

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 物理科

第三名

030104

空心的雷神之槌

— 避雷針與環境的變化對產生電弧的影響

學校名稱：雲林縣立斗六國民中學

作者： 國二 朱國璋 國二 吳振璋 國二 鍾禎芝	指導老師： 丁崇祺 何玉月
---	-----------------------------

關鍵詞：避雷針、電弧、離子蝕刻

摘要： 實驗發現：

理論部分

- 1、電壓越大，引電效果越好，頻率越小。
- 2、材質方面，引電效果紅銅>黃銅>鋁>石墨>不鏽鋼。
- 3、形狀方面，發現空心管引電效果稍優於實心；避雷針引電端角度越小，截面積越大引電效果越好，但截面積有最大極限。
- 4、避雷針數越多，能把電弧同時分散所有的針上，讓電流變小更安全。
- 5、溼度大，溫度小，引電效果越好。

應用部分

- 1、以高壓電弧電鍍發現，電鍍時間會縮短，但也更容易與空氣中的氧氧化。
- 2、可發現皮較乾的蔬果，會被電弧打擊成小洞；皮薄汁多的蔬果，會被打成一定區域的凹痕；皮厚汁多的蔬果，會有一定範圍的碳化現象。
- 3、由電弧顏色發現柑橘科中果皮鈣離子含量大於果肉；而果皮過熟變黑反而讓鈣離子變多。

壹、研究動機

當暴風雨來臨時，打雷時安全的依靠就是避雷針，談起避雷針的發現就得要說到富蘭克林了，就當富蘭克林做完引下閃電的實驗後。為了老婆對閃電的擔憂，回家馬上在房頂豎起一根鐵棒，下面連上銅線延伸到土內。而產生了世界上第一個避雷針。但另一個有趣的故事是來自於當時美國為了脫離英國的獨立戰爭，當英國國王看到克攸王宮頂上那根尖尖的避雷針，就想到獨立宣言簽字者之一的富蘭克林這個罪魁禍首，越想越生氣，本來想把避雷針拆掉，但大臣們反對，國王就說乾脆針的尖頭改成圓球形的，但到最後還是沒有改變。(梁衡, 2008)

當我們聽到這個故事後，就開始思考，避雷針為什麼一定要尖的，為何不能像國王所說的球型，亦或是中空的，於是我們就開始針對避雷針的材質、形狀、數目、溫濕度及電壓來對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小來探討。

貳、研究目的





- 1、探討電壓對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響。
- 2、探討避雷針的材質對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響。
- 3、探討避雷針形狀對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響。
- 4、探討避雷針數目對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響。
- 5、探討濕度與溫度對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響。
- 6、探討高壓電弧電鍍的效果。
- 7、探討高壓電弧離子蝕刻的效果。

參、研究器材

器材：

電弧產生器 	紅外線測溫槍 	打火機脈衝電弧元件 	鉗形三用電表 
熱電偶溫濕度計 	吹風機 	塑膠手套 	超音波霧化機 

藥品與材料：

各式金屬棒與碳棒 	硫酸銅 	澱粉 	各式蔬果 
---	--	--	---

肆、研究過程或方法

研究架構圖：

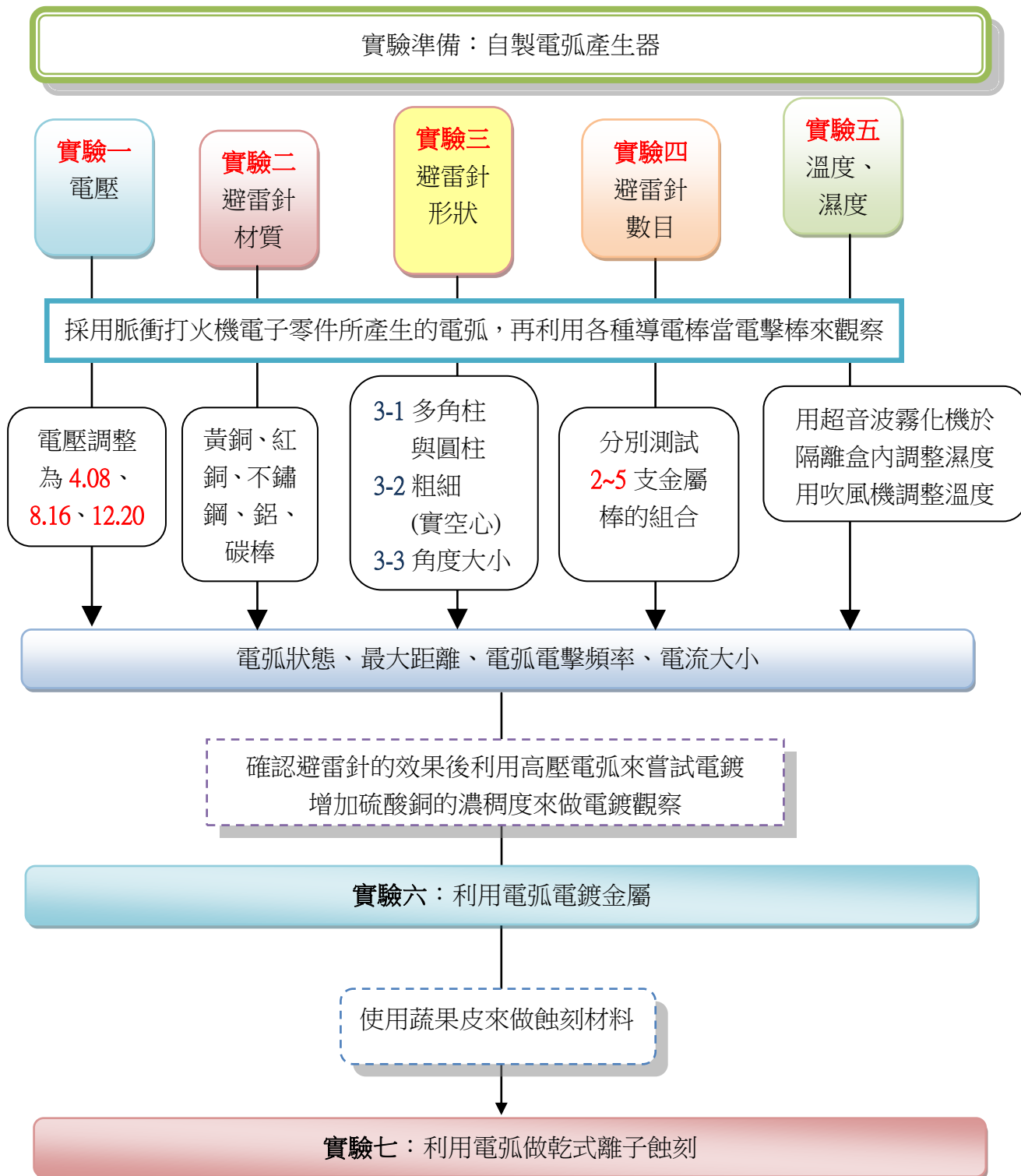


圖1 研究架構圖

實驗原理：

閃電是因為雲層內的微粒互相摩擦後而累積電荷，累積電荷到很高時而引起放電。閃電的電流很大，其一般能達到數萬安培，但是其持續的時間很短，一般只有幾十微秒。所以閃電電流的能量不如想像的那麼巨大。不過雷電電流的瞬間功率很大，對建築物和其他設備尤其是電器設備的破壞還是十分巨大，所以才需要安裝避雷針保護建築和設備。(維基百科, 2015)

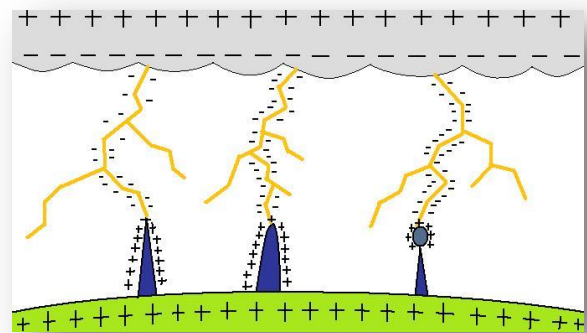


圖 2 閃電與避雷針作用

實驗準備：

要想知道避雷針的運作，就得觀察避雷針所接收的閃電電弧，這在一開始實驗時我們就面臨瓶頸，成員們第一個想法是想利用捕蚊拍所產生的電弧，捕蚊拍的原理主要是由高頻振盪電路、三倍壓整流電路和高壓電擊金屬網三個部分所組成(下頁圖3)，但使用的過程中，發現其電路是使用儲存式的電容，而造成其放電方式是屬於間斷式的放電，與我們一開始的實驗構想有很大的差別，我們所要求的是能至少維持一分鐘以上的持續性放電，這樣才能更能仔細觀察閃電的狀態。

接下來改用可持續性放電的電子點火槍零件(下頁圖4)，連接1.5V的乾電池後，發現電弧長度太短且細，導致觀察不易，於是我們就嘗試想增加電壓來改善，換成3V之後電弧似乎有稍微大一點，但改變超過4.5V時，甚至一直增加到6V、12V，電弧大小反而變化不大，照理說電壓提高時，電流也會跟著變高，電弧應該會變粗才對，所以朝兩個可能性判斷，第一可能是因為乾電池的電容太小，當提高電壓時，電容太小不足以增加電流。第二，電路板上的裝置限制電流無法太高。

