

# 2017 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 100016

參展科別 工程學

作品名稱 紙電路印刷機研發及其運用於教學之可行性分析

得獎獎項 大會獎：一等獎

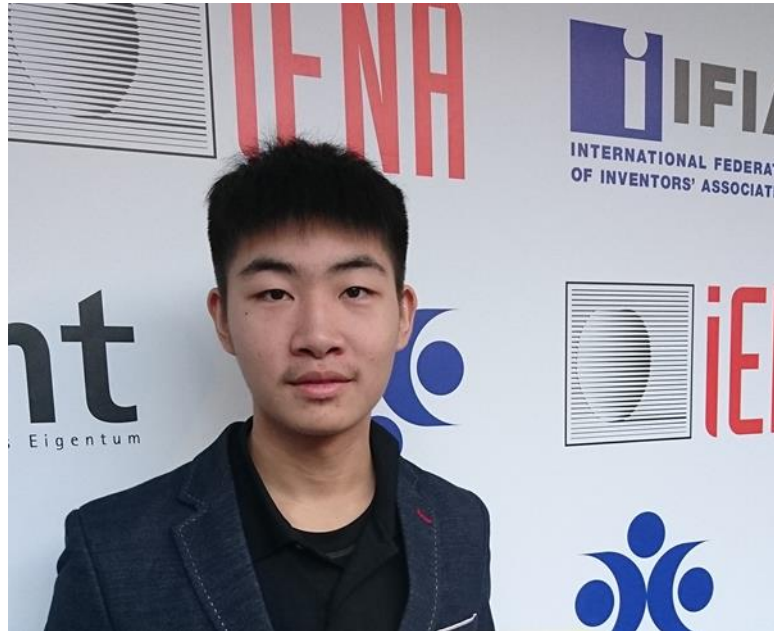
就讀學校 高雄市私立中山高級工商職業學校

指導教師 楊鎮澤、宋由禮

作者姓名 葉家宇

關鍵字 印刷、影像處理、紙電路

## 作者簡介



我叫葉家宇，現在是高三生，現在就讀高雄私立中山工商資訊科正規班，從小就對電腦科學領域的知識充滿興趣，也因為父母的支持，得以在國小六年級就接觸圖形化控制程式。

高一時透過老師的介紹，我認識了知名的開發板 Arduino，我寫的軟體也正式與現實世界接軌，更讓我像是作夢般完成從前覺得自己不可能辦到的事。對我而言，程式語言如同軍隊操演般充滿秩序，卻也是個能發展無限可能的魔法世界，讓我像個剛收到魔法棒當禮物的孩子般，一發不可收拾的深深愛上研究。

## 摘要

本研究為紙電路印刷機之研發，我們將紙當成電路板的基材，以銅箔與銀箔為佈線的導電材料，透過自行開發的機台研究銅箔與銀箔在製作時，所需的時間、溫度、壓力、印刷電路完成度、耐流值與耐熱值等因素，來驗證我們研發的紙電路印刷機適合用於學校實習課程教學，培養學生 LAYOUT 的能力，同時也在獲得數值曲線的關係式之後，再加以製作更大作業面積的機台，以期能製作出更大的電路，而整個研究除了自行開發儀器及數據驗證外，亦可以把學生實習課程融入環境保護的概念以及文創商品整合的知識。

## Abstract

In this study, we have developed a thermal printing technology to fabricate circuits on the surface of ordinary paper. We designed a machine to print a paper circuit board by thermally melting a toner and fusing it to the metallic foil. For the thermal printing, the temperature are optimized and controlled at 200 degree Celsius, whereas the pressure exerted on the printed circuit board is controlled at 4923.3 N/m<sup>2</sup>. Compared to traditional circuit board technology, our proposed process is simple, cost effective, and environmentally friendly. The paper circuits also have great flexibility and recyclability.

## 壹、前言

### 一、研究動機

我們在實習工廠做實驗時常常看到工廠外推積如山的電路板，這些電路板其實都是我們上課時所練習的板子，每次看到這些電路板都感覺很浪費，而且也造成環境的污染，還有電路板上的零件也是，明明沒有壞掉，但卻要丟掉而感到惋惜，在分解傳統電路板時，所產生的廢料與所浪費的水、電等能源，所以我們想有沒有比焊接電路板更好的方法呢，於是我們計畫將電路直接 LAYOUT 在紙張上，因為紙張可以回收，如果我們將電路直接印在紙上，那麼我們就可以減少對環境的傷害，另外，若是元件也可以回收再利用，那就更好了，所以我們開始著手我們的計畫「紙電路印刷機」的開發，同時也研究其銅箔與銀箔兩種原料在製作時，所能達到的效能，研究出最省時或省能的方案。

市面上常見的電路板幾乎為電木板或是玻璃纖維板，而無論是哪一種，其製作方法繁雜，且從製作到電路完成整個過程非常地不環保，回收後所造成元件和電路板的浪費，分解回收時所需消耗的能源與產生的汙染對環境造成很大的傷害，同時我們也針對在印刷紙電路時，使用到的原料做溫度、時間、壓力與完成度的分析，研究出最環保節能的製作方法。



圖 1 練習後的廢棄電路板

## 二、研究目的

- (一)、 了解碳粉的組成
- (二)、 了解機構及電路的設計
- (三)、 了解影像處理的方法
- (四)、 了解熱印刷的原理
- (五)、 了解電路 LAYOUT 的方法
- (六)、 了解銅箔與銀箔的物理特性
- (七)、 了解以 C#程式語言撰寫驅動程式

## 貳、 研究設備及器材

### 一、 Arduino Uno 板



圖 2 Arduino Uno 板

### 二、 電源供應器



圖 3 電源供應器

### 三、 溫度計



圖 4 溫度計

四、 印表機



圖 5 印表機

五、 銀箔



圖 6 銀箔

六、 銅箔



圖 7 銅箔

七、 電烙鐵



圖 8 電烙鐵

八、 三用電錶



圖 9 三用電錶

九、 手機計時器



圖 10 手機計時器

十、 筆記型電腦



圖 11 筆記型電腦

十一、 牙刷



圖 12 牙刷

十二、 光軸與牙軸



圖 13 光軸、牙軸

十三、 步進馬達



圖 14 步進馬達

#### 十四、 電木板



圖 15 電木板

#### 十五、 鋁塊



圖 16 鋁塊

#### 十六、 壓力感測器



圖 17 壓力感測器

#### 十七、 熱敏電阻



圖 18 熱敏電阻

### 參、 研究方法與過程

#### 一、 元件及材料分析

##### (一) 碳粉的組成

碳粉的主要成分大多數是由樹脂和黏合劑組成，其主要成分包括：樹脂、碳黑、磁性氧化鐵、電荷控制微粒、潤滑劑、熱融塑料。其中熱融塑料是我們印刷時主要的關鍵原料，其含量多寡，將影響印刷品質。





圖 19 碳粉

## (二) 熱敏電阻

我們所使用的熱敏電阻為 NTC(Negative Temperature Coefficient)熱敏電阻，即負溫度係數熱敏電阻，NTC 熱敏電阻在室溫下的變化範圍約在 10Ohm~1000000Ohm 利用電阻會根據溫度係數改變阻值的特性，我們可以經由分壓法，串聯一個分壓電阻後，來測量熱敏電阻的電位差的變化，再計算出與實際溫度的轉換公式，就可以從 Arduino 中得到當下加熱模組的溫度。

公式-電阻溫度係數：

待測溫度下的阻值 = 參考溫度下的阻值 \* [1 + 溫度係數 \* (溫度差)]

註：電阻單位(Ohm)，溫度單位(Celsius)

公式-電壓與實際溫度轉換公式：

實際溫度 = (參考電壓 - 測量電壓) / 溫度轉換係數 + 校正常數

## (三) 壓力感測器

壓力感測器 (Force-Sensitive Resistor)，英文直翻為壓敏電阻，顧名思義就是根據施加的壓力，其電阻值就會跟著改變，我們使用的壓力感測器，在沒有施加壓力時電阻值是趨近無限大的，但是隨著施加的壓力越來越大，阻值就會明顯變的越來越小我們就可以利用這個特性同樣使用分壓法，從電壓變化中得知阻值的變化，進而得到加熱模組該次印製時，下壓的力道

公式-電壓與實際壓力轉換公式：

實際壓力 = (參考電壓 - 測量電壓) / 壓力轉換係數 + 校正常數

註：壓力單位(Grams)，電壓單位(Volts)

