：

訊號-1 電阻範圍: $46.1 \pm 0.2 \text{K}\Omega$

訊號 0 電阻範圍: $39.9 \pm 0.31 \text{K}\Omega$

訊號 1 電阻範圍: $36.9 \pm 0.11 \text{K}\Omega$

由實驗結果 (圖二十三) 觀察到，當串聯兩組液態可變電阻時，能明顯呈現出三段訊號。藍色部分定義為訊號 1，此時兩液態可變電阻之介質為流動狀態，為圖中最低之電阻值；綠色部分電阻值定義為訊號 0，表有一介質為靜止、另一液態可變電阻為介質流動的情形，其電阻值大小排在適中的位置；紅色部分電阻值定義為訊號-1，兩液態可變電阻之介質為靜止狀態，電阻值最高。

求得三段訊號的實驗說明，液態可變電阻並非只有邏輯訊號，0101 訊號的表徵，能透過串聯兩個可液態可變電阻得三段明顯的訊號差，並且其標準差小，訊號穩定性高。目前邏輯訊號以 0101 的方式表現，若未來需呈現出三段、甚至更多段訊號差異，可透過串聯液態可變電阻達到此目的。

串聯液態可變電阻具訊號放大的功能，從上述實驗得電阻值又將近兩倍之差。此狀態可利用固態可變電阻的串連原理來做解釋，當串聯市售之可變電阻時，其電阻值為電阻總和。在此證明液態可變電阻也具有串聯越多電阻，電阻值越大的特性。

柒、結論

一、在此研究中證明，液態可變電阻可滿足半導體物理中的理論，能看到以下現象：

(一)在介質流動對液態可變電阻之影響實驗中，當介質流動速度靜止時，電阻值較大；介

質流動時，電阻值較小。(電阻定義 $R = \frac{V}{neA\mu E}$ ， $\mu \uparrow$ ， $R \downarrow$)

(二)在濃度對液態電阻之影響實驗中，觀察到介質濃度越低，電阻值越大；介質濃度越高，

電阻值越小。(電阻定義 $R = \frac{V}{neA\mu E}$ ， $n \uparrow$ ， $R \downarrow$)

(三)在電極擺放位置與電阻關係實驗中，電極距離越長，電阻值越高；電極距離越短，電

阻值越低。(電阻幾何關係 $R = \rho \frac{L}{A}$ ， $L \uparrow$ ， $R \uparrow$)

(四)在改變電場方向對電阻之影響的實驗中，若電場與介質流動方向同向，測得電阻值較高；相反的，電場與介質流動方向反向，電阻值較低。電場與介質流動方向改變後，會明顯的影響電阻值。

(五)在溫度對電阻之影響實驗中，驗證液態可變電阻為負溫度係數，當溫度越高時，電阻值越低；溫度越低，電阻值越高。當溫度由高溫變低溫時，電阻值有明顯增加的趨勢。

(物理方程式 $R = Ae^{\frac{B}{T}}$ ， $T \uparrow$ ， $R \downarrow$)

(六)透過串聯液態可變電阻及控制介質流動與否，得出明顯的兩段訊號(01 訊號表徵)，與三段訊號。

二、未來展望與應用

現行科技發展飛快，台灣在世界半導體供應鏈中扮演著舉足輕重的重要角色。伴隨著世界產品開發需求，台灣半導體技術及邏輯元件也因摩爾定律說明了演進快要到發展極限。未來液態可變電阻可能成為科學家研究的主流趨勢。

研究觀察到液態可變電阻能符合半導體物理的趨勢、具重複使用性，電阻值穩定，且有

產生 01 訊號、多段訊號的特性。液態可變電阻可透過介質流動與否來產生不連續的 01 訊號。期盼未來能讓液態可變電阻進行邏輯運算並應用於半導體產業中。

捌、參考資料

1. 陳壽安 (2000)。意外發現的導電高分子。科學月刊，31，39-46。
2. 楊賜麟 (譯) (2012)。半導體物理與元件 (原作者：Donald A. Neamen)。臺北市：東華書局。
3. *PTC Thermistor: positive temperature coefficient*. (n.d.) Retrieved February 27, from <https://reurl.cc/GdnkNG>
4. Xamidea Editorial Board. (2020, December 30). *20 Plus CBSE Sample Papers Mathematics Class 12 for 2021 Exam with Reduced Syllabus*. Retrieved March 5, from <https://reurl.cc/0jx1MK>
5. EPCOS AG (2018). *NTC thermistors, general technical information*. Retrieved March 6, from <https://reurl.cc/Akgmle>

