

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 化學科

第一名

030210

以酸鹼指示劑製作軟性彩色電子紙之探討

學校名稱：屏東縣立崇文國民中學

作者： 國一 楊承諺 國一 林峻民	指導老師： 吳明耀 郭泰亨
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：酸鹼指示劑、電子墨水、電子紙

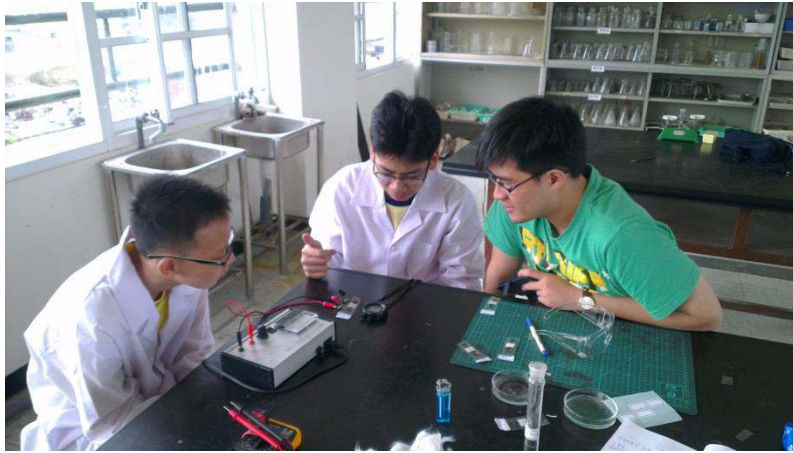
得獎感言

「三、二、一，按！」碼表數字約莫凍結在三十秒，仔細端倪著模型上的變色區塊，我們馬上就列出不少缺點，又再度討論著看似永無止盡的改進計畫。雖然已經過多代的演化，但永遠都有缺點可挑，卻也樂此不疲，也許，硬拚的執著和追求更好的信念，就是讓我們持續撐了將近八個月的原因。這中間，真的歷經了太多磨難，從一開始尋找組員的困難，到模型的演化之路，不得已的捨棄，緊急惡補理化的那幾堂課，我和夥伴都沒想過，會一起擁有過這些經驗。每回實驗的成功，我曾說過：「就像小時候得到新玩具那樣興奮。」就是這份想把努力成果展現給他人的想法，才導致我們冒著可能犯規的風險，也要在縣賽時實作給評審模型變色的「實況」，但也因為這樣，我們拿到進全國賽的資格。

全國賽第一天評審前夕，我們只能朝著自己各自不足之處加強，解說還是不順，問題還是不周全，化學反應式到底搞懂了沒？這時，我心裡浮現一個想法，為了曾經幫助支持過我們的一切人事物，拚了！為了能解答評審老師在現場所提出的問題，我們找遍了成大，南一中附近的藥妝店、便利商店，我們倆則是到飯店旁的文具店尋找可用的材料，最後是指導老師徒步到附近百貨公司地下的超市買到，在資源不足的狀況下做出模型並進行測試，以便在第二天評審時能給予答案。長達五天的賽程，印象最深的也許就是這段瘋狂的經過。而對於名次，一切只能樂觀以對，至少我們努力過了。

一路上要謝的人真的很多，尤其是身旁兩位指導老師，不僅指導比賽，也給我們人生很多方向；還有和我一起奮鬥的科展夥伴，沒有他的幫忙，如同沒有引擎的汽車，怎麼也前進不了；以及去年替我們打下根基的學姊們，她們的作品是我們作品的起源。在此特別感謝在縣賽之後，教育處大家長鴻麟處長百忙中撥空親自指導和建議、秀慧教授對於實驗和材料的寶貴意見、以及教育處秉誠老師、友校的盈吉、梅英老師和各隊伍指導老師競賽前的集訓與經驗傳承，讓我們深刻體會到，團隊合作的重要性。最後，也感謝全國賽評審老師們的鼓勵和肯定，以及一路上支持我們的師長們。

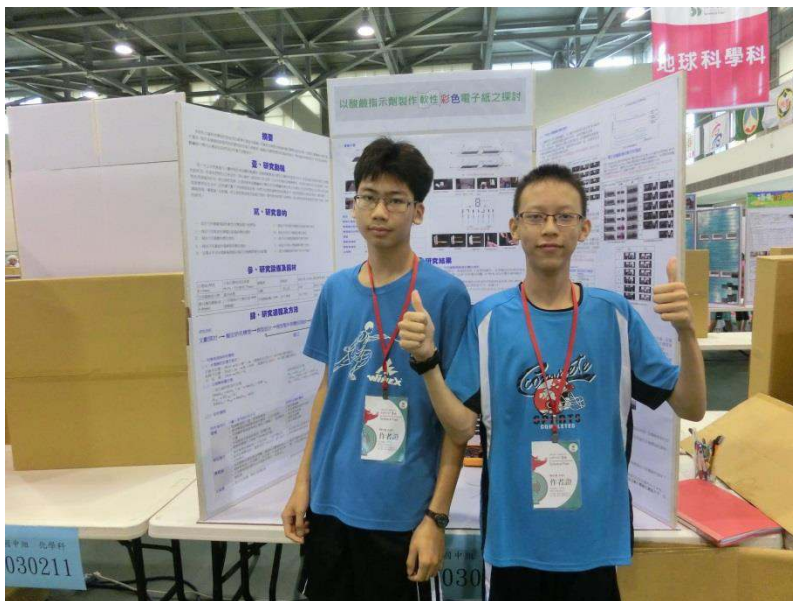
誰能想到呢？國一，對理化陌生、化學實驗的新手、個性有點合不來的兩人，竟闖出這樣的成果。科展，這段路，累是累，但眼界開闊了很多。但如果說到這次科展學到了什麼，那就是，不管情況多不利，堅持是唯一突破的方法。



超興奮！第一次穿上實驗衣！



首戰大捷！但也代表下一場戰役的開始。



全國賽第一天，難得的寧靜……。

摘要

本研究利用薄型材料包含以薄石墨紙為電極、不織布為導電反射層和護貝膠膜為密封材料，並以酸鹼指示劑為電子墨水，製作具備節能特性的軟性彩色電子紙模型。透過通電控制酸鹼指示劑的顏色變化，並探討影響模型變色的變因。主要結論如下：

- 一、模型不需要使用導電玻璃，並具備軟性可彎曲的特性
- 二、導電反射層的結構和厚度會影響顯色的速率
- 三、較小的電極尺寸有助提高顯色的均勻程度
- 四、較高的電壓有助顯色的速率
- 五、較高的電解質濃度有助於顯色的速率
- 六、酚酞指示劑具備較佳電子墨水的能力
- 七、適當厚度的去極劑能在不影響顯色速率下，有效改善氣體的生成
- 八、Arduino 微控制器板能應用於模型的顯色和去色控制
- 九、去色時間大約為顯色所需時間的 3~4 倍

壹、研究動機

有一次上自然課進行人體呼吸作用氣體的檢測時，老師將酚酞指示劑加入鹼性的澄清石灰水，水溶液竟然神奇的變成了鮮豔的粉紅色。而當我們將自己呼出的二氧化碳吹入粉紅的石灰水時，石灰水的顏色卻漸漸變淡，回到原本應有的白色混濁狀。我們對此現象感到好奇，便去詢問老師，才發現原來是酸鹼指示劑在不同的酸鹼性會出現不同顏色。於是我們開始去思考如何把這個現象應用在生活中。

老師提供文獻 1 的科展作品給我們研讀，是有關指示劑變色和電子紙的主題，其作法是將酸鹼指示劑和電解質混入洋菜膠中製作導電層的電子紙螢幕模型，雖然也有不錯的成果，但洋菜膠不易製作和乾燥硬化、透明導電玻璃不易切割、模型不能彎曲等缺點尚未得到改善。

因此，我們決定做出軟性電子紙模型，探討酸鹼指示劑顯色和去色的變因，再加上智能車課程中所使用到的 Arduino UNO 微控制器，試著設計出一套簡易的電子紙控制系統。