## 二、軟硬體系統開發

本印刷機體主要由五大單元組成，分別為馬達升降系統、加熱單元、清除單元、影像處理單元以及軟體驅動單元，以下將分別說明各單元與系統的製作方法：

### (一) 馬達升降系統：

#### 1. A4988 晶片

由 Arduino 傳輸脈波訊號來控制 A4988 晶片，藉此驅動步進馬達完成預期的動作。

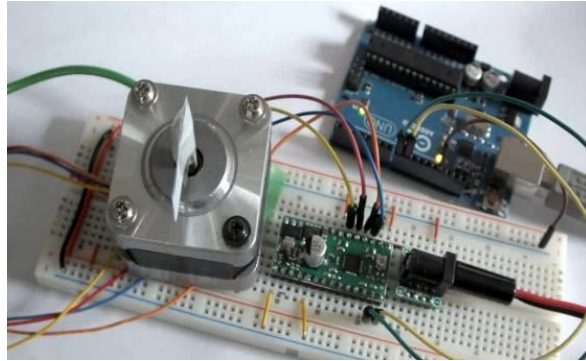


圖 20 A4988 晶片

#### 2. 步進馬達

本機台以步進馬達為動力主體來帶動清除單元與加熱單元。

### (二) 加熱單元：

本單元以鋁塊為主體，以銑床加工，切削出特殊造型，增加其導熱速度。



圖 21 加熱單元模型(7cm\*7cm)



圖 22 改良後加熱單元(7cm\*12cm)

### (三) 清除單元：

本單元先以 AUTOCAD 繪製出轉盤模型，接著以雷射切割方式切割出我們所需的樣式，再加上齒輪以及刷毛，此即為我們清除單元的清除刷頭。



圖 23 清除刷頭

### (四) 影像處理單元：

#### 1. CCD 鏡頭

本單元以 CCD 模組組成，主要為用以識別前後電路影像之比較，透過演算法計算對應百分比，即可完成電路製作完成度之計算。



圖 24 CCD 鏡頭



圖 25 提升影像擷取的解析度

#### 2. 二值化

透過 CCD 鏡頭拍攝擷取雷射印表機輸出之電路影像，以軟體進行二值化轉換，電路印刷完成後擷取紙電路之影像，再利用初始儲存的圖片進行比對，計算電路完成百分比。其計算公式為：

$$\{1 - \frac{\text{二值化後之白色區域面積}_{(\text{雷射印表機輸出之電路影像})} - \text{二值化後之白色區域面積}_{(\text{電路印刷完成後})}}{\text{二值化後之白色區域面積}_{(\text{雷射印表機輸出之電路影像})}}\} \times 100\%$$