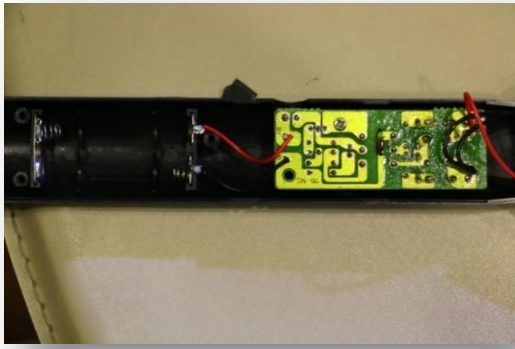


圖 3 捕蚊拍電子零件

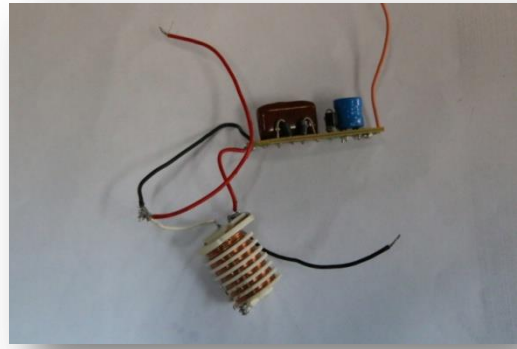


圖 4 電子點火槍電子零件

故針對電容更改電池來測試，將碳鋅電池改成18650鋰電池，結果電弧狀態與碳鋅電池並無差異，所以問題應該是出在電路板上。若是要能增加電弧大小，勢必要將電路板上的電容全部升級，那不如換別種方式增加電弧，於是就想到有一種電弧打火機，其電弧的效果不錯，改成電弧打火機的零件後(如圖5)，果然效果提升，電弧能超過3cm以上，並利用此零件製作出容易觀察的裝置。設計圖如下圖6，實際組裝圖如下圖7及圖8。

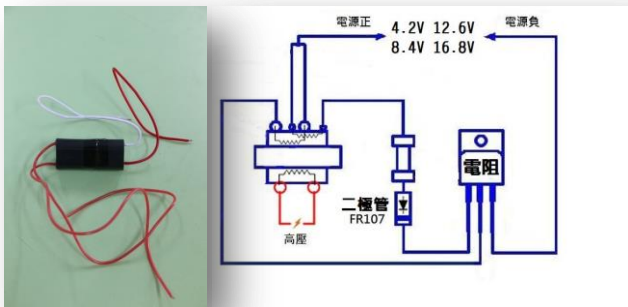


圖 5 電弧產生器與電路圖

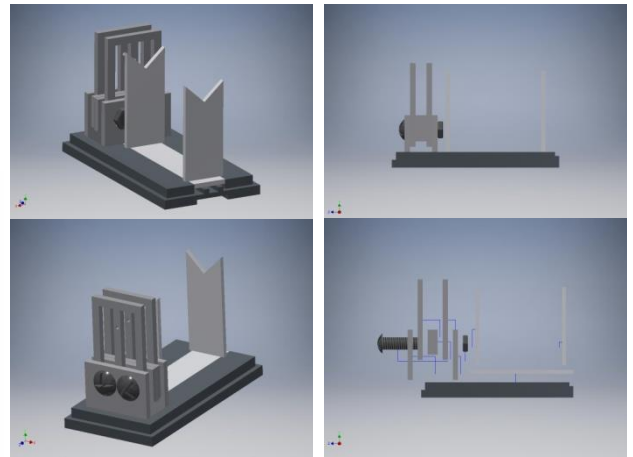


圖 6 裝置設計圖

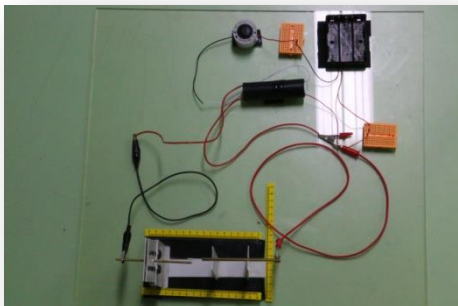


圖 7 實際裝置

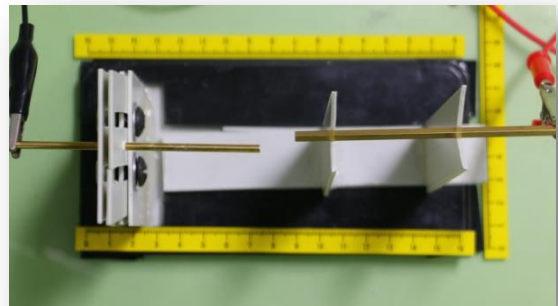


圖 8 電弧裝置

實驗步驟：

實驗1 探討電源電壓對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響

- 1、將兩支直徑3mm，長度10cm的黃銅圓棒分別接在電弧產生器的正負極。
- 2、輸出電源以四種電池盒(1~4顆18650鋰電池)分別放入18650鋰電池，每次實驗皆以三用電錶測量其電壓。

原本想使用紅外線感溫槍來偵測電弧溫度，但怎麼測都測不出來，查詢資料了解紅外線感溫槍的檢測方式是物體必須放出熱才能偵測到，所以才無法測得非物體的電弧，研究方向只好改為偵測電擊棒之間的空氣電阻，但利用三用電錶偵測時，因為在電擊棒兩端測量，因為電弧的脈衝太強，而使三用電錶燒壞，所以我們改採測量電池兩端電流大小來推測電阻大小。

- 3、蓋上pp桶後再開啟開關，放電一分鐘，使用鉗型三用電表在電池兩端測量，在開始後30秒測量電弧電流大小。(前30秒做為暖機及讓環境因素穩定的功用)
- 4、停止實驗三分鐘後，再次啟動電弧約30秒後，再利用鉗型三用電表測量電弧頻率。
- 5、再次停止實驗後以數位單眼相機曝光0.4秒，光圈開最大來拍照，進而觀察電弧大小與電弧形狀的狀態。

實驗2 探討避雷針的材質對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響

原本認為材質可能會影響避雷針的顏色，但電弧打擊時，發現並不會使金屬激發而產生不同顏色的光，故改為研究閃電打擊頻率，同時也可探討引電的效果。

- 1、將直徑3mm，長度10cm的黃銅圓棒接在電弧產生器負極。
- 2、正極分別接上同樣直徑3mm，長度10cm的紅銅圓棒、黃銅圓棒、鋁圓棒、不鏽鋼圓棒、碳圓棒，並將兩極調整距離為1cm。



圖 9 直徑相同不同材質的避雷針

3、重覆實驗一步驟3至5並記錄結果，每次實驗都會以充電器將電池充飽至相同電壓。

實驗3 探討避雷針形狀對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響

3-1 電擊棒多角柱型與圓柱效應的比較

- 1、將直徑3mm，長度10cm的黃銅圓棒接在電弧產生器負極。
- 2、正極分別接上同樣直徑3mm，長度10cm不同形狀的黃銅四角棒以及黃銅六角棒、黃銅圓棒，並將兩極調整距離為1cm。



圖 10 不同形狀的避雷針

3、重覆實驗一步驟3至5，並記錄結果。

3-2 電擊棒粗細比較

實心粗細比較：

- 1、將直徑3mm，長度10cm的黃銅圓棒接在電弧產生器負極。
- 2、正極分別接上1mm、2mm、3mm、5mm、10mm的黃銅實心圓棒。

3、重覆實驗一步驟3至5，並記錄結果。



圖 11 不同粗細的黃銅實心圓棒

空心粗細比較：

- 1、將直徑3mm，長度10cm的黃銅圓棒接在電弧產生器負極。
- 2、正極分別接上1 mm、1.5mm、3mm、5mm黃銅空心棒。
- 3、重覆實驗一步驟3至5，並記錄結果。



圖 12 不同粗細的黃銅空心圓管

3-3 電擊棒頭角度大小比較

- 1、將直徑3mm，長度10cm的黃銅圓棒接在電弧產生器負極。
- 2、將碳棒削成四種不同角度(128.87° 、 106.26° 、 90.00° 、 77.32°)的尖形碳棒，再個別接上正極。
- 3、重覆實驗一步驟3至5，並記錄結果。

實驗4 探討避雷針數目對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響

- 1、將直徑3mm，長度10cm的黃銅圓棒接在電弧產生器負極。
- 2、在平板上繪出半徑兩公分的圓並畫出一條直徑及各頂點距

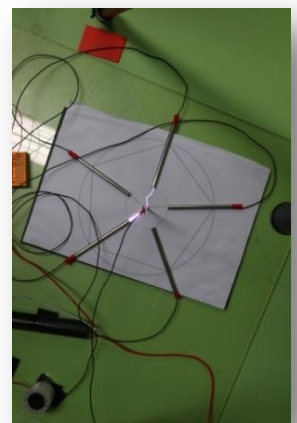


圖 12 多根導電棒裝置

中心點2cm的三角形、四角形、五角形四種(如上頁圖12)，再將接負極的黃銅圓棒插入中間。

- 3、正極各自連結電線，將電工膠帶纏住電線與2~5支不鏽鋼，各放置圖上所繪位置上。
- 4、重覆實驗一步驟3至5，並記錄結果。

實驗5 探討溫度、濕度對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響

溫度：

- 1、將3mm直徑，10cm長度的黃銅圓棒接在電弧產生器負極。
- 2、正極接上3mm黃銅實心圓棒。
- 3、半開塑膠蓋子後，用吹風機調整桶內溫度後，等待2分鐘後，再以熱電偶溫度計測量溫度。
- 4、重覆實驗一步驟3至5四次，共五種不同的溫度狀態。
- 5、重覆步驟3至4，做出五種不同的溫度狀態。