貳、研究目的

為了測試酸鹼指示劑當電子墨水的性能，本研究設計一個電子紙像素模型的雛型，在進行初步測試並確認可行後，進行模型各項變因的測試實驗，以探討酸鹼指示劑在不同的導電層材質、導電反射層厚度、電極尺寸、電壓、電解質種類、電解質濃度的變色情形，再探討不同指示劑的變色差異、去極劑對變色的影響。最後，則利用常見的微控制器(Arduino UNO)探討模型的變色控制。研究目的如下所列：

- 一、設計可供實驗測試的軟性可彎曲電子紙模型
- 二、探討不同材質的導電反射層的變色情形
- 三、探討不同厚度的導電反射層的變色情形
- 四、探討不同尺寸電極的變色情形
- 五、探討不同電壓的變色情形
- 六、探討不同種類電解質的變色情形
- 七、探討不同濃度的電解質的變色情形
- 八、探討不同指示劑種類的變色情形
- 九、自製水平式水電解檢測器以探討去極劑對變色的影響
- 十、電子紙模型驅動器的製作和初步測試

參、研究設備及器材

石墨紙 (厚度0.13mm)	銅箔 (厚度0.1mm)	硝酸鉀	硫酸鉀
人造石墨粉 (固定碳素99.5%，平均粒徑75 μ m)	鋅粉	丙酮	合成樹脂
酚酞指示劑	百里酚酞指示劑	廣用試劑	純水
護貝膠膜 (厚度0.08mm)	護貝機	攝影機及腳架	計時碼錶
燒杯	鱷魚夾電線	電源供應器	打洞器(孔徑2mm)
三用電錶(可自動記錄9999筆數據)	培養皿	雙面膠帶	空氣壓縮機(1.5HP)
美工噴槍	研鉢及杵	Arduino 微控制器	100%木質纖維不織布
制服布料60%棉40%聚酯	雙氧水	稀鹽酸	乙酸乙醴1

肆、研究過程及方法

一、科學原理

(一) 水電解的反應方程式

水電解時在正負極附近會產生 H^+ 和 OH^- ，而分別呈現酸性和鹼性，使酸鹼指示劑在電極處出現不同的顏色，我們由各種指示劑中選擇僅出現單一顏色者進行實驗。

正極半反應： $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ (電極附近呈酸性，指示劑呈酸性顏色)

負極半反應： $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ (電極附近呈鹼性，指示劑呈鹼性顏色)

全反應： $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$

(二) 呈現單一顏色的酸鹼指示劑及變色範圍

為了能夠方便使用電流控制顏色，我們的模型需要的指示劑為只出現單一顏色者；另外，由光學理論可知，三原色光可以混合不同的顏色，符合需求的指示劑如表 1 所示。其中可以由藍色+黃色調配出綠色。而廣用試劑由多種色素所組成，在不同 pH 值下會出現多種顏色，可進行多種色彩測試。

表 1 酸鹼指示劑列表

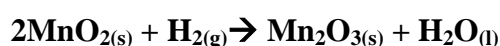
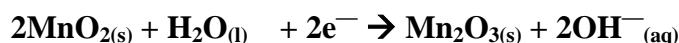
酸鹼指示劑	pH 值範圍及顏色	備註
1.酚酞	(無色) 8.2~10.0 (紅色)	pH<0 紅色；pH>12 無色
2.百里酚酞	(無色) 9.4~10.6 (藍色)	
3.間硝基苯酚	(無色) 8.2~10.0 (黃色)	價格昂貴、有毒性、暫不採用
4.廣用試劑	紅橙黃綠藍靛紫(pH 範圍廣)	多種色彩測試用

(三) 去極劑的相關反應

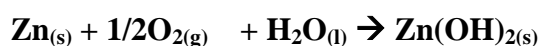
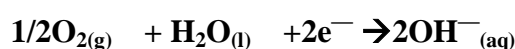
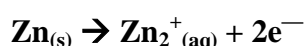
使用石墨電極在電解水時，由反應可知，正負極會分別產生氧氣和氫氣，除了危險之外，也會造成水分的減少。經查詢網路得知，如果在電極處加上去極劑，例如：在鋅錳乾電池中二氧化錳，可以在正極(碳棒)附近和氫反應產生水，達到去極化的效果。至

於氧氣的去除，我們發現，鋅粉對氧的活性較大，可以和氧氣反應形成氫氧化鋅，因此選擇上述兩種藥品為本研究的去極劑，探討其效果。相關反應如下：

1、二氧化錳與氫氣的反應



2、鋅粉與氧氣的反應



(四) 電子墨水(E ink)和電子紙顯示器

所謂的電子墨水是指將帶有正電或負電的有色細微顆粒(常見為白色和黑色)，填充在充滿透明液體的微膠囊或微杯構造中。當上下電極通電時，相對應的帶電有色粒子就會以電泳方式移動至頂層或底層，因而呈現出特定的顏色(白色、黑色或灰階)。如下圖 1。

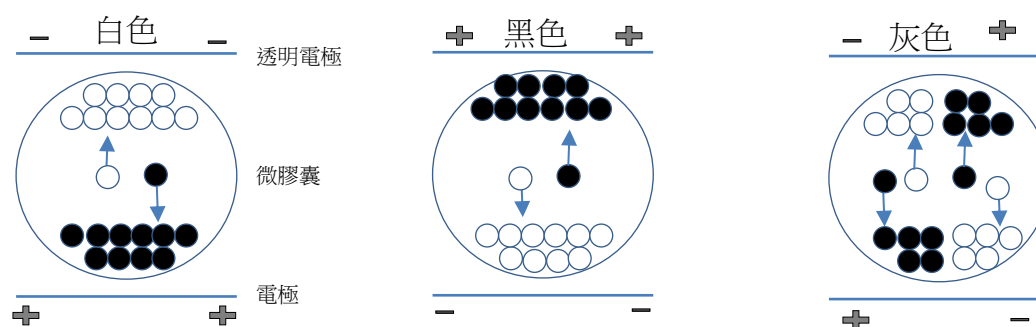


圖 1 電泳式電子紙原理示意圖(本研究繪製)

電子紙具有優良的低耗電特性——**雙穩態和反射式(無背光源)設計**。在未通電狀態下，畫面並不會消失，只有在更新畫面時才需要耗電，此種特性稱為雙穩態。目前主流的顯示器為液晶顯示器，其缺點是必須在後方的內建光源才能顯色，而電子紙顯示器多屬於無背光源設計，利用外界的自然光源的反射，即可以呈現畫面，相對省電。

電子紙可進一步製作成電子紙顯示器(E paper display) 然而，目前的電子紙顯示器的底層多使用玻璃材質的薄膜電晶體基板，因此不具有彎曲的能力，現有研究方向是底層改採塑膠材質基板，可以製作出軟性的電子紙。在應用上，軟性電子紙可以結合其他電子裝置，製成電子標籤或是電子書閱讀器(Ebook Reader)。

(五)、Arduino UNO 微控制器

Arduino 是開放硬體和軟體設計的專案，而 Arduino Uno R3 是最常見的微控制器板，如圖 2。上方的數位輸入輸出接腳有 14 個，即編號 0~13；另外下方的 6 個類比輸入，也可以設成數位輸入。具有一個 USB 埠，電腦可以上傳程式到 Arduino 上，同時供應所需的 5V 電源，也可以使用電源供應器或電池。透過程式設定，[可以很容易的進行電流方向的轉換和通電時間控制](#)。

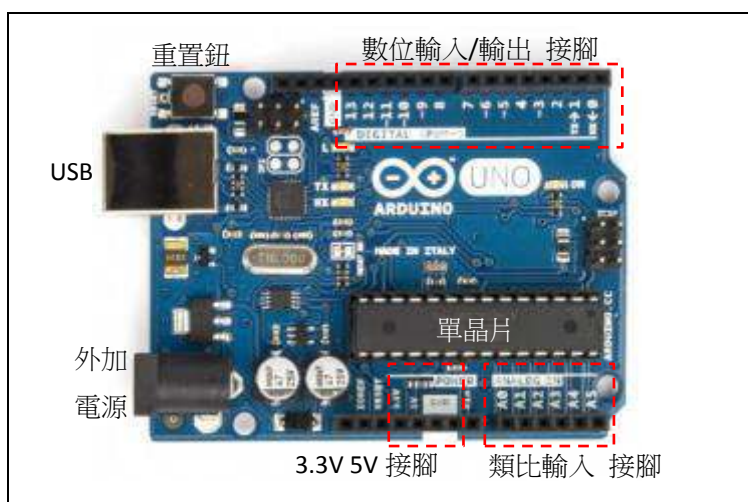


圖 2 Arduino UNO R3 接腳圖

(六)、研究構想

文獻 1 所提出的螢幕的模型採用三個電極設計，分別是 F 透明導電玻璃、D 不銹鋼網和 B 不銹鋼網，以洋菜膠為導電顯色層，在洋菜膠製作過程中加入電解質和指示劑，並使用雙面泡棉膠密封，透過正負極交換變化，在電極 D 表面變成鹼性(顯色)或中酸性(去色)，如下圖 3。

