

中華民國第 57 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

030120

上帝寶劍—探討鐵屑效應與電漿蝕刻的現象

學校名稱：南投縣立大成國民中學

作者： 國一 柯佳宏 國一 謝易峻	指導老師： 梁敏芳 徐敏益
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：鐵屑效應、電漿蝕刻

摘要

我們利用鐵屑效應自製檢波器，發現連續性脈衝訊號檢波器(打火槍、電漿球發射器及零電壓諧振軟開關)比非連續性脈衝訊號檢波器(壓電素子)激活率高，在檢波器中以不同直徑大小的鋁球填充時，激活率的表現為：大鋁球>中鋁球>小鋁球，而鋁粉無法激活，當小鋁球的重量達 5 公克時較易激活，而大鋁球、中鋁球則不受影響，但電弧數量多寡對檢波器的激活率無顯著影響。發射器的感應距離，以第四代(ZVS)的效果最佳，可達 99 公分。以此裝置進行電漿蝕刻，我們可以看出銅蝕刻洞較淺，但顏色較深，而鋁蝕刻洞較深，且顏色較深，鐵蝕刻洞不僅較淺，而顏色也較不明顯，當電漿蝕刻的時間越久或次數越多，會使蝕刻痕越深；放置 24 小時，蝕刻顏色會變深。

壹、研究動機

我是一個十分喜歡 DIY 的人，喜歡把壞掉的電器拆下來一探究竟，也喜歡看相關的影片以及書籍，去年暑假，我偶然在 YouTube 上看到一部片名叫「マルコーニ電信機を作る」(製作馬可尼的無線電裝置)，影片內容是用杯子、鋁箔紙、鋁箔球製作檢波管，負載為燈泡，之後用壓電素子去激活它，燈泡亮代表導通，敲擊檢波管後則恢復原本未被激活的狀態。而在做實驗的時候，發現打火的導線上總是會留下一個個類似融掉的洞與黑色痕跡，後來我們才知道那是因為電弧打到某一個物體時產生高溫所留下的痕跡。經過這些事後，我就不停的思考著：「如何提高檢波管的激活率?」、「這種檢波管除了應用在檢驗 AM 脈衝電波外還有甚麼應用?」、「電漿蝕刻如何應用在我們的生活中?」。為了找出讓檢波管的靈敏度提升的關鍵，並且想讓電漿蝕刻能應用在生活中，因此我找了一位也同感興趣的同學，開始了對鋁粉檢波管與電漿蝕刻的研究。

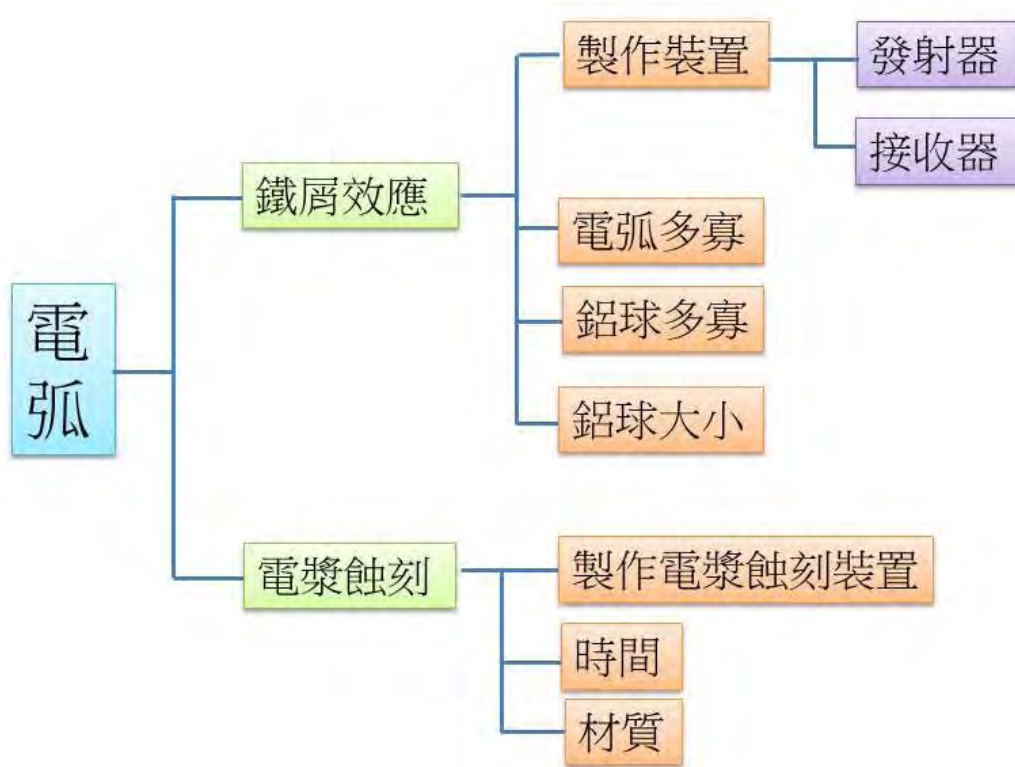
貳、研究目的

- 一、改善鐵屑效應實驗的穩定性
- 二、自製檢波器
- 三、探討檢波管的特性
- 四、製作電漿蝕刻裝置
- 五、探討電漿蝕刻的特性

參、實驗器材

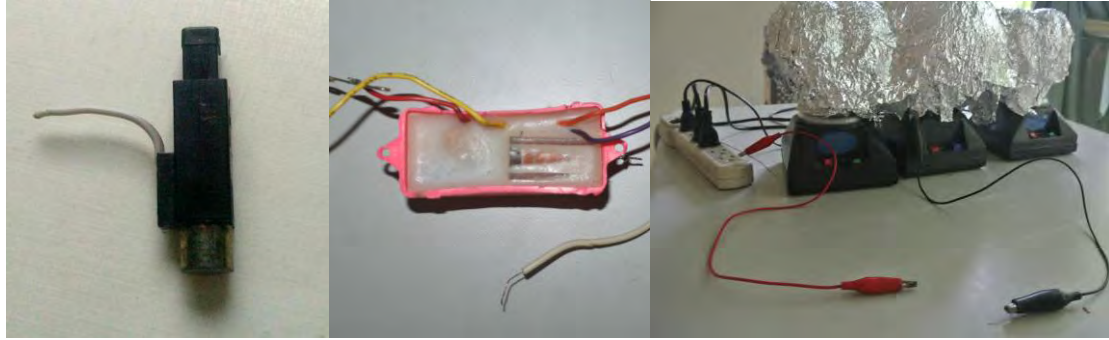
- | | |
|-----------------|-----------------|
| 一、電漿球 | 六、3 種金屬片(銅、鋁、鐵) |
| 二、鋁箔紙 | 七、相機(Nikon J5) |
| 三、指針式電錶(HA-380) | 八、顯微鏡 |
| 四、檢流計 | 九、錶玻璃 |
| 五、天平 | 十、電子材料 |

肆、實驗方法



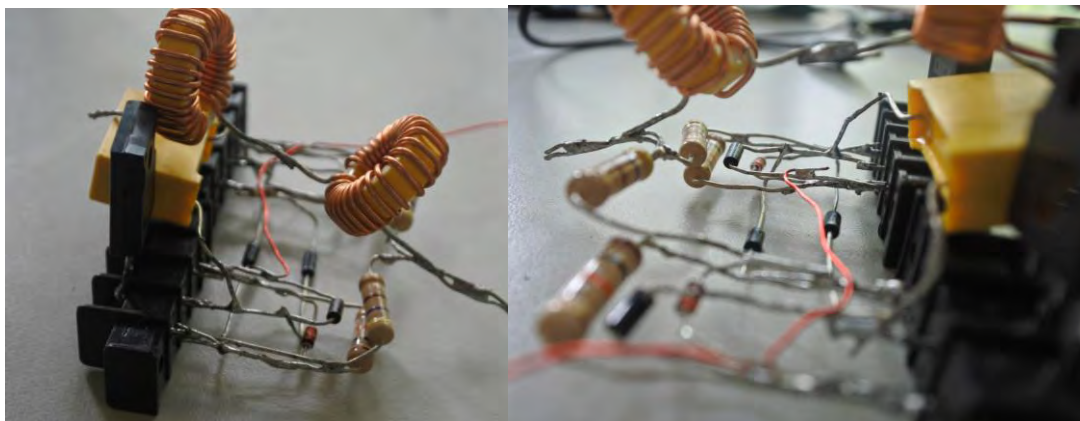
一、改善鐵屑效應實驗的穩定性(發射器的設計):

我們在實驗的過程中發現發射器的穩定性是造成檢波管不容易成功激活的主要原因，在探討問題的過程中，我們總共研發了四代的發射器，第一代的壓電素子發射器(圖一)啟動不容易，所以手經常會壓到很痛也不一定能啟動成功，也不便於調整電弧的大小；所以我們使用打火槍作為第二代的發射器(圖二)，克服不易啟動的缺點，但是我們發現打火槍發射器利用電容充電所產生的脈衝來啟動線圈以產生高壓電，所產生的電磁波頻率變化大，較難以控制產生穩定的電磁波。所以我們又研發出以三顆電漿球來當第三代的發射器，第三代電漿球發射器(圖三)的構造是將三顆電漿球用鋁箔紙包起來之後串連，開啟開關後就可以與地線之間產生電弧，原理是電漿球與鋁箔紙會產生電容，而我們依據電流的隔直通交原理將玻璃罩內的高壓電取出來，但因為這個電容的容量不大，所以能量有一點耗損，造成電弧的長度變短，也造成電弧不穩定。

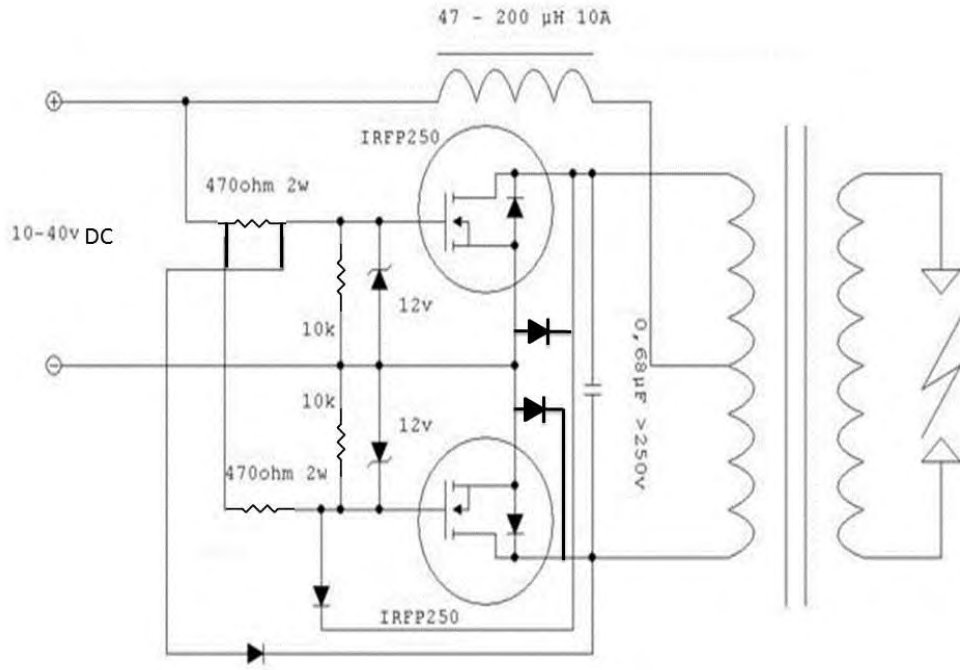


圖一、壓電素子發射器 圖二、打火槍發射器 圖三、電漿球發射器

我們以零電壓諧振軟開關(ZVS)作為波型產生電路來產生電弧，也就是第四代的發射器(圖四)，它的優點是低耗能，且能產生穩定的電弧，是良好的電磁波發射器。我們所使用的波形產生器為零電壓諧振軟開關(zero voltage switching；ZVS)，可以由ZVS的電路圖(圖五)看出ZVS電路是由兩個場效電晶體、兩個齊納二極體、兩個二極體、四個電阻、一個電容、一個電感組成。ZVS電路的原理是當電流分通過兩個場效電晶體時，一定會有一方的電流會先通過其中一個場效電晶體，而兩個場效電晶體就會將電流拉來拉去，產生一個震盪的效果。而震盪就會傳到返馳式變壓器的其中一個初級線圈，而另外的初級線圈會產生感應電流，而這個感應電流又與電容產生一個LC震盪電路，而另外的初級線圈又會產生勵磁，讓初級線圈產生電流，於是就這樣一直重複。而圖中的變壓器我們就使用返馳式變壓器，因為返馳式變壓器的初級線圈匝數是可以變動且容易更換的，這樣就可以利用初級線圈的匝數來控制輸出端的電壓及電流的大小，因此利用返馳式變壓器可以讓實驗的方便性、安全性、可變性以及穩定度都大幅提高。我們依照這張電路圖稍微修改，修改的點在兩個場效電晶體的D極管腳(drain)以及S極管腳(source)都加上一個二極管負極在D極管腳，修改後的電路圖則是與圖五一樣，這樣一來就會更穩定，也可以預防兩個齊納二極體燒毀，並延長電路中齊納二極體的壽命。



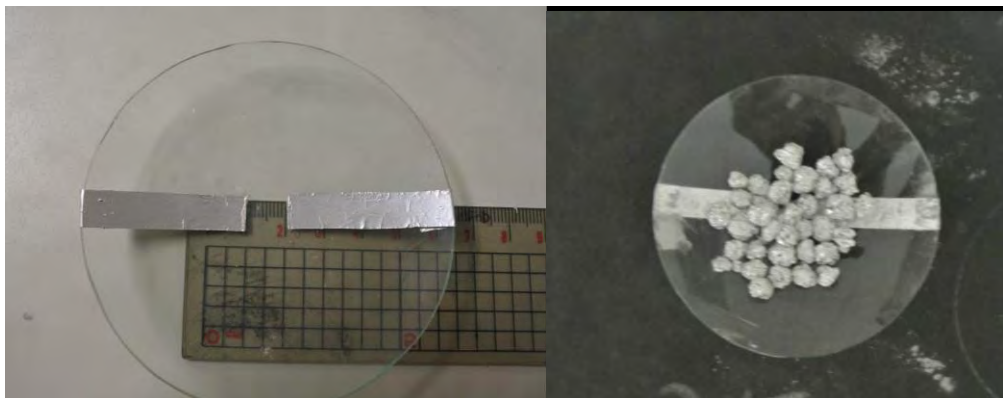
圖四、零電壓諧振軟開關(第四代)-零電壓諧振軟開關(ZVS)



圖五、改裝零電壓諧振軟開關電路圖

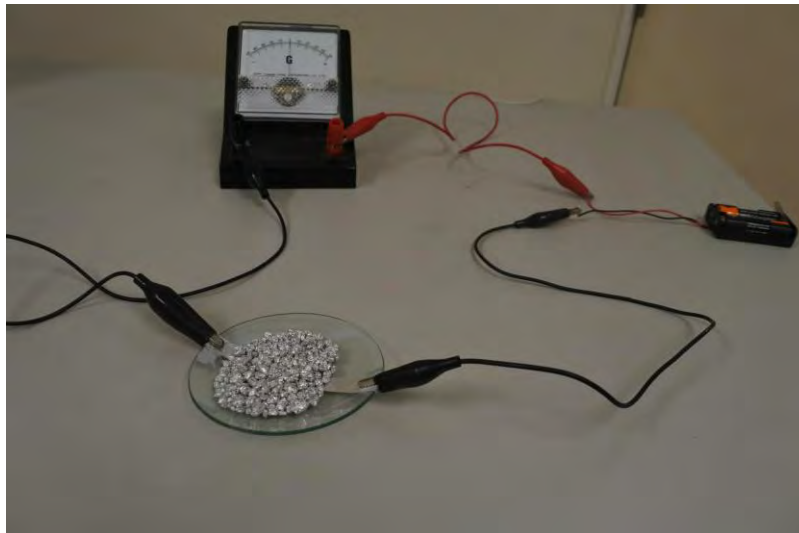
二、製作檢波器與激活現象

我們發現要提高形成鐵屑效應的機率，需要電極與填充物形成兩個以上的接觸點，因此為了避免接點太少形成短路，我們的檢波器的設計為首先將錶玻璃當作檢波管的容器，之後再將兩片鋁箔紙黏在錶玻璃凹面，兩片鋁箔紙之間的距離為1公分(圖五)。我們之所以將兩片鋁箔紙之間的距離設定為1公分，是因為大鋁球的平均直徑為0.9公分，至少要兩個以上的鋁球接觸才能形成通路，而更小直徑的鋁球，則需要更多的接觸點。

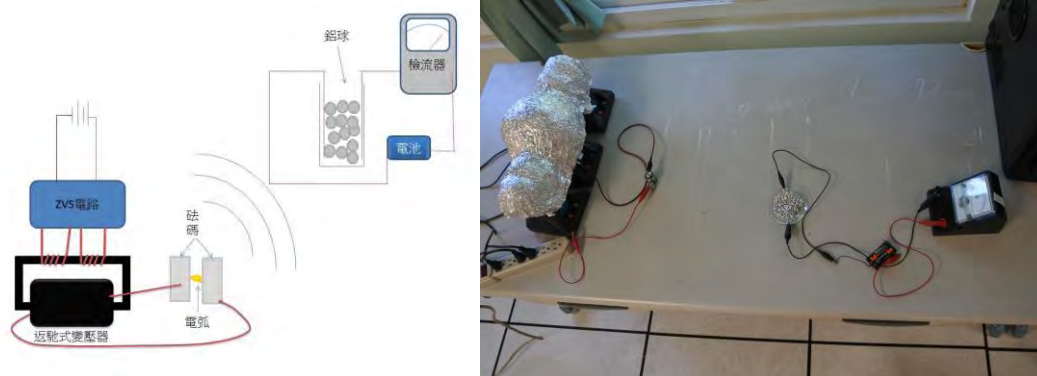


圖五、檢波器的設計，右為已填充鋁球

我們利用發射器在形成電弧時發出電磁波引起檢波器產生鐵屑效應而形成通路(激活現象)，使得檢流計偏轉，直到敲擊檢波器形成斷路，檢流計歸零，實驗裝置如圖六。再將步驟一的發射器與檢波器放置適當距離，進行實驗(圖七)。