濕度：

- 1、將3mm直徑，10cm長度的黃銅圓棒接在電弧產生器棒負極。
- 2、正極接上3mm黃銅實心圓棒。
- 3、蓋上塑膠蓋子後，以超音波霧化機將水震成小分子導入桶內如圖13，蓋好後並靜置2分鐘，記錄濕度。
- 4、重覆步驟3四次，加上未加水時共五種濕度。
- 5、重覆實驗一步驟3至5，並記錄結果。

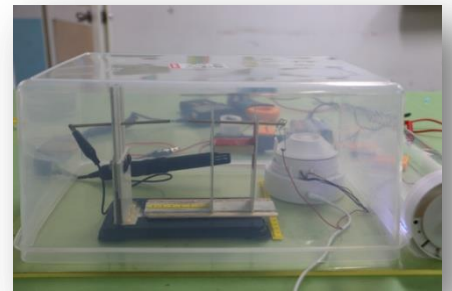


圖 13 超音波霧化機導入水氣

實驗6 探討利用高壓電弧嘗試電鍍金屬

電鍍是主要靠直流電流讓電解液的金屬離子還原成金屬，我們思考若是在高壓電弧之下，電流的流速較快，會不會加速其氧化還原反應，進而快速的讓金屬離子還原，一開始先使用氧化鋅測試，但外觀看不出來是否有還原，所以利用易觀察且易取得的硫酸銅溶液測試。

- 1、電源輸出電壓12.01V，並將3mm直徑，10cm長度的黃銅空心圓棒接在電擊棒正極。
- 2、將鋅片秤重後接上負極，再以飽和硫酸銅滴入濕紙巾，並連同硫酸銅溼紙巾包覆住鋅片。
- 3、在負極端以鱷魚夾固定並通電1分鐘，觀察鋅片外觀後將鋅片秤重，如右圖14。
- 4、將電池改成一顆，觀察電壓對鋅片電鍍前後狀況。
- 5、以澱粉適量讓飽和硫酸銅溶液形成濃稠狀
- 6、重覆步驟1到4，利用濃稠狀的硫酸銅溶液電鍍並進行觀察。

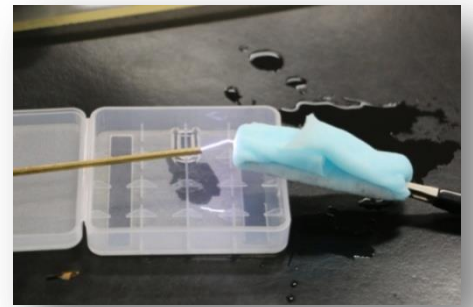


圖 14 高壓電弧電鍍情形

實驗7 探討高壓電弧對離子蝕刻的效應

從文獻中可以發現高壓電弧可以以離子蝕刻的方式把圖案刻上想要的金屬，種類分為使用化學藥劑腐蝕的溼式蝕刻法以及物理性撞擊的乾式蝕刻法，在學校設備中要做到濕式蝕刻以及大部分的乾式蝕刻有其危險與困難性，但我們發現乾式蝕刻中電弧撞擊聚合物所需的氣體為氧氣(如下表1)，這似乎可以簡單的觀察高壓電弧對蝕刻的作用。

表1 乾式蝕刻材料與氣體種類

蝕刻材料	氣體種類
多晶矽	CF ₄ ，CF ₄ -O ₂ ，C ₂ H ₆ ，CCl ₄ ，CBrF ₃ ，CF ₂ Cl ₂
Si ₃ N ₄	CF ₄ ，CF ₄ -O ₂ ，SF ₆ ，CCl ₂ F ₂ ，SF ₆ ，C ₂ Cl ₂ F ₄
SiO ₂	CF ₄ ，CF ₄ -O ₂ ，C ₂ F ₆ ，CHF ₃ ，C ₃ H ₈
Al	BCl ₃ ，CCl ₄ ，SiCl ₄ ，Cl ₂ ，HCl，BBr ₃ ，HBr
W、Mo、Ti	CF ₄ ，CF ₄ -O ₂ ，NF ₃ ，CCl ₄ -O ₂
Cr	Cl ₂ ，CCl ₄ -O ₂
聚合物	O ₂
矽化物(W、Mo)	CF ₄ ，CF ₄ -O ₂ ，CCl ₄ -O ₂

(嚴大任，2016)

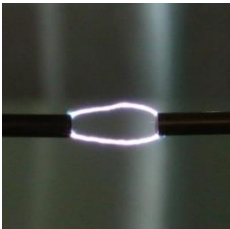
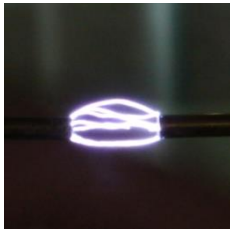
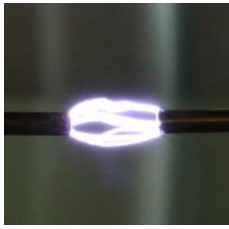
乾式蝕刻缺點就是需要真空的環境之下通入與電弧撞擊想結合的氣體，而從氣體種類與材料來看，唯一可行的實驗就是對聚合物蝕刻，因為氣體種類為氧氣，可直接由現有環境做蝕刻，雖然空氣中的氧氣才20%，效果會比較不好，但應該可以觀察到蝕刻的現象，所以我們選擇水果表皮來做乾式蝕刻的觀察。

- 1、將3mm直徑，10cm長度的黃銅圓棒接在電弧產生器負極。
- 2、將負極插入待測水果與蔬菜內(橘子、葡萄、蘋果、番茄、香蕉、葡萄柚、奇異果、西洋梨、洋蔥、胡蘿蔔、薑)。
- 3、將正極接上實驗1~3效果最好的避雷針並離待測水果與蔬菜約1cm。
- 4、通電約一分鐘，觀察表皮狀況並拍照。

因為實驗中發現葡萄柚電弧顏色與其他水果不同，於是接下來針對蘋果、香蕉、葡萄柚、甜橙、奇異果、桃子等含鈣離子的水果做實驗，剝皮對果皮與果肉分別蝕刻，觀察電弧的顏色。

伍、研究結果與討論

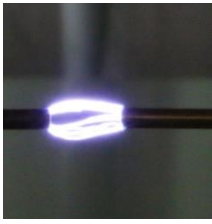
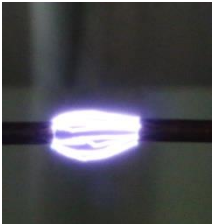
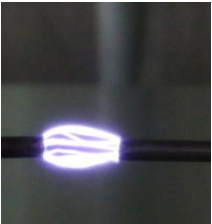
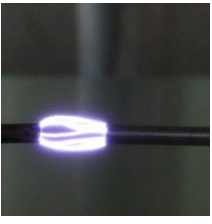
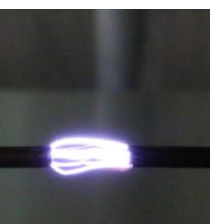
實驗1 電源電壓對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響

電壓	4.08 V	8.16 V	12.20 V
電弧狀態			
電流大小	1.83~3.10 A 平均=2.62 A	1.90 A	2.11 A
電功率	7.4664~8.122 w	15.504 w	25.762 w
頻率	28.02~34.23 Hz 平均=29.12 Hz	23.43 Hz	22.86 Hz
電弧最長距離	3.99 cm	5.05 cm	5.21 cm

一開始本來決定有四種電壓來做實驗(1~4顆18650電池)，但使用四顆18650鋰電池時，因電壓過大，加上測量最大距離會提高裝置的負擔，所以造成了脈衝電弧裝置燒掉，因此最後對測試電壓的安全性及易於觀察來考量，最後以三顆18650電池來做串聯，可以很明顯的發現到電壓越大，其頻率越小，電流越大，最大距離也越長，而電壓太小時(4.08V)，電流與頻率卻非常不穩定，電流最大的甚至還比12.20V產生的電流還更大，所以後續的實驗皆以三顆18650電池串聯來做實驗。

實驗2 避雷針的材質對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響

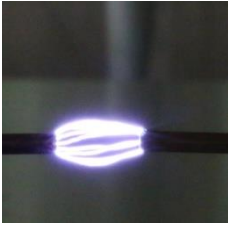
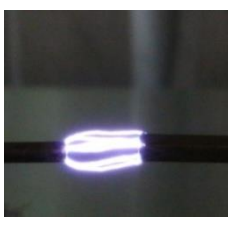
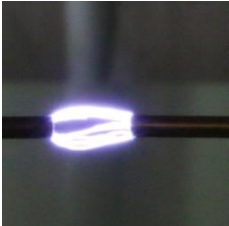
避雷針材質種類有以下五種，以固定電壓12.20V做電源輸出，每一次實驗皆把電池充滿至相同電壓後再做實驗，記錄結果並觀察電弧狀態。

材質	黃銅圓棒 3 mm	紅銅圓棒 3 mm	不鏽鋼圓棒 3 mm	鋁圓棒 3 mm	石墨圓棒 3 mm
電弧 狀態					
電流大小	2.07 A (12.23V)	2.08 A (12.21V)	2.26 A (12.21V)	2.24 A (12.20V)	2.16 A (12.22V)
頻率	23.11 Hz	23.02 Hz	23.24 Hz	22.14 Hz	23.10 Hz
電弧最長 距離	4.90 cm	5.00 cm	4.50 cm	4.80 cm	4.60 cm