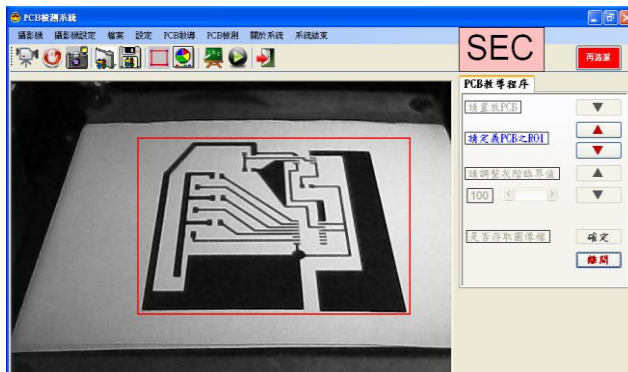


圖 26 印刷前擷取畫面

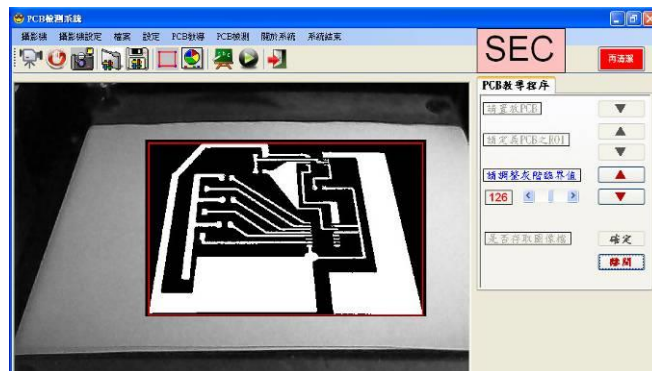


圖 27 二值化轉換

(五) 軟體驅動程式：透過我們自行以 C# 撰寫的軟體來驅動整個機體，可以自動控制所有製作程序，也可以透過軟體，隨時追蹤製作進度。



圖 28 更新版驅動程式

### 三、 機構建置

(一) 機台主要架構試裝，包含步進馬達、光軸及牙軸等垂直及水平校正。

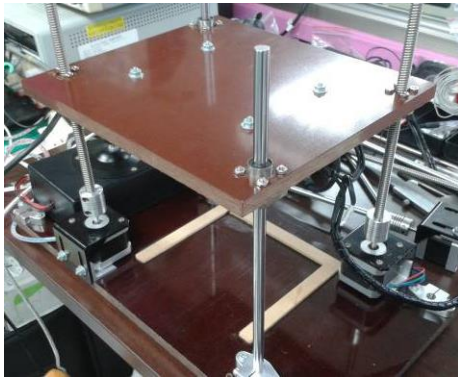


圖 29 機台試裝

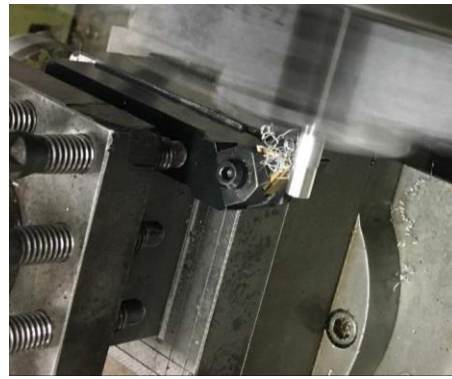


圖 30 車床切削支撐軸

(二) 清除單元裝設，架設水平方向驅動電路及機構，使清除單元可以順利將多餘的原料清除。



圖 31 清除單元裝設

(三) 加熱單元配置，將加熱單元裝置穩固後加入加熱棒，並於其表面裝上熱敏電阻，可依據我們實驗所需的溫度實施恆溫控制，加熱單元於本機台扮演非常重要的角色。



圖 32 裝設加熱單元

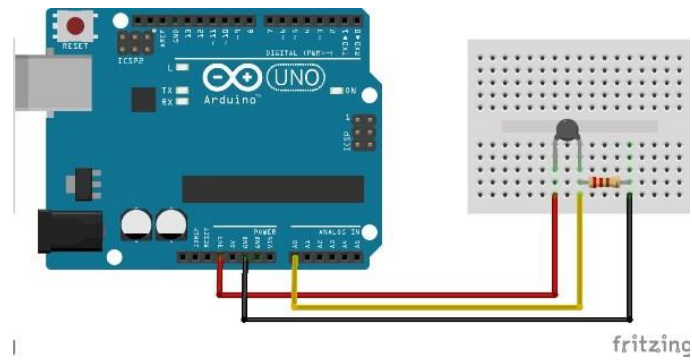


圖 33 熱敏電阻電路圖

(四) 壓力感測器配置，將壓力感測器裝設於工作台下方以偵測工作壓力值，以取得最佳工作壓力，以作為機台最佳化的最終設定值。



圖 34 壓力感測器

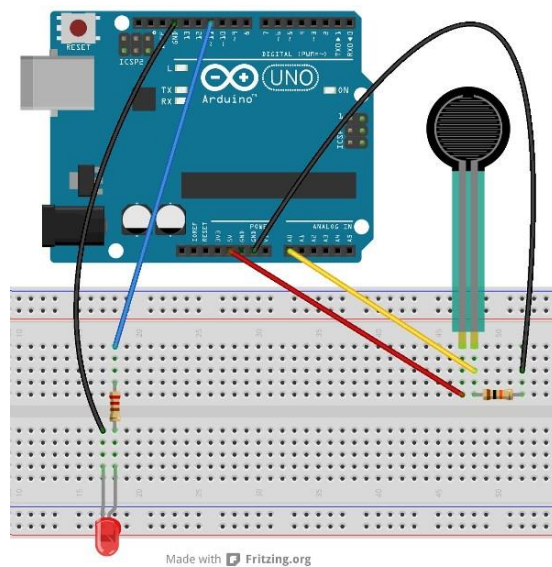


圖 35 壓力感測電路圖