圖六、檢波器與檢流計形成的電路



圖七、發射器與檢波器激活示意圖

三、探討檢波管的特性:

我們比較連續脈衝訊號(第二代發射器、第三代發射器、第四代發射器)和非連續脈衝訊號(第一代發射器)、鋁球大小、填充物數量、電弧多寡與各代發射器，這五個因素對檢波管的激活率是否有影響。

(一)實驗一：探討連續脈衝訊號和非連續脈衝訊號對檢波管的激活率是否有影響

我們為了看出連續脈衝訊號(打火槍)和非連續脈衝訊號(壓電素子)對激活率有多大的影響，我們以5g的鋁球填充檢波器，一個電弧數量，將9公分的距離作為一個距離單位，依次增加為0、9、18、27、36.....90公分，共11種距離，這些間隔距離是指發射器與接收器之間的距離，分別再用連續脈衝訊號(打火槍)和非連續脈衝訊號(壓電素子)的發射器激活檢波管，每個距離，重複20次，計算每個距離的激活率，比較連續脈衝訊號(打火槍)和非連續脈衝訊號(壓電素子)對檢波管的激活率是否有影響。

(二)實驗二：探討填充物顆粒大小對檢波管的激活率是否有影響

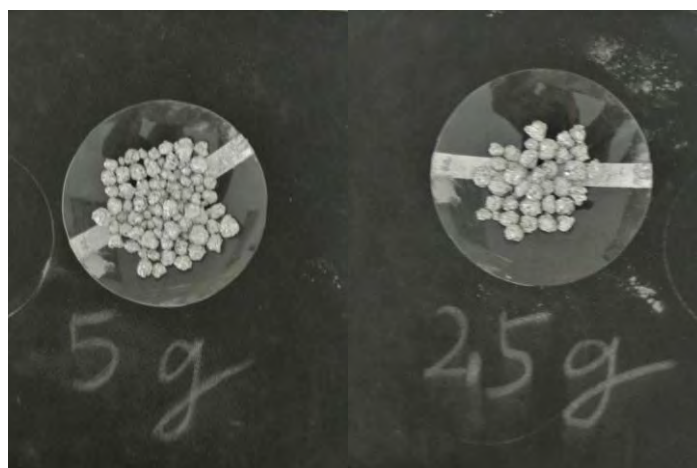
我們為了看檢波管的激活率是否受到出填充物顆粒大小的影響，因此我們分別將填充物顆粒分成大鋁球(直徑約9mm)、中鋁球(直徑約6mm)、小鋁球(直徑約4mm)及鋁粉(圖八)，將此四種尺寸的鋁球秤重量5公克，再填裝入自製檢波器後，用不同代的發射器激活檢波管，每個條件重複20次，計算激活率，比較鋁球的直徑大小是否對檢波管的激活率產生影響。



圖八、大、中、小鋁球及鋁粉

(三)實驗三：探討填充物重量對檢波管的激活率是否有影響

我們為了要看出檢波管的激活率是否受到檢波管內的填充物重量影響，因此我們將三種鋁球及鋁粉分成5公克及2.5公克(圖九)這兩種重量作比較，填裝入自製檢波管後用不同代的發射器激活它們，每個條件重複20次，記錄實驗結果後比較三種鋁球以及鋁粉的重量是否對激活率有影響。

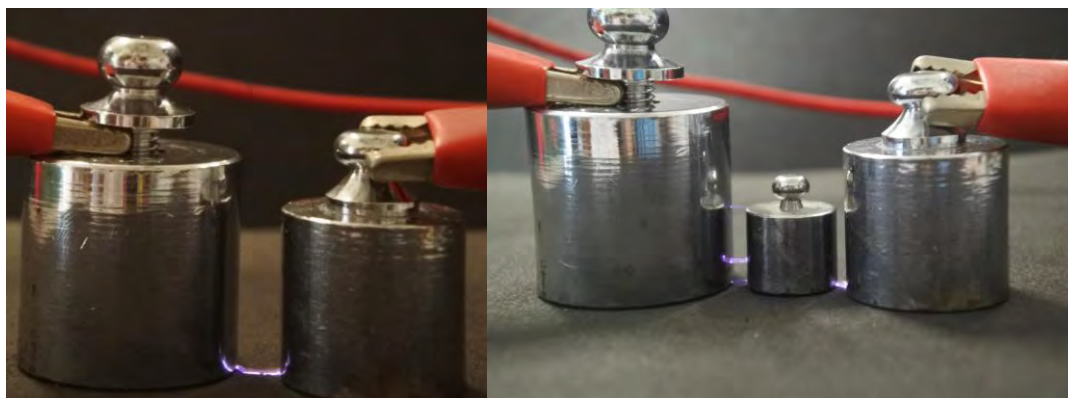


圖九、5g和2.5g的中鋁球

(四)實驗四：探討電弧多寡對檢波管的激活率是否有影響

我們為了要看出同時間發射器與地線之間所發生尖端放電現象的多寡是否會對檢波管的激活率造成影響，因此我們將發射器與地線之間放置了二至四個砧

碼，兩個砝碼之間可以產生一個火花間隙，三個砝碼之間可以產生兩個火花間隙，四個砝碼之間可以產生三個火花間隙(圖十)，因此電弧的長短是由我們的各代發射器所能打出來最長的電弧作為實驗用的電弧長度。



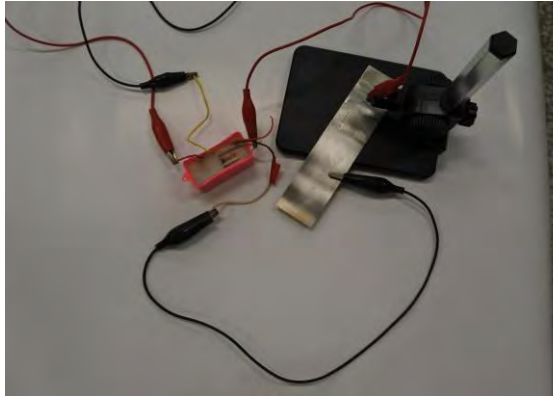
圖十、左為一個火花間隙(電弧)，右為兩個火花間隙(電弧)

(五)實驗五：探討各代發射器對不同距離的檢波管的激活率是否有影響

我們為了看出各代發射器對激活率有多大的影響，分別以5公克的大、中、小鋁球及鋁粉填充於檢波器，以一個電弧，距離間隔分別為9、18、27、36.....126公分，記錄實驗結果後比較各代發射器是否對檢波管的激活率有影響。

四、製作電漿蝕刻裝置:

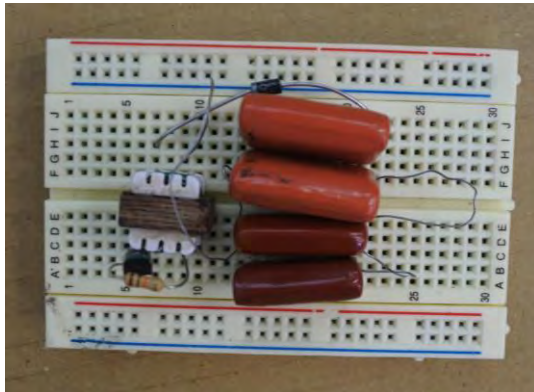
我們發現電弧打到的物體表面會產生一些黑色的的痕跡，後來才知道這些電弧打到導體留下的痕跡就叫「電漿蝕刻」，我們一開始以打火槍作為電漿蝕刻裝置(圖十一)，但因為打火槍是以電容充電所產生的脈衝來啟動線圈產生高壓電，所以電弧會一直亂跳、不容易集中於同一點，不容易精準的刻出圖畫。第二代的電漿蝕刻裝置是電漿球(圖十二)，第二代和第一代相比，雖然電漿球的電弧不如打火槍的電弧長，但因電漿球的頻率比打火槍的頻率高出許多，因此電弧較不會亂跳、較容易集中於同一點，所以較容易精準的刻出圖畫，但是產生的電流較小，蝕刻痕仍淺。因此我們以電晶體、電阻、電容、變壓器、二極體組成了直流電電漿蝕刻裝置，即是第三代電漿蝕刻裝置(圖十三)，能產生較大電流及穩定性高的電弧，能精準的蝕刻圖案。操作時是將珠針連結鱷魚夾，另一鱷魚夾連結於金屬板，連結成通路，即可於金屬板上進行蝕刻(圖十四)。



圖十一、第一代電漿蝕刻裝置(打火槍)



圖十二、第二代電漿蝕刻裝置(電漿球)

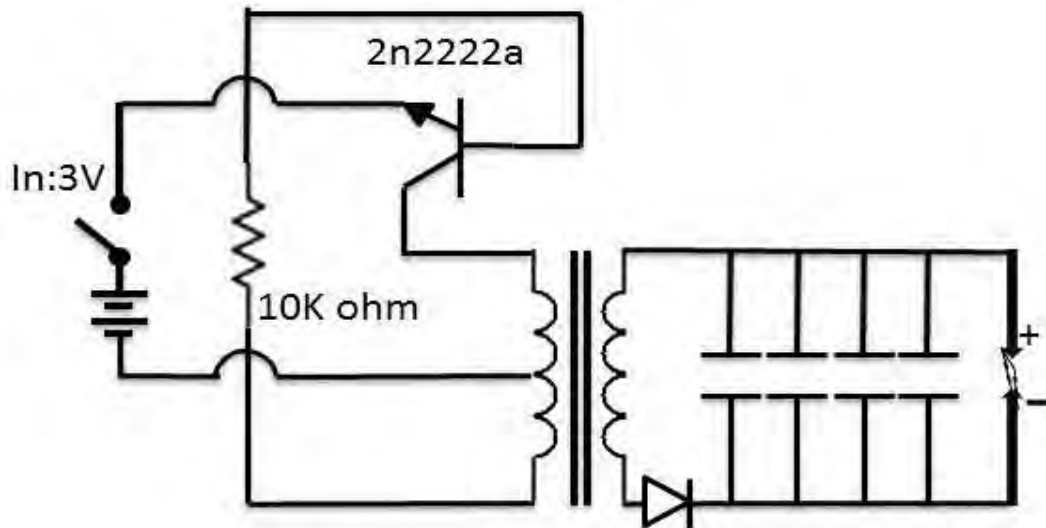


圖十三、第三代電漿蝕刻裝置(自組電路)



圖十四、電漿蝕科操作圖

我們自製的第三代電漿蝕刻裝置，由電路圖(圖十五)上看到用三極管以及電阻所構成的正反饋的單管自激電路，這個電路給變壓器提供了一個波升壓，升壓後將波整流成直流電，之後用這個直流電給電容組充電，之後再將電容組短路時就會產生電弧以及火花，這個裝置所產生的電弧和電壓比之前的打火槍與電漿球還小，也因為不是交流電所以沒辦法產生連續的火花，但因為是直流電幫電容組充電，所以電流比打火槍與電漿球大，因此較容易進行電漿蝕刻。



圖十五、自製直流電裝置電路圖

五、探討電漿蝕刻的特性:

我們在電漿蝕刻的實驗中探討了不同金屬片的材質蝕刻特性、放置一段時間後電漿蝕刻痕跡的變化、不同的電漿蝕刻裝置產生的蝕刻痕差異，及嘗試利用不同輔助裝置進行電漿蝕刻。

(一)實驗六：探討不同金屬材質對電漿蝕刻的影響

我們為了看出不同的金屬片是否對電漿蝕刻的結果有差異因於是我們找來三種金屬片分別為銅、鋁、鐵(圖十六)，分別以第二代和第三代的電漿蝕刻裝置進行電漿蝕刻，再利用手持式顯微鏡進行刻痕比較。



圖十六、銅、鋁、鐵片

(二)實驗七：探討不同蝕刻時間對電漿蝕刻痕的影響

我們為了看出不同的尖端放電次數對電漿蝕刻的結果有何差異，於是我們將放電時間調整為1分鐘以及30秒，因為它是交流電所以控制放電時間即可控制電漿蝕刻次數。

(三)實驗八：探討成品放置一段時間後電漿蝕刻的痕跡是否有所改變

先將電漿蝕刻完的成品用手持式顯微鏡拍照後，再將每個成品放置24小時，24小時後再用手持式顯微鏡拍照並比較。

(四)實驗九：探討不同蝕刻裝置對電漿蝕刻的影響

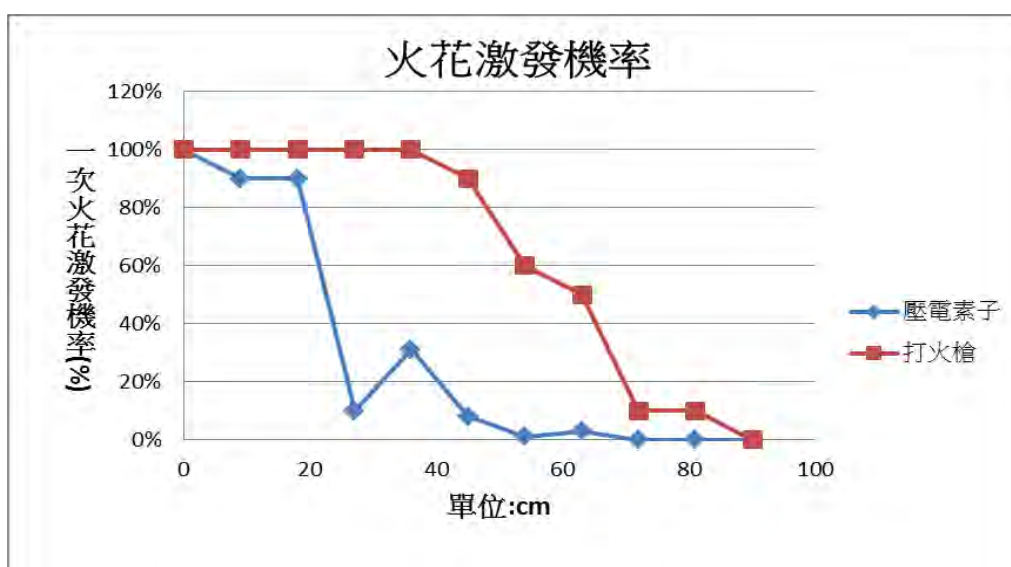
因第一代電漿蝕刻裝置不易控制蝕刻圖形，因此我們比較第二代電漿蝕刻裝置與第三代的電漿蝕刻裝置與在金屬片上刻出洞，再用手持式顯微鏡拍照並比較。

伍、實驗結果

一、探討檢波管的特性

(一)實驗一：探討連續脈衝訊號和非連續脈衝訊號對檢波管的激活率是否有影響

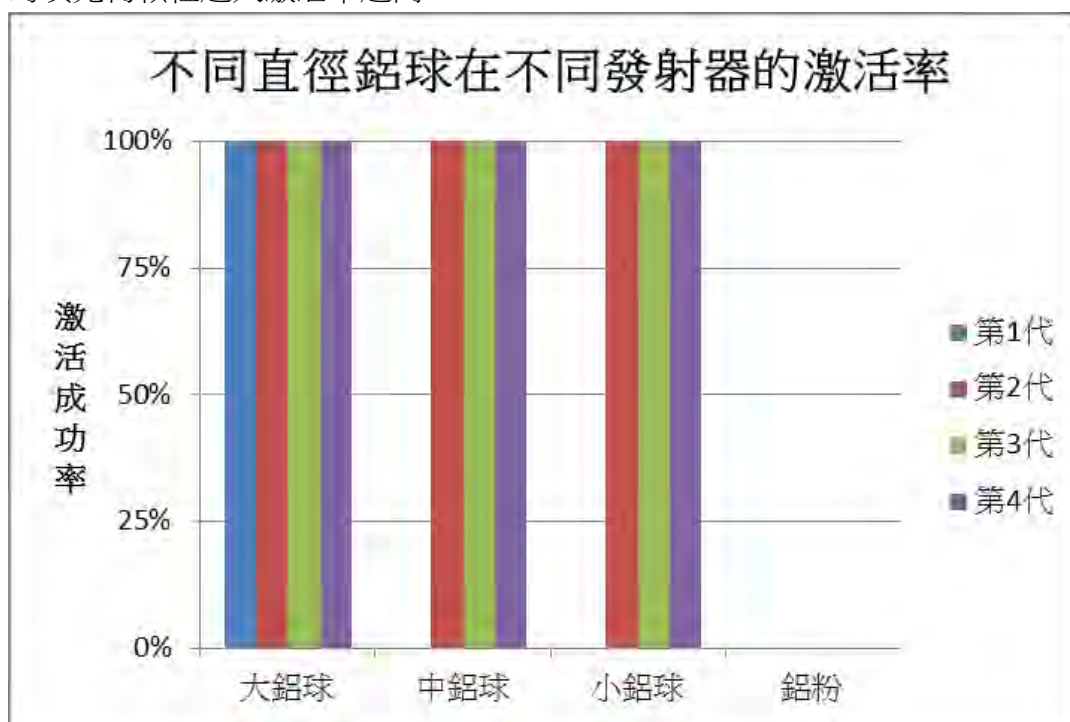
根據圖十七，我們發現連續脈衝訊號的激活率在 36 公分之前都保持在 100%，在 36 公分之後就有下降的趨勢。而非連續脈衝訊號的激活率在 20 公分之前的激活率都在 90%以上，而 20 公分之後激活率就有大幅降低的趨勢。這個實驗中所填充的鋁球有大有小，於是在後面的實驗中我們將填充物的大小作更明確的分類，讓實驗的結果更具準確性。在實驗中發現到 20 公分以內的距離，不管是連續性或非連續性脈衝的激活率都很高，所以之後如果有需要固定距離的實驗時，我們就將 20 公分當作發射器以及接收器之間的距離。