從材質中可以發現電流大小不鏽鋼>鋁>石墨>紅銅>黃銅，而頻率則是不鏽鋼>黃銅>石墨>紅銅>鋁，電弧最長距離為紅銅>黃銅>鋁>石墨>不鏽鋼，可以發現材質對於電流大小及頻率並無絕對的關係，材質的差別與導電有關的是電阻率，所以後續結果討論的地方利用電阻率來做探討。

實驗3 避雷針形狀對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響

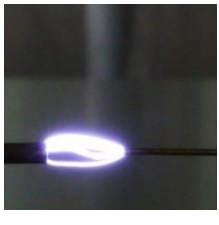
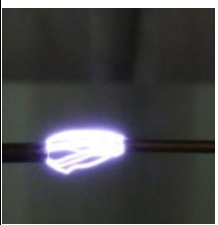
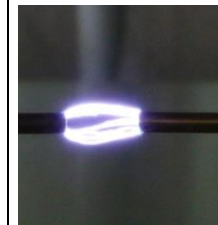
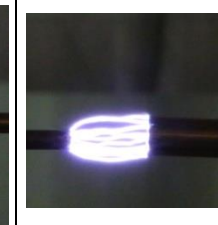
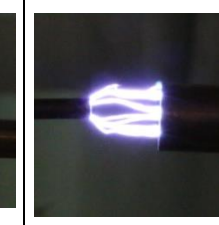
3-1 電擊棒多角柱型與圓柱效應的比較

形狀	黃銅六角形 3 mm	黃銅四角形 3 mm	黃銅圓棒 3 mm
電弧 狀態			
電流大小	2.02 A	1.63 A	1.33 A
頻率	22.53 Hz	23.46 Hz	23.58 Hz
電弧最長 距離	5.00 cm	5.10 cm	4.90 cm

本實驗控制變因並未控制好，因同時存在有三個操縱變因，角數、角度與截面積，原本設定角數當本實驗的操縱變因，實驗中可以看出角數越多其電流越大，頻率越小，但引電距離反而變小。但利用角度來判斷時，角度越小引電距離越大，但電流反而越小，表示角數影響比角度大小大，因此後續做實驗 3-2 對截面積的探討，實驗 3-3 角度的探討，以及實驗四避雷針的數目了解三個因素各自影響電弧狀態的關係。

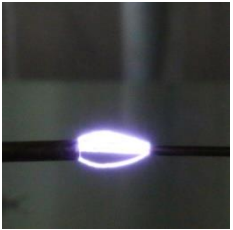
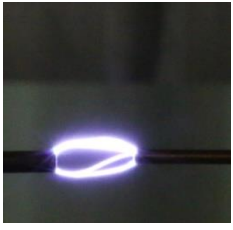
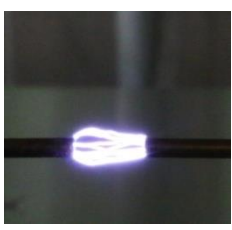
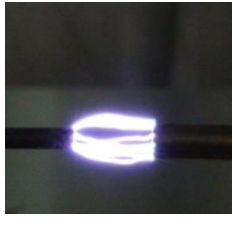
3-2 電擊棒粗細比較

實心粗細比較：

材質	黃銅圓棒 1 mm	黃銅圓棒 2 mm	黃銅圓棒 3 mm	黃銅圓棒 5 mm	黃銅圓棒 10mm
電弧 狀態					
電流大小	2.18 A (12.20V)	2.20 A (12.21V)	2.24 A (12.20V)	2.38 A (12.21V)	2.39 A (12.21V)
頻率	22.98 Hz	23.02 Hz	23.28 Hz	23.43 Hz	23.45 Hz
電弧最長 距離	3.15 cm	3.50 cm	3.52 cm	3.05 cm	3.00 cm

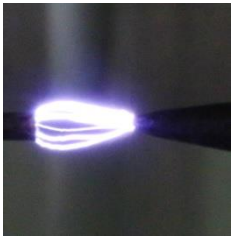

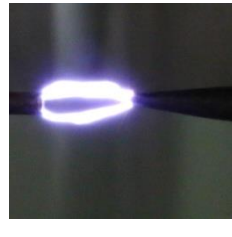
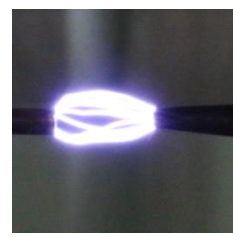
可從電弧狀態發現顏色不會因為粗細而改變，避雷針越粗，其閃電電弧整體範圍也比較大，另外在電流方面，直徑越粗電流有越大的趨勢，但增加越來越少，而電弧最長距離反而在直徑超過3mm後，距離變小。電擊棒頻率結果與最大距離相同，也是超過3mm時開始變小。

空心粗細比較：

材質	黃銅圓管 1 mm	黃銅圓管 1.5 mm	黃銅圓管 3 mm	黃銅圓管 5 mm
電弧 狀態				
電流大小	2.07 A (12.15V)	2.14 A (12.10V)	2.36 A (12.16V)	2.41 A (12.22V)
電功率	25.151 w	25.894 w	28.697 w	29.328 w
頻率	22.69 Hz	23.08 Hz	22.49 Hz	22.59 Hz
電弧最長 距離	3.45 cm	3.35 cm	3.50 cm	3.15 cm

從空心可以發現，圓管越大引電距離愈長，但可以發現圓管直徑超過 3mm 時，引電距離反而變小。或許是因為圓管越粗，引的電弧越多而導致距離縮小之故，因為本實驗的電壓有些差異，所以加入電功率來看，可以發現，越粗的銅管也會提高電功率。

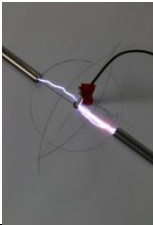
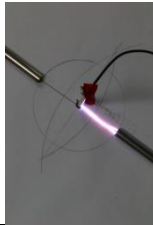

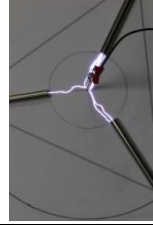
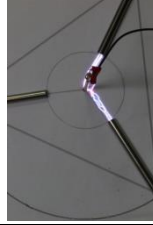
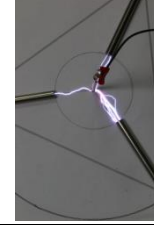
3-3 電擊頭角度比較：

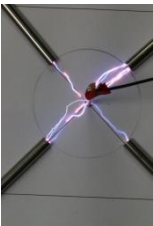
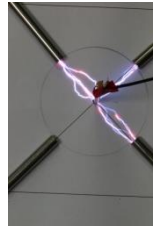
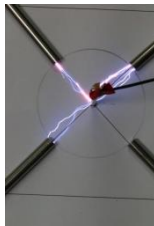
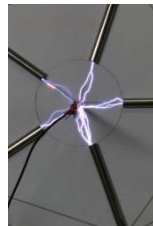
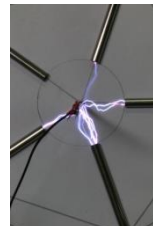
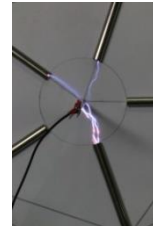
角度	126.87°	106.26°	90.00°	77.32°
電 弧 狀 態				
電流大小	2.29 A (12.22 V)	2.23 A (12.27 V)	2.41 A (12.21 V)	2.30 A (12.21 V)

角度	126.87°	106.26°	90.00°	77.32°
電功率	27.984 w	27.362 w	29.426 w	28.313 w
頻率	23.34 Hz	22.96 Hz	22.67 Hz	22.98 Hz
電弧最長距離	5.00 cm	5.10 cm	5.20 cm	5.60 cm

在電弧狀態中，可以發現角度越小，其電弧範圍反而越大，電弧數更多，再從電弧最長距離可以發現角度越小，其電弧引電距離越遠，同時也可以由電流中可以發現，角度越小其電流越大。

實驗4 探討避雷針數目對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響

數目	2支不鏽鋼棒			3支不鏽鋼棒		
電弧狀態						
電流大小	1.34 A			1.32 A		
頻率	20.57 Hz			20.61 Hz		

數目	4支不鏽鋼棒			5支不鏽鋼棒		
電弧狀態						
電流大小	1.92 A			2.12 A		
頻率	20.29 Hz			20.11 Hz		

由實驗一直到實驗三可以發現，電功率有時會因為頻率的縮小而增加，除了圓棒的截面積有呈現正比關係外，其與各自的變因並沒有很大的關係，而且變動較大，所以要判斷引電的效果，還是得針對實際電弧狀態以及電弧最大長度來判斷比較容易，故之後每次實驗需讓每次電壓差異縮小使其更能控制變因。

實驗四利用高速攝影可以觀察到，電流會同時流到大部分的避雷針，有時候會有輪動的現象，而當避雷針越多時，除了發現總電流所分出來各避雷針的電流變得越小以及電弧輪動的情況較少外，還有頻率有越小的趨勢。

實驗5 溫度濕度對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響

溫度(°C)	36	39	41	44	47
電流大小(A)	1.27	1.29	1.31	1.32	1.33
頻率(Hz)	24.04	23.62	23.54	23.06	22.79
電弧最長距離(cm)	4.5	4.1	4.0	3.4	3.1

濕度(%)	58.2	63.1	65.4	67.3	71.2
電流大小(A)	3.0	3.2	3.4	4.1	4.7
頻率(Hz)	24.32	24.11	23.89	23.38	23.12
電弧最長距離(cm)	4.2 cm	4.3 cm	4.7 cm	4.8 cm	5.2 cm