【評語】 051811

利用液態物質流動探討電阻的變化，實驗的設計及探討的方向都非常正確，可惜實驗沒有針對電導度來分析電流密度的理論探討，導致無法得知流速、離子濃度、溫度及幾何形狀對電阻值的關聯性。

作品簡報



歐姆的「液」想世界~

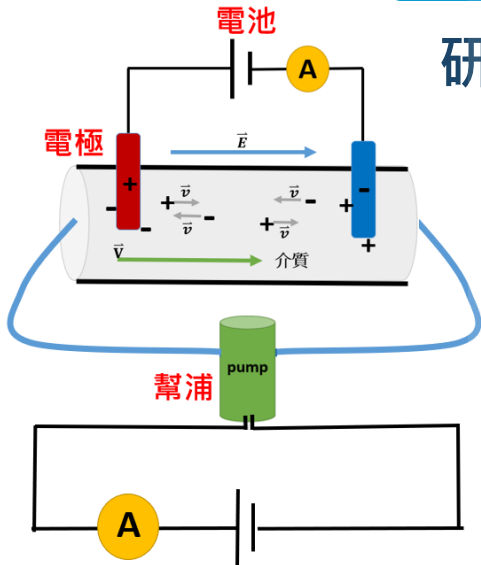
液態可變電阻物理特性之探討

組別：高級中等學校組

科別：物理與天文學科

報告重點

已涵蓋各審查要項



實驗裝置示意圖

前言



Why ?

- 曾使用arduino控制晶片與可變電阻串聯，執行調整LED燈具模組的明暗程度。
- 固態電路已廣泛使用於生活，缺乏液態材料的討論。
- 課本提過隨著電解溶液種類不同，有著不同的導電表現。



What ?

- 探討液態可變電阻的可行性：
 - 以固態電路的物理模型為基礎，觀察液態電阻是否符合趨勢，作為液態可變電阻可行性之考量。
- 是否具有產生訊號的特性：
 - 觀察導體在不同狀態下穩定性，進一步利用液態可變電阻作為電路中的訊號表徵。



How ?

- 以液態食鹽水作為離子介質
 - 透過改變物理模型中的變量，觀察液態電阻是否符合趨勢。
 - 半導體物理電阻模型： $R = \frac{V}{neA\mu E}$
 - 電阻幾何關係： $R = \rho \frac{L}{A}$
- | | |
|----------|--------------|
| V：電壓 | E：電場 |
| n：帶電載子濃度 | ρ ：電阻係數 |
| A：導體截面積 | L：導線長度 |
| u：飄移率 | |

研究方法與結果

一、介質流動與否

介質靜止時，電阻值較大；
介質流動時，電阻值較小。

$$\text{電阻定義：} R = \frac{V}{neA\mu E} \cdot \mu \uparrow \cdot R \downarrow$$

二、介質濃度

濃度越低，電阻值越大；
濃度越高，電阻值越小。

$$\text{電阻定義：} R = \frac{V}{neA\mu E} \cdot n \uparrow \cdot R \downarrow$$

三、電極距離

電極距離越遠，電阻值越高；
電極距離越近，電阻值越低。

$$\text{電阻幾何關係：} R = \rho \frac{L}{A} \cdot L \uparrow \cdot R \uparrow$$

四、電場與介質流動方向

兩者同向時，電阻值較高；
兩者反向時，電阻值較低。

改變電場與介質流動方向，會明顯的影響電阻值。

五、介質溫度

溫度越高時，電阻值越低；
溫度越低時，電阻值越高。

液態可變電阻為負溫度係數

六、液態電阻串聯

得出明顯的兩段訊號(01訊號表徵)，與三段訊號。

電阻大小與串聯數目正相關

研究結果

- 各項物理性質之趨勢與電阻幾何模型相符
- 將傳統半導體模型變化應用在液態可變電阻上是可行的
- 具電阻穩定性，且有明顯01訊號、多段訊號特性
- 近似於目前半導體物理使用的數位訊號概念

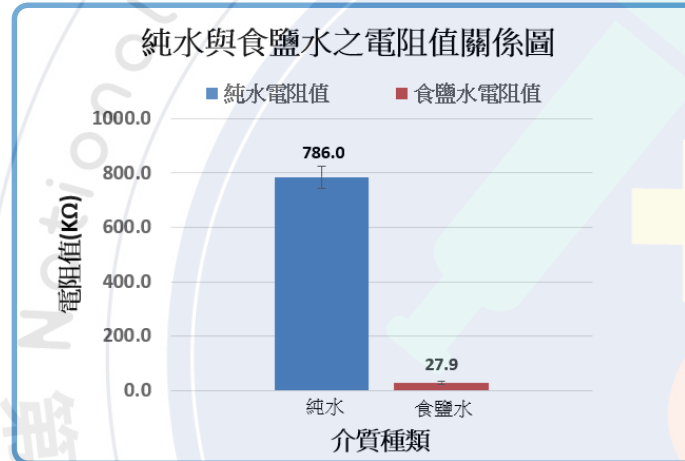
一、液態可變電阻介質可行性及穩定度

➤ 介質種類之實驗穩定度評估

純水與食鹽水之電阻值

次數	純水(KΩ)	食鹽水(KΩ)
1	740	28.5
2	790	26
3	830	22.4
4	820	29
5	750	33.5
AVG.	786.0	27.9
STD.	40.4	4.1

