

National Cheng Kung University
Institute of Space and Plasma Sciences
111 Annual Report

研究生：劉哲宇

指導教授：張博宇 博士

日期：2022/2

摘要

為了改善系統的時間不準度問題，我設計了一個以 MOSFETS 為開關的高壓脈衝產生器，來取代多重觸發系統中的梅鳳號，目前已完成兩極的測試電路，上升時間為 $35 \pm 2 \text{ ns}$ 。同時，軌道間隙開關的電極在實驗過程中會產生焦痕，我們根據學長所建立的流程進行研磨，並根據自己的經驗對研磨模流程進行改良另外，我也建立高壓幫浦的換水流程。最後，為了使高壓警示燈開關以及雷射警示燈開關能更穩定的固定在抽風櫃上，我使用了適用於金屬的黏膠。

目錄

- 一、 高壓脈衝產生器
 - 1.1 決定所需產生之脈衝電壓
 - 1.2 電路設計
 - 1.3 實驗測試
- 二、 軌道間隙開關研磨流程
- 三、 氣壓幫浦換水流程
- 四、 警示開關盒子
- 五、 未來工作
- 六、 總結
- 七、 附錄

一、高壓脈衝產生器

為了取代梅鳳號(慢速高壓脈衝訊號產生器)，我們設計了一個可以產生 -8-kV 的高速脈衝訊號，以確保可以觸發下一級的馬氏機。如圖 1 所示，目前我們的多重觸發系統是透過光學脈衝產生器來觸發梅鳳號，再由梅鳳號觸發馬氏機，最後由馬氏機提供一個高速高壓脈衝訊號。

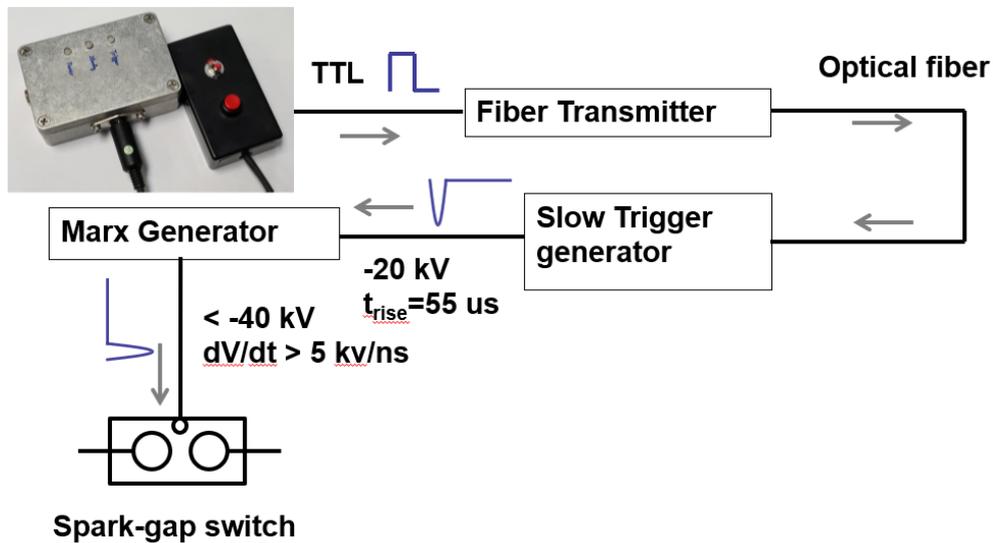


圖 1 多重觸發裝置流程圖

梅鳳號產生的脈衝時間尺度落在 μs 等級，即便多重觸發系統中其餘設備所產生的脈衝時間尺度皆為 ns 等級，系統最後產脈衝訊號的時間不準度依然落在 μs 等級。因此，新的高壓脈衝產生器所產生的脈衝時間尺度需落在 ns 等級，才能將時間不準度降至 ns 等級。