溫度很明顯是溫度越高，其電流越大，頻率越小，引電距離越短。而濕度很特別的是，當我們將溼度提高到70%後關閉霧化器，再開啟電弧同時檢測，溼度也會慢慢往下，但真正情形是開啟電弧後發現溼度卻馬上下降至不到50%，這很可能是因為電弧產生時，會將水蒸氣趕走。所以我們改以讓霧化器將裝置調整到我們想要的溼度再觀測瞬間電流與瞬間頻率。從結果可以發現溼度越高，其電流越大，頻率越小。

實驗6 利用高壓電弧嘗試電鍍金屬

從實驗中可以發現空心管效果最佳，於是想嘗試利用高壓電弧來電鍍金屬，一開始以 3mm 黃銅空心管來當電極時，同時也發現空心圓管的電弧也較為集中，能在極小範圍產生電弧，高壓電弧一分鐘後的結果竟然如右圖 15，本來預測應該銅離子在負極還原成銅金屬 $\text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Cu}$ ，沒想到變成黑色的物質，思考是否是因為高壓電弧造成溼紙巾碳化還是因為硫酸銅溶液所造成的影響。

於是將剪裁過的溼紙巾滴入飽和硫酸銅，並以電工膠帶包覆五分之一的鋅片，電鍍結果為右圖 16，可以發現只有包覆的地方才會產生黑色的產物，另外電弧有無接觸有硫酸銅的地方，並不會影響實驗結果。

接下來嘗試用單純溼紙巾電鍍，看是否是因為硫酸銅溶液的影響，還是溼紙巾的影響。電鍍一分後結果如圖 17，進而證明不是因為包覆物所形成。

接下來降低電壓看看是否能夠完整的還原銅金屬，故將電壓降低為一顆 18650 的電池，電壓約 4.2V，仍然有氧化銅產生，如圖 18，發現仍然與圖 15 類似都是黑色的，但部分區域已經出現了暗紅色的銅，證明了高壓電弧可能會迫使還原出來的紅色銅金屬繼續在空氣中與氧氣氧化成黑色的氧化銅，在秤重發現重量變輕，主要是雖然銅電鍍的附著力不差，但一變成氧化銅時，除了在溼紙巾上生成外，另外在鋅片所產生的氧化銅也很容易輕輕一抹而抹開，證明了氧化銅附著度不足的現象。

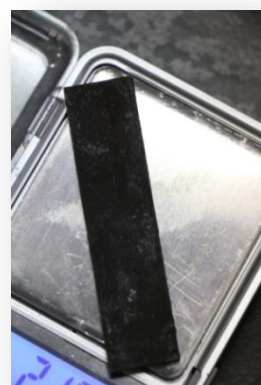


圖 15 電鍍生成物



圖 16 部分電鍍生成物



圖 17 溼紙巾電鍍後情況



圖 18 降低電壓所產生的電鍍物

既然溶液狀態很難電鍍，思考若是將溶液變成凝膠態，將電阻變大一點，看能不能減緩銅在空氣中的氧化作用，於是加入澱粉 50g，使其飽和硫酸銅形成凝膠態，再做高壓電弧電鍍，其電鍍結果如右圖 19，可以發現硫酸銅澱粉水溶液撥開表面後，還是有黑色氧化銅產生。這代表了高壓電弧的脈衝的方式會加速所有的氧化還原，一分鐘以內就可以產生，但同樣的也很容易與空氣中的氧氣氧化反應，而造成氧化銅的快速生成。



圖 19 以硫酸銅澱粉溶液電鍍的產物

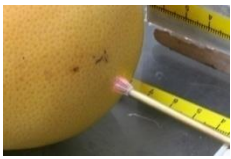
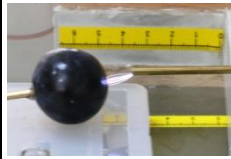
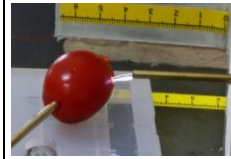





實驗 7 利用高壓電弧嘗試乾式離子蝕刻

針對聚合物的乾式離子蝕刻，因為離子蝕刻的限制很多，我們利用實驗一到三所發現的結果，利用三顆電池（18650 鋰電池），與黃銅空管來測試，對於聚合物的乾式蝕刻，我們先選擇含有電解質，且表皮為纖維素聚合物的水果與蔬菜來做蝕刻的觀察。

首先針對於皮比較厚的橘子來做測試，發現電擊後表皮有粗糙感，且流出汁液來，如右圖 20，為了想了解是否有其他現象，於是針對同樣皮厚的葡萄柚、香蕉，皮薄的葡萄、小番茄、蘋果、西洋梨、奇異果，以及蔬菜類的薑、洋蔥以及紅蘿蔔等來做測試。後來在葡萄柚電擊發現有特殊顏色的電弧，於是也同時開始觀察電弧的顏色。



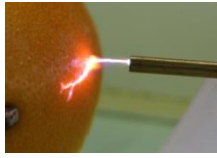
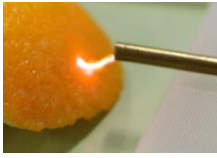
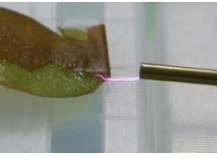


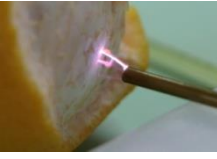
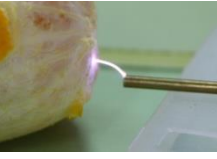
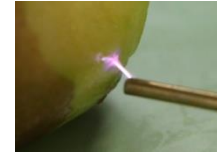
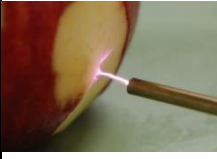
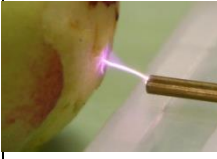
圖 20 橘子電擊後的表皮狀態

種類	葡萄柚	香蕉	葡萄	小番茄	蘋果
電弧狀態					
表皮狀態					

種類	西洋梨	奇異果	薑	洋蔥	紅蘿蔔
電弧狀態					
表皮狀態					

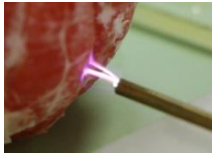
因為在蝕刻葡萄柚時，發現電弧顏色特別與其他9種蔬果顏色不同，從電弧顏色查詢資料發現 (焰色反應- 台灣Word, 2015)，可能是鈣離子受到電弧提供的能量激發，使得外層電子會被激發到能量較高的激發態。而因為處於激發態的外層電子不穩定而跳回到能量較低的基態。在這個過程中多餘的能量就會以光的形式放出而產生不同的波長的電磁波，如果這種電磁波的波長是在可見光波長範圍內 (波長為400nm~760nm)，就會呈現顏色讓我們看到。

因此我們想了解是果皮還是果肉所激發的的磚紅色電弧，於是先針對葡萄柚的果皮與果肉分開電擊，接下來也對甜橙、奇異果、蘋果、桃子的果皮與果肉分別電擊，結果如下表。


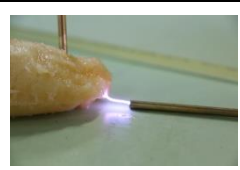
種類	葡萄柚	甜橙	奇異果	蘋果	桃子
電擊果皮					
電擊果肉					

從果肉與皮的電弧來比較，可以很清楚觀察到皮厚的水果電擊皮的電弧比電擊果肉較偏紅色，而皮薄的水果可能是因為電流通過時間相對比皮厚還短，所以電弧顏色偏紅不明顯。

另外因為厚皮的葡萄柚與甜橙都未把皮的白肉剝除乾淨，怕白肉影響電擊果肉時的結果，於是我們針對葡萄柚把白肉剝除再重新電擊，電弧結果如上表所示，其實與未剝除白肉時的電弧顏色差異不大。

葡萄柚	去白肉果肉
電擊狀態	

我們接下來想了解食物過熟時，表皮的鈣離子的影響，於是針對過熟香蕉的皮與果肉來做電擊，結果如右表。發現電擊未過熟香蕉原本未偏紅的電弧，在過熟的香蕉皮電弧反而整個偏紅。

香蕉	電擊果皮	電擊果肉
電擊狀態		

陸、結論

原本變因裡也包含對電弧顏色、溫度來探討，從所拍的照片觀察，其電弧顏色並沒有很明顯的差異，溫度也無法以紅外線感溫槍測得，因此只針對電弧最大距離及電弧電擊頻率與電流大小來做研究。

實驗一：電源電壓對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響

從一顆電池到三顆電池的電壓改變，電流與電壓的關係如下所示，假設空氣電阻固定的情況下，根據歐姆定律來看，電壓與電流應該會呈現正比關係，但結果在低電壓時有很大的差別，可看出低電壓的電流有很大的浮動區間，也表示低電壓時很可能造成空氣電阻的不穩定才會有這樣的現象，如下圖 21。