(五) 待所有單元安裝完成之後，最後裝設主控盒，其主要為透過硬體電路來控制機台所有運作程序，可說是整台印刷機的中央處理器。

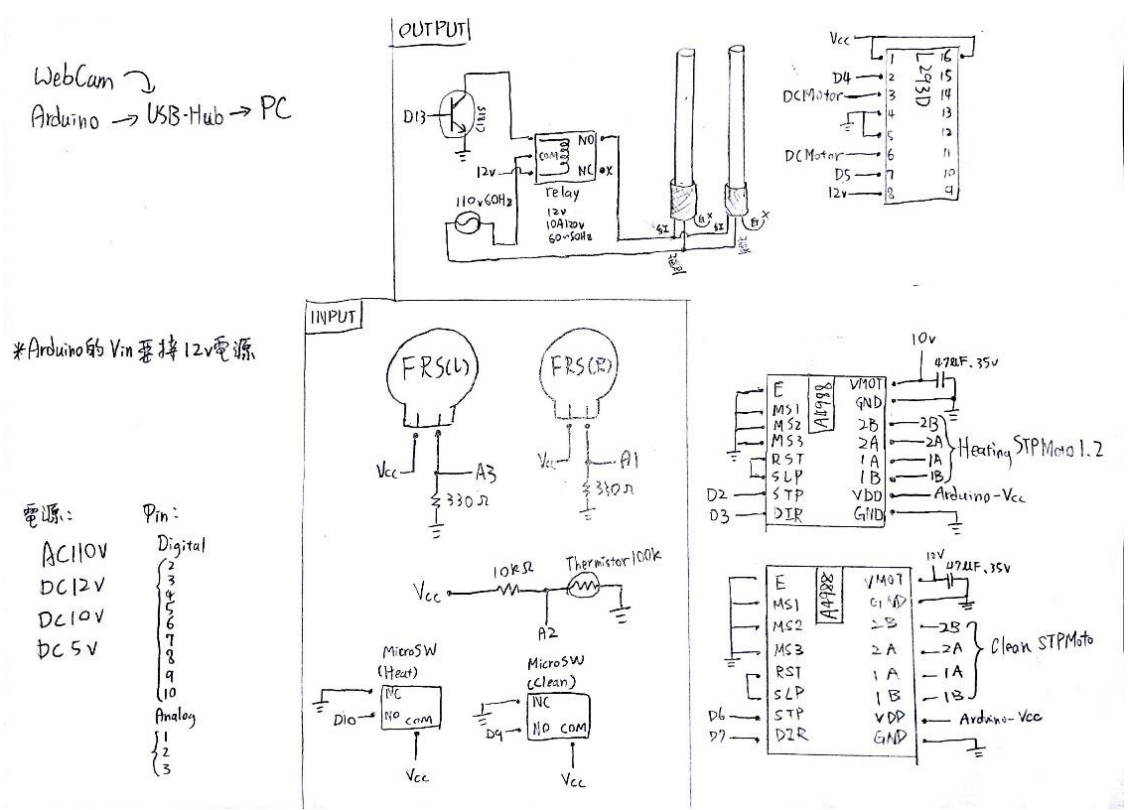


圖 36 主控盒電路設計圖

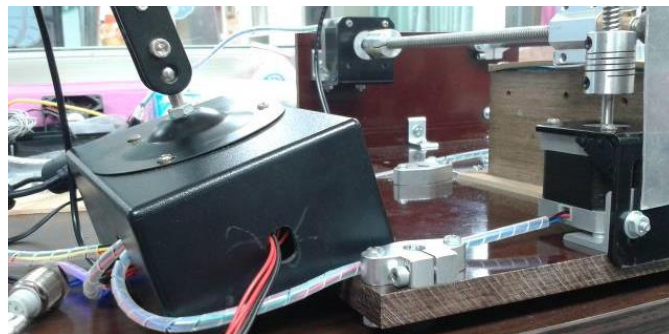


圖 37 主控盒裝設

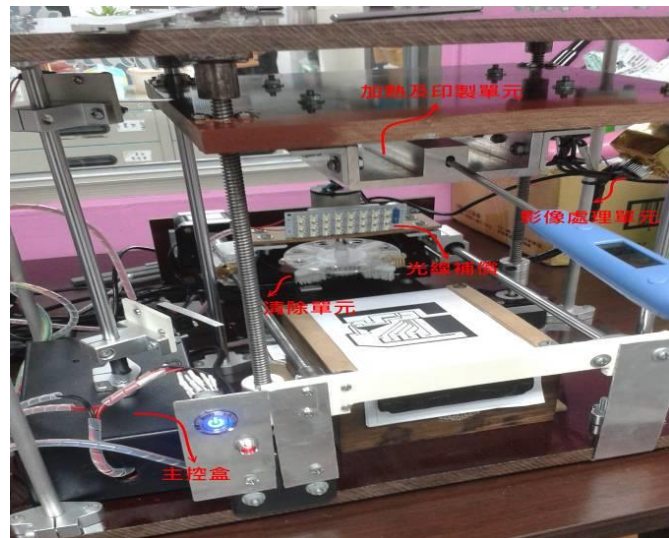


圖 38 紙電路印刷機成品

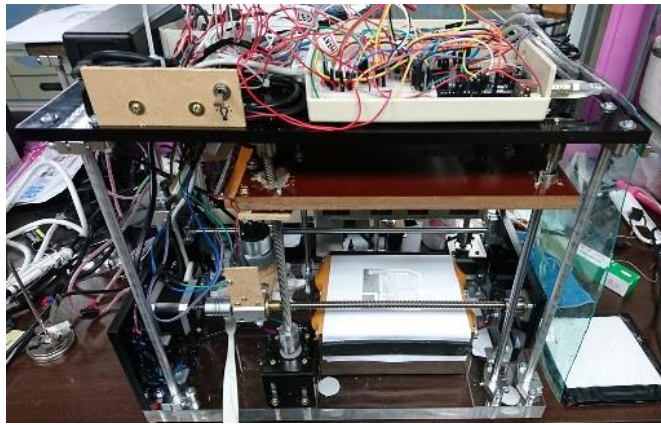


圖 39 改良版紙電路印刷機成品

#### 四、 紙電路輸出

(一) 將電路以軟體繪製，以雷射印表機印出檢查 LAYOUT 是否正確無誤。

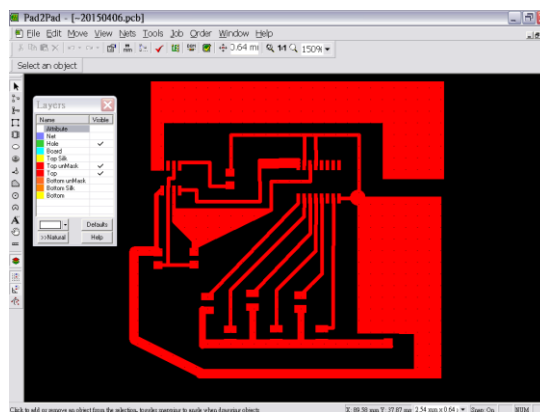


圖 40 軟體繪製電路

(二) 將雷射印表機輸出的圖檔放置於印刷機的工作檯。

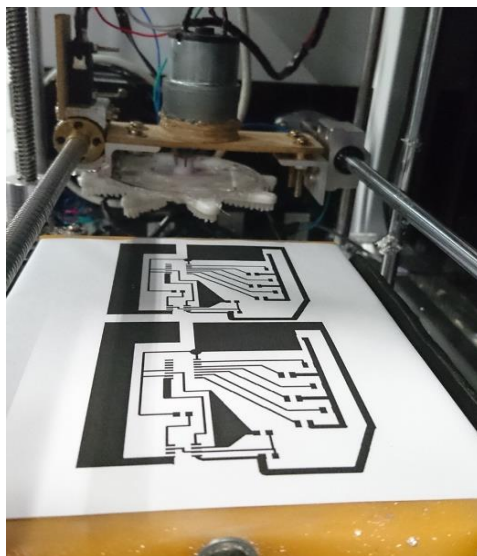


圖 41 將待印紙張固定於工作檯



(三) 待原料放置完成後，即開始印刷，印刷完成後由清除單元進行掃除工作。

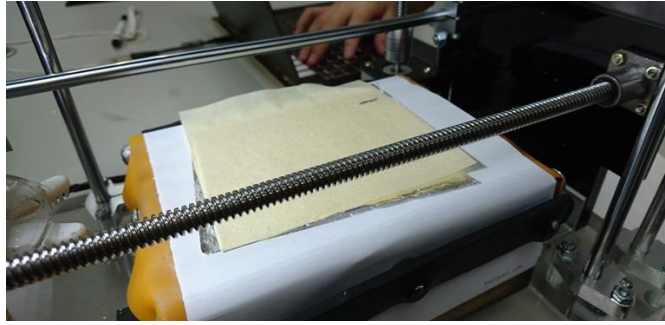


圖 42 將原料放置於工作檯

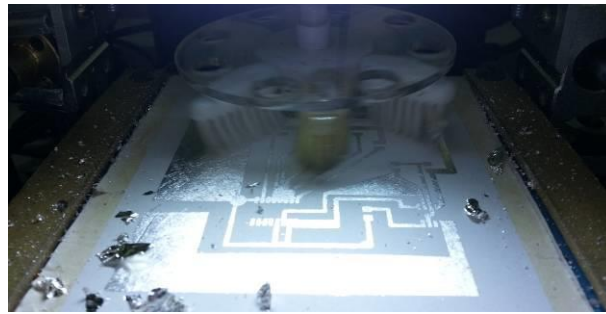


圖 43 清除多餘原料

(四) 取出完成之紙電路，其完成度可達 95% 以上，緊接著黏上元件即可讓電路運作。

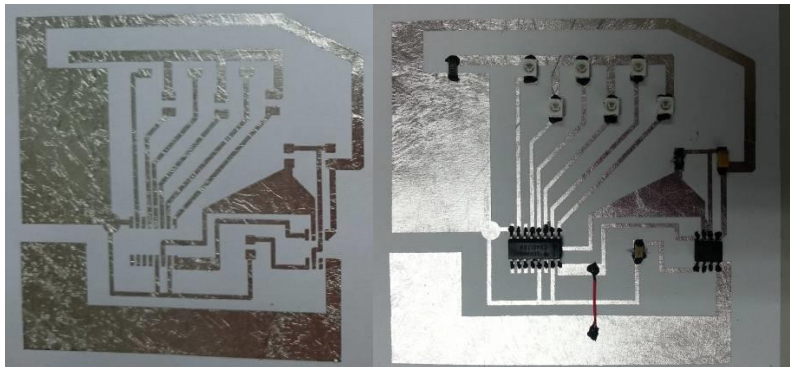


圖 44 紙電路完成圖(原料：銀)