1.1 決定所需產生之脈衝電壓

根據承翰學長於 2021/09/16 Helmholtz coil 放電測試實驗我們量測了梅鳳號輸出端(圖 2 中的紅色箭頭)相對於接地(如

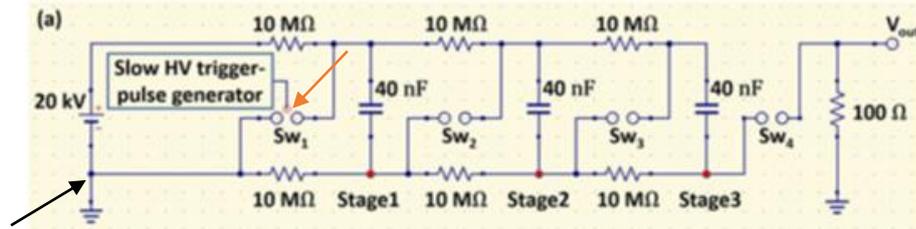


圖 2 量測位置紅色為高壓端黑色為地端

圖 2 中的黑色箭頭)，得到梅鳳號輸出訊號

(/Experiments/2020_cdu/20210916_Helmholtz coil)如圖 3 所

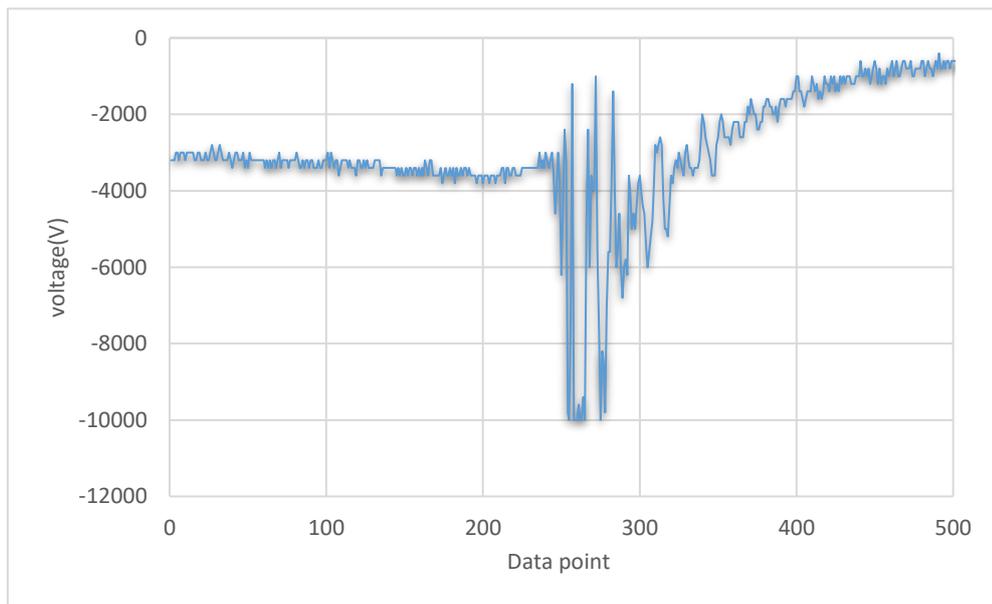


圖 3 梅鳳號輸出電壓與資料作圖

示，發現在第 225 數據點以後，因為圖 2 中的 Sw1 導通而產生的高壓雜訊，藉此判斷 Sw1 導通電壓，因此取前 225 筆資料做平均在此稱為 V_B ，並減掉三個標準差 $V_{3\sigma} = V_B - 3\sigma$

做為導通的標準，得到 $V_{3\sigma}$ 之後將 $|V| < |V_{3\sigma}|$ 的數據轉換成 1， $|V| > |V_{3\sigma}|$ 數據則轉為 0 轉換後結果，如圖 4 所示。