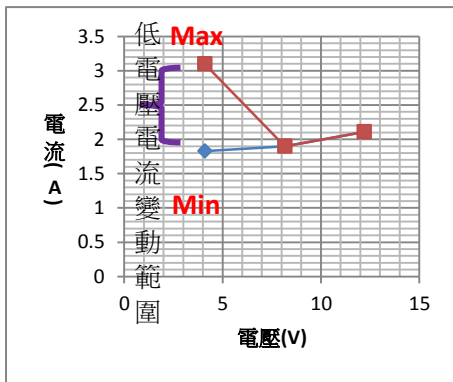


圖 21 不同電壓與電流的關係圖

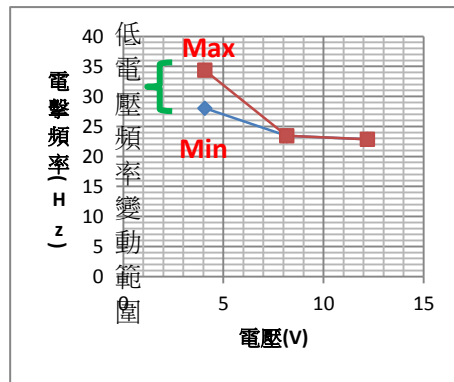


圖 22 不同電壓與頻率的關係圖

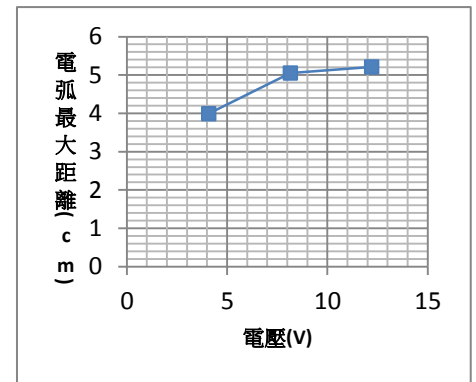


圖 23 不同電壓對電弧最大距離的關係圖

我們由電弧狀態綜合判斷推測電流、頻率會有浮動區間的可能性有兩點，一、低電壓所產生的電弧在同一點維持的時間較短，導致在導電棒上同時會有多點產生電弧，如果剛好這些電流在同一時間產生並形成並聯，這樣就會造成電流比較大的情況。如果電弧時間不同就

會造成電流有浮動的關係。再從頻率來看，可以發現低電壓比高電壓電擊頻率更高來佐證前面的說法。二、可能是因為本裝置未到起始電壓而導致電壓與電流不穩定。

而對於引電最大距離，電壓越大則引電距離越遠，也就是引電效果越好。

實驗二：材質差異對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響

找尋資料，材質最大的差別在於電阻率的不同，對歐姆定律來看，電阻率越小其電流越大，所以根據下表 2 來觀察電流的大小與最大電弧距離(引電效果)。

表 2 不同材質的電阻率

電擊棒材料	紅銅	黃銅	不鏽鋼301	鋁	石墨
電阻率(Ωm)	1.7×10^{-8}	8×10^{-8}	7.2×10^{-7}	2.82×10^{-8}	1.0×10^{-6}

根據歐姆定律 $V=IR$ ，電阻與電壓成反比關係，所以我們針對電流、最大距離、電擊頻率與電阻率的倒數來探討是否有呈現正比，關係圖如下圖24~26。

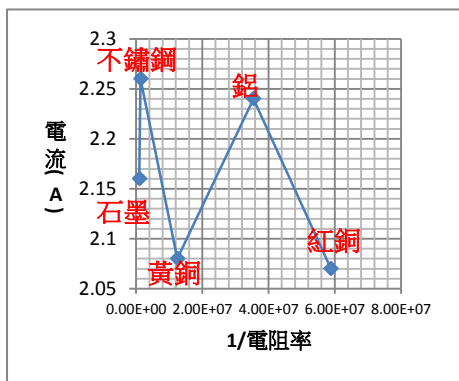


圖 24 不同材質的電阻率倒數對電流大小的關係圖

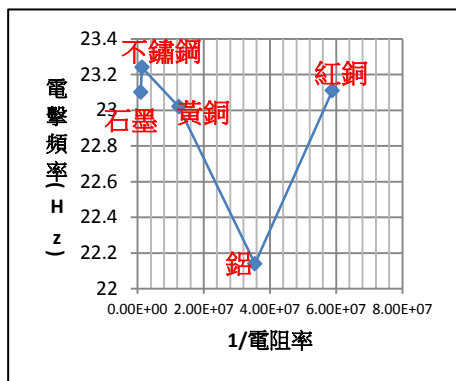


圖 25 不同材質的電阻率倒數對電擊頻率的關係圖

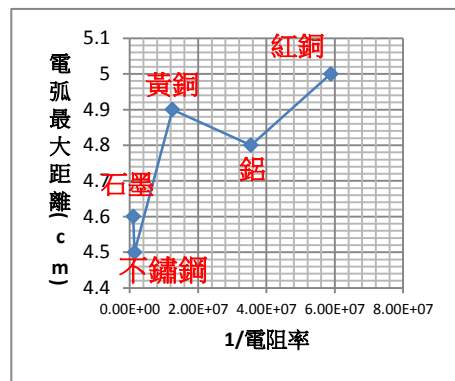


圖 26 不同材質的電阻率倒數對電弧最大距離的關係圖

可以發現電阻率對電流、頻率甚至電弧最大距離皆沒有一定的規律性，只能由圖中綜合分析得到最後結論，由電弧最大距離判斷較容易引電的避雷針由大到小排列為紅銅> 黃銅>鋁> 石墨 > 不鏽鋼。判斷也許為合金混合金屬以及鋁在表面形成氧化鋁，而影響實驗結果。未來的實驗可以針對材質的狀況來了解引電效果的原因。

實驗三-1與三-2：截面積的差異與空實心的差別

實驗二探討避雷針粗細的電流來看，根據判斷，電流大小與歐姆定律有關，所以根據 $V=IR$ 來看(自然與生活科技第五冊)，可以知道電壓固定的情況時電流越大其電阻越小，而避雷針都固定10cm，所以改變的變因在於截面積越大電阻越小其電流越大，於是就針對截面積與電流大小、頻率對實驗二的多角、實空心畫出圖表來比較(如下圖27)。

多角形截面積 = $0.5 \times n \times R^2 \times \sin(360/n)$ (R是外切圓的半徑，而 n 是多邊形的邊數量) (維基百科, 2015)，所以下表3為粗細金屬棒內的截面積對照。

表3 截面積對照表

形狀	四角棒 (直徑3mm)	六角棒 (直徑3mm)	空實心圓棒 (直徑1mm)	空心圓棒 (直徑1.5mm)	實心圓棒 (直徑2mm)
面積	4.5cm ²	5.85 cm ²	0.79 cm ²	1.77 cm ²	3.14 cm ²
形狀	空實心圓棒 (直徑3mm)	空實心圓棒 (直徑5mm)	實心圓棒 (直徑10mm)		
面積	7.07 cm ²	19.63 cm ²	78.54 cm ²		

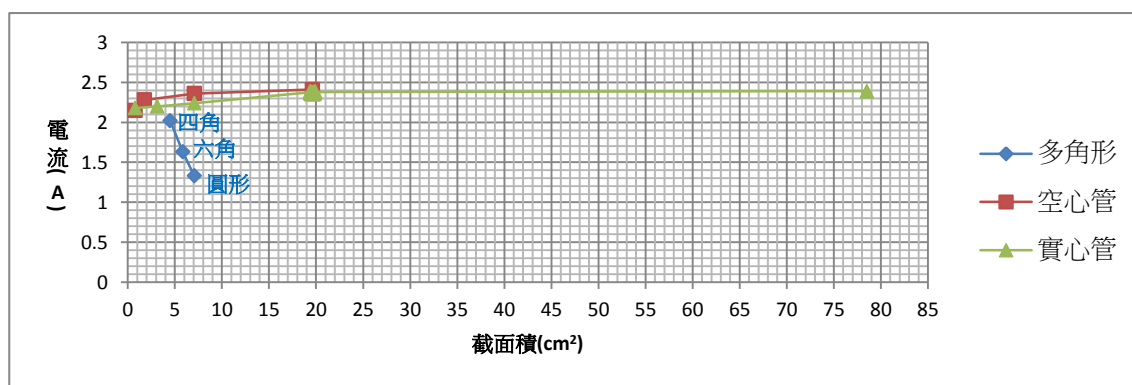


圖27 多角形、空實心管的截面積與電流的關係圖

對於**實心管**其截面積越大，其電阻越小，根據歐姆定律電壓固定的時候，電流與電阻成反比，又電阻與截面積成反比，所以電流與截面積應該要成正比關係，可以發現大約小於直徑接近5mm時是符合歐姆定律的且增加的幅度很小，但超過5mm時，電流增高效果變差，可能是因為以電池做為電源，其提供的電容有限之故。

而**空心管**很不可思議的是相同截面積下，電流比實心管還大，但在直徑很小時，效果與

實心差不多，直到超過直徑1.5mm時開始有明顯的增加，但當直徑接近5mm時，增加電流有趨緩的情形。電子在導線流動方式，有交流電電子傳遞在導體表面的集膚效應，還有直流電因正電的阻擋而產生的漂移式傳遞方式（導線中電子的移動, 2011），本實驗是模擬閃電的高壓直流，所以照理說應該是以漂移方式傳遞，但導線為空心時，猜測會迫使電子會在管內外表面傳遞而類似交流電的集膚效應，但不像集膚效應因為感應電場的抵銷而失去中間的能量，讓電子從空心外與內跑，進而減少漂移式傳遞的能量損耗而讓電流反而不比實心差，甚至好一點，或許這樣的流動方式更像屏蔽效應多一些。