純水與食鹽水之電阻值關係圖

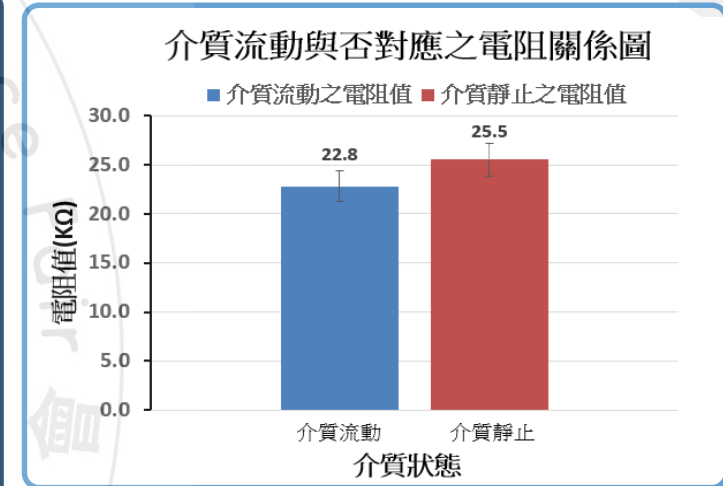


➤ 介質流動對液態可變電阻之影響

介質流動與否對應之電阻值

次數	介質流動 (KΩ)	介質靜止 (KΩ)
1	26.5	28.2
2	24.7	28.2
3	22.7	26.5
4	22.0	25.1
5	22.3	24.1
6	22.9	25.8
7	21.4	25.7
8	21.9	24.5
9	22.2	24.1
10	21.8	23.2
AVG.	22.8	25.5
STD.	1.6	1.7

介質流動與否對應之電阻值關係圖



方法

1. 以純水及食鹽水進行評估
2. 交換流水馬達電源，觀察介質流動與靜止對電阻值之影響

小結

- ✓ 為減少實驗誤差，選擇電阻值較穩定的食鹽水為介質。
- ✓ 介質靜止時，電阻值較大；介質流動時，電阻值較小。

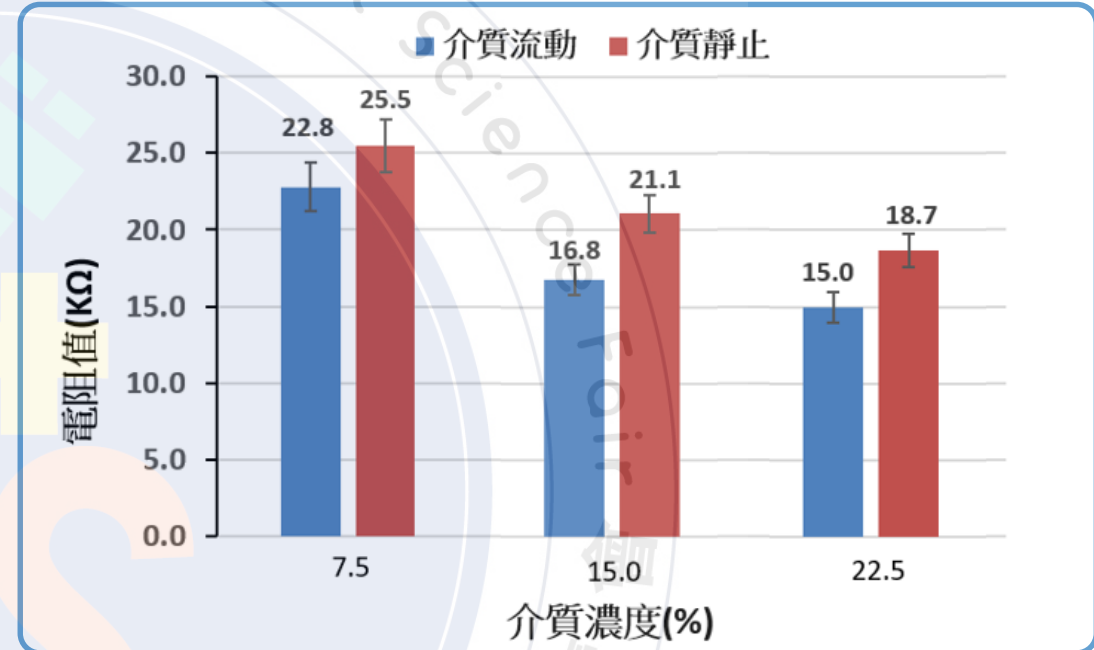
✓ 符合電阻定義 $R = \frac{V}{neA\mu E}$ ， $\mu \uparrow$ ， $R \downarrow$