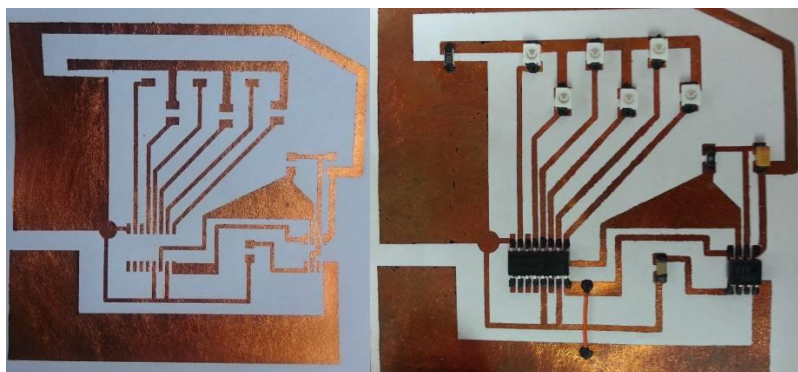


圖 45 紙電路完成圖(原料：銅)

(五) 改良工作臺範圍後，機台可一次印製多個電路。

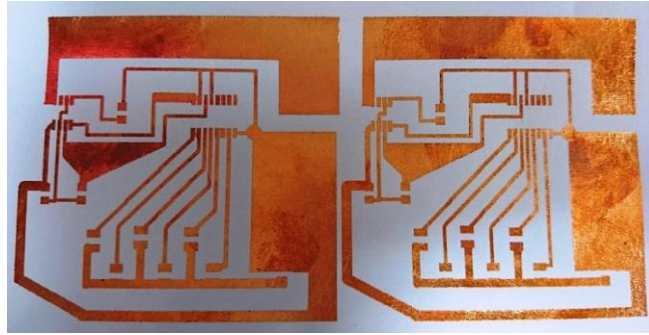


圖 46 輸出 7cm\*12cm 的電路

#### 五、 紙電路製作溫度及時間分析(工作範圍 7cm\*7cm)

觀察前我們製作流程圖以追蹤進度，透過單一變因來觀察以銅箔或銀箔為原料時其最佳工作溫度及時間。

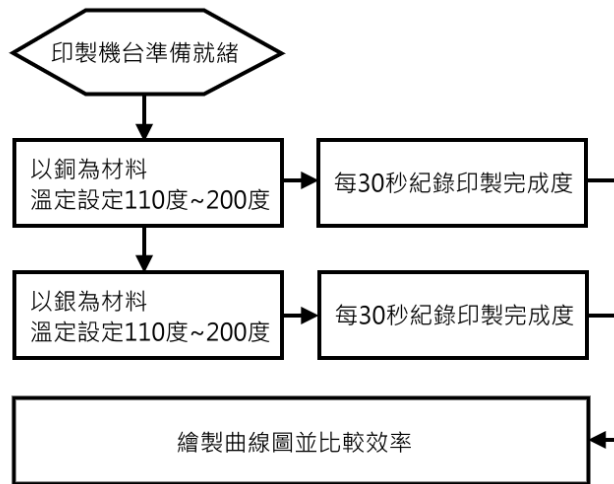


圖 47 實驗流程圖-溫度與時間

(一) 以銅為導電材料(80nm)，控制溫度變因為 110°C、120°C、130°C、140°C、150°C、160°C、170°C、180°C、190°C、200°C，每一溫度變因皆觀察加熱時間 60 秒~300 秒，用以找出最佳溫度與時間組合。

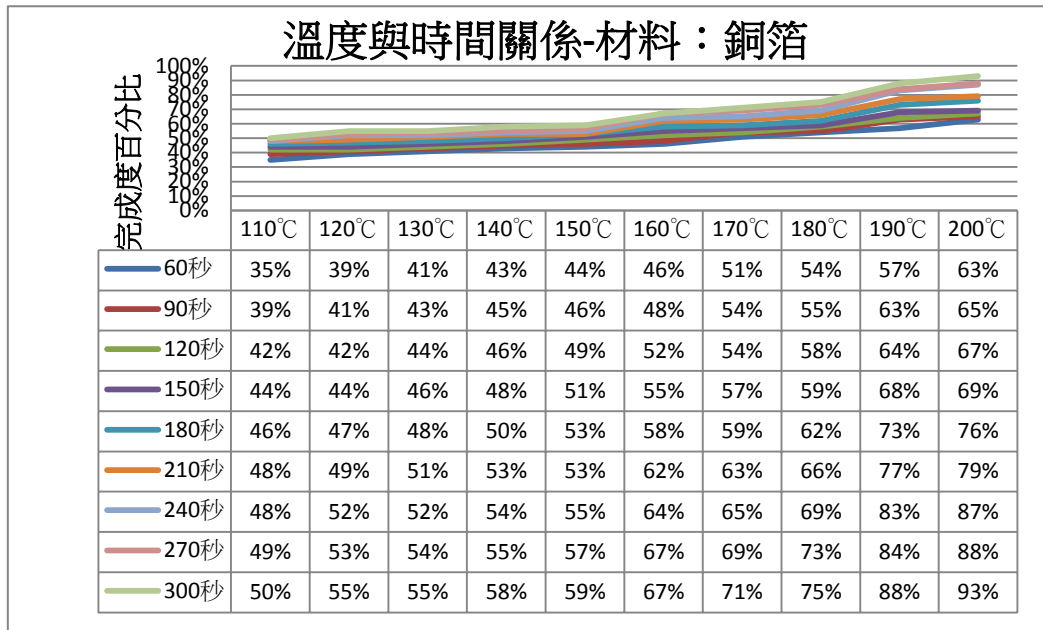


圖 48 溫度與時間關係-材料：銅箔

由圖 48 可知，以銅箔為材料時其最佳的工作溫度為 200°C，工作時間為 5 分鐘。

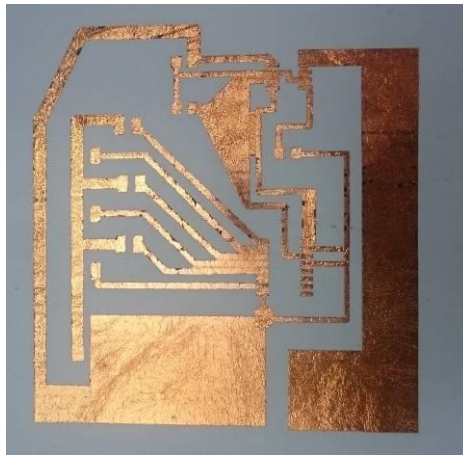


圖 49 180°C 加熱 5 分鐘之完成度

(二) 以銀為導電材料(26nm)，控制溫度變因為 110°C、120°C、130°C、140°C、150°C、160°C、170°C、180°C、190°C、200°C，每一溫度變因皆觀察加熱時間 60 秒~300 秒，用以找出最佳溫度與時間組合。