本研究發現文獻 1 中仍有不少可改進的項目，因此，在[電極、模型製作、導電層、反射層和變色控制](#)等五個方面，提出了我們的改進目標和構想，整理如下表 2。

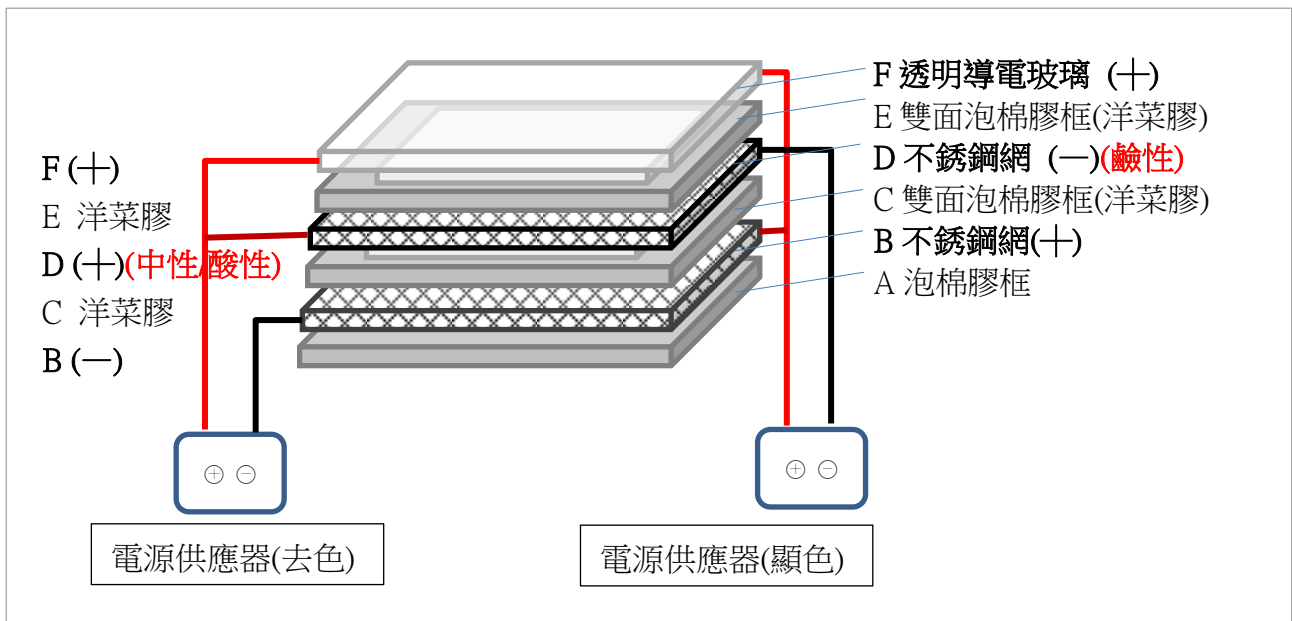


圖 3 文獻 1 中的螢幕模型設計圖、顯色和去色的接線圖

表 2 文獻 1 中模型設計待改進的項目

待改進項目	文獻 1 原有設計的不足	我們的目標和構想
電極	<ul style="list-style-type: none"> 電極數較多達到三個，使接線複雜 透明導電玻璃鍍膜會被反應掉、去色很緩慢 不銹鋼網電極會參與反應產生鐵離子，造成顏色干擾 水電解產生氫氣和氧氣，影響反應 電極反應面積過大 2.0cm * 2.0 cm(長*寬) 	<ul style="list-style-type: none"> 降低電極數 尋找導電玻璃替代材料 採用惰性電極 測試去極劑 縮小電極面積
模型製作	<ul style="list-style-type: none"> 透明導電玻璃硬度大不易切割，不具有彎曲性 採用泡棉膠密封，總厚度較厚約 1.0 公分，密合度不足易滲水 	<ul style="list-style-type: none"> 使用透明軟性塑膠材料 使用薄材料降低厚度，使用護貝膠膜密封
導電層	<ul style="list-style-type: none"> 洋菜膠製作需加熱至沸騰，凝固快且體積會縮小 電解質需混入洋菜膠中一同加熱，不易變更材料 洋菜膠通電時會有泌水現象而變形，過久會乾掉 	<ul style="list-style-type: none"> 使用不織布取代洋菜膠為導電層，以吸附電解質和指示劑，方便改變材料
反射層	<ul style="list-style-type: none"> 缺乏反射層，顏色深度較淺 	<ul style="list-style-type: none"> 使用白色的不織布材料
變色控制	<ul style="list-style-type: none"> 採用手動方式 	<ul style="list-style-type: none"> 採用微控制器，以軟體自動控制

二、 實驗步驟

(一) 設計可供實驗測試的軟性電子紙模型

根據表2的內容，本研究提出軟性電子紙模型設計圖，如圖4。模型分為兩代。第一代模型未使用去極劑，用於進行各項變因的測試；第二代模型，主要在探討去極劑對於降低電極表面氣體生成的影響

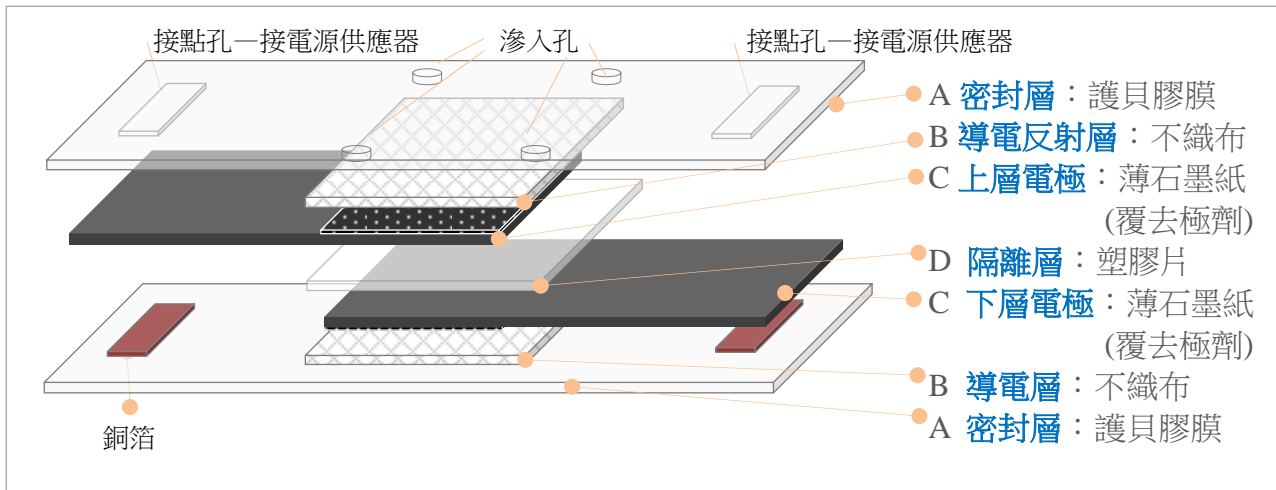


圖 4 本研究提出的軟性電子紙模型設計圖。第一代無去極劑，第二代有去極劑。

第一代電子紙模型

1.準備材料：依實驗變因，選定下列不同尺寸的材料

- (1) 隔離層(塑膠片) 1.0cm × 1.0 cm、1.5cm × 1.5 cm、2.0cm × 2.0 cm
- (2) 電極(石墨紙) 0.5cm × 3.0 cm、1.0cm × 3.0 cm、1.5cm × 3.0 cm
- (3) 不織布 1.0cm × 4.5 cm、1.5cm × 4.5 cm、2.0cm × 4.5 cm
- (4) 銅箔 0.5cm × 1.0 cm、1.0cm × 1.5 cm、1.5cm × 2.0 cm