二、介質濃度對電阻之影響

不同濃度的電阻值

次數 濃度	介質流動(KΩ)			介質靜止(KΩ)		
	7.5%	15.0%	22.5%	7.5%	15.0%	22.5%
1	26.5	17.3	15.1	28.2	21.5	18.6
2	24.7	17.5	15.6	28.2	21.5	19.7
3	22.7	18.5	14.3	26.5	23.1	18.7
4	22.0	18.1	14.1	25.1	22.4	17.6
5	22.3	15.9	14.0	24.1	19.8	17.7
6	22.9	15.5	14.0	25.8	19.3	17.4
7	21.4	17.2	15.3	25.7	21.3	19.0
8	21.9	16.4	14.6	24.5	21.6	17.8
9	22.2	15.9	15.8	24.1	20.0	19.9
10	21.8	15.9	17.0	23.2	20.8	20.5
AVG.	22.8	16.8	15.0	25.5	21.1	18.7
STD.	1.6	1.0	1.0	1.7	1.2	1.1

濃度與電阻關係圖



方法

以重量百分濃度7.5%、15%、22.5%的食鹽水溶液為介質，觀察不同自由離子濃度對電阻值之影響。

小結

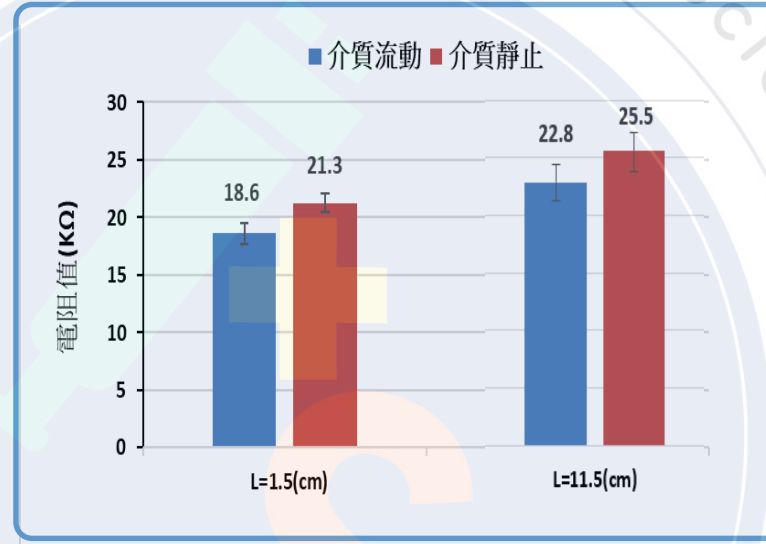
- ✓ 溶液濃度越**低**，電阻值越**大**；溶液濃度越**高**，電阻值越**小**。
- ✓ **符合電阻定義** $R = \frac{V}{neA\mu E}$ ， $n \uparrow$ ， $R \downarrow$
- ✓ 不同濃度下，介質靜止之電阻值較高，改變載子遷移率依舊**會影響電阻值**。