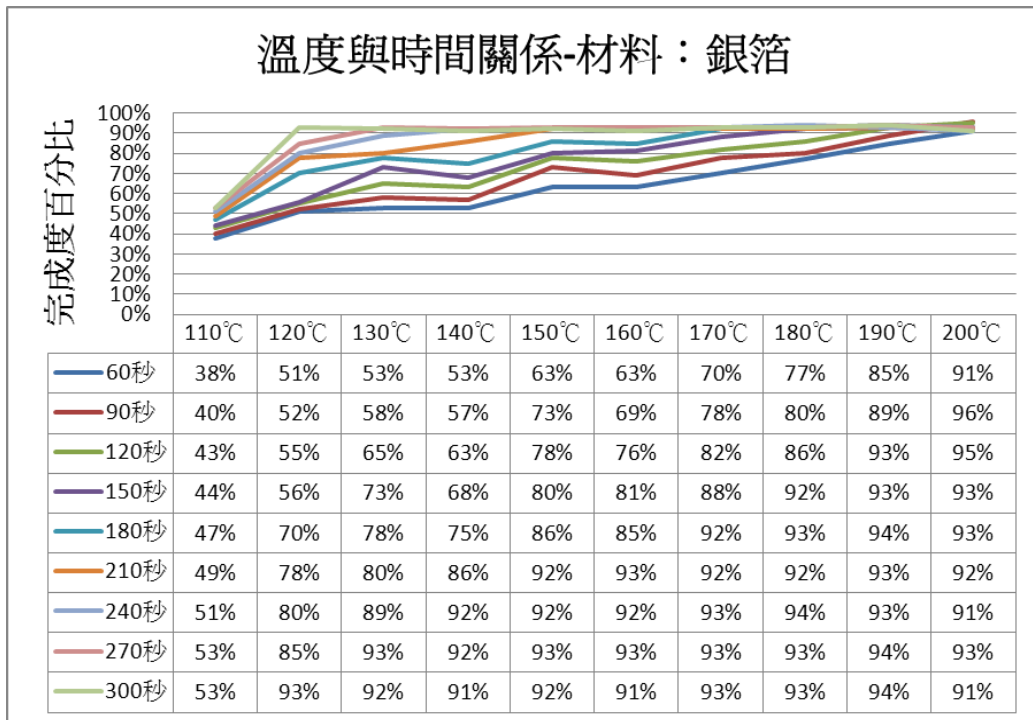


圖 50 溫度與時間關係-材料：銀箔

由圖 50 可知，以銀箔為材料時其最佳的工作溫度為 200°C，工作時間為 90 秒；另一較佳工作溫度為 120°C，工作時間為 300 秒。

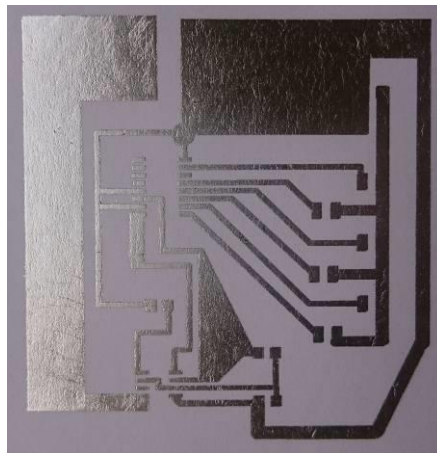


圖 51 120°C 加熱 300 秒之完成度

(三) 經由前兩個實驗觀察之後，我們特別將 200°C 訂為一個最佳的工作溫度，觀察加熱時間 60 秒~300 秒，用以比較銅箔與銀箔的不同。

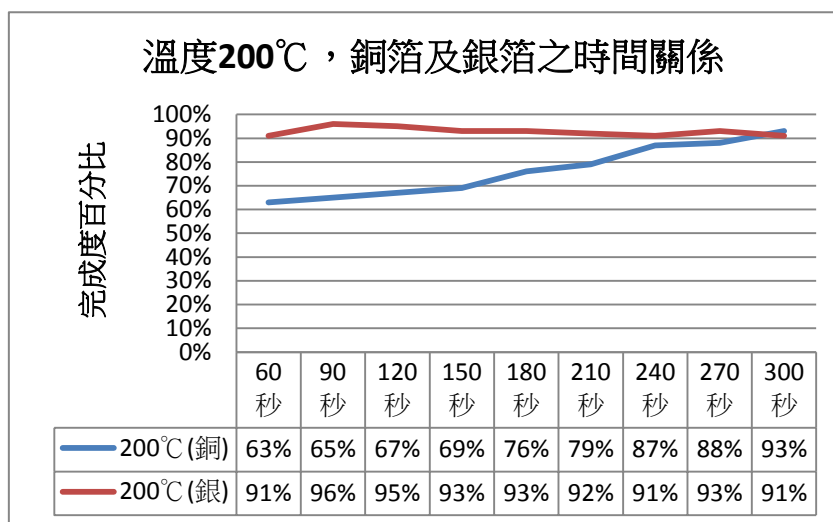


圖 52 銅箔與銀箔之比較

#### 六、紙電路其不同材料耐電流壓力測試

觀察前我們製作流程圖以追蹤進度，透過電流變化來觀察以銅箔或銀箔為原料時其最大耐電流測試(紙張厚 70 磅)。

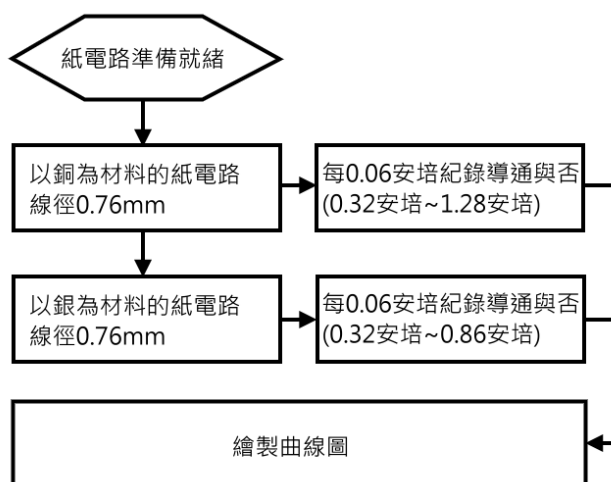


圖 53 實驗流程圖-電流測試

(一) 以銅為導電材料(最小線徑 0.76mm)，每次增加 0.06 安培，觀察導線是否燒毀。

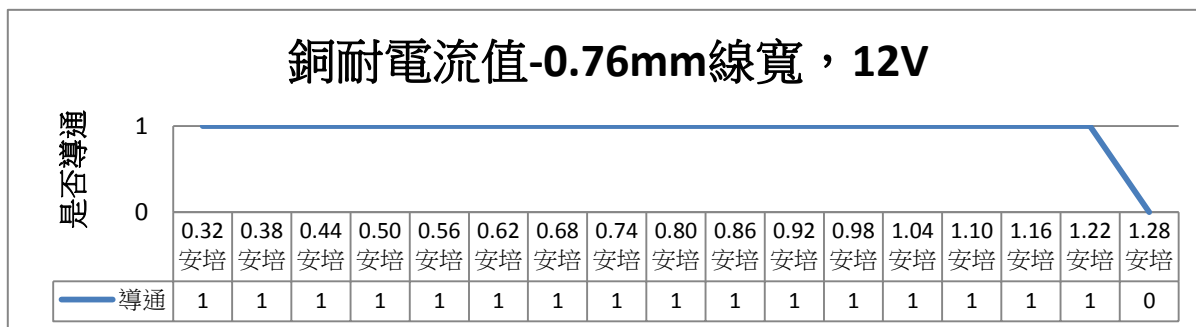


圖 54 銅耐電流測試圖

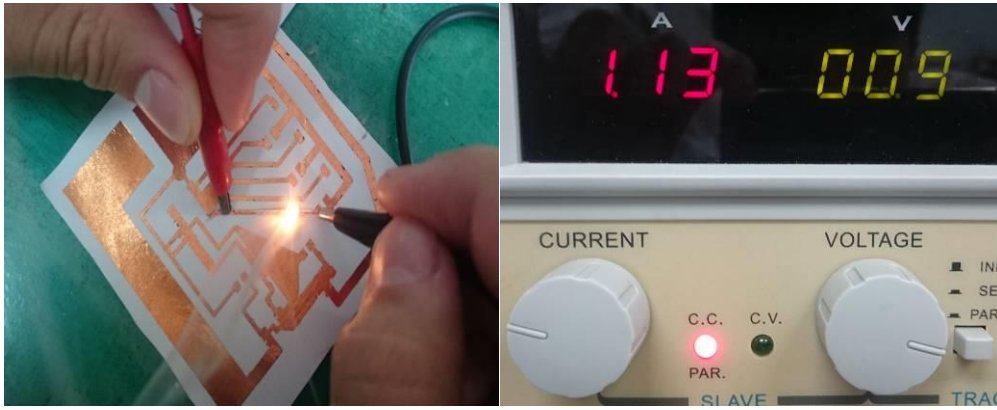


圖 55 銅耐電流測試示意圖

(二) 以銀為導電材料(最小線徑 0.76mm)，每次增加 0.06 安培，觀察導線是否燒毀。

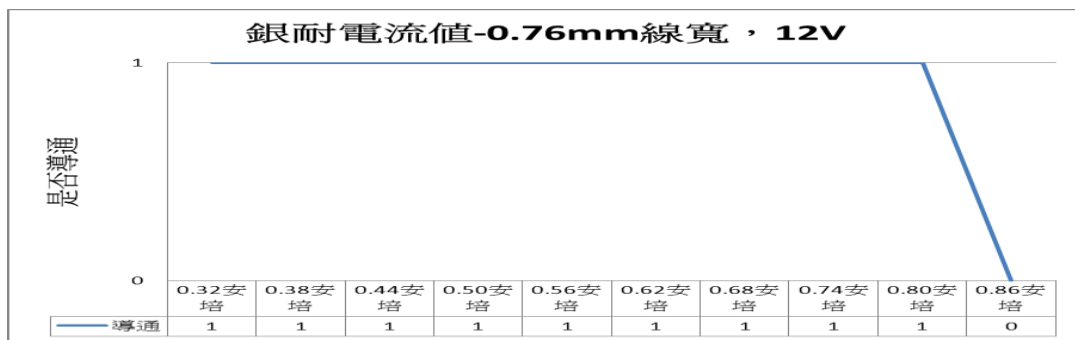


圖 56 銀耐電流測試圖

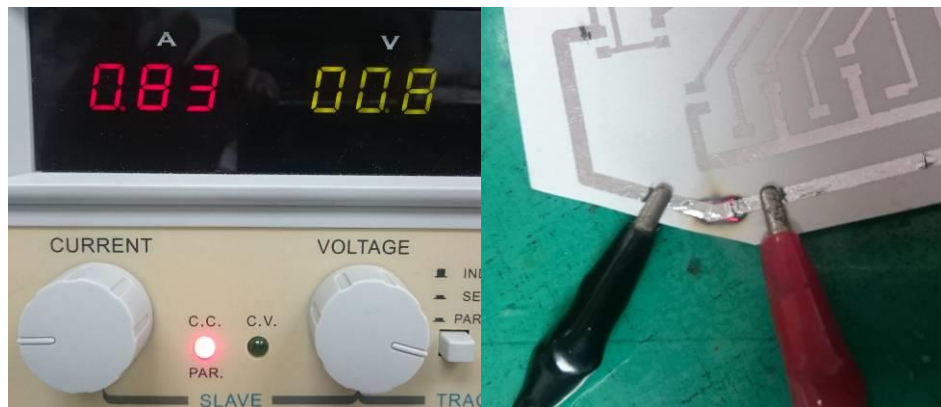


圖 57 銀耐電流測試示意圖

七、 開發大工作範圍之機台(7cm\*12cm)，並測量定溫下其時間與完成度百分比之關係

我們嘗試將整個機台重新規劃與製作，最大的改變便是加大工作範圍，使我們的輸出電路可達到 7cm\*12cm，也因為如此，所以我們由先前的經驗變成每一分鐘測量一次數據，期待能夠找尋加大工作範圍後的最佳工作溫度。