2.組裝步驟：

- (1) 在塑膠片正反面黏上雙面膠，再切割出隔離層(塑膠片)，如圖 5。
- (2) 在護貝膠膜上，標示出相關位置，上層挖出二個連接孔；使用打孔機，在上下層打出四個電解質滲入孔，如圖 6，在連接孔位置各黏貼一片銅箔，避免石墨紙破裂。其他各式材料，如圖 7。
- (3) 隔離層塑膠片正反面黏貼雙面膠，將電極(石墨紙)黏在正反面上，如圖 8。
- (4) 將不織布緊密繞在電極上，上下各兩層。
- (5) 將上述材料使用護貝機進行高溫護貝密封，如圖 9。

3.顯色初步測試：

- (1) 將模型浸泡電解質和酚酞指示劑混合液中約三分鐘。
- (2) 上層不織布(反射層)為負極，將模型連接電源供應器，設定固定電壓，通電特定時間，觀察表面的顏色變化，如圖 10。

4. 去色測試：

- (1) 改變正負極連接位置，上層不織布(反射層)改為正極，將模型連接電源供應器，設定固定電壓，通電特定時間，觀察表面的顏色變化。



第二代電子紙模型：含去極劑，材料和組裝方式與第一代相似。

1. **去極劑配比：**二氧化錳粉末：鋅粉：石墨粉 = 1：2：3 (莫耳數比)

2. 模型噴去極劑步驟：

- (1) 隔離層塑膠片正反面黏貼雙面膠，將電極(石墨紙)黏在正反面上。
- (2) 在塑膠片上面挖出多個比電極反應區的長和寬各大 0.2cm 孔洞當遮罩，將電極固定在遮罩下方。
- (3) 使用研鉢將去極劑磨細混合。取出 5 公克去極劑置入燒杯中，加入 6mL 丙酮和 1 克(約 2 滴)合成樹脂。用玻璃棒攪拌均勻倒入美工噴槍中。
- (4) 啟動空壓機，距離電極約 20cm，將去極劑均勻噴在電極正面，以 1 秒約 15 公分速率噴灑。待乾燥後，依相同方法噴電極背面。如圖 11、12。
- (5) 將不織布緊密繞在電極上，上下各兩層。
- (6) 將上述材料用護貝機進行高溫護貝密封。

3. 顯色測試：

- (1) 將模型浸泡電解質和酚酞指示劑混合液中約 3 分鐘。

- (2) 上層電極(有記號)為負極，將模型連接電源供應器，設定固定電壓，通電特定時間，錄影觀察表面的顏色變化。

4. 去色測試：

- (1) 改變正負極連接位置，上層電極(有記號)改為正極，將模型連接電源供應器，設定固定電壓，通電特定時間，錄影觀察表面的顏色變化。



圖 11 空壓機與噴槍

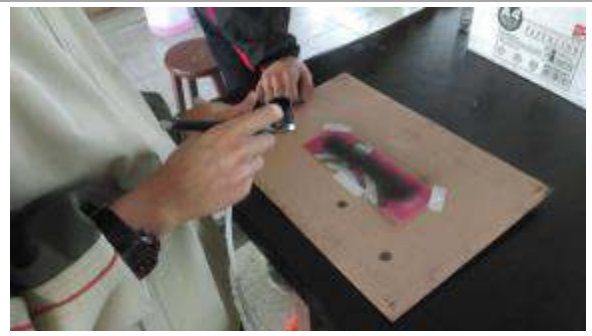


圖 12 電極放在塑膠遮罩下方，將去極劑噴在電極反應區

(二) 探討不同電極尺寸的變色情形

1. 準備材料：準備三條尺寸不同的石墨紙，尺寸分為
 - (1) 0.5cm × 3.0 cm，反應區面積為 0.5cm × 0.5 cm
 - (2) 1.0cm × 3.0 cm，反應區面積為 1.0cm × 1.0 cm
 - (3) 1.5cm × 3.0 cm，反應區面積為 1.5cm × 1.5 cm
2. 組裝多個第一代模型，如圖 13。
3. 測試條件：有孔不織布為正面單層背面雙層、電壓 5V、指示劑為酚酞。
4. 測試步驟與第一代模型相同，觀察導電反射層變色的情形。



圖 13 不同電極尺寸(反應區)模型

(三) 探討不同材質的導電反射層的變色情形

使用第一代電子紙模型，選用不同的厚度和結構的導電反射層材料進行測試。

1. 準備材料：，尺寸均為 $1.0\text{cm} \times 4.5\text{cm}$ 。
2. 模型編號：編號 1—有孔不織布(薄)、編號 2—學生制服布料(厚)、編號 3—木質纖維布(厚)、編號 4—濕紙巾(已經乾燥、薄、無孔)
3. 組裝多個第一代模型，如圖 14。
4. 測試條件：電極面積 $1.0\text{cm} \times 1.0\text{cm}$ 、電壓 5V 、指示劑為酚酞。
5. 測試步驟與第一代模型相同，分別觀察導電反射層變色的情形。

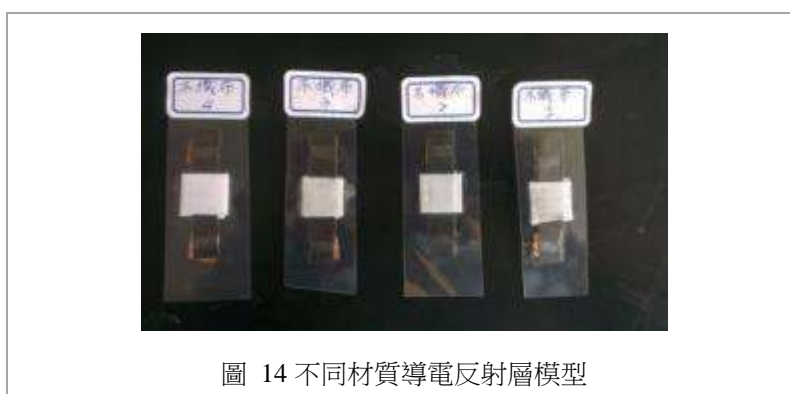


圖 14 不同材質導電反射層模型

(四) 探討不同導電反射層厚度的變色情形

使用第一代電子紙模型，選用有孔不織布以不同的纏繞層數進行測試。

1. 準備材料：有孔不織布尺寸為 $1.0\text{cm} \times 4.5\text{cm}$ 。
2. 模型編號：編號 5—雙面雙層、編號 6—雙面雙層_學生制服布料(厚)、編號 7—、正面單層背面雙層_電極正負反接、編號 8—正面單層背面雙層_電極正負反接
3. 組裝多個第一代模型，如圖 15。
4. 測試條件：電極面積 $1.0\text{cm} \times 1.0\text{cm}$ 、電壓 5V 、指示劑為酚酞。
5. 測試步驟與第一代模型相同，觀察導電反射層變色的情形。

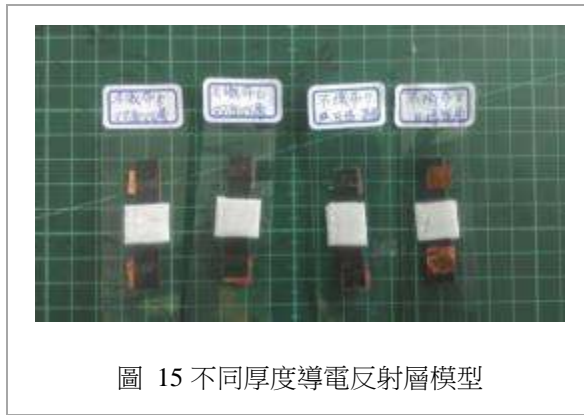


圖 15 不同厚度導電反射層模型

(五) 探討不同電壓時的變色情形

1. 組裝多個第一代模型。
2. 測試條件：有孔不織布雙面雙層、電極面積 $0.5\text{cm} \times 0.5\text{ cm}$ 、指示劑為酚酞、電解質為 1M KNO_3 。
3. 分別使用 1V 、 3V 、 5V 的電壓進行測試，分別觀察反射層變色的情形。
4. 顯色通電時間為 1.5 分鐘，觀察導電反射層變色情形。