三、電極距離與電阻關係

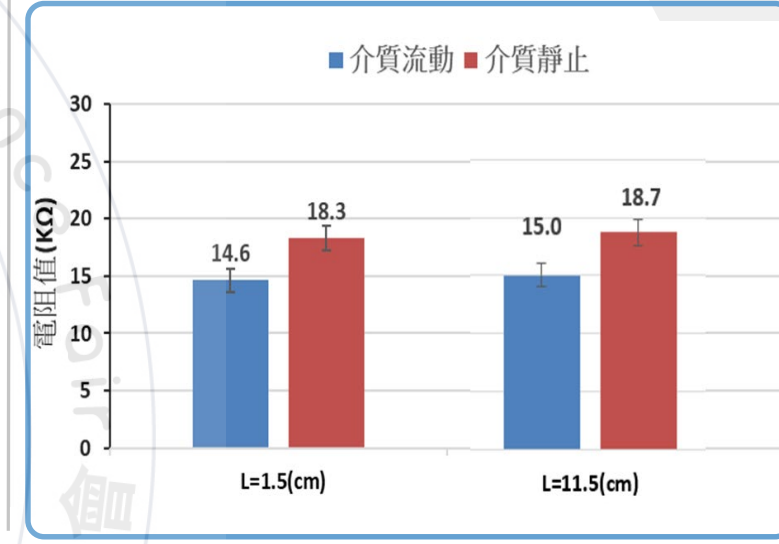
電極擺放位置所對應之電阻

次數	介質流動 7.5% (KΩ)		介質靜止 7.5% (KΩ)		次數	介質流動 22.5% (KΩ)		介質靜止 22.5% (KΩ)	
	L=11.5(cm)	L=1.5(cm)	L=11.5(cm)	L=1.5(cm)		L=11.5(cm)	L=1.5(cm)	L=11.5(cm)	L=1.5(cm)
1	26.5	18.5	28.2	21.7	1	15.1	14.9	18.6	18.9
2	24.7	17.9	28.2	21.5	2	15.6	13.8	19.7	17.4
3	22.7	19.4	26.5	23.1	3	14.3	13.5	18.7	17.3
4	22.0	18.2	25.1	20.5	4	14.1	15.3	17.6	16.9
5	22.3	17.8	24.1	21.0	5	14.0	15.2	17.7	19.7
6	22.9	17.6	25.8	20.7	6	14.0	15.2	17.4	17.3
7	21.4	17.9	25.7	21.9	7	15.3	15.6	19.0	18.8
8	21.9	18.8	24.5	20.8	8	14.6	14.6	17.8	19.9
9	22.2	20.2	24.1	21.0	9	15.8	14.0	19.9	17.4
10	21.8	19.8	23.2	20.4	10	17.0	13.8	20.5	19.3
AVG.	22.8	18.6	25.5	21.3	AVG.	15.0	14.6	18.7	18.3
STD.	1.6	0.9	1.7	0.8	STD.	1.0	0.8	1.1	1.1

電極距離與電阻關係圖
(濃度7.5%)



電極距離與電阻關係圖
(濃度22.5%)



方法

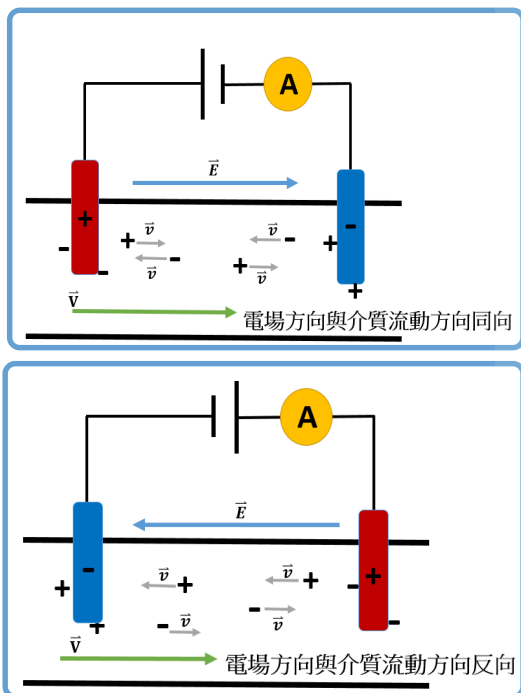
觀察探棒在兩種距離下，電阻值變化
 短距離相距1.5公分
 長距離相距11.5公分

小結

- ✓ 電極距離越長，電阻值越高；
電極距離越短，電阻值越低。
- ✓ 符合物理模型 $R = \rho \frac{L}{A}$ ， $L \uparrow, R \uparrow$ 。