圖十七、連續脈衝訊號(打火槍)和非連續脈衝訊號(壓電素子)對檢波管的激活率

(二)實驗二：探討填充物顆粒大小對激活率的影響

我們由圖十八的結果發現：第一代發射器的實大鋁球的激活率為100%，也就是說每次都會被激活，而中鋁球小鋁球和鋁粉的激活率都為0%，也就是說從未激活過。第二代發射器則是中鋁球、小鋁球以及大鋁球的激活率都為100%，但是鋁粉的激活率為0%。第三代發射器和第四代發射器的狀況都和第二代相同。由以上的實驗結果我們推測第一代發射器(非連續性脈衝)所產生的電弧沒有第二代、第三代以及第四代發射器(連續性脈衝)的電弧穩定，因而造成中鋁球、小鋁球和鋁粉的激活率皆為0%。另外，我們發現四種發射器對鋁粉的激活率皆為0%，我們認為是鋁粉的體積太小且接觸點太多，當電磁波引起鐵屑效應時，容易造成斷路，才造成鋁粉激活率為0%。由我們的實驗結果發現檢波管內的填充物顆粒越大激活率越高。



圖十八、不同直徑的鋁球顆粒檢波器與四代發射器的激活率比較

(三)實驗三：探討填充物重量對檢波管激活率的影響

我們由表一發現，大鋁球都不受到重量(數量)多寡的影響，而對中鋁球來說數量較少時，激活率有較好的表現。而對小鋁球而言，在第一代發射器，量較少時，激活率較高，在第四代發射器，量少時，激活率較高。而鋁粉則都沒有激活率，於是我們推測，填充物的數量對中鋁球、小鋁球的影響較大。

表一、不同填充物重量對檢波管激活率的影響

	第一代發射器	第二代發射器	第三代發射器	第四代發射器
大5公克	100%	100%	100%	100%
大2.5公克	100%	100%	100%	100%
中5公克	0%	0%	100%	100%
中2.5公克	0%	100%	100%	100%
小5公克	0%	100%	100%	100%
小2.5公克	100%	100%	100%	0%
粉5公克	0%	0%	0%	0%
粉2.5公克	0%	0%	0%	0%

(四)實驗四：探討電弧多寡對激活率的影響

我們由表二至表五發現，在大鋁球的實驗中(表二)，四種發射器分別以1個電弧、2個電弧以及3個電弧進行實驗，激活率皆為100%。中鋁球(表三)以第二代和四代的發射器以1個電弧、2個電弧以及3個電弧進行實驗時，激活率皆為100%，但第一代的1個電弧和第三代的2個電弧，則無法激活檢波器，表現較不穩定。小鋁球(表四)以第二代和第三代的發射器分別以1個電弧、2個電弧以及3個電弧進行實驗時，激活率皆為100%，但第四代的1個電弧和第一代的三種電弧，則無法激活檢波器，表現更不穩定。以鋁粉填充時則皆無法激活檢波器(表五)。綜合以上結果顯示電弧的數量多寡對激活率無顯著影響，激活率的高低主要和填充物的顆粒大小與發射器的種類較有關連。

表二、不同發射器的電弧多寡對大鋁球激活率的影響

	第一代發射器	第二代發射器	第三代發射器	第四代發射器
1 個電弧	100%	100%	100%	100%
2 個電弧	100%	100%	100%	100%
3 個電弧	100%	100%	100%	100%

表三、不同發射器的電弧多寡對中鋁球激活率的影響

	第一代發射器	第二代發射器	第三代發射器	第四代發射器
1 個電弧	0%	100%	100%	100%
2 個電弧	100%	100%	0%	100%
3 個電弧	100%	100%	100%	100%

表四、不同發射器的電弧多寡對小鋁球激活率的影響

	第一代發射器	第二代發射器	第三代發射器	第四代發射器
1 個電弧	0%	100%	100%	0%
2 個電弧	0%	100%	100%	100%
3 個電弧	0%	100%	100%	100%

表五、不同發射器的電弧多寡對鋁粉激活率的影響

	第一代發射器	第二代發射器	第三代發射器	第四代發射器
1 個電弧	0%	0%	0%	0%
2 個電弧	0%	0%	0%	0%
3 個電弧	0%	0%	0%	0%

(五)實驗五：探討各代發射器對不同距離的檢波管激活率是否有影響

我們由表六至表九發現，第一代發射器的最高激活率可到27公分(中鋁球)(表七)，第二代發射器的最高激活率可到54公分(大鋁球)(表六)，第三代發射器的最高激活率可到81公分(大鋁球)(表六)，第四代發射器的最高機活率則是到達99公分(大鋁球)(表六)。由以上實驗可以看出第四代發射器的激活率最佳。

表六、不同發射器在不同距離對大鋁球激活率的影響

	第一代發射器	第二代發射器	第三代發射器	第四代發射器
9公分	100%	100%	100%	100%
18公分	100%	100%	100%	100%
27公分	0%	100%	100%	100%
36公分	0%	100%	100%	100%
45公分	0%	100%	100%	100%
54公分	0%	100%	100%	100%
63公分	0%	0%	100%	100%
72公分	0%	0%	100%	100%
81公分	0%	0%	100%	100%
90公分	0%	0%	0%	100%
99公分	0%	0%	0%	100%
108公分	0%	0%	0%	0%

表七、不同發射器在不同距離對中鋁球激活率的影響

	第一代發射器	第二代發射器	第三代發射器	第四代發射器
9公分	100%	100%	100%	100%
18公分	100%	100%	100%	100%
27公分	50%	100%	50%	100%
36公分	0%	50%	0%	0%
45公分	0%	0%	0%	0%

表八、不同發射器在不同距離對小鋁球激活率的影響

	第一代發射器	第二代發射器	第三代發射器	第四代發射器
9公分	100%	100%	100%	100%
18公分	0%	50%	0%	30%
27公分	0%	0%	0%	0%

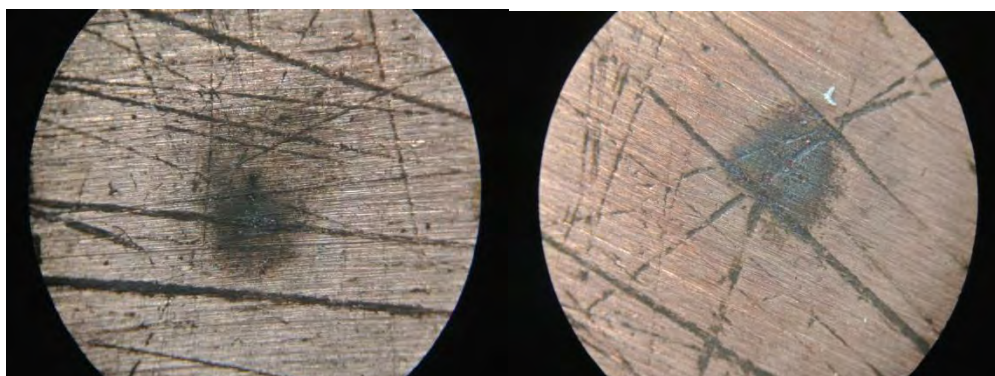
表九、不同發射器在不同距離對鋁粉激活率的影響

	第一代發射器	第二代發射器	第三代發射器	第四代發射器
9公分	0%	0%	0%	0%
18公分	0%	0%	0%	0%
27公分	0%	0%	0%	0%

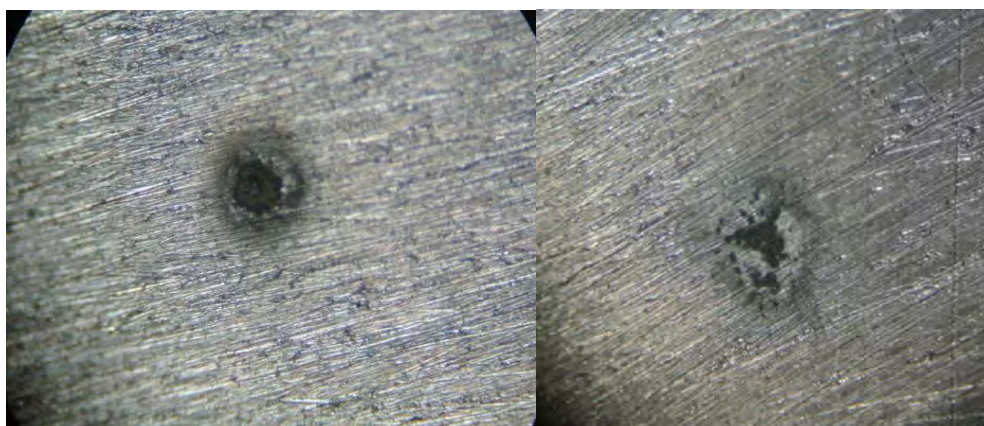
二、探討電漿蝕刻的特性

(一)實驗六、探討不同金屬材質對電漿蝕刻的影響

從銅蝕刻(圖十九)可以看見在銅上雕刻雖然顏色較深，但洞很淺。而鋁蝕刻(圖二十)可以看見在鋁上雕刻雖然洞較深，但顏色不明顯。在鐵蝕刻(圖二十一)可以看見在鐵上雕刻不僅洞較淺，而且顏色不明顯，我們推測這可能與電弧的電流大小以及導體的熔點以及導體的硬度有關，



圖十九、銅蝕刻的結果



圖二十、鋁蝕刻的結果


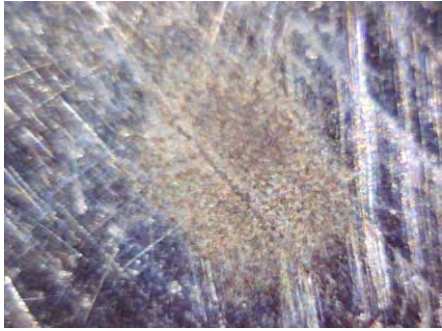


圖二十一、鐵蝕刻的結果

(二)實驗七：探討不同電漿蝕刻次數對電漿蝕刻的影響


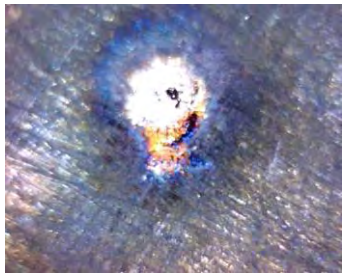
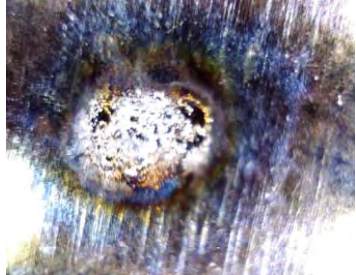
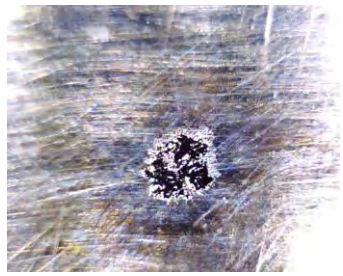
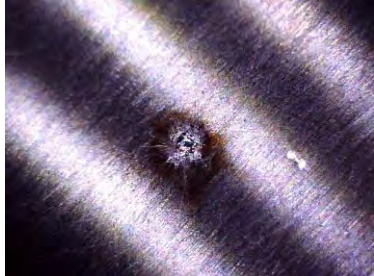
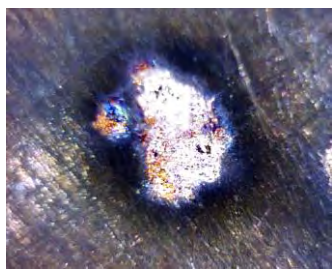
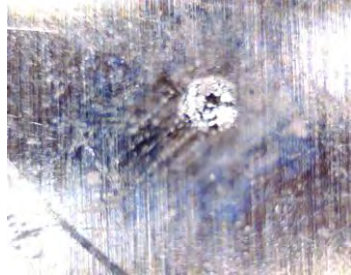
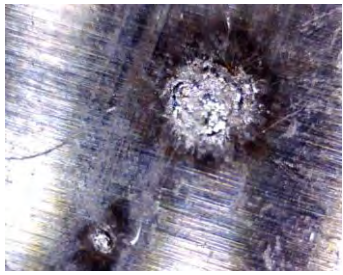
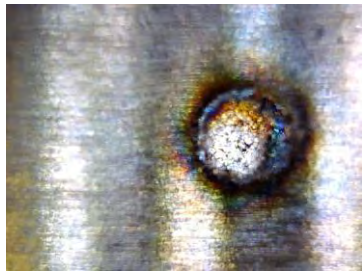
在第二代的電漿蝕刻裝置下進行不同蝕刻的結果，我們可以由圖二十二看見不論是銅片、鋁片或鐵片在30秒時電漿蝕刻的範圍都比1分鐘電漿蝕刻所出現的範圍廣。而從顏色這個方面來說，進行電漿蝕刻30秒比進行電漿蝕刻1分鐘的顏色淺。我們推測，這種現象可能是與電的特性有關，因為電會找最近的點去導通，因此電弧會找最容易導通的點導通，而電漿蝕刻則會造成被電弧打到的地方形成一個洞，電弧就會打到周圍較高的地方，因此電漿蝕刻時間越長，蝕刻的範圍就越廣。

<p>銅蝕刻 1 分鐘</p>	<p>銅蝕刻 30 秒</p>
<p>鋁蝕刻 1 分鐘</p>	<p>鋁蝕刻 30 秒</p>

	
鐵蝕刻 1 分鐘	鐵蝕刻 30 秒

圖二十二、第二代的電漿蝕刻裝置下進行不同時間蝕刻的結果

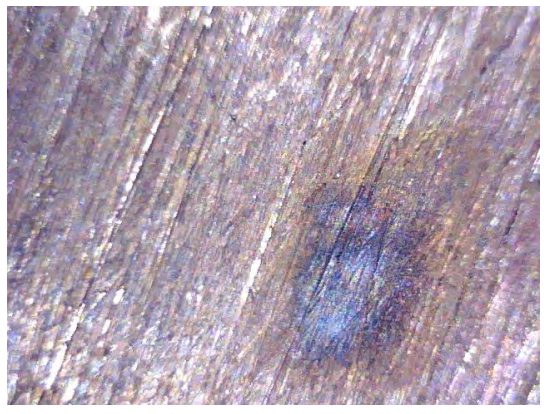
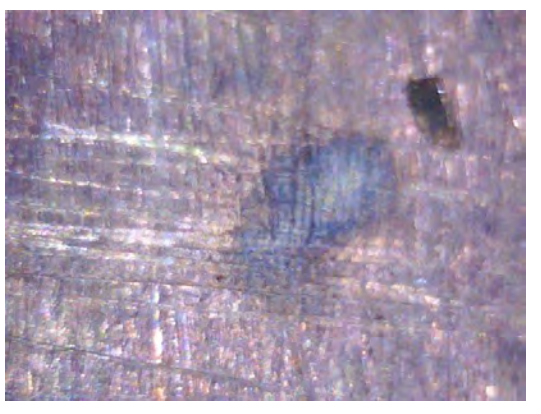
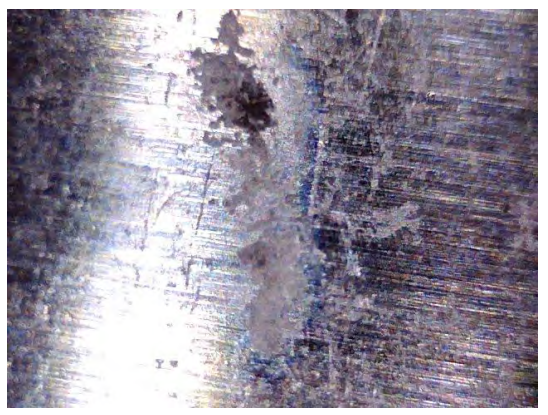
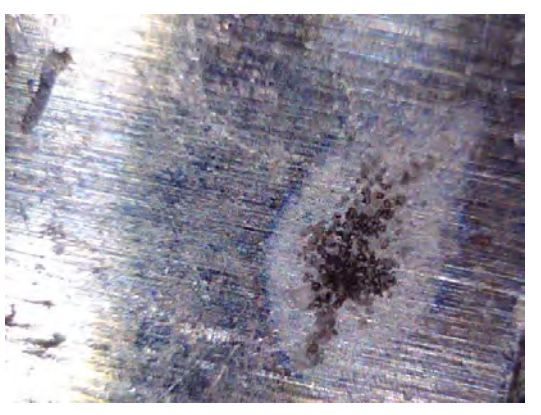
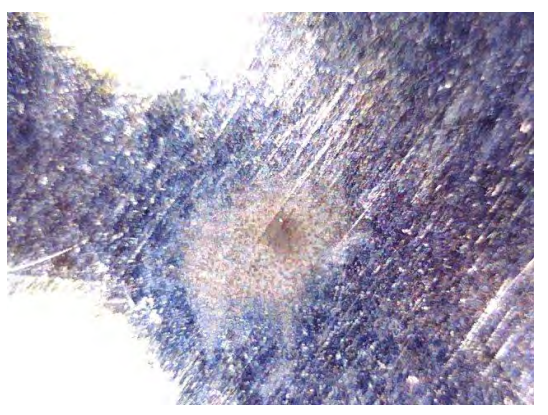

在第三代電漿蝕刻裝置(自組電路)進行不同次數電漿蝕刻的結果，我們可以由圖二十三發現不論是銅片、鋁片或鐵片的電漿蝕刻模式都和第二代電漿蝕刻裝置進行不同次數電漿蝕刻的結果一致，當電漿蝕刻進行愈多次，電漿蝕刻的範圍就會愈大顏色就會愈深。