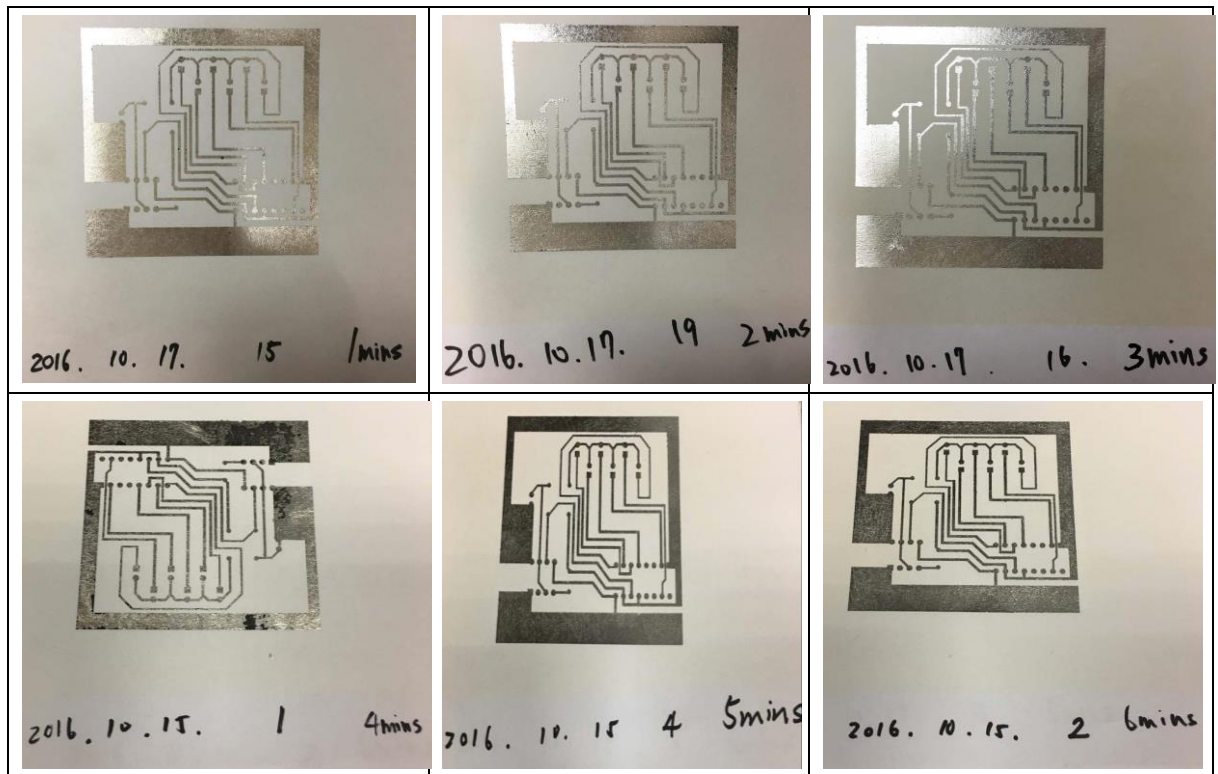


圖 58 定溫 195°C 時各分鐘所測得之數據

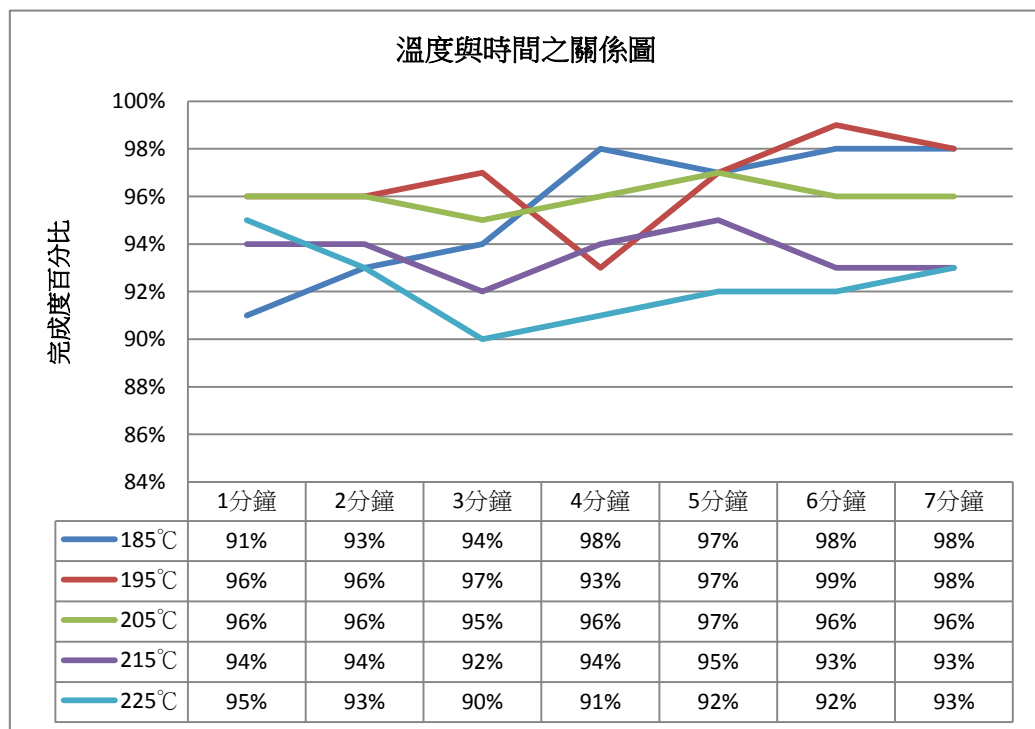


圖 59 溫度與時間關係-材料：銀箔(工作範圍：7cm\*12cm)

八、 銀箔上加上導熱麻紙，並測量其 185°C 時每分鐘與完成度百分比之關係

由上圖可以發現，其溫度為 185°C 且時間為 4 分鐘時期完成度可達 98%，因此我們以這個溫度為定值，觀察其加上導熱麻紙之後隨時間變化之完成度百分比。

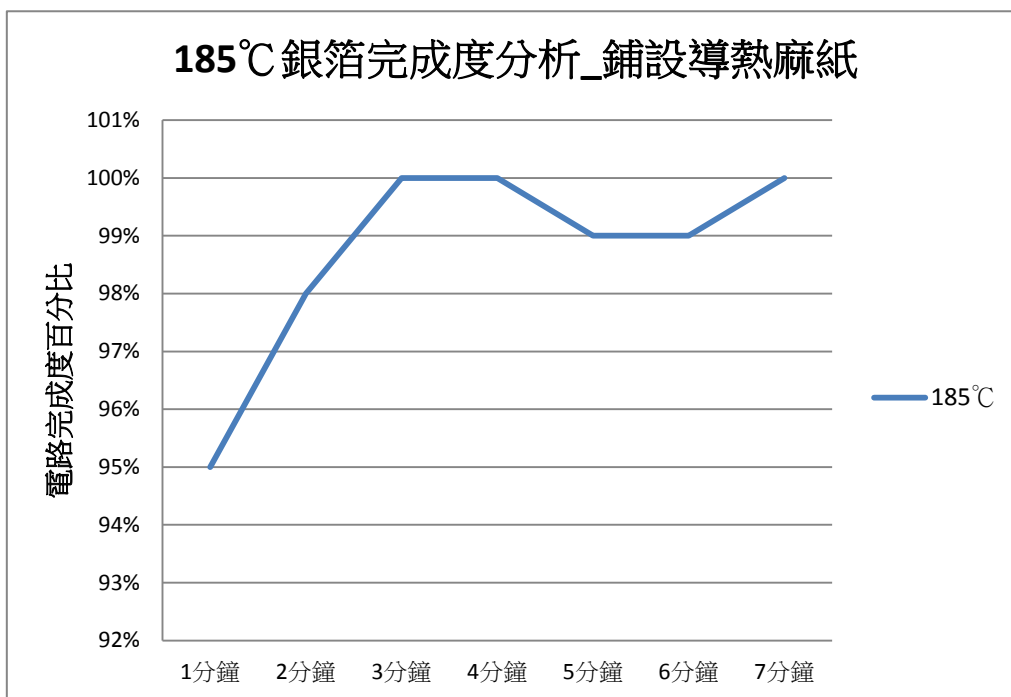


圖 60 溫度與時間關係-材料：銀箔+麻紙(工作範圍：7cm\*12cm)

#### 九、 測量其 185°C 時其壓力與完成度百分比之關係

由上圖可以發現，其工作溫度 185°C 時，只需 3 分鐘完成度便可達 100%，因此我們繼續選定 185°C 為最佳溫度來量測壓力與完成度之關係。

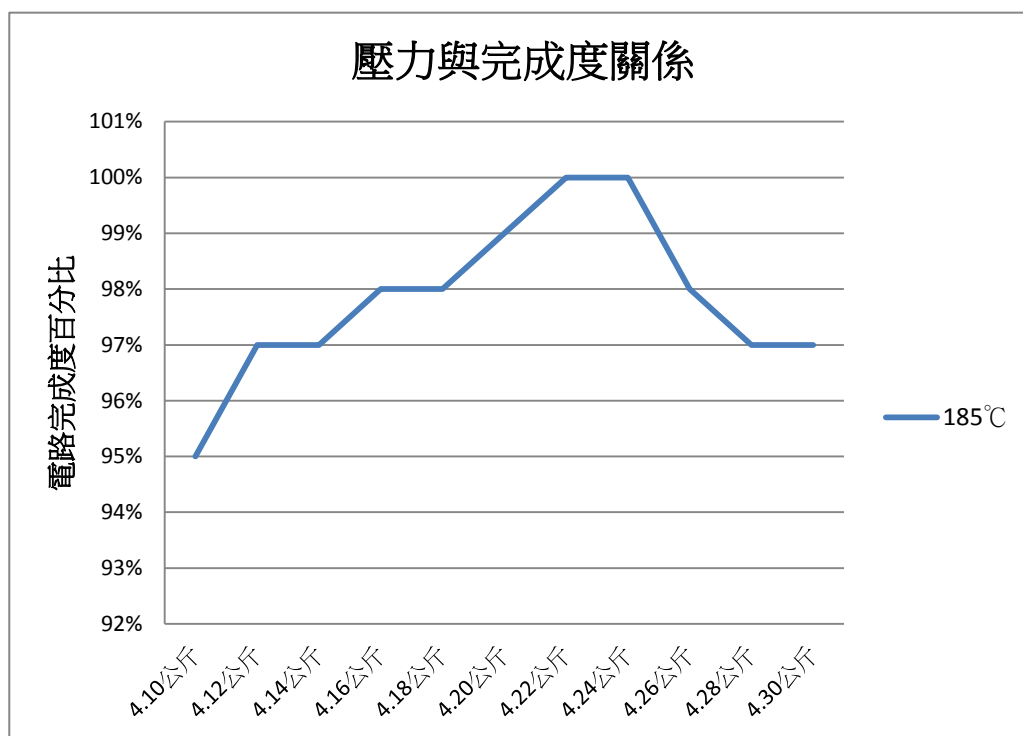


圖 61 壓力與完成度關係-材料：銀箔+麻紙(工作範圍：7cm\*12cm)