四、改變電場方向對電阻之影響

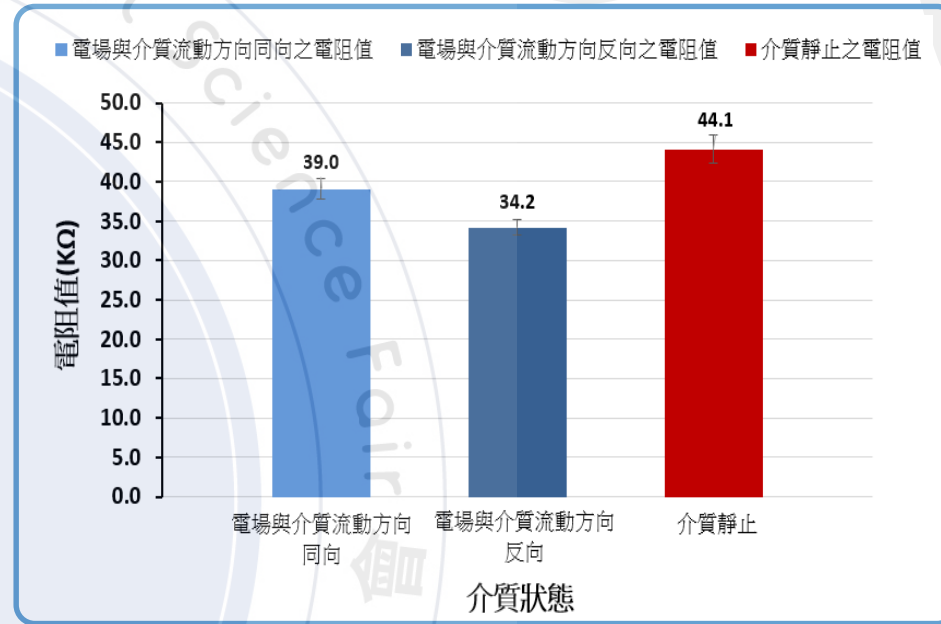
實驗測試示意圖



電場與介質流動方向對電阻值的影響

次數	介質流動 (K Ω)		介質靜止(K Ω)
	電場與介質流向同向	電場與介質流向反向	
1	38.1	33.7	43.3
2	39.5	35.9	45.9
3	41.0	34.3	46.0
4	39.0	33.8	43.2
5	37.6	33.2	42.0
AVG.	39.0	34.2	44.1
STD.	1.3	1.0	1.8

電場與介質流動方向與電阻值關係圖



方法

改變電場方向對電阻之影響

分為兩種情形，電場方向與介質流動方向同向與反向，探討介質流動方向與電場方向和電阻值之關係。

小結

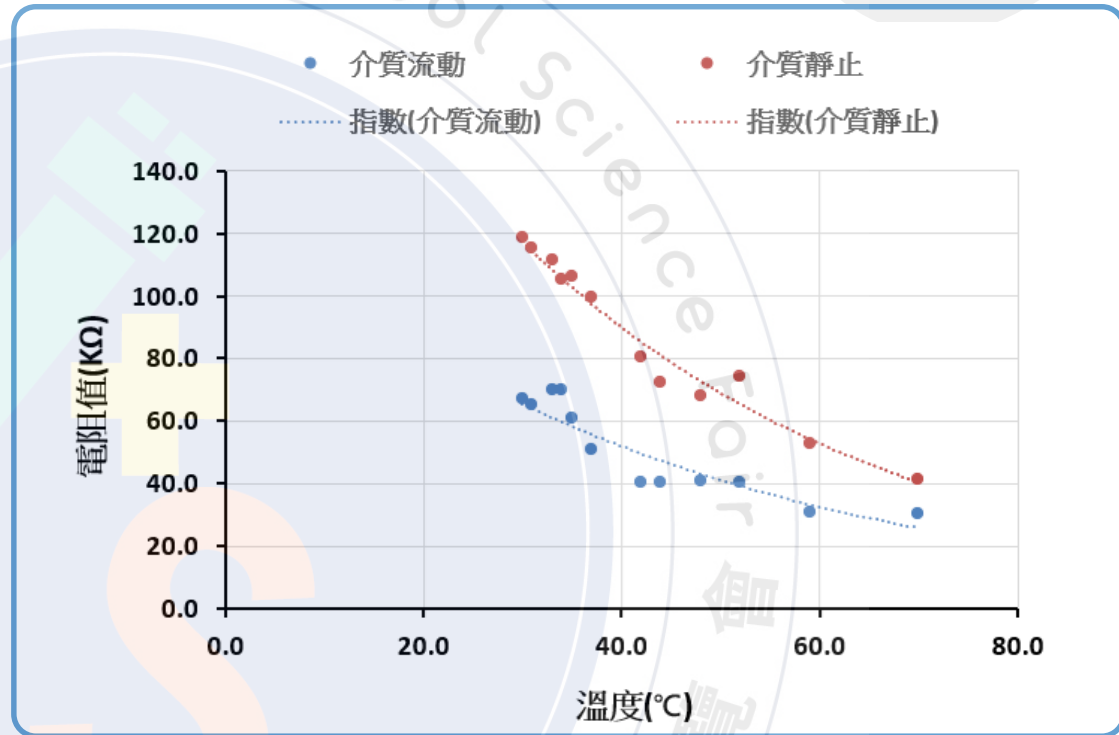
- ✓ 電場與介質流動方向同向，測得電阻值較高；
- ✓ 電場與介質流動方向反向，電阻值較低。
- ✓ 電場與介質流動方向改變，會明顯影響電阻值。
- ✓ 無論電場與介質流動方向為何，介質靜止之電阻值皆較高。