		
銅片蝕刻 1 次	銅片蝕刻 10 次	銅片蝕刻 20 次
		
鋁片蝕刻 1 次	鋁片蝕刻 10 次	鋁片蝕刻 20 次
		
鐵片蝕刻 1 次	鐵片蝕刻 10 次	鐵片蝕刻 20 次

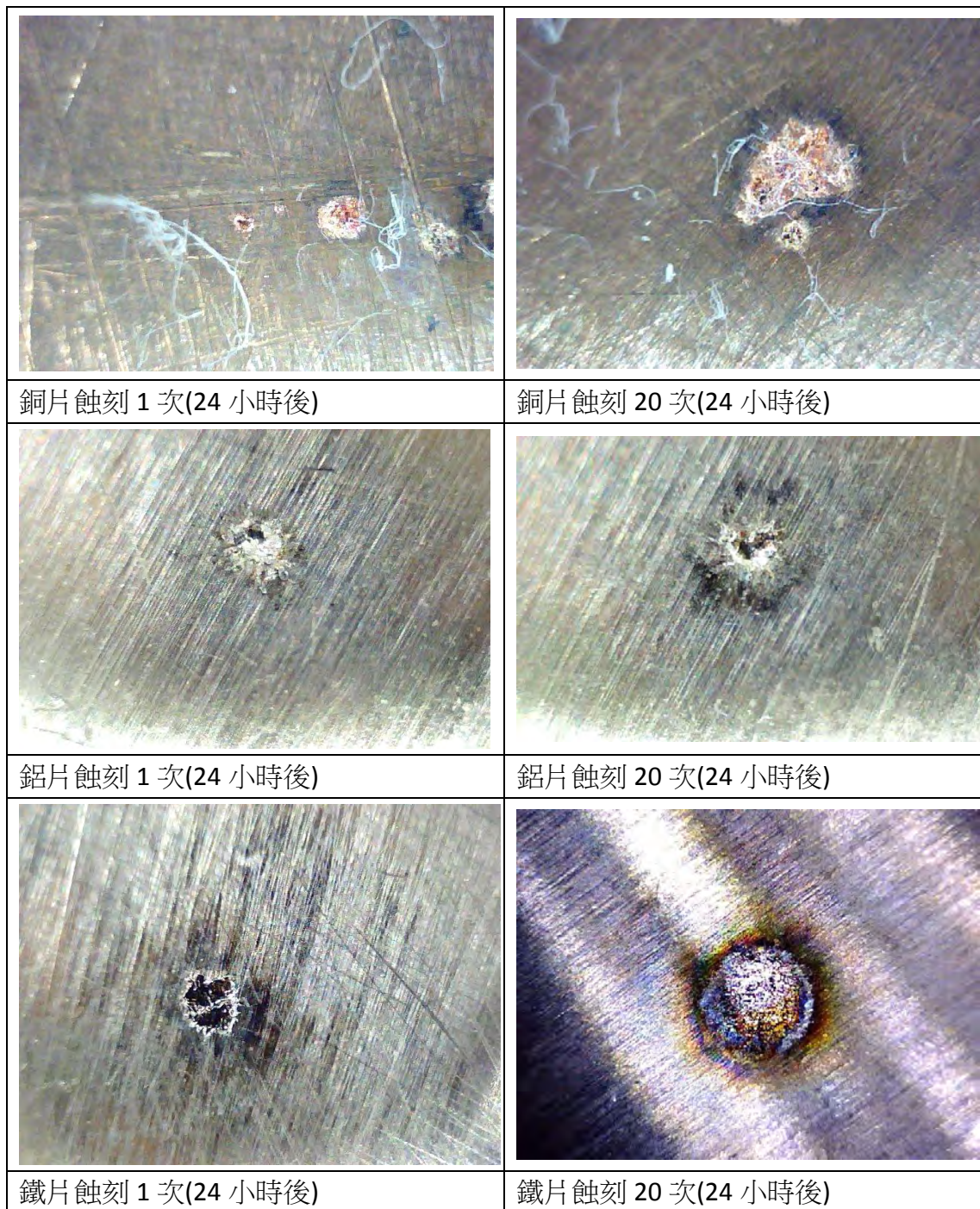
圖二十三、第三代的電漿蝕刻裝置下進行不同次數蝕刻的結果

(三)實驗八、探討蝕刻成品放置24小時後蝕刻痕跡是否改變

我們可以在圖二十四和圖二十五中下發現不論是銅片、鋁片、鐵片或是不同的電漿蝕刻裝置，24小時後蝕刻痕的顏色都比24小時前的顏色深。我們推測這可能與氧化現象有關，就像剛切開的金屬切面會保持光澤，而如果繼續保持與空氣的接觸時此切面將會因氧化因此日益的失去原有的光澤。

	
<p>銅蝕刻 30 秒 (24 小時後)</p>	<p>銅蝕刻 1 分鐘(24 小時後)</p>
	
<p>鋁蝕刻 30 秒(24 小時後)</p>	<p>鋁蝕刻 1 分鐘(24 小時後)</p>
	
<p>鐵蝕刻 30 秒(24 小時後)</p>	<p>鐵蝕刻 1 分鐘(24 小時後)</p>

圖二十四、第二代電漿蝕刻裝置的蝕刻成品放置24小時後蝕刻痕跡變化



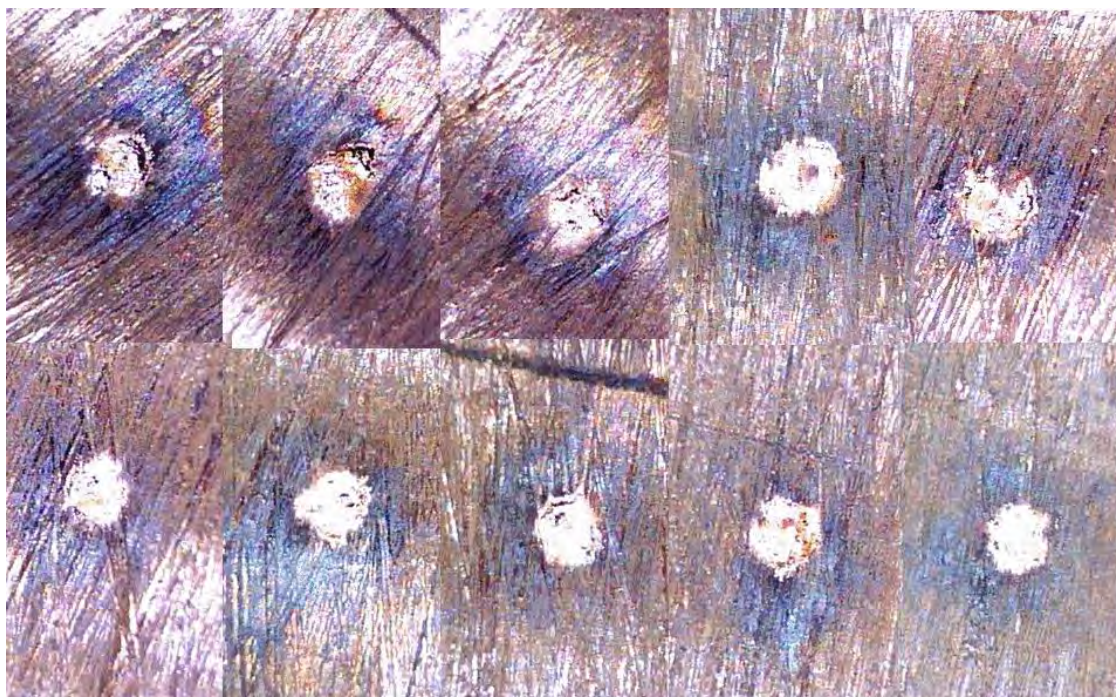
圖二十五、第三代電漿蝕刻裝置的蝕刻成品放置24小時後蝕刻痕跡變化

(四)實驗九: 比較第二代與第三代電漿蝕刻裝置對銅產生的蝕刻痕差異

我們由圖二十六、圖二十七可發現，第三代電漿蝕刻裝置(直流電)進行電漿蝕刻的結果都比第二代電漿蝕刻裝置(電漿球)進行電漿蝕刻的結果洞來的較深，且具有一致性。我們推測這可能與電流大小有關，第二代電漿蝕刻裝置的峰值電流約為0.1mA，而第三代電漿蝕刻裝置的峰值電流約為2mA(由電錶測量)，由此可見電流愈大金屬片愈容易被電漿蝕刻。所以我們利用此裝置，也能將文字刻蝕於金屬上(圖二十八)。



圖二十六、第二代電漿蝕刻裝置不同蝕刻痕跡的比較(差異大，不具有一致性)



圖二十七、第三代電漿蝕刻裝置不同蝕刻痕跡的比較(差異小，有一致性)



圖二十八、直接蝕刻文字效果

陸、討論

一、鐵屑效應：

鐵屑效應是由法國的科學家布蘭里所發現的。鐵屑效應是指金屬粉遇到 AM 的脈衝電波時，金屬屑會凝聚在一起的現象，斷電後維持斷電前狀態(圖二十九)。我們推測可能是因為檢波器中的金屬屑受到 AM 電波的能量，這個能量可以使金屬屑中的電荷產生變化而互相吸引並造成互相聚集起來的現象，而再給它一個震動後檢波管就會回復原本高電阻的狀態。在早期，鐵屑效應被用在無線電檢波裝置上，此效應只能用來檢測火花發射器所發射出來的類比無線電訊號(0 和 1)。當檢波管遇到 AM 脈衝電波時，金屬屑凝聚在一起，讓電流可以較容易得通過，因此導電，而導電狀態下的檢波管受到震動後就會恢復原本的高電阻狀態。我們在鐵屑效應的實驗中，並未考慮電弧大小的變因，而我們的電弧大小則是以各代發射器所能達到的最大電弧當作實驗用的電弧，因為我們認為電弧大小是屬於各代發射器的差異。而如果想讓檢波管的激活率提高，就必須找大一點的填充物，和找出能發出連續電弧的發射器。若使用不同金屬粉，甚至可觀察到金屬顆粒被電弧拉起而形成一直線(圖三十、圖三十一)





圖二十九、金屬粉遇到脈衝電波時，金屬屑凝聚在一起的現象



圖三十、鐵粉產生的鐵屑效應



圖三十一、鋁粉產生的鐵屑效應

二、歷代發射器的優點和缺點

我們比較不同形式的發射器，發現第一代發射器的優點為容易攜帶，缺點為啟動不容易、不便於調整電弧的大小；第二代發射器的優點是電弧較大較容易調整，缺點為頻率較低，且難控制；第三代發射器的優點是頻率穩定，缺點為地線不容易接好；而第四代發射器的優點為耗能低且效能高，而缺點為電弧小。

三、檢波管

檢波管是一種可以接收無線電波信號的電子零件或電路，起源於 19 世紀時的接收機，最初的檢波器使用一個有缺口的金屬環，只要有偵測到附近有火花放電，缺口就會出現火花，用途是尋找附近以火花放電方式發出之信號，以達到溝通的作用，但範圍僅能偵測幾公尺的範圍。現代的檢波電路可以先利用 LC 電路濾波後再用運算放大電路將無線電信號放大，放大信號後將載波分離，再經解碼後將它轉變成有意義的訊號。而我們在填充物大小的實驗結果與黃以勒等人的在 2008 年填充物大小的實驗結果是不同的，我們的實驗結果是填充物愈大，激活

率愈高，而他們的實驗結果為填充物愈小，激活率愈高。我們推測這種情形可能是因為他們作實驗時，並沒有考慮到填充物數量的變因，進而造成實驗結果不一致的情形。

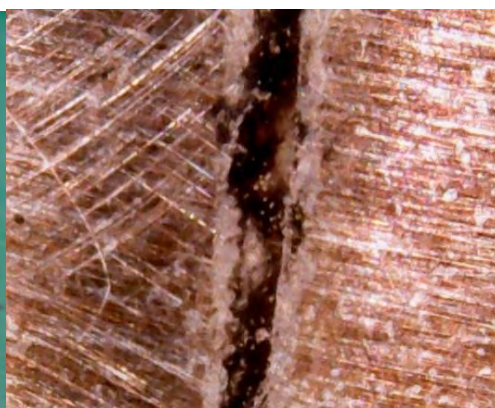
四、電漿蝕刻

電漿態是人類繼固、液、氣三態之外發現的物質第四態，主要是藉由氣體在高電磁場下離子化後，形成一個包括電子（負電荷）、正離子（正電）、活性自由基與中性氣體分子所組成的高活性氣體團，通常會自行發光。在正常狀況下，電漿中的正電荷總數約幾乎等於負電荷總數，而具有類似電中性的特性，常見的電漿現象包括：太陽、閃電、極光、日光燈及霓虹燈等。電漿是指當高壓端與接上地線或者接上負極的導體，因為電太強而造成空氣被擊穿時所產生的電弧。而電漿蝕刻就是指當電弧打到接上地線或者接上負極的導體時，因為電弧會產生高溫，因此這個導體會留下一個洞和黑色的痕跡，黑色的痕跡容易被擦掉，我們推測，那個黑色的痕跡應該是被電弧的高溫燻黑而造成的，不過那個洞因為是電弧的高溫將金屬熔掉，因此需要用砂紙或其他粗糙的東西磨掉。而之所以要打出一個電弧，是為了讓電子衝撞後，接上地線或是負極的導體，這樣才能達成電漿蝕刻的條件。

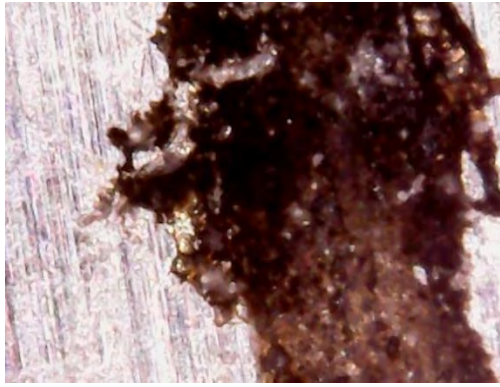
我們也嘗試使用工具輔助電漿蝕刻的穩定性，以便能刻出圖畫，分別使用電火布及石頭進行輔助。我們發現直流電電漿蝕刻裝置因為是直流電，因此很好操作，根本不用擔心電弧會亂跑，因此我們只對電漿球蝕刻裝置進行實驗。在進行電漿蝕刻時，電火布會被電弧融掉(圖三十二、圖三十三、圖三十四、圖三十五)，進而引響電弧的方向，讓電漿蝕刻刻得不準確。而石頭雖然會影響電弧的行進方向(圖三十六、圖三十七；圖三十八、圖三十九)，不過沒有嚴重到不會讓電弧打不到金屬板，但因為如此，大部分的能量將會消耗在石頭上因此效果比較差。沒有任何補助的模式這是三者之中效果最好的一種模式。所以在這三種補助模式下沒有任何補助是最好的，而石頭是第二，因為蝕刻處有電火布所融掉的膠，故電漿蝕刻的效果最差。



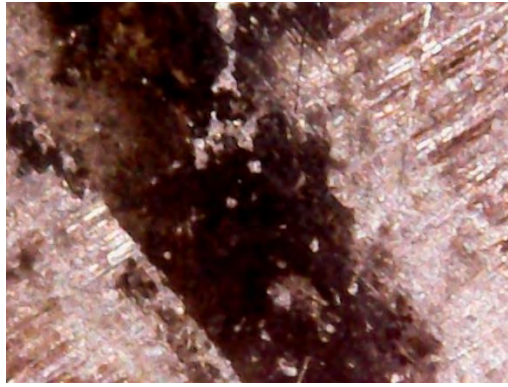
圖三十二、電火布輔助蝕刻



圖三十三、電火布輔助蝕刻的效果(銅)



圖三十四、電火布輔助蝕刻的效果(鋁)



圖三十五、電火布輔助蝕刻的效果(鐵)



圖三十六、石頭輔助蝕刻



圖三十七、石頭輔助蝕刻銅的效果



圖三十八、石頭輔助蝕刻鐵的效果



圖三十九、石頭輔助蝕刻鋁的效果

我們在電漿蝕刻的實驗中，並未考慮到電弧長短的問題，或許改變電弧長短就可以使電漿蝕刻的結果改變。經過我們的實驗發現如果想讓電漿蝕刻的效果變好，就要讓電流盡量大於電壓。而我們在電漿蝕刻的裝置方面功率只有 0.64 瓦，而朱國偉等人在 2016 年的電漿蝕刻裝置則高達 25 瓦，雖然我們電漿蝕刻裝置的瓦數比他們電漿蝕刻裝置的瓦數低，但他們的電漿蝕刻裝置只能蝕刻果皮，而我們的電漿蝕刻裝置卻在金屬表面留下燒熔的痕跡，所以雖然我們的電漿蝕刻裝置功率只有 0.64 瓦，但能燒熔金屬，這將是在能源日益短少的未來，能將能源運用最高效能的。

柒、結論

- 一、可利用鐵屑效應自製檢波器。
- 二、連續性脈衝訊號檢波器(打火槍)比非連續性脈衝訊號檢波器(壓電素子)激活率高。
- 三、檢波器以不同直徑大小的鋁球填充時，激活率的表現為：大鋁球 > 中鋁球 > 小鋁球，鋁粉無法激活。
- 四、小鋁球的重量須達 5 公克時較易激活，大鋁球、中鋁球則不受影響。
- 五、電弧數量多寡對檢波器的激活率無顯著影響。
- 六、四種自製發射器的感應距離，以第四代(ZVS)的效果最佳，可達 99 公分。
- 七、不同金屬電漿蝕刻的刻痕差異大，刻痕深度鋁 > 銅 > 鐵，與金屬性質有關。
- 八、電漿蝕刻的時間越久或次數越多，會使蝕刻痕越深；放置 24 小時，蝕刻顏色會變深。
- 九、自組電路電漿蝕刻裝置(第三代)產生的蝕刻痕跡有較高的一致性。

捌、參考文獻

- 一、休伊特著。2001。「觀念物理V，電磁學.核物理」。天下遠見出版社。台北
- 二、鐵屑效應：<http://baike.baidu.com/view/428994.htm>
- 三、朱國璋、吳振璋、鍾禎芝。2016。空心的雷神之槌—避雷針與環境的變化對產生電弧的影響。中華民國第 56 屆中小學科展覽會。
- 四、野尻一男著，倪志榮譯。2015。半導體乾蝕刻技術。白象文化出版社
- 五、自然與生活科技課本第五冊。2015。第四章電流、電壓與歐姆定律，南一出版社
- 六、維基百科擷取自
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%A2%E7%A7%AF#.E8.A1.A8.E9.9D.A2.E7>
- 七、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>
- 八、マルコーニ電信機を作る—YouTube 。2011。
<https://www.youtube.com/watch?v=X-N-HuUFolw>

【評語】 030120

此作品為去年全國科展電弧的相關延伸改良研究，有具體比較與之前研究的差異性。電弧經多次改良設計，共有四代，可見研究者之用心。可惜略嫌緊張，若能再多考量各代電弧的適用應用，不僅呈現各電弧的蝕刻現象，也能分析其現象形成之成因，將更可觀。