## 肆、 研究結果與討論

### 一、研究結果

本次實驗為期約 1 年時間，經由我們的觀察與研究發現以下幾點：

1. 由圖 48、圖 50 數據可見，在相同溫度的情況下，以銀為材料的電路比銅為材料的電路所需的製作時間來的更少；若以相同製作時間來說，銀為材料的電路所需要的工作溫度低於銅為材料的電路。
2. 由第一項結果我們可以知道，以銀為材料時其工作時間較短，因此我們以此為根據重新製作一工作範圍可達 7cm\*12cm 之電路印製儀器，結果由圖 59 可知，當工作溫度 185°C 時經 4 分鐘後可使完成度達 98%；195°C 時經 6 分鐘後可使完成度達 99%，以省電來看我們可以 185°C 為理想工作溫度。
3. 由圖 60 可見，若以 185°C 為工作溫度，於銀箔上覆蓋一層導熱麻紙，那麼 3 分鐘後便可讓電路完成度達 100%。
4. 由第三項結論我們更精密的研究其加熱壓力值，由圖 61 我們可以看到當壓力 4.22 公斤時，其電路完成度最佳為 100%。
5. 耐電流能力來說，同樣是 0.76mm 線徑的電路來說，銅材料的耐電流能力優於銀材料。
6. 以電力消耗成本計算，完成一張一銀為材料的電路需耗費：(以 185°C 計算)  
 $(110W \times 180 \text{ 秒} / \text{千瓦小時}) \times 3 + 4(\text{銀箔}) = 4.0165 \text{ 元}$
7. 以經濟方面來做考量，兩張相同的電路，一張為傳統電路板(蝕刻機或雕刻機製作)，一張為紙電路，假如皆不包含元件，傳統電路板一張成本約 60 元，然而紙電路一張約為 4 元。
8. 在製作過程，以紙作為基底，搭配導電膠水黏著元件，回收時可直接將元件移除下次再使用，紙也可再生回收再利用，可說是相當環保。
9. 學校在教導學生製作電路時，使用這台紙電路印刷機，所需印刷時間比蝕刻機與雕刻機來的更短，機台本身價格也比蝕刻機與雕刻機來的便宜，且較符合環保概念，有助於減少教學時造成電路板的廢棄亦可以訓練學生自行 LAYOUT 電路能力。

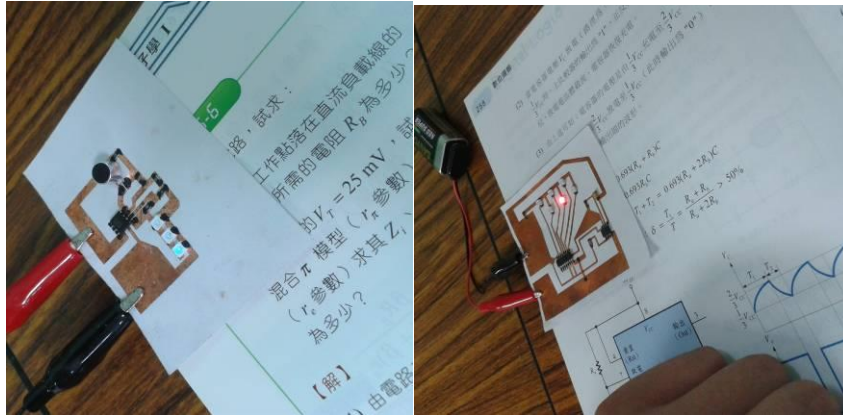


圖 62 紙電路融入課本教學

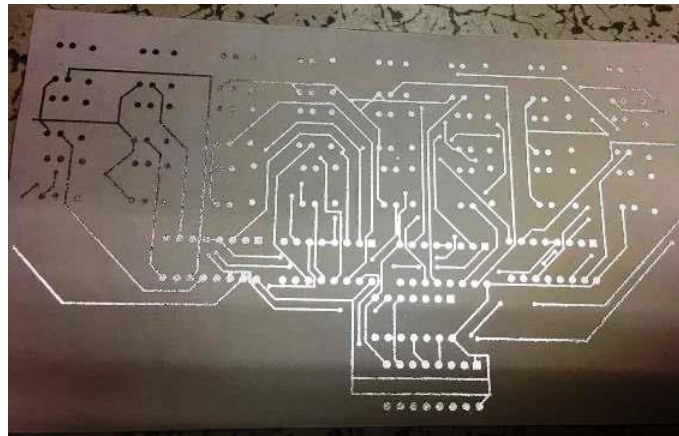


圖 63 紙電路細緻度

## 二、討論

### (一) 使用紙電路印刷機教學上就無法學習焊接技術？

電路元件焊接能力是我們要學習的基本能力，因此我們需要花一些時間來練習，但除此外，電路識圖尤其重要，因此我們的紙電路主要教導學生在自行設計電路後，使用電腦學習 LAYOUT 電路的能力，讓學生可以在最短的時間、最低的成本內可以實現自己所設計的電路，並可以在友善環境的狀況下學習。

### (二) 紙電路可以取代傳統電路板？

我們製作的紙電路主要是用於教學，我們標榜快速以及環保，可以方便我們將電路印出，讓學生可以清楚了解電路的功能與特性，一方面可減少時間，另一方面也可減少資源浪費，對於產業來說該電路印製儀器為打樣的功能，若確定以此電路為

量產版本時仍需要以工業方式施行大量製作。

### (三) 回收時是否造成環境汙染？

紙電路在回收時，可將元件直接移除再利用，紙也可泡入水中分離出金屬與紙，分解出來的紙可造成再生紙，銀也可回收再利用，不像傳統電路板回收過程浪費大量的水及電力，且須請專門的人來統一集中處理。

### (四) 如何在電路完成後比較電路的完成度？

利用機台旁的 CCD 鏡頭先將紙電路擷取畫面，紙電路印刷完成後，再將紙電路和印製前擷取的電路相互比對，經過公式計算後就可知道電路完成的百分比。

## 伍、 結論與應用

生活中存在著很多有趣的現象值得去探討，看待事情若能多點不一樣的角度，那就可能會有更多的驚奇，就像我們這次的實驗，上實習課時發現電路板大量廢棄的狀況，再了解電路板製作與回收時的情況後，我們動作製作了這台紙電路印刷機儀器，其中銀箔與銅箔是我們所關注的，因此在討論過後我們決定以銅箔與銀箔做實驗來驗證這台裝置用於教學的可行性，在機台製作完成後透過我們自行量測的數據來分析與比較，我們發現紙電路印刷機是可行的，因此在教學方面若能夠以這台紙電路印刷機來代替蝕刻機與雕刻機，那麼相信在教學後電路板大量廢棄的狀況將會改善，且也可降低製作成本、製作時間與對環境的傷害，如此有朝一日紙電路所帶來的效益，將足以讓老師在課堂上更方便的教學生製作電路，慢慢的紙電路教學將得以實現。

除此外，紙電路可運用於未來課本內容的實施，因為是一張紙，因此可當成夾頁附於課本內，該單元電路講解完成後學生只需要回去黏貼電子元件接上電池，便能夠馬上了解老師所講述的內容；亦可與文創結合，改變以往文創產品呈現的瓶頸，使文創更多樣化，最後，更可以提供近來非常熱門的話題 Maker，使大家都有機會是 Maker，不再受限於電路製作複雜的限制，因此可以啟發更多的創意，為台灣軟實力盡一份心力。

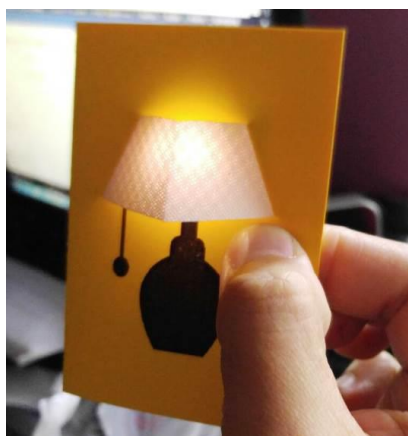


圖 64 以印製機製作之立體檯燈卡片

## 陸、 參考資料與其他

- (一) 王歌是、陳依封(2001)。跨入 Maker 物聯網時代：誰都可以用 Arduino。通訊雜誌，36 期，43-44 頁。
- (二) 洪啟強(2015)。電子學。新北市：全華圖書。
- (三) 黃仲宇、梁正(2011)。基本電學 I。台北市：台科大圖書。
- (四) 劉震昌/審譯(2010)。數位影像處理。新北市：高立圖書。
- (五) 潘皇玉(2014)。Visual Basic 2010 程式設計實例。台北市：上奇資訊股份有限公司。
- (六) 謝進發、鄭錦鈞(2010)。基本電學實習 I。台北市：台科大圖書。

## 【評語】 100016

1. 本作品以紙為基材，銅／銀箔為導線材料，以自行開發的機台印刷電路，並作有系統的探討，達成環境保護的目的，值得鼓勵。
2. 建議宜針對印刷尺寸精度、關鍵尺寸、電性精度等作進一步探討。
3. 建議可以思考對於軟性或可撓性電路應用的探討，例如塑膠或薄玻璃基材、電路的耐折或保型特性的探討，以擴大本作品的應用價值。