五、介質溫度對電阻之影響

溫度對電阻值的影響

溫度	介質流動	介質靜止
70.0	30.2	41.4
59.0	31.0	52.9
52.0	40.5	74.1
48.0	40.8	67.9
44.0	40.4	72.5
42.0	40.6	80.5
37.0	50.6	99.5
35.0	60.8	106.2
34.0	70.0	105.5
33.0	70.1	111.3
31.0	65.4	115.5
30.0	67.3	118.7

溫度與電阻關係圖



方法

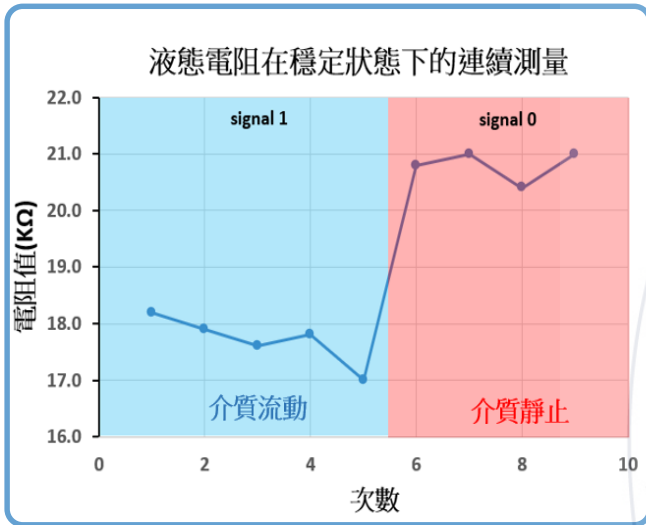
測量並觀察70°C至30°C食鹽水對電阻值的影響

小結

- ✓當溫度越高時，電阻值越低；溫度越低，電阻值越高。
- ✓驗證液態可變電阻為負溫度係數

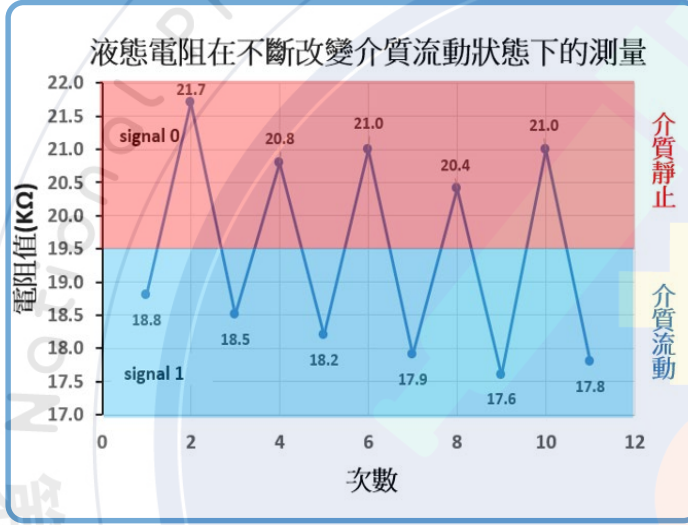
六、液態可變電阻之應用

➤ 欲測得**兩段**數位訊號 - **串聯一個**液態可變電阻



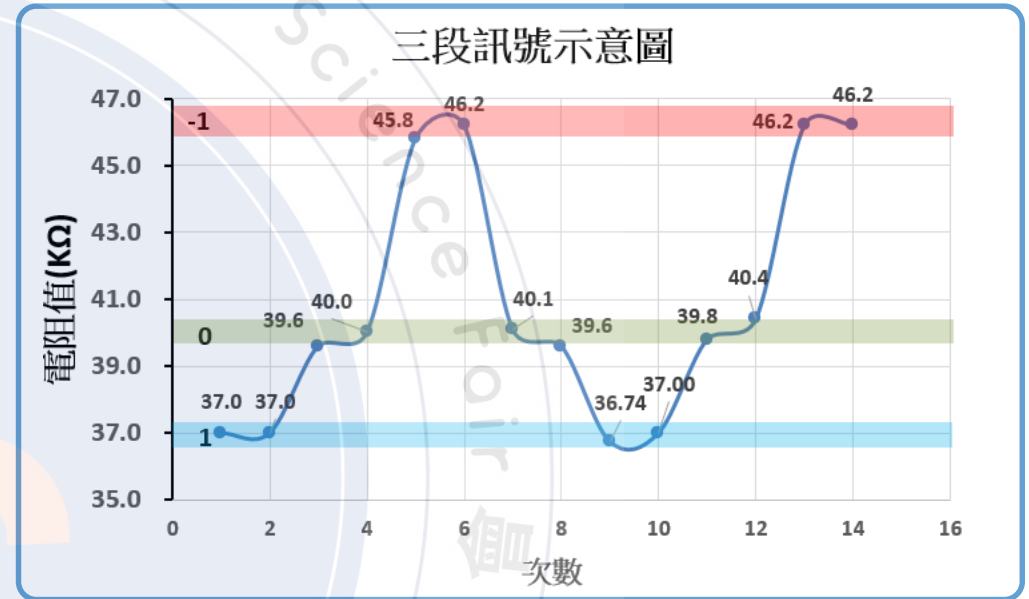
每10秒記錄一次

訊號0電阻範圍: $20.84 \pm 0.47 \text{K}\Omega$
訊號1電阻範圍: $18.1 \pm 0.45 \text{K}\Omega$



每60秒記錄一次

➤ 欲測得**三段**數位訊號 - **串聯二個**液態可變電阻



訊號-1電阻範圍: $46.1 \pm 0.2 \text{K}\Omega$
訊號 0電阻範圍: $39.9 \pm 0.31 \text{K}\Omega$
訊號 1電阻範圍: $36.9 \pm 0.11 \text{K}\Omega$

方法

1. 各別在介質流動與靜止下**連續測量**電阻值，得到穩定狀態下的平均電阻。
2. 在介質反覆改變流動狀態下測量電阻值，**判斷**液態可變電阻的**穩定性**。

小結

- ✓ 得出**明顯的兩段**訊號(具有**01訊號**表徵差異)，與**三段**訊號。
- ✓ 具有**串聯越多**電阻，電阻值越大的**訊號放大**特性。
- ✓ 可透過介質流動與否，產生電阻差異，進而生成不同訊號。

研究結果

達成研究目的



透過改變液體載子濃度，觀察電阻穩定性並探討其物理準度。



透過改變單一參數，觀察液態電阻是否符合傳統物理模型

$$R = \frac{V}{neA\mu E}$$

$$R = \frac{V}{I}$$

$$R = \rho \frac{L}{A}$$



控制液態電阻溫度，觀察其物理性質。



串聯液態電阻，透過介質流動與否觀察是否能產生訊號差異。

研究結果皆符合物理方程式趨勢



串聯

得出明顯的兩段訊號 (01 訊號表徵)，與三段訊號。

電場與介質流動方向

同向，電阻值較高；