作品海報

摘要

我們利用鐵屑效應自製檢波器，發現連續性脈衝信號檢波器(打火槍、電漿球發射器及零電壓諧振軟開關)比非連續性脈衝信號檢波器(壓電素子)激活率高，在檢波器中以不同直徑大小的鋁球填充時，激活率的表現為：大鋁球>中鋁球>小鋁球，而鋁粉無法激活，當小鋁球的重量達5公克時較易激活，而大鋁球、中鋁球則不受影響，但電弧數量多寡對檢波器的激活率無顯著影響。發射器的感應距離，以第四代(ZVS)的效果最佳，可達99公分。以此原理進行電漿蝕刻，我們可以看出銅蝕刻洞較淺，但顏色較深，而鋁蝕刻洞較深，且顏色較深，鐵蝕刻洞不僅較淺，而顏色也較不明顯，當電漿蝕刻的時間越久或次數越多，會使蝕刻痕越深；放置24小時，蝕刻顏色會變深。

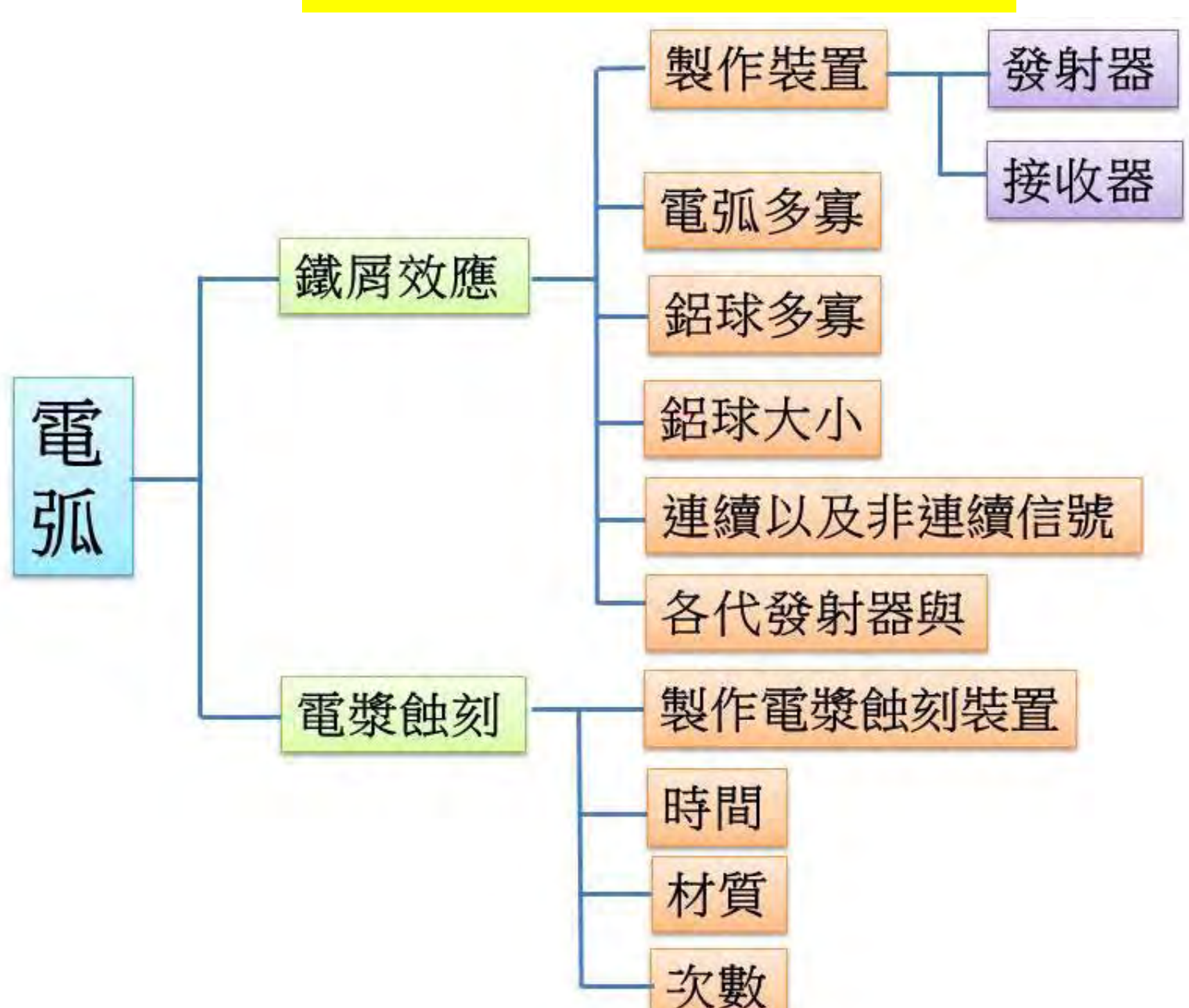
壹、研究動機

我是喜歡DIY的人，我在網站看到「マルコーニ電信機を作る」製作檢波器，負載為燈泡，用壓電素子激活，燈亮代表導通，敲檢波器後恢復。我想如何提高檢波器的激活率? 檢波器除了檢驗脈衝電波還有甚麼用? 電漿蝕刻如何應用在生活中?於是開始對檢波器與電漿蝕刻的研究。

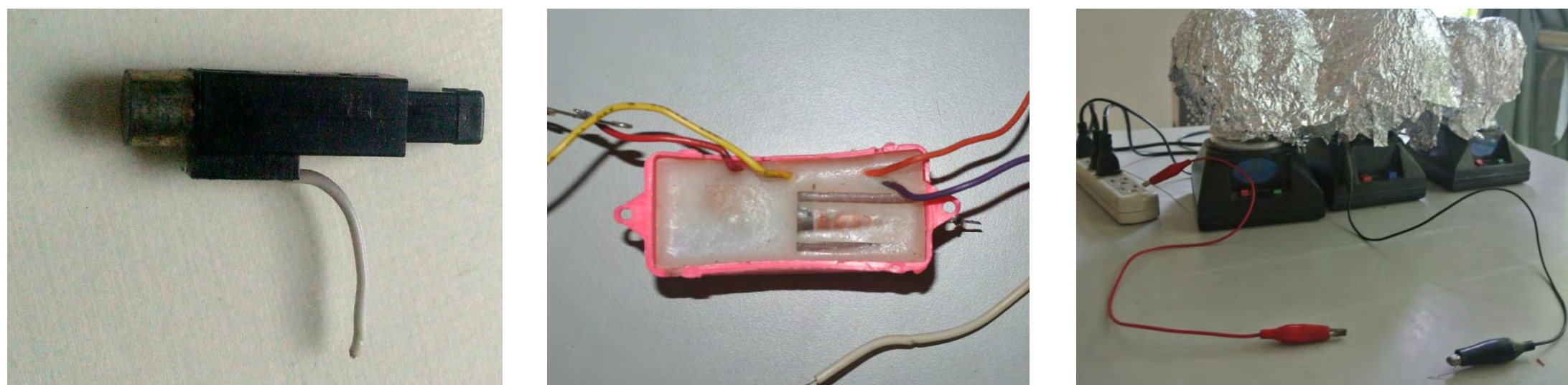
貳、研究目的

- 一、改善鐵屑效應實驗的穩定性
- 二、自製檢波器
- 三、探討檢波器的特性
- 四、製作電漿蝕刻裝置
- 五、探討電漿蝕刻的特性

肆、實驗方法



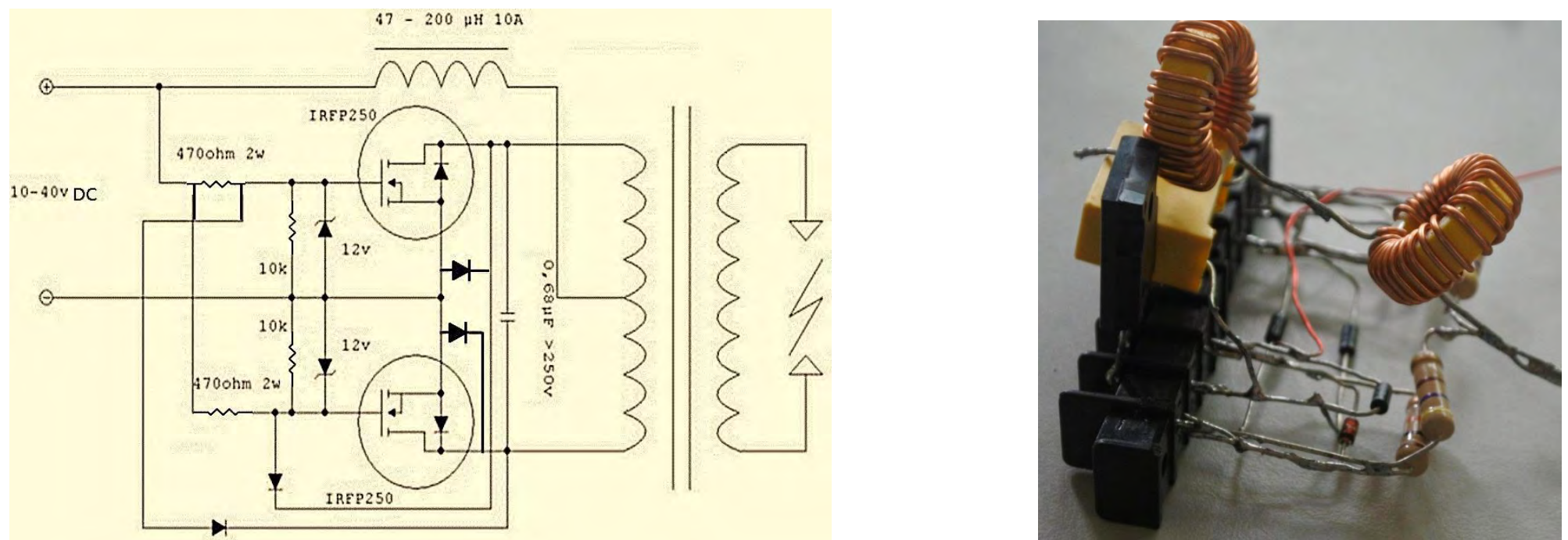
一、改善鐵屑效應實驗的穩定性(發射器的設計):