(六) 探討不同種類電解質的變色情形

使用第一代電子紙模型，選用不同的電解質進行測試。

1. 準備材料：配製相同濃度的不同電解質水溶液，分別為 0.5 M KNO_3 、 $0.5\text{ M K}_2\text{SO}_4$ 。
2. 測試條件：有孔不織布雙面雙層、電極面積 $0.5\text{cm} \times 0.5\text{ cm}$ 、電壓 5V 、指示劑為酚酞。
3. 顯色通電時間為 1.5 分鐘，觀察導電反射層變色情形。。

(七) 探討不同濃度的電解質的變色情形

使用第一代電子紙模型，如圖 16，選用不同濃度的 KNO_3 電解質水溶液進行測試。

1. 準備材料：使用量瓶配製不同濃度 KNO_3 電解質水溶液分別為 0.1M 、 0.5M 、 1M 。
如圖 17。
2. 測試條件：電極面積 $0.5\text{cm} \times 0.5\text{ cm}$ 、電壓 5V 、電解質 KNO_3 、指示劑為酚酞。
3. 通電時間縮短為 1.5 分鐘，其餘測試步驟與第一代模型相同，觀察導電反射層變色的情形。



圖 16 配製不同濃度 KNO_3 電解質水溶液



圖 17 不同濃度電解質

(八) 探討不同指示劑種類的變色情形

使用第一代電子紙模型，選用不同種類的指示劑進行測試。

1. 準備材料：使用標準濃度的酚酞指示劑和廣用試劑，百里酚酞則另行配製。取各指示劑 3mL，分別與 9mL 1M KNO_3 電解質水溶液混合備用。
2. 指示劑配製：取 0.25 克百里酚酞粉末，加入無水乙醇至 200mL，配成 0.05% w/v 指示劑備用。
3. 測試條件：有孔不織布 2 層、電極面積 $0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm}$ 、電壓 5V、電解質 1M KNO_3
4. 模型分別浸入不同指示劑中，通電時間縮短為 1.5 分鐘，其餘測試步驟與第一代模型相同，觀察反射層變色的情形。

(九) 自製水平式水電解檢測器以探討去極劑對變色的影響

為方便觀察電極處氣體產生情形，製作水電解檢測器，採用水平式設計，電極反應區改成水平配置，移除不織布，固定電極間距離，方便由上方進行觀察並記錄離子遷移速率，設計圖如圖 18。製作三種測試模型，其中模型 A 為只有石墨電極無去極劑，模型 B 在石墨電極表面噴上一層去極劑，模型 C 在石墨電極表面噴上二層去極劑。

1. 準備材料：去極劑粉末 5 克、合成樹脂 2 克、丙酮 6mL。護貝膠膜、電極(石墨紙) $0.5\text{cm} \times 3.0\text{cm}$ 、銅箔 $0.5\text{cm} \times 1.0\text{cm}$
2. 模型組裝：
 - (1) 在護貝膠膜上，標示出相關位置，上層挖出二個 $1.0\text{cm} \times 0.5\text{cm}$ 連接孔，在二個電極反應區位置挖出 $0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm}$ ，兩電極間隙為 0.6 公分，此間隙與電子紙

模型的正反面電極間的距離相同。在連接孔位置各黏貼一片銅箔。

- (2) 將上述材料使用護貝機進行高溫護貝密封。
 - (3) 使用遮罩，如圖 19，將部份模型噴上去極劑，在 1 秒內噴一層，如圖 20，部份模型則為無去極劑。模型 A 電極表面光滑無去極劑，模型 B 去極劑在 1 秒內噴一層，厚度較薄，模型 C 噴二層，厚度較厚。
 - (4) 將模型以虛線位置為谷折線，折成倒梯型，如圖 21。
3. 測試條件：電極面積 $0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm}$ 、電壓 5V 、電解質 1M KNO_3
 4. 水平式檢測器測試：將檢測器用雙面膠固定在培養皿中央，倒入電解質和酚酞指示劑混合液(比例為 3:1)，如圖 22，通電進行測試 150 秒，觀察電極處氣泡產生和指示劑變色的情形，如圖 23、24。三用電錶設定成每 1 秒自動記錄一次電流值。使用 Excel 繪製電流-時間關係圖。
 5. 製作第二代電子紙模型測試，通電時間縮短為 1 分鐘，去色通電時間維持 3 分鐘。