反向，電阻值較低。

溫度

溫度越高時，電阻值越低；為負溫度係數，
溫度越低時，電阻值越高。 $T \uparrow, R \downarrow$

電極距離

電極距離越遠，電阻值越高；
電極距離越近，電阻值越低。 符合電阻幾何關係
 $R = \rho \frac{L}{A}, L \uparrow, R \uparrow$

濃度

濃度越高，電阻值越小；
濃度越低，電阻值越大。 符合電阻定義 $R = \frac{V}{neA\mu E}, n \uparrow, R \downarrow$

介質流動

介質流動時，電阻值較小；
介質靜止時，電阻值較大。 符合電阻定義 $R = \frac{V}{neA\mu E}, \mu \uparrow, R \downarrow$



結論與研究貢獻

研究結論

- 各項物理性質之趨勢與電阻幾何模型相符
- 透過改變介質流動，決定電流通過與否，產生01訊號。
- 具電阻穩定性，可產生不連續訊號與多段訊號。

研究貢獻

實驗裝置
低成本
易取得

不到**1,500**元



研究特色
具創新

目前缺**液態材料**討論

- 將傳統半導體模型變化應用在液態可變電阻上是可行的
- 各項物理性質之趨勢與電阻幾何模型相符
- 具電阻穩定性，且有明顯01訊號、多段訊號特性。
- 可透過介質流動與否來產生不連續的數位訊號

未來應用
具潛在效益

開啟**液態材料**應用

- 開啟研究新篇章
摩爾定律說明將到發展極限
- 符合半導體物理的趨勢
以簡單的物理理論特性，透過現有理論參數控制訊號變化。
- 期盼能進行邏輯運算並應用於半導體產業中



1. 陳壽安 (2000)。意外發現的導電高分子。科學月刊，31，39-46。

2. 楊賜麟 (譯) (2012)。半導體物理與元件 (原作者: Donald A. Neamen)。臺北市: 東華書局。

3. PTC Thermistor: positive temperature coefficient. (n.d.) Retrieved February 27, from <https://reurl.cc/GdnkNG>

4. Xamidea Editorial Board. (2020, December 30). 20 Plus CBSE Sample Papers Mathematics Class 12 for 2021 Exam with Reduced Syllabus. Retrieved March 5, from <https://reurl.cc/0jx1MK>

5. EPCOS AG (2018). NTC thermistors, general technical information. Retrieved March 6, from <https://reurl.cc/Akqmlle>