圖一、第一代發射器

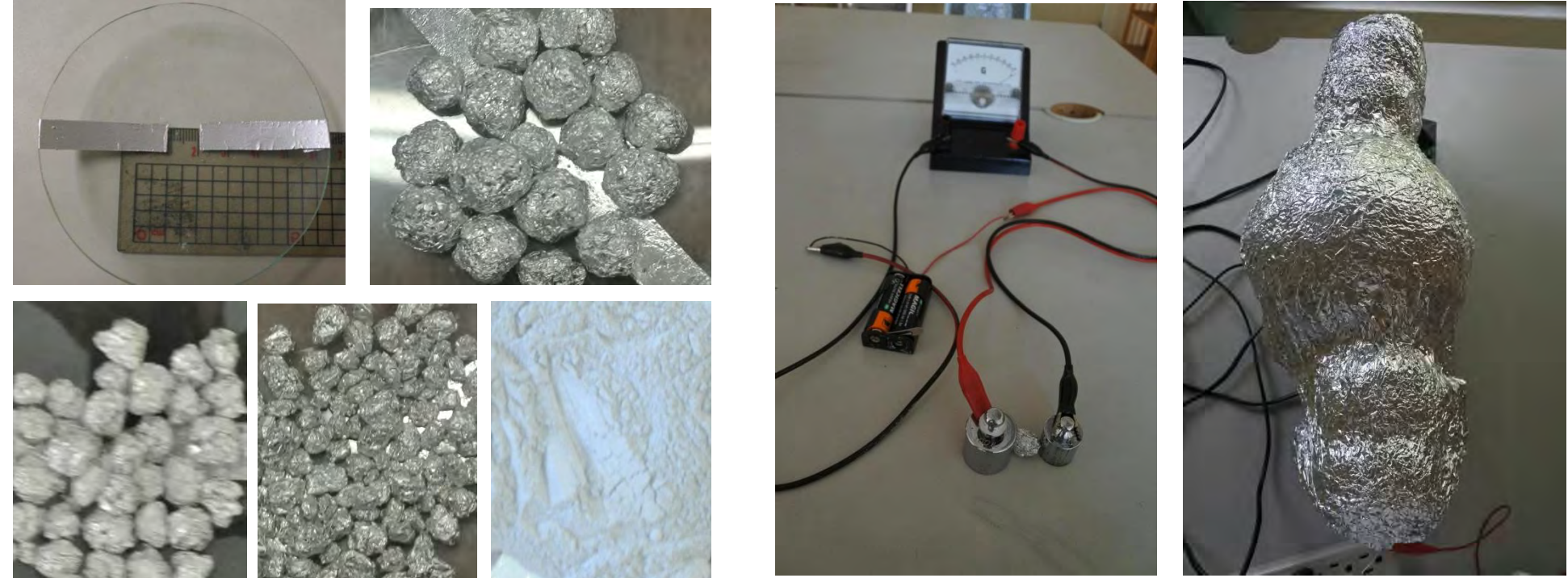
圖二、第二代發射器

圖三、第三代發射器



圖四、第四代發射器電路圖以及本體

二、製作檢波器與激活現象



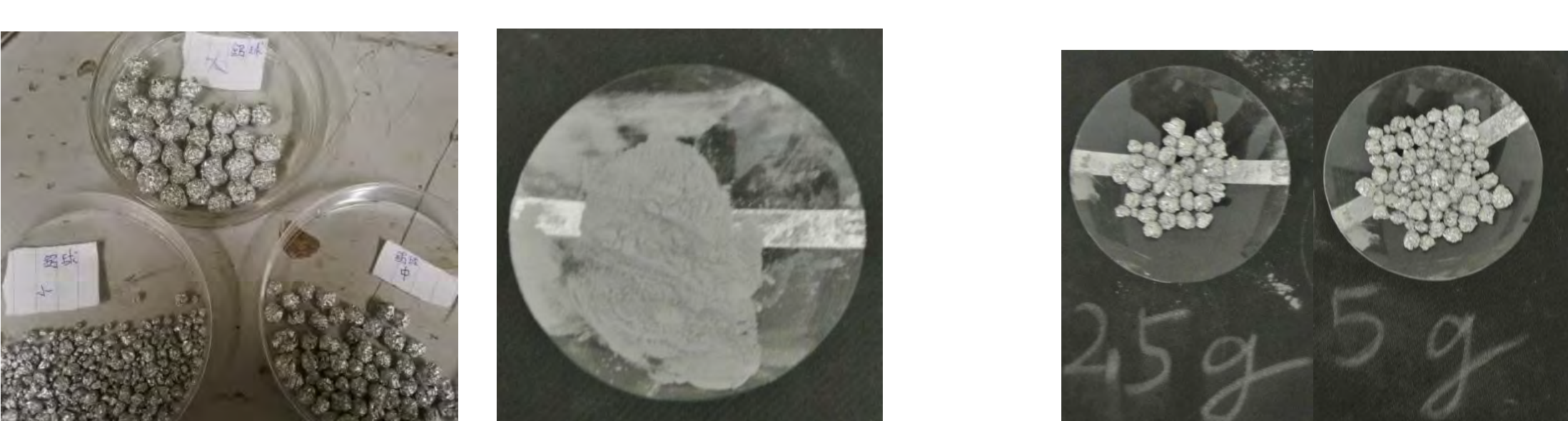
圖五、檢波器實體、填充物、發射裝置以及接收裝置

三、探討檢波器的特性

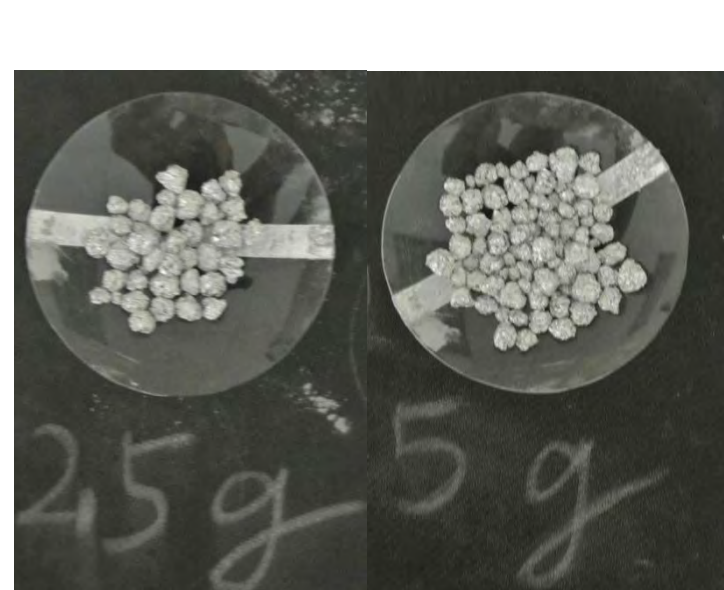
實驗一：探討連續脈衝信號和非連續脈衝信號對檢波器的激活率是否有影響

實驗二：探討填充物顆粒大小對檢波器的激活率是否有影響

實驗三：探討填充物重量對檢波器的激活率是否有影響



圖六、四種尺寸的填充物



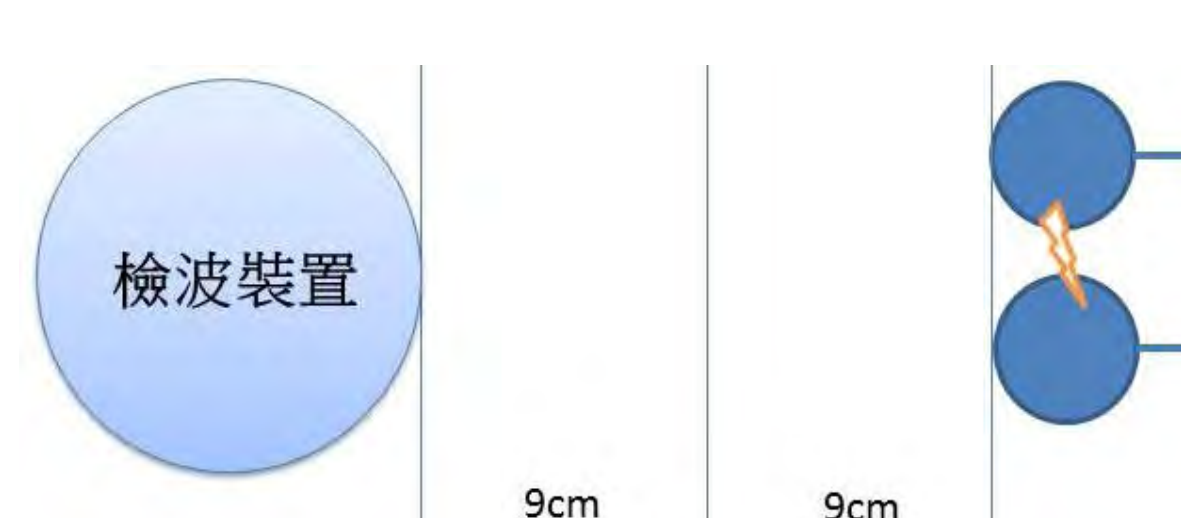
圖七、兩種重量的中型填充物

實驗四：探討電弧多寡對檢波器的激活率是否有影響

實驗五：探討各代發射器對不同距離的檢波器的激活率是否有影響

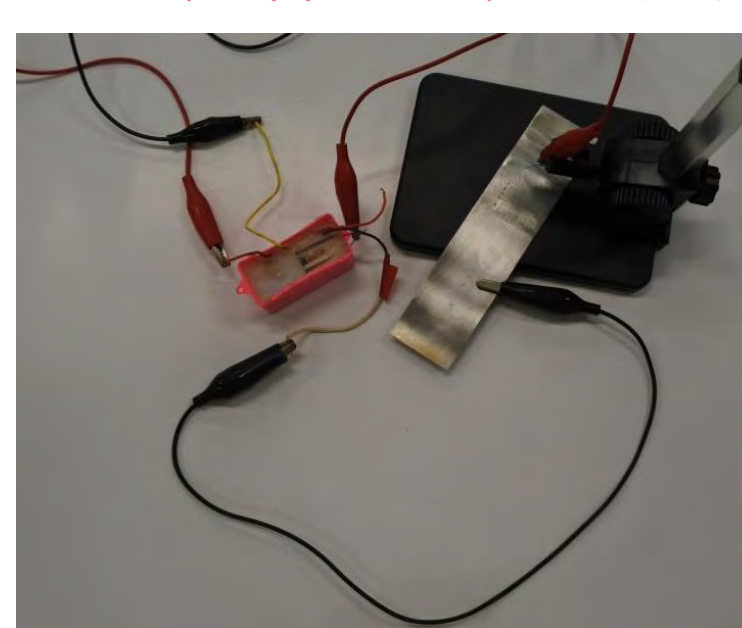


圖八、一個電弧與多個電弧

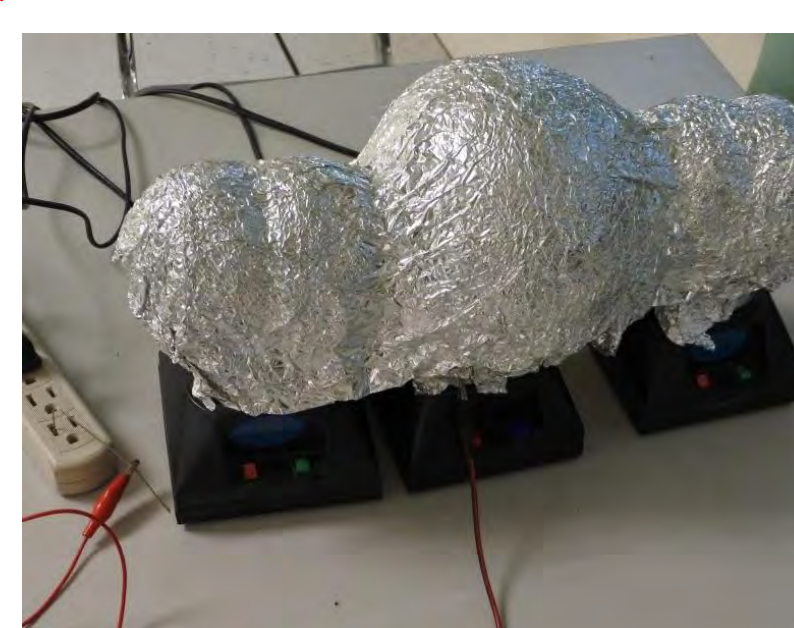


圖九、鐵屑效應實驗示意圖

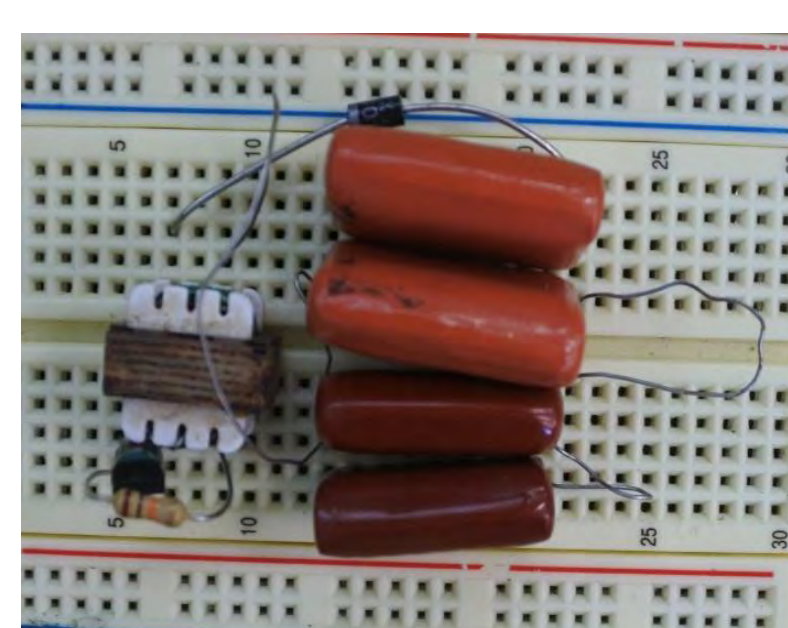
四、製作電漿蝕刻裝置



圖十、第一代電漿蝕刻裝置(打火槍)



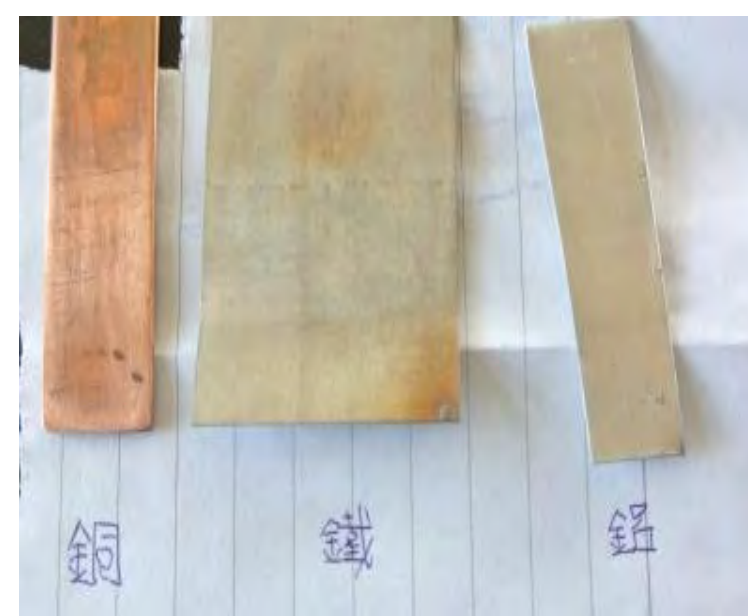
圖十一、第二代電漿蝕刻裝置(電漿球)



圖十二、第三代電漿蝕刻裝置(自組電路)

五、探討電漿蝕刻的特性

實驗六：探討不同金屬材質對電漿蝕刻的影響



圖十三、電漿蝕刻所使用的金屬片



圖十四、電漿蝕刻的補助裝置

實驗七：探討不同蝕刻時間對電漿蝕刻痕的影響

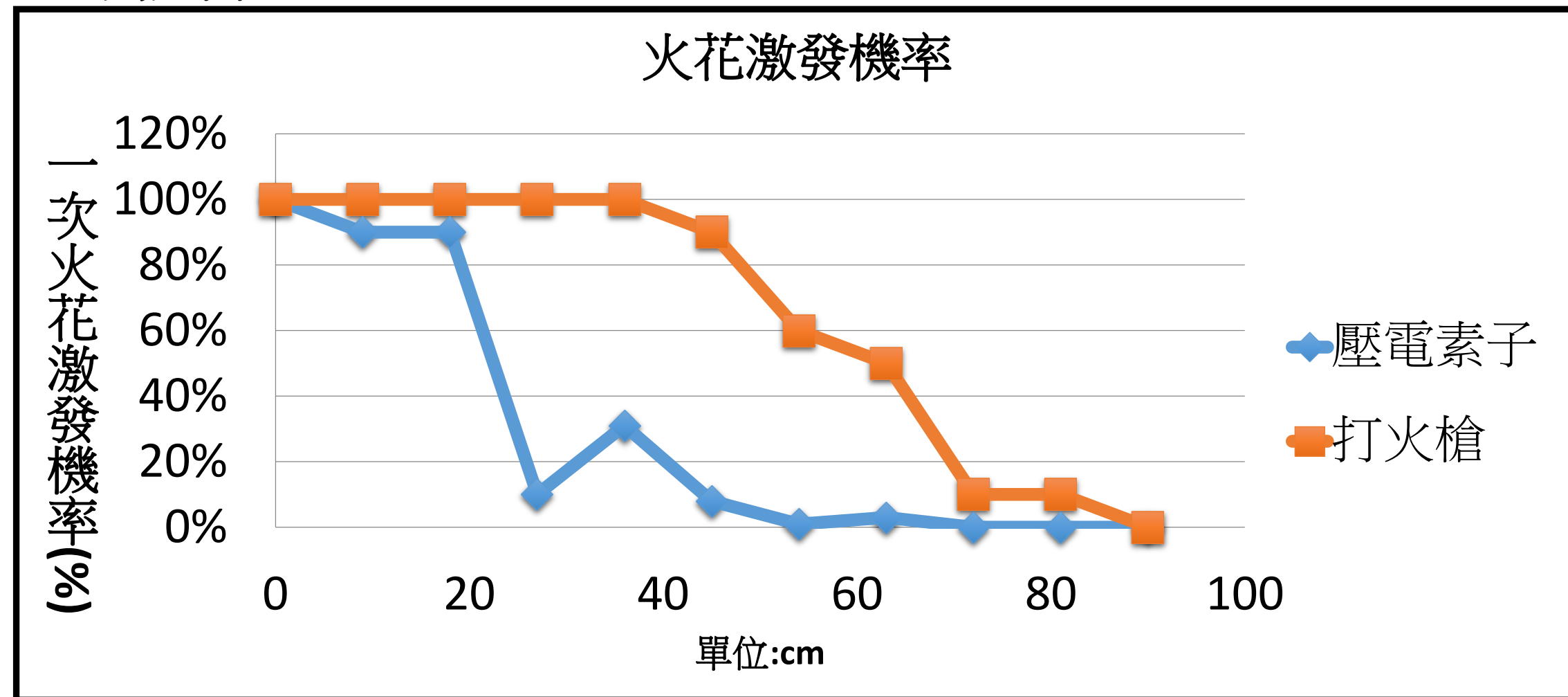
實驗八：探討成品放置一段時間後電漿蝕刻的痕跡是否有所改變

實驗九：探討不同蝕刻裝置對電漿蝕刻的影響

伍、實驗結果

一、探討檢波器的特性

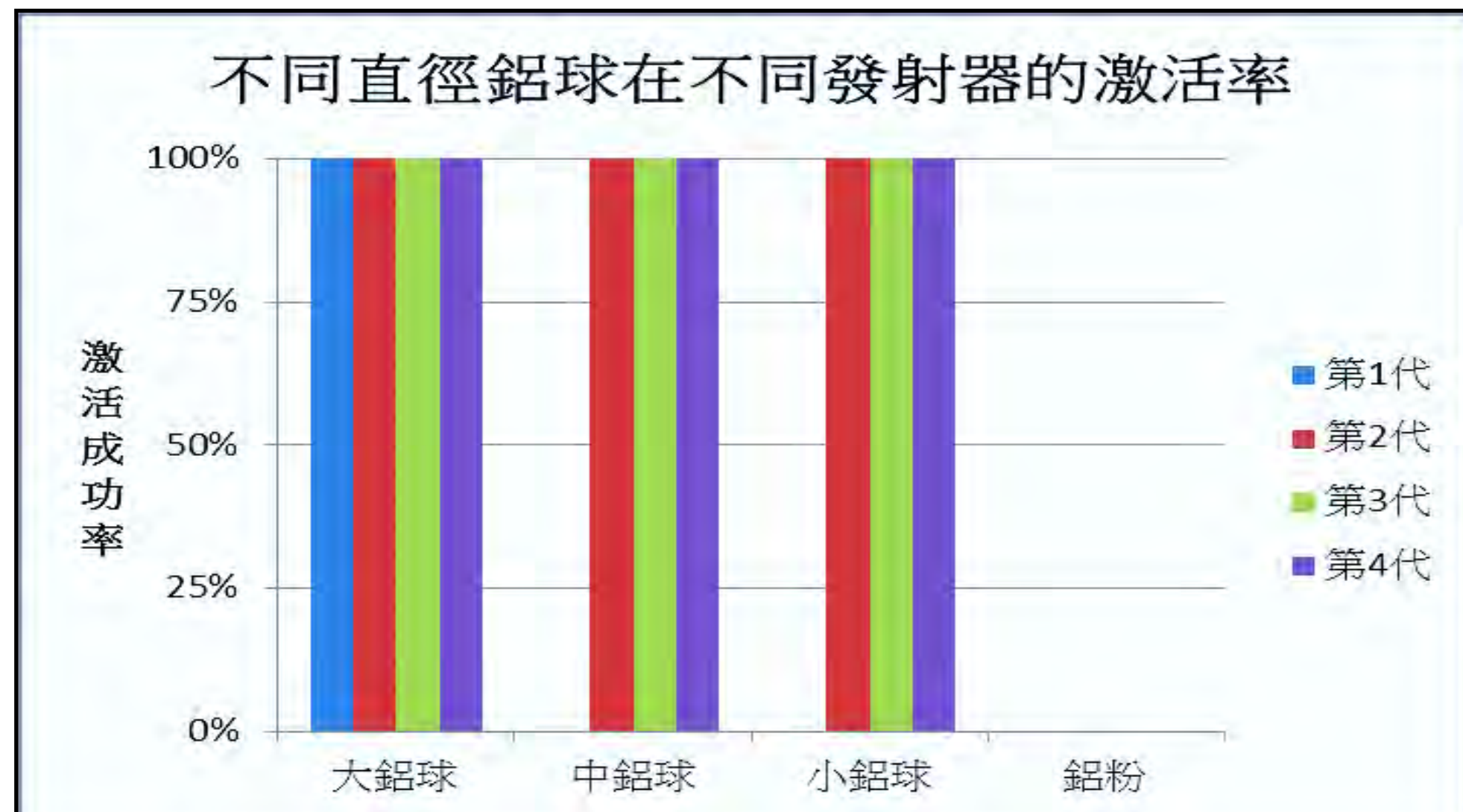
實驗一、探討連續、非連續脈衝信號檢波器的激活率是否有影響



圖十五、連續、非連續脈衝發射器與距離的關係圖

連續脈衝信號的激活率比非連續脈衝信號的激活率高。

實驗二、探討填充物顆粒大小對檢波器的激活率是否有影響



圖十六、不同填充物大小對激活率的影響

鋁球愈大，激活率愈高。

實驗三、探討填充物重量對檢波器激活率的影響

表一、不同鋁球、重量以及各代發射器的激活率比較表

	第一代發射器	第二代發射器	第三代發射器	第四代發射器
大5公克	100%	100%	100%	100%
大2.5公克	100%	100%	100%	100%
中5公克	0%	100%	100%	100%
中2.5公克	0%	100%	100%	100%
小5公克	0%	100%	100%	100%
小2.5公克	0%	0%	0%	100%
粉5公克	0%	0%	0%	0%
粉2.5公克	0%	0%	0%	0%

大、中鋁球不太受重量的影響，小鋁球重量愈重激活率愈高。

實驗四、探討電弧多寡對激活率的影響

表二、不同電弧多寡以及發射器對大鋁球激活率的影響

	第一代	第二代	第三代	第四代
1個電弧	100%	100%	100%	100%
2個電弧	100%	100%	100%	100%
3個電弧	100%	100%	100%	100%

表三、不同電弧多寡以及發射器對中鋁球激活率的影響

	第一代	第二代	第三代	第四代
1個電弧	0%	100%	100%	100%
2個電弧	100%	100%	0%	100%
3個電弧	100%	100%	100%	100%

表四、不同電弧多寡以及發射器對小鋁球激活率的影響

	第一代	第二代	第三代	第四代
1個電弧	0%	100%	100%	0%
2個電弧	0%	100%	100%	100%
3個電弧	0%	100%	100%	100%

表五、不同電弧多寡以及發射器對鋁粉激活率的影響

	第一代	第二代	第三代	第四代
1個電弧	0%	0%	0%	0%
2個電弧	0%	0%	0%	0%
3個電弧	0%	0%	0%	0%

一個電弧時的激活率：大鋁球>中鋁球>小鋁球>鋁粉
 兩個電弧時的激活率：大鋁球>中鋁球、小鋁球>鋁粉
 三個電弧時的激活率：大鋁球>中鋁球>小鋁球>鋁粉

實驗五、探討各代發射器對不同距離的檢波管激活率是否有影響

表六、不同發射器在不同距離對大鋁球激活率的影響

	第一代	第二代	第三代	第四代
9公分	100%	100%	100%	100%
18公分	100%	100%	100%	100%
27公分	0%	100%	100%	100%
36公分	0%	100%	100%	100%
45公分	0%	100%	100%	100%
54公分	0%	100%	100%	100%
63公分	0%	0%	100%	100%
72公分	0%	0%	100%	100%
81公分	0%	0%	100%	100%
90公分	0%	0%	0%	100%
99公分	0%	0%	0%	100%
108公分	0%	0%	0%	0%

表七、不同發射器在不同距離對中鋁球激活率的影響

	第一代	第二代	第三代	第四代
9公分	100%	100%	100%	100%
18公分	100%	100%	100%	100%
27公分	50%	100%	50%	100%
36公分	0%	50%	0%	0%
45公分	0%	0%	0%	0%