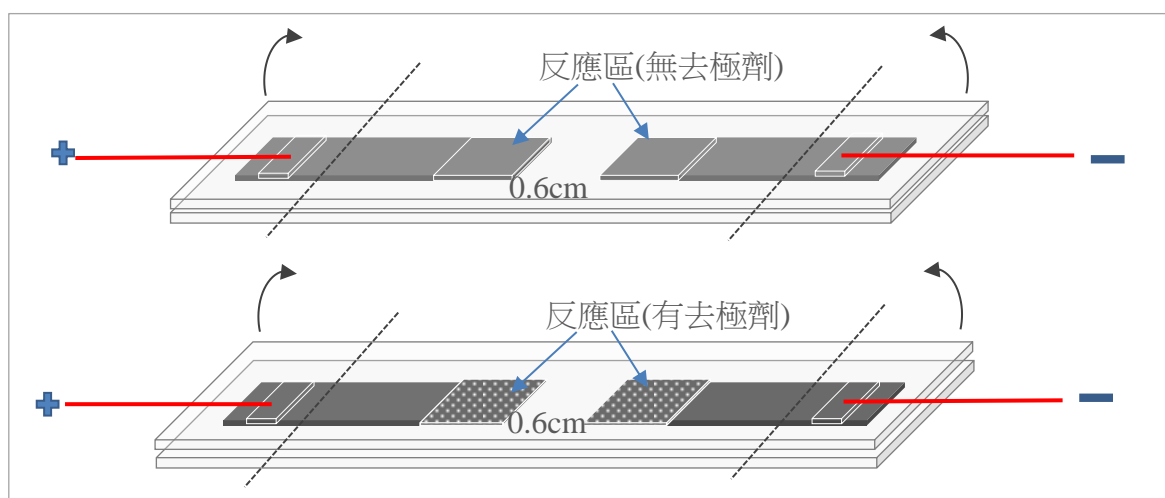


圖 18 水平式水電解檢測器設計圖

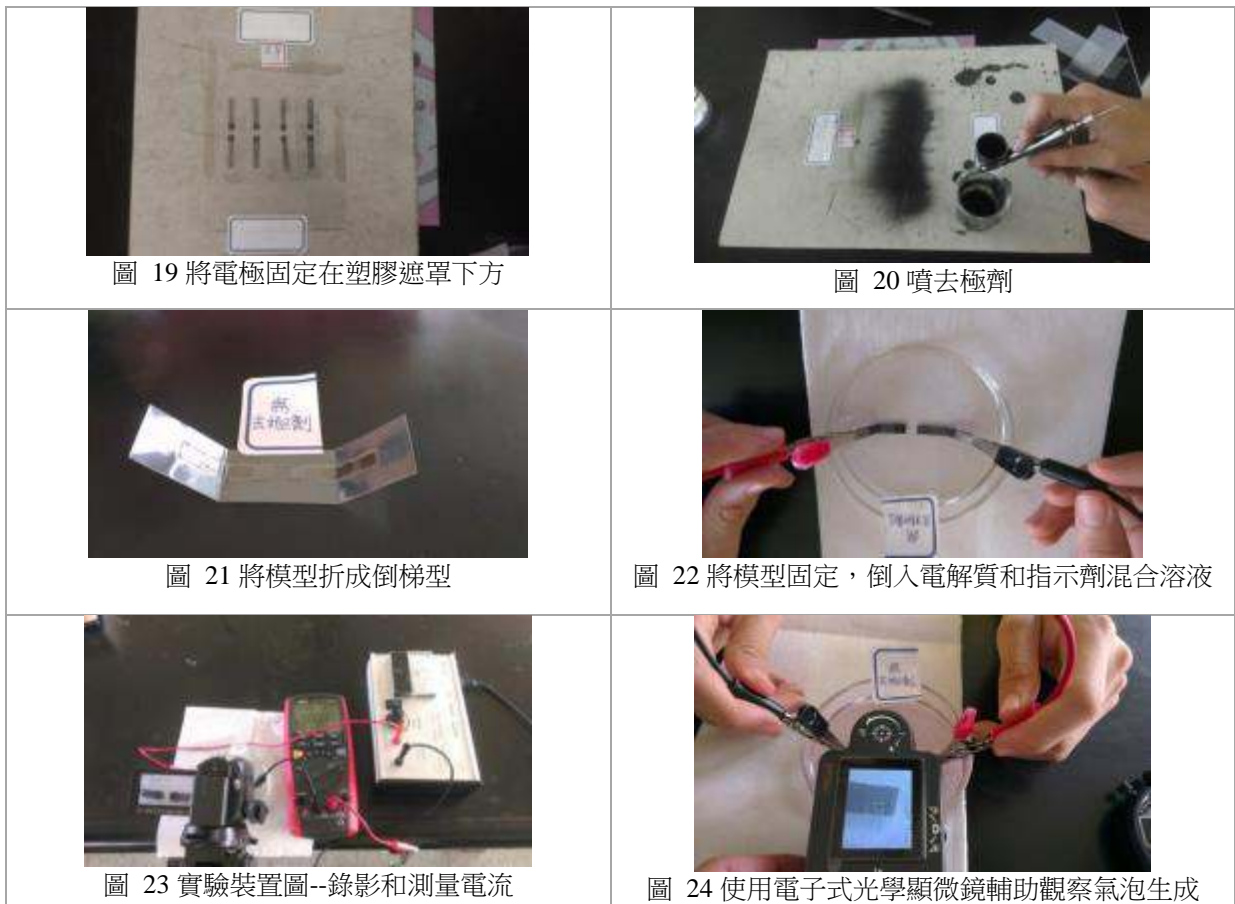


圖 19 將電極固定在塑膠遮罩下方

圖 20 噴去極劑

圖 21 將模型折成倒梯型

圖 22 將模型固定，倒入電解質和指示劑混合溶液

圖 23 實驗裝置圖--錄影和測量電流

圖 24 使用電子式光學顯微鏡輔助觀察氣泡生成

(十) 螢幕驅動器的製作和初步測試

1. 製作多個第二代模型。
2. 測試條件：有孔不織布 2 層、電極面積 $0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm}$ 、電壓 5V、電解質 1M KNO_3 ，指示劑為酚酞指示劑。
3. 撰寫程式碼上傳到 Arduino 記憶體中，將模型連接 Arduino 的數位接腳。啟動程式進行顯色和去色測試。如圖 25。



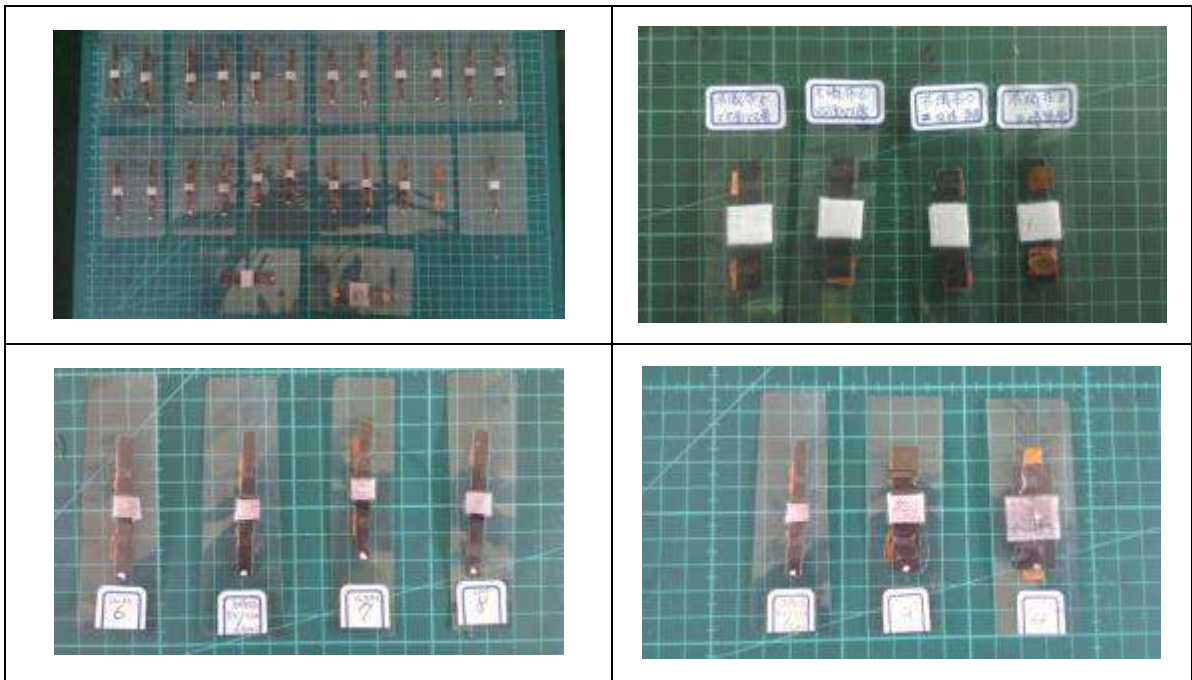
圖 25 模型與 Arduino UNO 的接線圖

伍、研究結果

(一) 設計可供實驗測試的軟性可彎曲螢幕模型

1. 以隔離層隔開上下層薄型電極的設計，**不需要使用導電玻璃**，同時具備**軟性可彎曲**的特性，而且能方便而有效地進行各種變因的測試。如表3。
2. 模型可以方便更換不同的電解質和指示劑，並隨時補充。模型成本低廉、容易組裝和裁切，可以重覆使用。

表 3 各式軟性電子紙模型









(二) 探討不同電極尺寸的變色情形

1. 三個模型的變色速度都很快，都可在 30 秒內觀察出顏色變化。如表 4。
2. 電極面積越大，變色較不平均，變色位置都出現在電極邊緣處；**電極面積越小者，變色位置較為平均。**
3. 顏色的變化不易判定，產生的**顏色容易被電極的黑色掩蓋。**

模型設計的缺點與改進：

本次實驗的初期顏色變化不易判定，推論原因是只有一層不織布，滴加電解質後會透出底下的電極的黑色，造成初期顏色不易。因此必須進一步探討不同材質和厚度的不織布的影響。

表 4 不同電極尺寸的變色情形

電極尺寸 (反應區)	顯色中	3 分鐘後
1.5 * 1.5 cm		
1.0 * 1.0 cm		
0.5 * 0.5 cm		









(三) 探討不同材質導電反射層的變色情形

1. 每個模型都是**從邊緣開始變色**，可能原因是不織布與電極的接觸，而模型 1 和 4 在 90 秒前後的顏色明顯，隨著通電時間的增加，中間的顏色會逐步移動到邊緣。如表 5。
2. 材質種類會影響顯色速率，以**有孔不織布材質較佳**。
3. 各模型的布料為背面兩層，正面一層，我們發現去色測試背面顏色較正面為鮮艷。

模型設計的改進：

1. 測試不同的布料厚度，**增加吸附的電解質和指示劑的含量**，看能否讓顏色更鮮艷。
2. **通電時間控制在 90 秒(1.5 分鐘)內**，避免不過度反應。
3. 設計不含不織布的檢測模型，以確認電極表面的反應情形。







表 5 不同結構導電反射層的變色情形

模型編號	顯色中	3 分鐘
編號 1 有孔不織布(薄)		
編號 2 學生制服布料(厚)		
編號 3 木質纖維布(厚)		
編號 4 濕紙巾(已乾燥、薄)		

(四) 探討不同厚度的導電反射層的變色情形

1. 由模型 5~6 可以發現，正面雙層不織布確實可以得到還不錯的顯色效果，其中有孔洞的編號 5 效果最好。可能是含有較多的電解質和指示劑，而孔洞有利於有色物質垂直方向的移動。如表 6。
2. 編號 6 顯色往邊緣退去較明顯，中間顏色會隨時間變淡較快，編號 6 跟編號 1 正面單層的結果類似。推測中間顏色的較淡可能原因為不織布與電極接觸程度或是產生氣泡。
3. 編號 8 條件與編號 5 相同以確是否有再現性，兩者結果相似，只是顏色較淡一些。



