在**多角形**的圖可以發現，正多邊形的截面積越大，其電流越小，那麼是什麼影響了應該有的結果？從外觀角度來判斷，發現角度越小時其電流越小，且四個角比六個角還差，所以發現了角的數目影響大於於角度大小所產生的影響。針對這點，繼續做實驗3-3來判斷角度的大小的影響。而電流小於實心管的部分，因測試時間與實心管時間不同，環境影響比較大，所以沒辦法判斷多角型與實心管的差別。

再由頻率來看，可以從下**圖28**同時證實，在實心管的部分，直徑越粗頻率越大且直徑小於5mm增加頻率比較明顯，空心管反而除了1.5mm比較大以外，其餘頻率都相對較小，而多角型在六角形頻率較小，不考慮圓棒來看，可發現角度比角數影響較大。對空心圓管對於實心圓棒來看以及角度較小的避雷針，電弧能較長時間的在同一點傳遞能量，而導致頻率較小之故。

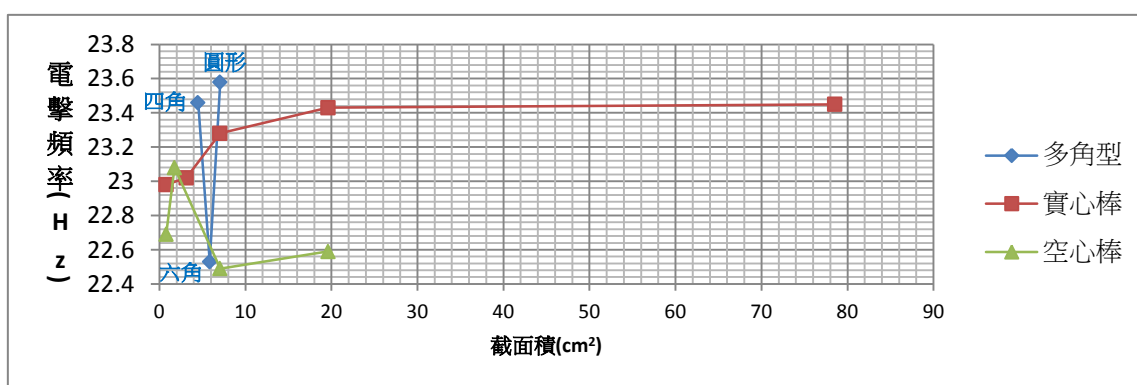


圖28 多角形、空實心管的截面積與電弧電擊頻率的關係圖

最後配合最大距離來看，由下頁**圖29**看結果，大面積的結果與電流的結果相似，也就是超過5mm時影響越小。而實心管與空心管很類似在特定面積（直徑3mm時）引電距離最大，

也就是說，其實空心引電效果不比實心管差，或許在電弧寬度大小與電擊管之間有一定比例的關係，雖然我們無法測量電弧寬度，但至少可以了解在對應實際閃電時，應該會有極限直徑的引電管，而不是越粗效果越好。

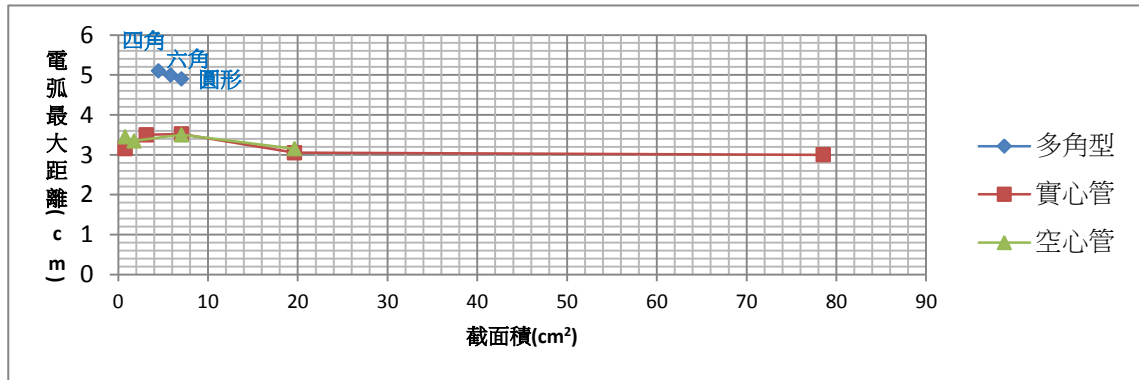


圖29 多角形、空實心管的截面積與電弧最大距離的關係圖

就以上實驗可以發現多角型的引電情形與空實心圓管有很大的不同，而四角甚至比六角柱體效果更好，既然角數不會幫助引電距離，到底甚麼讓四角效果這麼好？所以我們就另一個因素，也就是每個角的角度來探討，因為碳棒比較好削，所以我們利用碳棒，削成四種不同角度的碳棒，計算角度如右圖30，角度為 $2 \times \tan^{-1}(\frac{d}{L})$ ，利用查表找出 2θ 的大小。就角度從數據可得出下圖31。

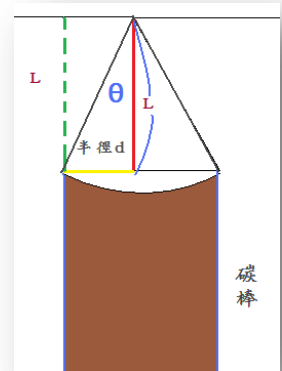


圖30 碳棒角度

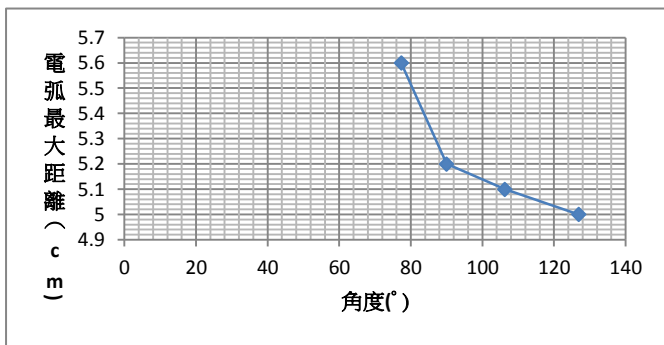


圖31 角度與電弧最大距離的關係

從圖可以發現，角度越小，其電弧最大距離越大，引電效果越好，而且越小效果越明顯，同時證實了電荷密度越高，也越容易吸引電弧。

綜合實驗三，我們可以做以下結論：

- 1、在沒有電容限制的條件下，圓形截面積避雷針的截面積越大，其電流越大，引電次數越多，而引電距離在空實心圓管直徑3mm時，引電效果越好。
- 2、空心管超過1.5mm時，其效果會比實心管稍好。
- 3、避雷針有尖角時，角度越尖效果越好，其效果大於截面積的影響。

另外從實驗一到實驗三可以發現，只有在形狀相同時，截面積越大電功率越大，另外也因為控制電壓之故，使得電功率與電流大致呈現正比關係，故後續實驗就不再探討。

實驗四：探討避雷針數目對電弧狀態、電弧電擊頻率與電流大小的影響

由電弧狀態可以發現，避雷針數目越多，電弧會開始分散，使得電弧的數目變多，同時電弧寬度也會變細，我們可以由避雷針數目與電流、電擊頻率的圖來判斷。

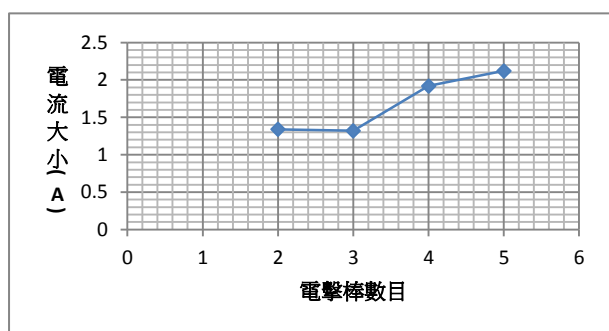


圖 32 避雷針數目與電流大小關係圖

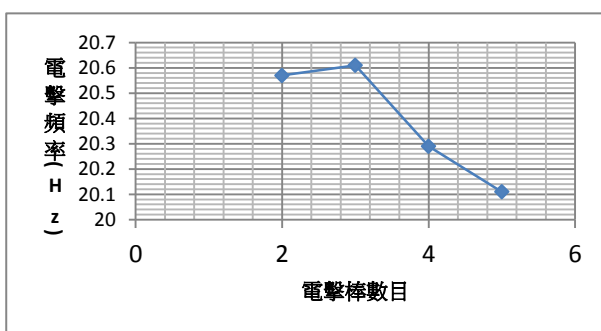


圖 33 避雷針數目與電擊頻率關係圖

從上圖32可以發現，在數目較多的避雷針中，雖然總電流較大，但將其平均可發現避雷針數目越多單一根的電流越小，並且從狀態發現，多根避雷針的存在下，電弧會同時分散在不同的避雷針，而不是一開始實驗前所推測的一次一根的輪動，所以這樣會讓電弧分流，而使電流變小。若是在避雷針的使用下，電流越小會提高安全性。而在電弧狀態觀察到避雷針越多根，能讓電弧更長時間與避雷針連結，而導致頻率較小，所以這讓我們判斷，其實在同一棟樓的避雷針越多，也有一定的引電效果。