表八、不同發射器在不同距離對小鋁球激活率的影響

	第一代	第二代	第三代	第四代
9公分	100%	100%	100%	100%
18公分	50%	100%	100%	100%
27公分	0%	0%	0%	0%

表九、不同發射器在不同距離對鋁粉激活率的影響

	第一代	第二代	第三代	第四代
9公分	0%	0%	0%	0%
18公分	0%	0%	0%	0%
27公分	0%	0%	0%	0%

各代發射器的最遠激活率距離

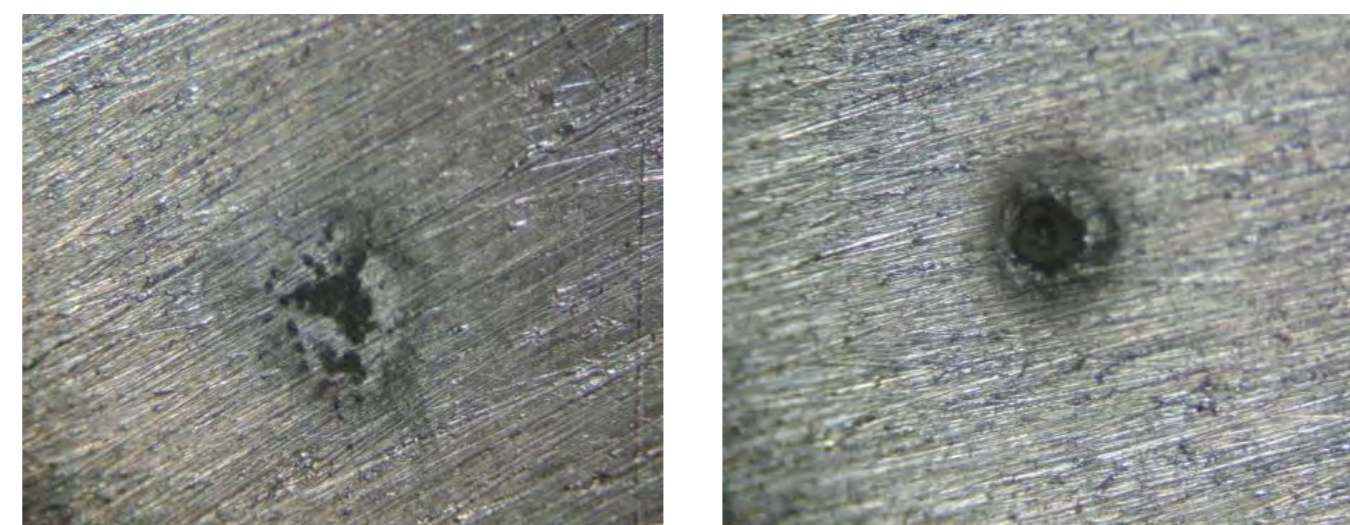
第一代：27公分 第二代：54公分
 第三代：81公分 第四代：99公分

二、探討電漿蝕刻的特性

實驗六、探討不同金屬材質對電漿蝕刻的影響



圖十七、銅蝕刻



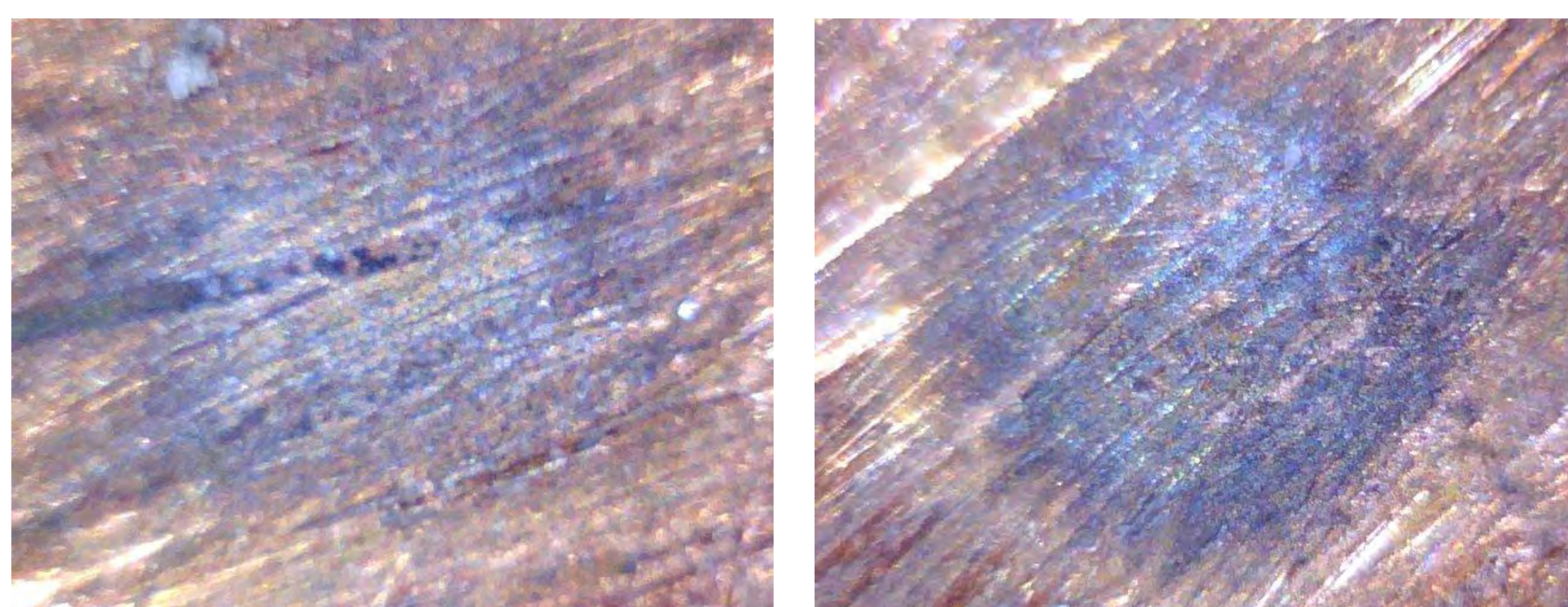
圖十八、鋁蝕刻



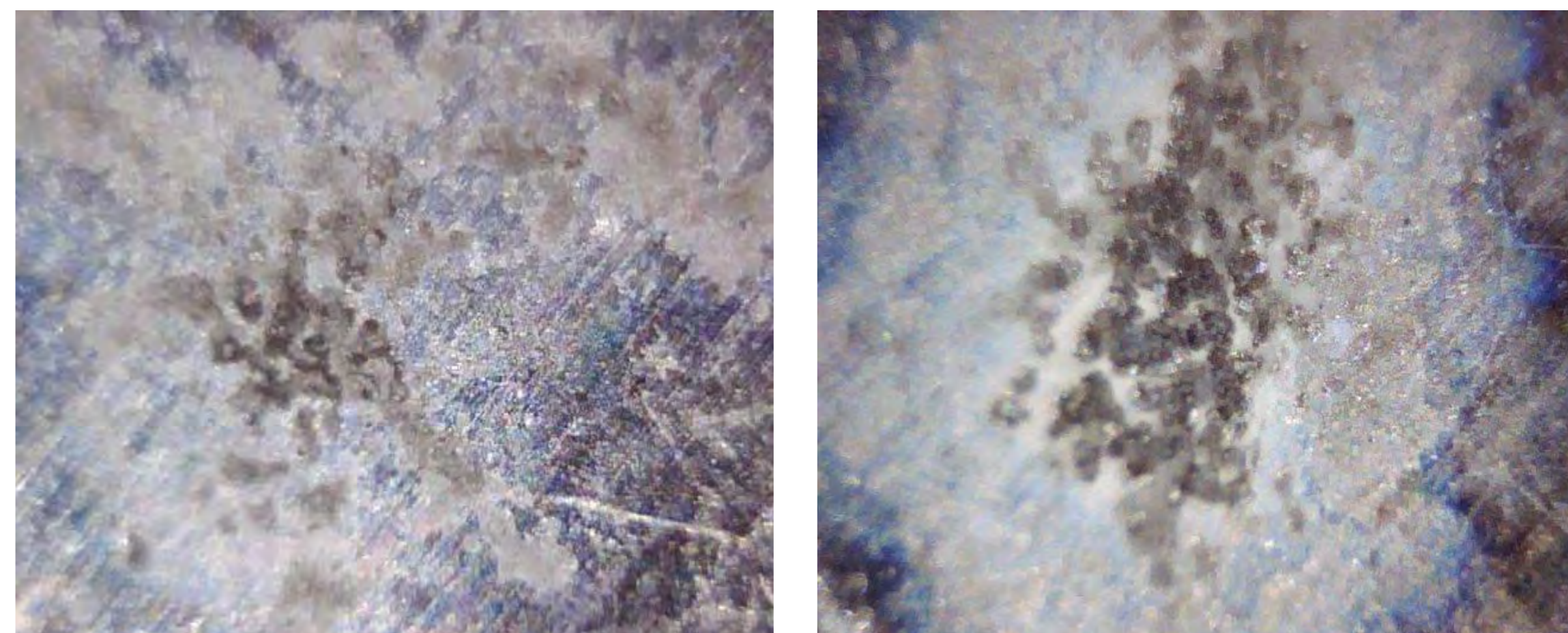
圖十九、鐵蝕刻

蝕刻顏色：銅>鋁>鐵
 蝕刻深度：鋁>銅>鐵

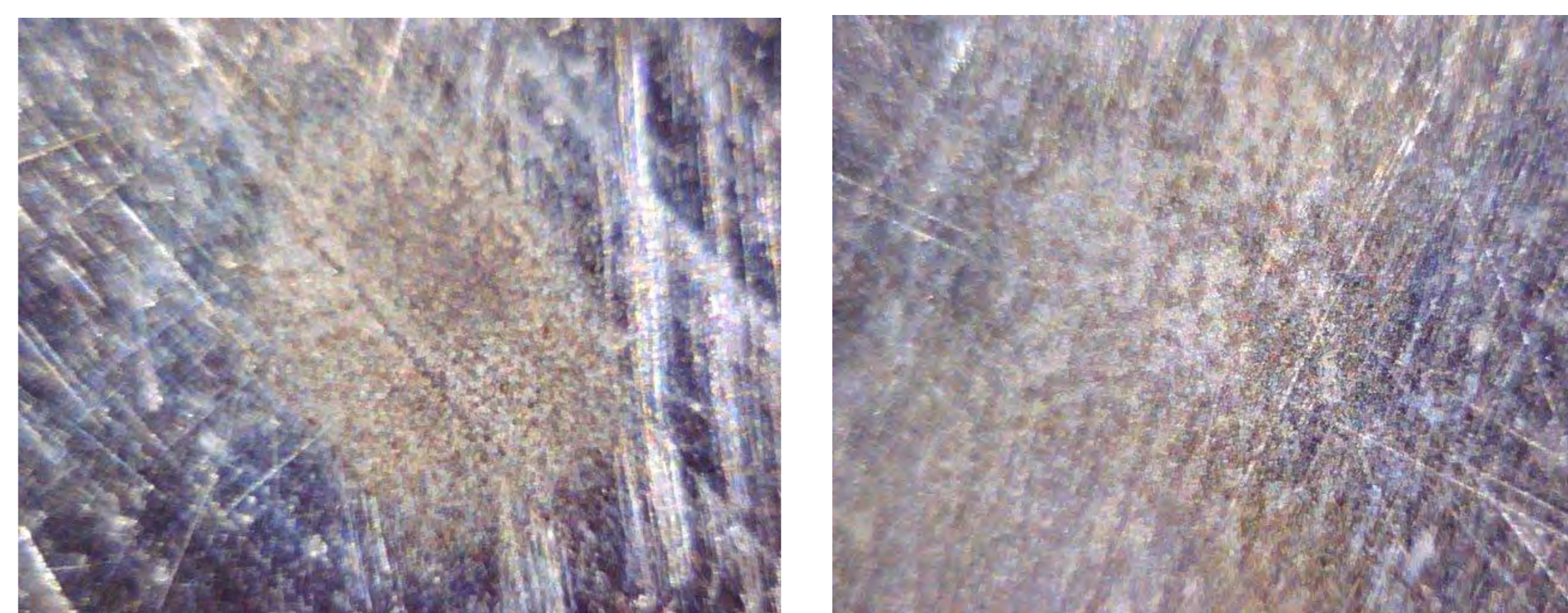
實驗七、探討不同電漿蝕刻次數對電漿蝕刻的影響



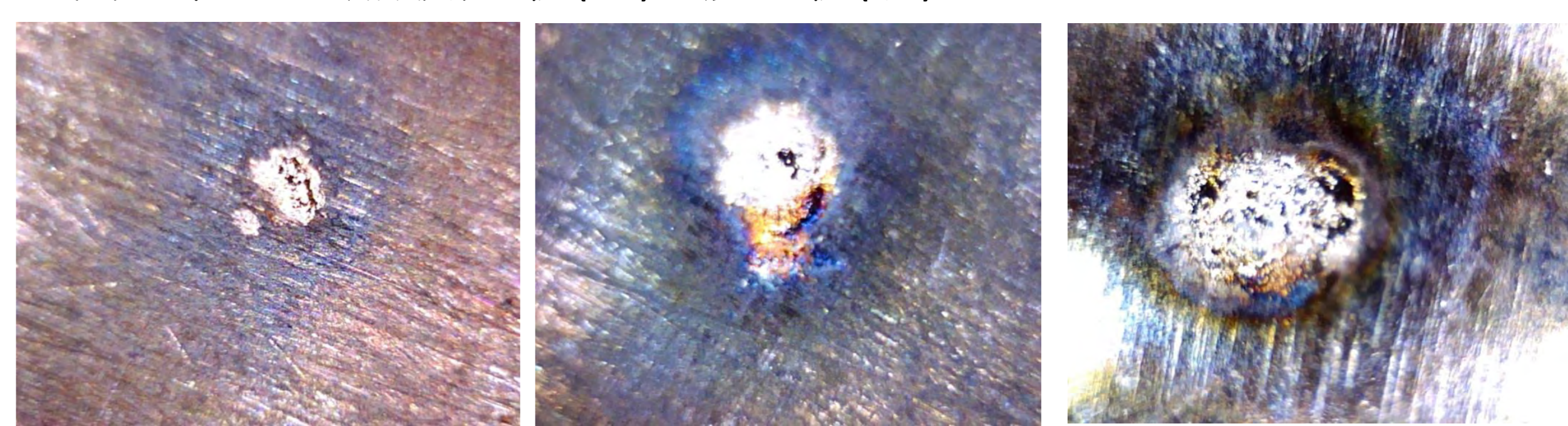
圖二十、銅蝕刻30秒(左)以及60秒(右)



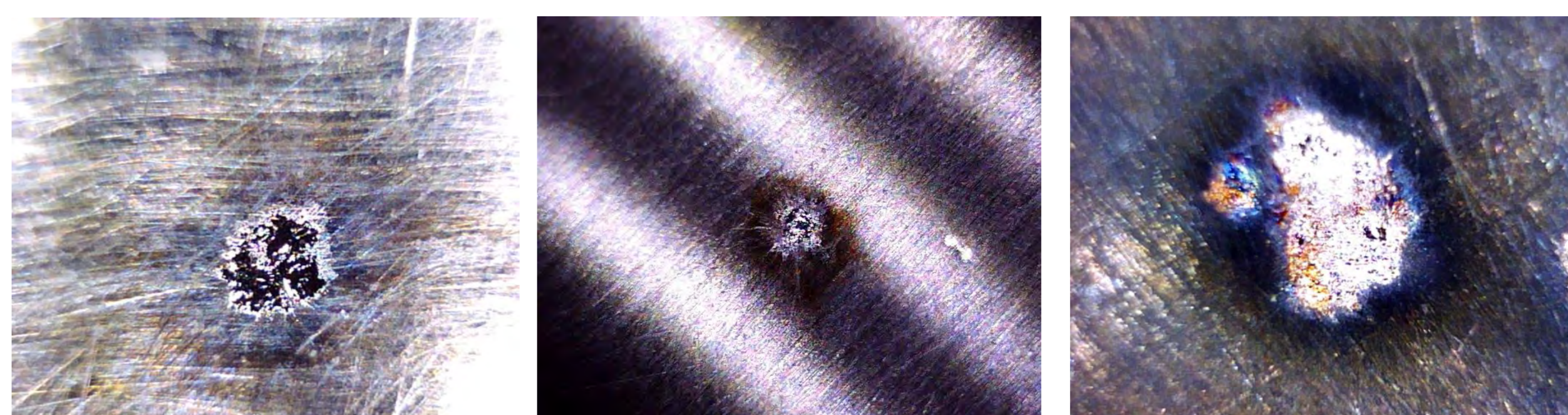
圖二十一、鋁蝕刻30秒(左)以及60秒(右)



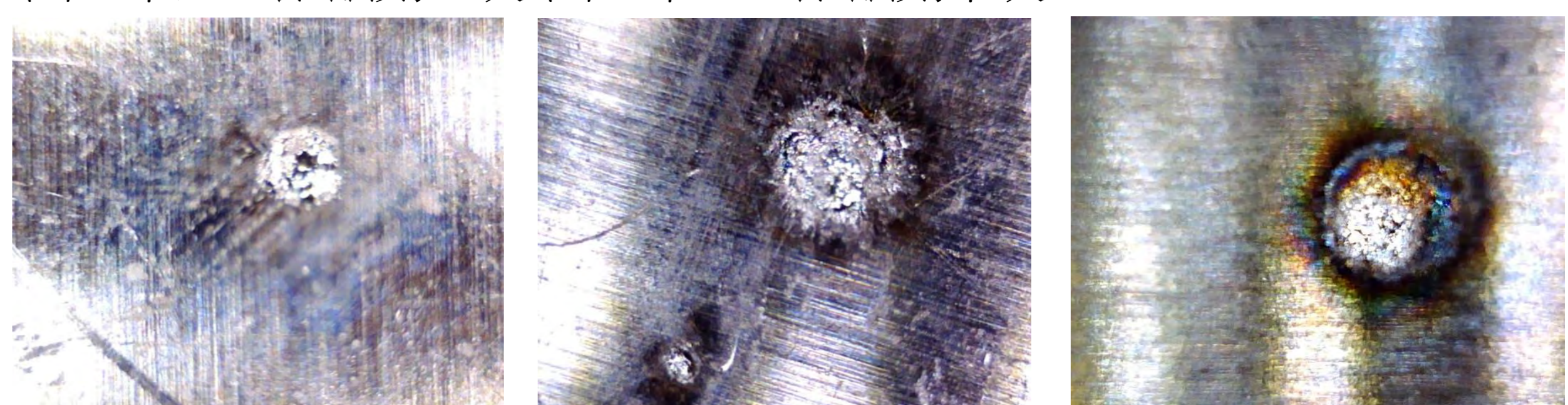
圖二十二、鐵蝕刻30秒(左)以及60秒(右)