表 6 不同厚度的導電反射層的變色情形

不織布厚度	顯色中	3 分鐘後
編號 1 正面單層 背面雙層		
編號 5 雙面雙層		
編號 6 木質纖維 (厚)		

(五) 探討不同電壓時的變色情形

1. 電壓為 1V 時，完全沒有變色。3V 時有正常顯色，往邊緣移動的較少，而 5V 時變色速率明顯較快，最後的顏色也最深。如表 7。
2. 由上述結果可知，顯色的時間 3V 和 5V 均可用於模型的顯色，顯色速率以 5V 較佳。

表 7 不同電壓時的顯色情形

時間 (秒)	1V	3V	5V
0			
5			
10			
30			
60			
90			

(六) 探討不同種類電解質的變色情形

1. 在顯色部份，兩個模型第 5 秒開始顯色，全部顯色的時間均落在 30~60 秒之間。如表 8。
2. 在去色部份，兩個模型顏色全部消失的時間均落在第 120~180 秒之間，如表 9。
3. 由上述結果發現， KNO_3 和 K_2SO_4 的結果接近，均適合作為電子紙的電解質。

表 8 不同電解質顯色情形























時間 (秒)	0.5M KNO_3	0.5M K_2SO_4
0		
5		
10		
30		
60		
90		

表 9 不同電解質的去色情形

時間 (秒)	0.5M KNO ₃	0.5M K ₂ SO ₄
0		
30		
60		
120		
180		

(七) 探討不同濃度的電解質的變色情形

1. 模型第 5 秒開始顯色，完全顯色的時間均落在第 30~60 秒之間，高濃度模型的顏色較深。如表 10。
2. 模型完全去色的時間均落在第 120~180 秒之間。高濃度模型在邊緣處容易有顏色殘留，可能原因是高濃度模型過度通電變色，造成顏色完全消失速率較慢。如表 11。
3. 由上述結果發現，較高濃度的 KNO₃ 電解質濃度顯色速率較快。另外，完全顯色的時間均落在第 30~60 秒之間，完全去色所需時約略為顯色時間的 3~4 倍左右。

表 10 不同濃度電解質顯色情形


































時間 (秒)	0.1M KNO ₃	0.5M KNO ₃	1.0M KNO ₃
0			
5			
10			
30			
60			
90			

表 11 不同濃度電解質去色情形

時間 (秒)	0.1M KNO ₃	0.5M KNO ₃	1.0M KNO ₃
0			
30			
60			
120			
180			

(八) 探討不同指示劑種類的變色情形

1. 三個模型第 5 秒已開始顯色，完全顯色的時間均落在第 30~60 秒之間，而且三個模型的顯色速率均相似，並無明顯的差異。如表 12。
2. 在去色結果部份，酚酞指示劑去色速率較快，百里酚酞模型較慢。如表 13。
3. 廣用試劑模型的藍色消失後，表面同時出現黃、紅、淡綠等各式色彩，沒有出現預期的單色結果。
4. 綜合上述結果，本研究**酚酞和百里酚酞指示劑均具備電子墨水的能力，以酚酞較佳，而廣用試劑並不適合。**

表 12 不同指示劑種類的顯色情形


















時間 (秒)	酚酞指示劑	百里酚酞指示劑	廣用試劑
0			
5			
10			
30			
60			
90			

表 13 不同指示劑類型的去色情形

時間 (秒)	酚酞指示劑	百里酚酞指示劑	廣用試劑
0			
30			
60			
120			
180			

(九) 自製水平式水電解檢測器以探討去極劑的對變色的影響

水平式水電解檢測器的結果：

1. 模型 A 無去極劑，在 0~20 秒電流逐漸下降，之後較為穩定，平均電流值為 10.9mA。有去極劑之模型 B 和 C 的平均電流穩定且相對較低，模型 B 去極劑(薄)為 2.7mA，模型 B 去極劑(厚)為 0.5mA。代表各模型的電流測量值很穩定。如圖 26。
2. 顯色區域面積和水平移動速率：模型 B > 模型 A > 模型 C。平均電流值：模型 A > 模型 B > 模型 C。此結果與去極劑厚有明顯關係。如表 14、15。
3. 比較模型 A 和 B 發現，模型 B 電流只是模型 A 的 1/4，但顯色區域面積和速率卻可達約為 2 倍。比較模型 A 和 C 發現，模型 C 電流只是模型 A 的 1/20，但顯色區

域面積和速率卻很接近。比較模型 B 和 C 發現，去極劑厚度越厚，氣體明顯減少而且電流降低。可以發現調整去極劑厚度就能在低電流下，產生預期的作用，並具備節能的特性。

4. 由模型 B 和 C 通電後 5 秒左右的顏色深度變化，可以研判本研究所選定的指示劑具備成為電子墨水的能力。

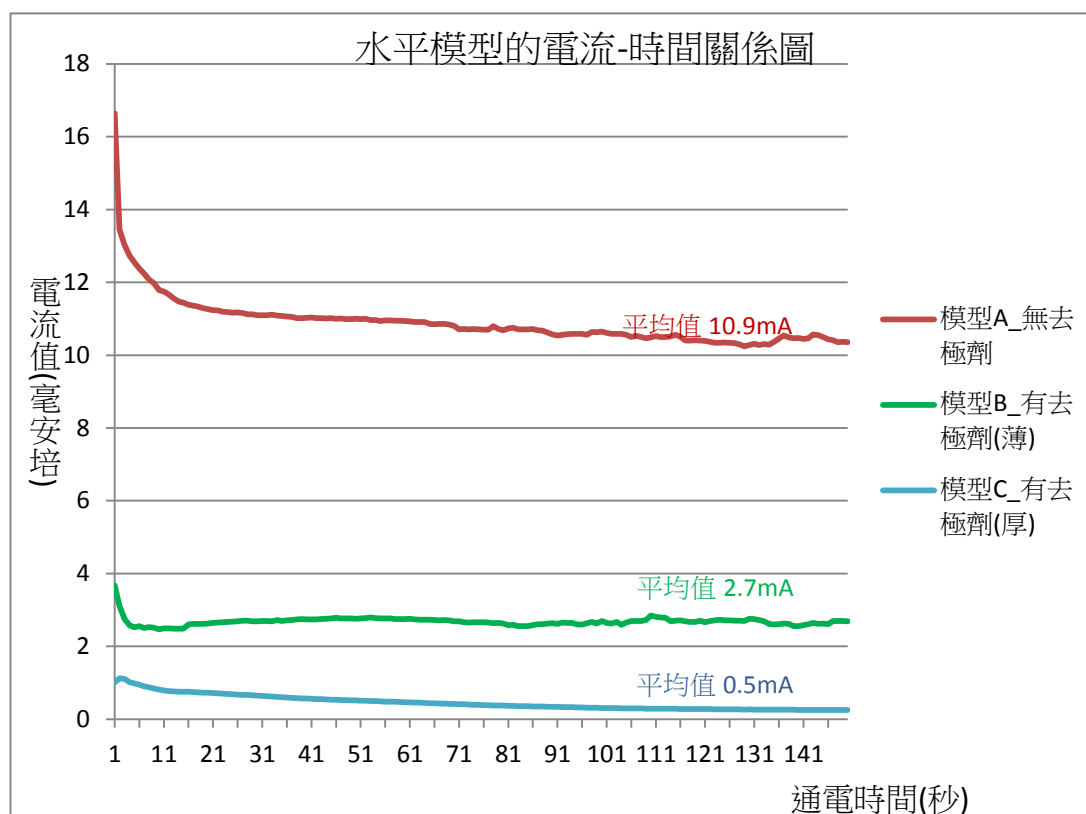

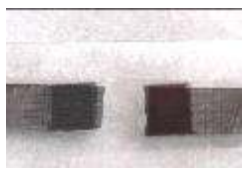


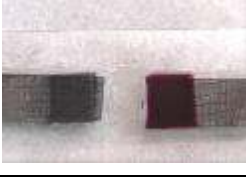



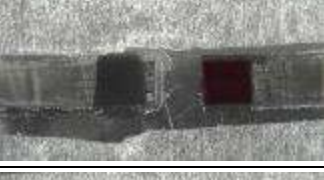

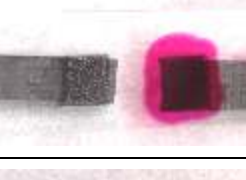









圖 26 水平模型的電流-時間關係圖

表 14 電極表面變色情形比較

模型	表面氣泡生成情況	顯色區域面積(90 秒) (半徑=6.5mm)	顯色區域水平移動速率(90 秒) (與電極邊緣距離 = 4.0mm)
A-無去極劑	邊緣處較多且顆粒較大，表面較細小	132.7 mm ² (半徑=6.5mm)	0.004mm/s (與電極邊緣距離 = 4.0mm)
B-有去極劑(薄)	多發生在表面，氣泡少且顆粒細小	226.9 mm ² (半徑=8.5mm)	0.007mm/s，最快 (與電極邊緣距離 = 6.0mm)
C-有去極劑(厚)	表面及邊緣無明顯氣泡	95.0 mm ² (半徑=5.5mm)	0.003mm/s，最慢 (與電極邊緣距離 = 3.0mm)