實驗五：溫度濕度對電弧狀態、最大距離及電弧電擊頻率與電流大小的影響

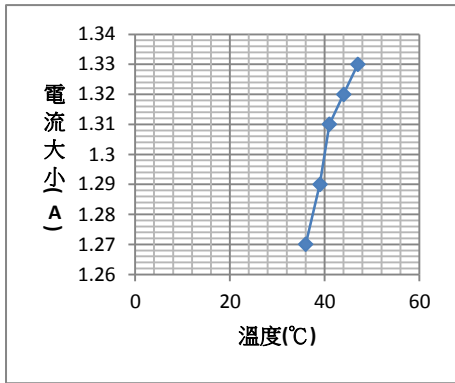


圖 34 溫度與電流關係圖

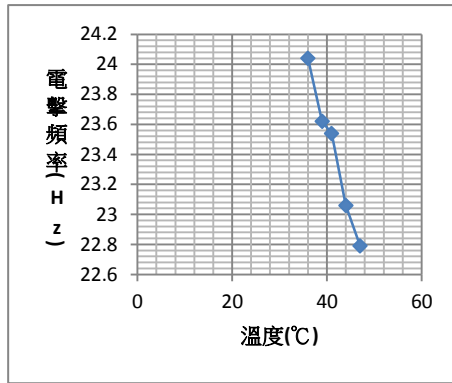


圖 35 溫度與電擊頻率關係圖

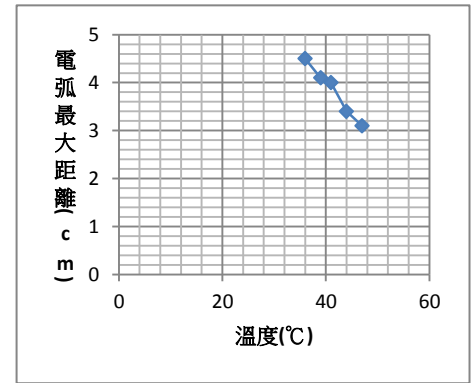


圖 36 溫度與電弧最大距離關係圖

從圖34~36來觀察，可發現溫度越高，電擊頻率越小，而導致電流較大，且最大距離越小，判斷可能是因為空氣隨著溫度越高，其空氣密度越小，而使得電阻越大，讓引電效果變差。

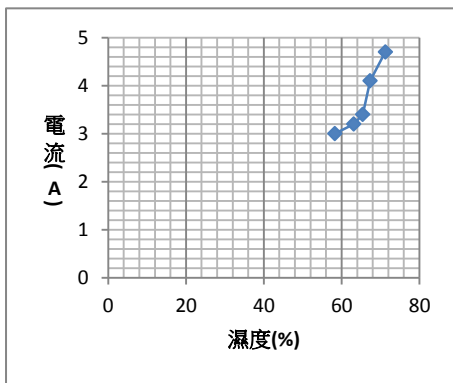


圖 37 濕度與電流關係圖

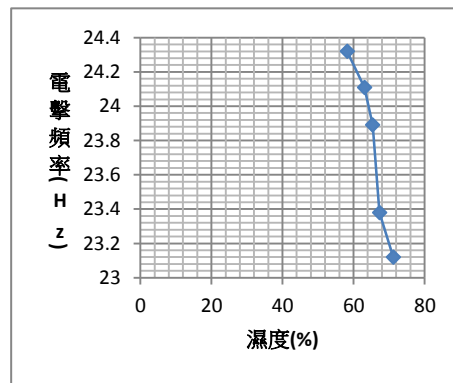


圖 38 濕度與電擊頻率關係圖

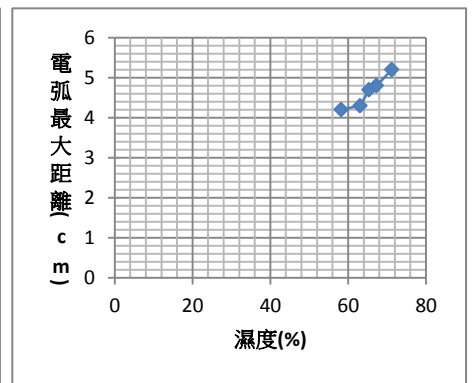


圖 39 濕度與電弧最大距離關係圖

從圖37~39來觀察，可以發現溼度越高，電擊頻率越小，而導致電流較大，且最大距離越大，判斷可能是因為空氣隨著濕度越高，導電性越佳，而使得電阻越小，讓引電效果變好。

實驗六：利用高壓電弧嘗試電鍍金屬

結論：

因本實驗電弧是以模擬閃電脈衝型式產生，故氧化還原比一般電解液的電鍍速度還快，但本實驗是在空氣中電鍍，導致還原金屬完又馬上與空氣中的氧產生氧化還原反應，改善的方法是這個實驗除非能在真空中電鍍，再導入結合的氣體，不然效果與所想的有很大的差距，但若是在真空中電鍍，勢必無法符合我們的初衷”電鍍帶著走”，期待有更好的方法能解決。

實驗七 利用高壓電弧嘗試乾式離子蝕刻

結論：

本實驗觀察蔬果乾式離子蝕刻的表現，所以先在11種蔬果中電弧打擊觀察，在電弧方面，可以觀察到水分較多的蔬果電弧較激烈，而針對在蔬果皮上，都有很明顯的蝕刻痕跡，但不同的蔬果表皮表現的不盡相同，發現的情況如下表。

表皮狀態	洞狀	範圍的凹狀	大周圍碳化
蔬果種類	薑、奇異果	葡萄、蘋果、小番茄、洋蔥、紅蘿蔔	香蕉、葡萄柚、橘子、西洋梨
蔬果共通點	可以發現表皮較乾，所以產生範圍較小	可以發現汁液較多，皮較薄	可以發現除了西洋梨外，皮較厚

另外在電弧打擊表面時可以發現，只有葡萄柚的電弧顏色偏亮紅色，其餘的是接近白紫色，可能是葡萄柚裡的金屬離子被電弧激發所造成顏色的差異，了解成分後對照金屬離子的焰色發現葡萄柚裡因含有大量的鈣離子而激發造成偏亮紅的顏色 (焰色反應, 2014)。下表提供每百克水果鈣離子的含量。

水果種類	桃子	紅蘿蔔	香蕉	奇異果	小番茄	洋蔥
鈣含量(mg)	5.6688	27.8399	3.2482	25.1576	13.5754	21.1329
水果種類	葡萄	蘋果	西洋梨	葡萄柚	甜橙	薑
鈣含量(mg)	5.6214	2.6825	8.2551	16.3052	35.2403	18.5450

(食品藥物消費者知識服務網-食品營養成分資料庫, 2012)

又發現其實大部分的水果都含有鈣離子，但一開始有激發紅色電弧只有葡萄柚，但葡萄柚鈣離子的含量還輸給紅蘿蔔跟甜橙，所以到底是什麼原因來影響電弧的顏色，我們懷疑是果皮所造成的影響，因為水果鈣離子含量大都以計算果肉為主，所以試著將葡萄柚的果肉與果皮分開電擊，果然發現電弧只有在果皮才有偏磚紅的顏色，在果肉則無。同時也發現柑橘類的表皮都有此現象，但蘋果、奇異果、桃子這些水果，表皮因為太薄，導電時電弧都走表皮表面，電弧顏色也沒柑橘科那樣紅，皮薄的水果，可能是因為電弧在表皮傳遞時間短，而無法激發金屬離子產生顏色。所以最後我們推測，柑橘類的表

皮鈣離子含量應該會比果肉高很多。

我們又針對過熟而變黑的水果來做實驗，水果是使用容易變黑的香蕉，可以發現香蕉皮變黑後，從電弧顏色與原先判斷，顏色差異很大，表皮的鈣離子應該比原來更多，推測有兩種可能，一是水果變黑後，水果的細胞膜破裂，而導致鈣離子跑出來，二是變黑後，表皮變軟變溼，而導致電弧能在表皮時間長一點，而使金屬離子激發顏色出來。

柒、未來展望

在實驗中可以發現，空心管的引電程度是不輸實心的，未來可以嘗試使用空心管來當避雷針的主軸，其餘添加尖銳角度的旁枝，可以節省材料，但用在家庭用電的導線上面，不知是否仍然也有其效果，未來可以朝這個方向研究，這樣除了可以節省大量的能量損耗，同時也減少金屬資源的使用。

捌、參考資料

- 1、嚴大任，2016，半導製程與原理與概論第八章蝕刻技術。
- 2、自然與生活科技第五冊第四章電流、電壓與歐姆定律，(2015)，翰林出版社。
- 3、梁衡.(2008). 數理化通俗演義. 凡異出版社.
- 4、維基百科.(2015年12月15日). 2016年3月29日 擷取自
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%A2%E7%A7%AF#.E8.A1.A8.E9.9D.A2.E7.A9.8D>
- 5、導線中電子的移動.(2011年1月6日). 2016年3月30日 擷取自 科學 on line 科技部高瞻自然科學教育平台: <http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=19112>
- 6、焰色反應.(2014年6月1日). 2016年4月8日 擷取自 維基百科:
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%84%B0%E8%89%B2%E5%8F%8D%E5%BA%94>
- 7、焰色反應- 台灣 Word.(2015). 2016年6月1日 擷取自 台灣 Word:
<http://www.twword.com/wiki/%E7%84%B0%E8%89%B2%E5%8F%8D%E6%87%89>
- 8、食品藥物消費者知識服務網-食品營養成分資料庫.(2012年8月9日). 2016年6月1日 擷取自 衛生福利部食品藥物管理署: <https://consumer.fda.gov.tw/Food/TFND.aspx?nodeID=178>

【評語】 030104

研究取材內容豐富，題材趣味性高，並有極佳之發展性，若就材料之功函數、電弧之光譜分析及電弧媒材之電阻控制再進行深入分析研究，將有大成。