圖二十三、銅蝕刻一次 圖二十四、銅蝕刻十次 圖二十五、銅蝕刻二十次



圖二十六、鋁蝕刻一次 圖二十七、鋁蝕刻十次 圖二十八、鋁蝕刻二十次



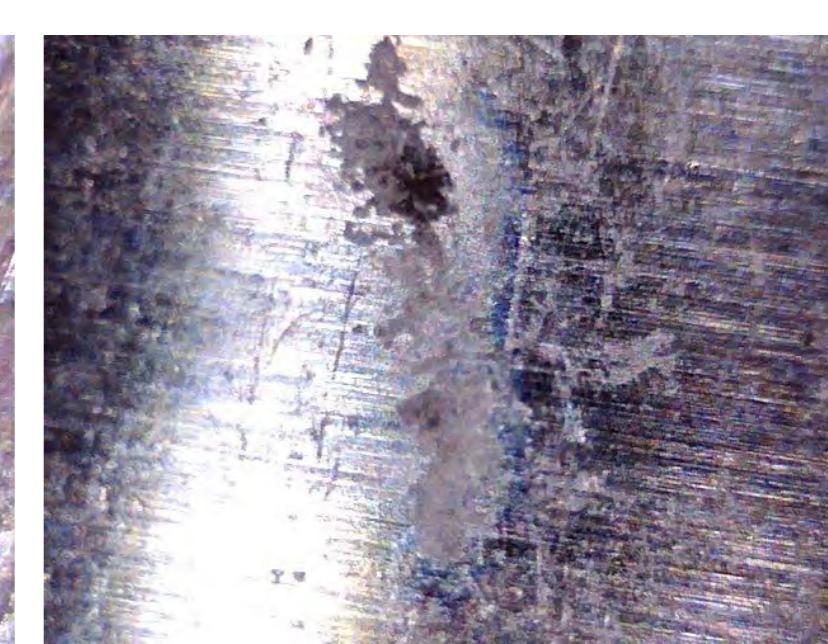
圖二十九、鐵蝕刻一次 圖三十、鐵蝕刻十次 圖三十一、鐵蝕刻二十次

電漿蝕刻進行次數愈多，蝕刻痕大。

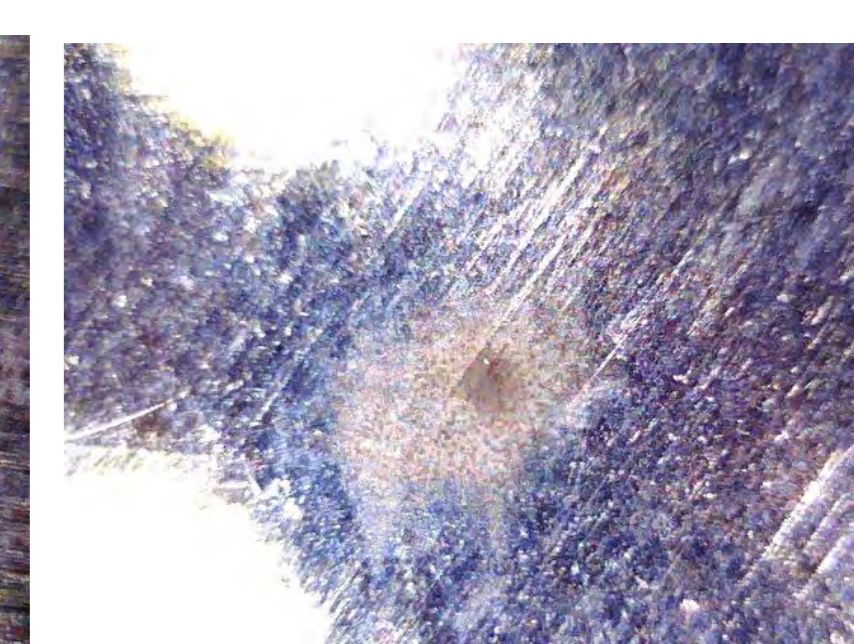
實驗八、探討蝕刻成品放置24小時後蝕刻痕跡是否改變



圖三十二、銅蝕刻30秒(24小時後)第二代



圖三十三、鋁蝕刻30秒(24小時後)第二代



圖三十四、鐵蝕刻30秒(24小時後)第二代



圖三十五、銅片蝕刻1次(24小時後)第三代



圖三十六、鋁片蝕刻1次(24小時後)第三代



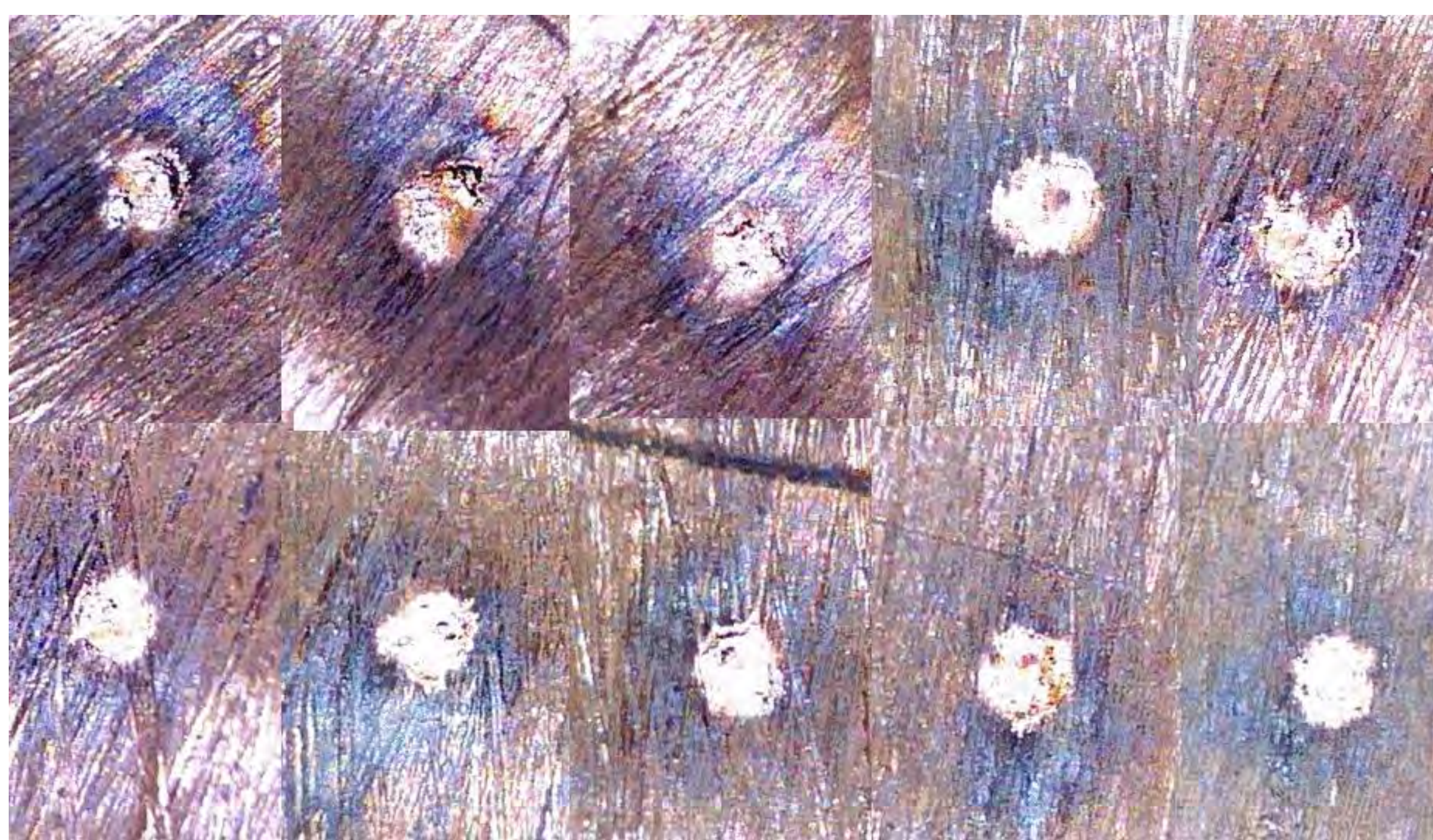
圖三十七、鐵片蝕刻1次(24小時後)第三代

不論是銅、鋁、鐵蝕刻24小時後蝕刻痕的顏色都比24小時前的顏色深。

實驗九：比較第二代與第三代電漿蝕刻裝置對銅產生的蝕刻痕差異



圖三十八、第二代電漿蝕刻裝置蝕刻痕跡



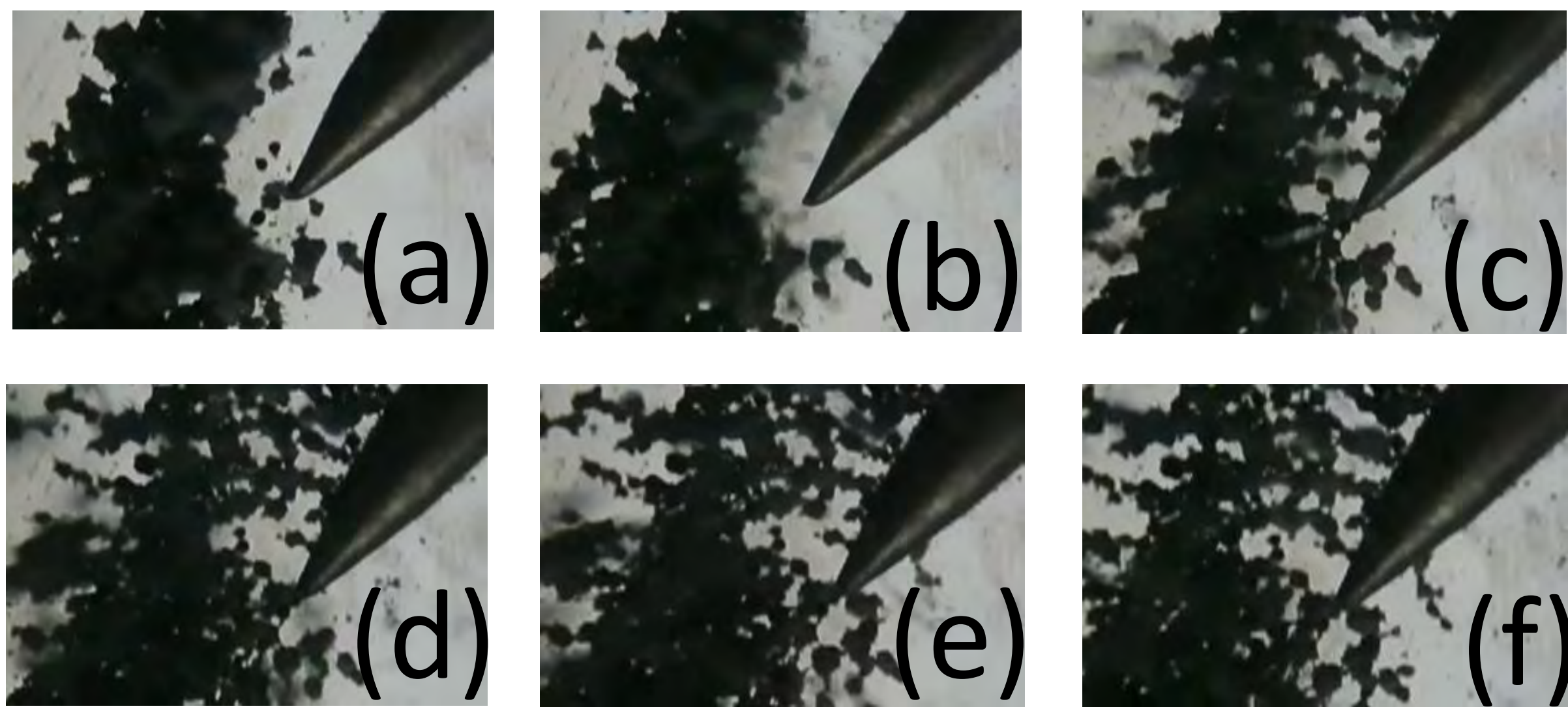
圖三十九、第三代電漿蝕刻裝置蝕刻痕跡

一致性比較
第三代電漿蝕刻裝置 > 第二代電漿蝕刻裝置

陸、討論

一、鐵屑效應

鐵屑效應是由法國的科學家布蘭里所發現的。鐵屑效應是指金屬粉遇到AM的脈衝電波時，金屬屑會凝聚在一起的現象，斷電後維持斷電前狀態。我們推測此現象可能是金屬屑原本顆粒間有空氣(高電阻)無法導通，接受到電波的能量時，使金屬屑中的電荷產生變化而互相吸引而降低電阻形成通路的現象。在我們的實驗結果中，發現小鋁球及鋁粉的激活率偏低，我們推測可能是因為小顆粒受到鐵屑效應而凝聚時，會各自形成一個個的小團，每個小團之間形成空隙，造成斷路。當鋁球重量增加時，可能會因為重量增加，使得底部的顆粒被壓密而容易形成通路，使激活率增高。



圖四十、鋅粉的鐵屑效應(a-f)



圖四十一、鐵粉的鐵屑效應



圖四十二、鋁粉的鐵屑效應

二、歷代發射器的優點和缺點

表十、各代發射器的優缺點比較表

	第一代	第二代	第三代	第四代
優點	易攜帶	電弧大	頻率穩定 (>1200Hz)	電弧穩定 (400Hz)
缺點	不容易調整電弧	電弧容易被影響	電弧不穩定	電弧小 (<1cm)

三、檢波管

檢波管是一種可以接收無線電波信號的電子零件或電路。我們在填充物大小的實驗結果與黃以勒等人的在2008年填充物大小的實驗結果不同，我們的實驗結果是填充物愈大，激活率愈高，而他們的實驗結果為填充物愈小，激活率愈高。我們推測這種情形可能是因為對方作實驗時，將發射器與檢波器以電線相連，而造成與我們的實驗結果不同。我們認為大鋁球間接觸點較少，當發生鐵屑效應時，容易形成通路，反之鋁粉則因為容易形成團塊，而不易導通。

四、電漿蝕刻

電漿蝕刻是指當高壓電與接地線的導體間產生高壓電弧，而高壓電弧中的電子會轟擊金屬板，造成金屬板留下痕跡。我們的實驗總共製造了三代的電漿蝕刻裝置，我們發現第一代裝置雖然電弧較大，卻不易在金屬表面留下蝕刻痕，後來我們以電漿球蓄積電容就有較好的效

果，但有電弧不穩定忽大忽小的問題，造成蝕刻痕不一致的現象。我們以自組電路裝設四個電容，進行蝕刻能產生一致的蝕刻痕。如表十一

表十一、三代蝕刻裝置優缺點比較表

	第一代	第二代	第三代
優點	電弧大	頻率穩定	一致性高
缺點	效果不佳	電弧不穩定	不能連續放電

我們第三代的電漿蝕刻裝置只需**0.64瓦**的功率就能蝕刻金屬，而朱國璋等人在2016年的蝕刻裝置則需**27瓦**的功率進行果皮蝕刻，我們電漿蝕刻裝置的瓦數比較低較為節能，可能原因為我們加裝了電容列陣，能先蓄電在一次放電，而有較好的效果。

而我們為了讓蝕刻圖形更為精準，我們嘗試以電火布、石頭、陶瓷、玻璃等材料進行輔助蝕刻直線，結果發現陶瓷和玻璃有較佳的效果。電火布會因為高溫而融化，石頭則因厚度較厚，影響電弧行進方向，在蝕刻過程中，因為手部的震動而影響蝕刻結果，如果以機械手臂來進行蝕刻，結果將會更精準。



圖四十三、不同蝕刻輔助器材



圖四十四、在銅、鋁、鐵片上用電漿蝕刻刻出字

柒、結論

- 一、可利用鐵屑效應自製檢波器。
- 二、連續性脈衝訊號比非連續性脈衝訊號激活率高。
- 三、檢波器以不同直徑大小的鋁球填充時，激活率的表現為：大鋁球 > 中鋁球 > 小鋁球，鋁粉無法激活。
- 四、小鋁球的重量須達5公克時較易激活，大鋁球、中鋁球則不受影響。
- 五、電弧數量多寡對激活率無顯著影響。
- 六、四種自製發射器的感應距離，以第四代(ZVS)的效果最佳，可達99公分。
- 七、刻痕深度鋁 > 銅 > 鐵，而顏色深度則是銅 > 鋁 > 鐵
- 八、電漿蝕刻的時間越久或次數越多，會使蝕刻痕越大；放置24小時，蝕刻顏色會變深。
- 九、自組電路電漿蝕刻裝置(第三代)產生的蝕刻痕跡有較高的一致性。

捌、參考文獻

- 一、休伊特著。2001。「觀念物理V，電磁學.核物理」。天下遠見出版社。台北
- 二、鐵屑效應：<http://baike.baidu.com/view/428994.htm>
- 三、朱國璋、吳振璋、鍾禎芝。2016。空心的雷神之槌——避雷針與環境的變化對產生電弧的影響。中華民國第56屆中小學科展覽會。
- 四、野尻一男著，倪志榮譯。2015。半導體乾蝕刻技術。白象文化出版社
- 五、自然與生活科技課本第五冊。2015。第四章電流、電壓與歐姆定律，南一出版社
- 六、維基百科擷取自蝕刻 <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%9D%95%E5%88%BB>
- 七、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>
- 八、マルコーニ電信機を作る-YouTube。2011。<https://www.youtube.com/watch?v=X-N-HuUFolw>