表 15 水電解檢測器實驗結果

時間 (秒)	模型 A-無去極劑	模型 B-有去極劑(薄)	模型 C-有去極劑(厚)
0			
5			
10			
30			
60			
90			

有去極劑電子紙模型顯色和去色結果：

1. 模型第 5 秒已開始顯色，完全顯色的時間均落在第 30~60 秒之間，完全去色在 120~180 之間。如下表 16
2. 顯色和去色的結果與無去極劑之模型相似，並不會降低顯色和去色的速率。
3. 顯色通電時間進一步縮短為 60 秒，可以觀察到去色時顏色消失效果較佳。













表 16 有去極劑電子紙模型顯色和去色結果

時間(秒)	顯色	時間(秒)	去色
0		0	
5		30	
10		60	
30		90	
60		120	
		180	

(十) 電子紙模型驅動器的測試

1. 使用arduino uno微控制器板進行顯色和去色反應，完全顯色時間約落在60秒左右。可能原因為Arduino採用USB電纜線供電輸出電壓約4.8V，略低於之前所使用的5V。而Arduino的數位接腳的輸出電流較弱，在開路無負載測試下約為64mA。
2. 優點是，在直接使用arduino的二個數位接腳下，即可以透過高低電位的切換，使模型顯色和去色，而且可以利用程式精確控制顯色和通電的時間。

表 17 使用 Arduino 驅動電子紙模型的結果

時間(秒)	顯色	去色
0		
5		
10		
30		
60		
90		

陸、討論

一、指示劑種類對變色的影響

百里酚酞指示劑和電解質混合時，會培養皿中會出現**白色沉澱物質**，如下圖；若採用滴加百里酚酞的方式則在電子紙模型內部會出現明顯的白色物質形成，而酚酞指示劑與電解質混合則無此現象。經查詢發現**百里酚酞不溶於水，而會溶於酒精**，在實驗中百里酚酞的顏色變化會受到影響，因此溶解度的問題需進一步尋找解決方法。



圖 27 百里酚酞指示劑在水中形成白色沉澱

二、電解質濃度對變色的影響

在實驗結果中，較高的濃度時有較多幫助導電的粒子，因此其顯色速率較快，但是根據文獻2的內容可知，過高的濃度，也會造成正負離子間靜電力增加，降低離子遷移速率。另外，在溶解度方面， KNO_3 為31.6g/100mL水(20 °C)， K_2SO_4 的溶解度為11.1 g/100 ml水(20 °C) KNO_3 可溶於稀乙醇， K_2SO_4 不易溶於醇類且最高濃度無法到達1M，因此本研究最後採用1M KNO_3







為最佳電解質和最佳濃度。

三、顯色和去色時間的影響因素

由實驗結果發現，**導電反射層對變色速率的有重大的影響**。正負極需要足夠的電解質以協助導電，幫助電極發生反應，而電極產生的紅色物質必須能往垂直方向才能呈現在反射層的表面，但是電泳則發生在水平方面，會往邊緣移動；由自製水電解檢測器可知，5秒內即有明顯的顯色，但是實驗的結果發現，都是由邊緣先顯色，而中間區域顯色較慢。

經推論有兩個原因：**(一)不織布和電極表面的緊密程度**。中間區域因吸水、原有氣體或產生氣體而略為隆起，與電極表面距離會增大。**(二)護貝膠膜表面不透水黏著劑**，為EVA(乙烯/醋酸乙烯酯共聚物)不溶於水，在高溫護貝下會黏住不織布，造成模型中間區域顏色不易透出而呈現白色。實際測試後發現，採用**乙酸乙酯**和美工刀去除電極反應區的EVA，顯色均勻、速度快而且顏色較深。因此，**護貝膠膜上的EVA是影響完全顯色的重要因素**。

完全顯色在30~60秒之間，完全去色時間在120~180秒之間，約為3~4倍。去色時間較久的原因，經討論可能有三個。**(一)H⁺離子與去極劑的鋅粉反應**，造成H⁺濃度產生速率較慢，無法有降低pH值使顏色消失，**在採用稀鹽酸測試電極表面發現，幾乎已無鋅粉存在**；使用雙氧水測試，則發現仍存在大量二氧化錳。**(二)纖維間氣體，造成離子移動的阻隔**。**(三)過度通電造成有色粒子移至較遠處**。上述原因仍需要進一步設計實驗的探討

處理方式	0秒	30秒	60秒
使用丙酮增加不織布與去極劑密合度			
使用乙酸乙酯去除護貝膠膜EVA			

柒、結論

本研究發現酸鹼指示劑具備電子墨水的能力，其顏色的變化可以在自製的電子紙模型上透過通電加以控制，而電極表面的反應也能透過自製的水平式水電電檢測器加以觀測。根據研究結果，有以下幾個結論：

- 一、自製軟性電子紙模型的設計，不需要使用導電玻璃，同時具備軟性可彎曲的特性，而且能方便而有效地進行各種變因的測試。
- 二、導電反射層的結構和厚度會影響顯色的速率，最佳結果為多孔性雙面雙層不織布。
- 三、較小的電極反應區尺寸有助提高顯色的均勻程度，本研究為 0.5 cm* 0.5 cm
- 四、較高的電壓有助顯色的速率，最佳結果為 5V。
- 五、較高的電解質濃度有助於顯色的速率，最佳結果為 1M KNO₃。
- 六、酚酞指示劑和百里酚酞指示劑均具備電子墨水的能力，以酚酞指示劑較佳。
- 七、自製的水平式水電解檢測器，能方便而有效地觀測電極表面反應和顏色變化，適當厚度的去極劑能在不影響顯色速率下，有效改善氣體的生成。
- 八、Arduino 微控制器板能應用於電子紙模型的顯色和去色控制。
- 九、在最佳情況下，電子紙模型可以在第 5 秒左右開始顯色，在 30~60 秒完全顯色；完全去色時間約為完全顯色的 3~4 倍。

下一階段，我們將尋找新材料和新方法去改善顯色和去色時間，並且縮小電極尺寸，期望更能精確控制酸鹼指示劑的顏色變化，使它成為簡單實用的電子墨水新選擇。

捌、參考資料

1. 彩色螢幕 DIY—酸鹼指示劑在彩色螢幕製作的應用。第 54 屆屏東縣科展國中組生活與應用科學科作品。2014。
2. 微型電解槽中的陰陽海。第 54 屆全國科展國中組化學科作品。2014。
3. 電子墨水技術。E ink Corporation。 <http://tw.eink.com/technology.html>。2014。
4. [3D 有趣實驗：美麗彩虹的消失酚酞](#)。科技部高瞻自然科學教學資源平台。2013。
5. 梅克·施密特。Arduino 快速上手指南。馥林文化。2012。

【評語】 030210

作者利用酚酞指示劑在酸中呈粉紅色，鹼性中呈無色的辨識，製造成電子紙模型，仿照 Arduino Uno 微控制器，創作力頗佳，唯實用性仍須發展，因目前顏色的變化速度仍太慢，但值得鼓勵去完整的作出模形之後，再改進顏色變化速度。