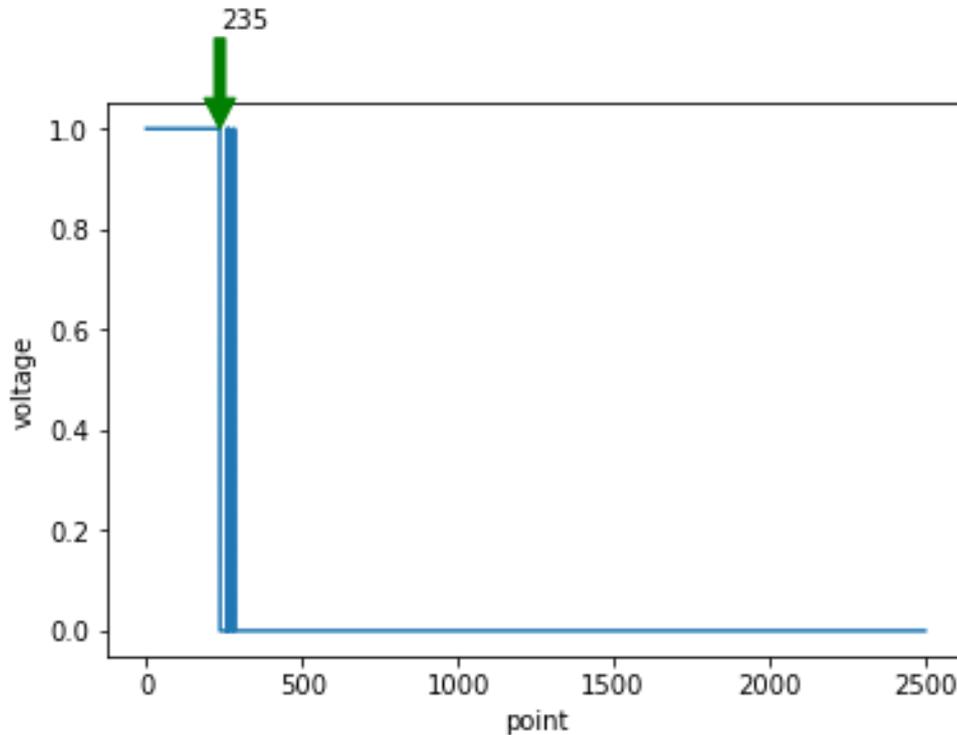


圖 4 轉換為 0 與 1 後結果

接著，找出第一個為 0 的點的前一個點定為 P_0 ，再往前取 10 個點的電壓取平均，定義為導通電壓值 V_{avg} ，16 次實驗所得的結果如表 1 及圖 5 所示，可以發現所需最高所需導通電壓為 -4020 V。

data	V-avg(V)	data	V-avg(V)
F0005	-3220	F0013	-2620
F0006	-3040	F0014	-3920
F0007	-2980	F0015	-3500
F0008	-4020	F0016	-3900
F0009	-3300	F0017	-3580
F0010	-3800	F0018	-3540
F0011	-3200	F0019	-3900
F0012	-4020	F0020	-3760

表 1 各資料導通電壓

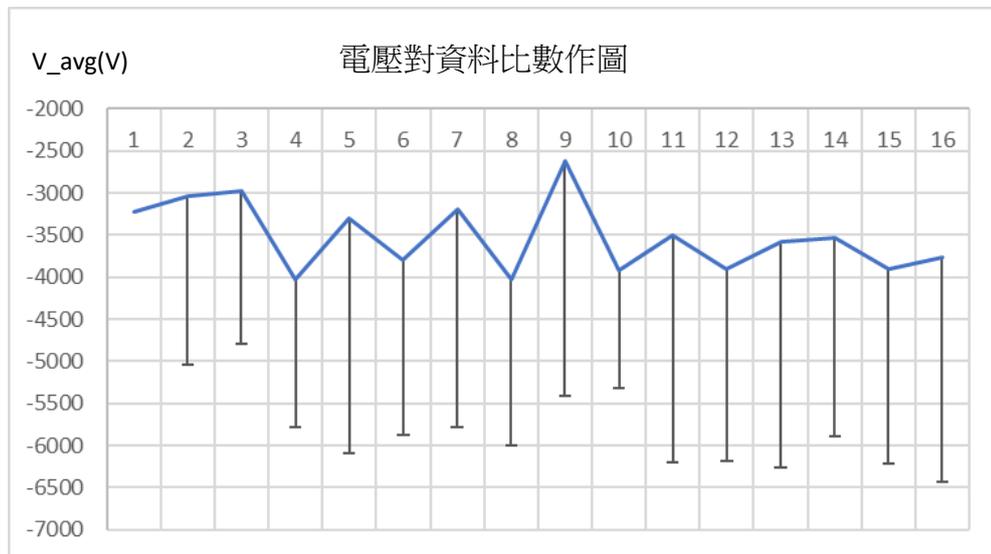


圖 5 導通電壓加 3 個標準差

為了確保可以使原本透過梅鳳號驅動的馬氏機可以運作，我們將所有導通電壓加上三個標準差，得到所需最大導通電為 -6500 V，首求保險，我們決定將脈衝電壓的輸出定為 -8000 V。

1.2 電路設計

我們使用 MOSFETs 作為我們快速高壓脈衝產生器的開關，因為其快速開關的特性符合我們上升時間在 ns 等級的要求，然而，單一 MOSFET 的源極及汲極無法承受 8 kV 的跨壓，所以我們透過堆疊 8 個 MOSFETs，讓每一個 MOSFET 源極及汲極間的跨壓降為 1 kV，設計電路如圖 6。

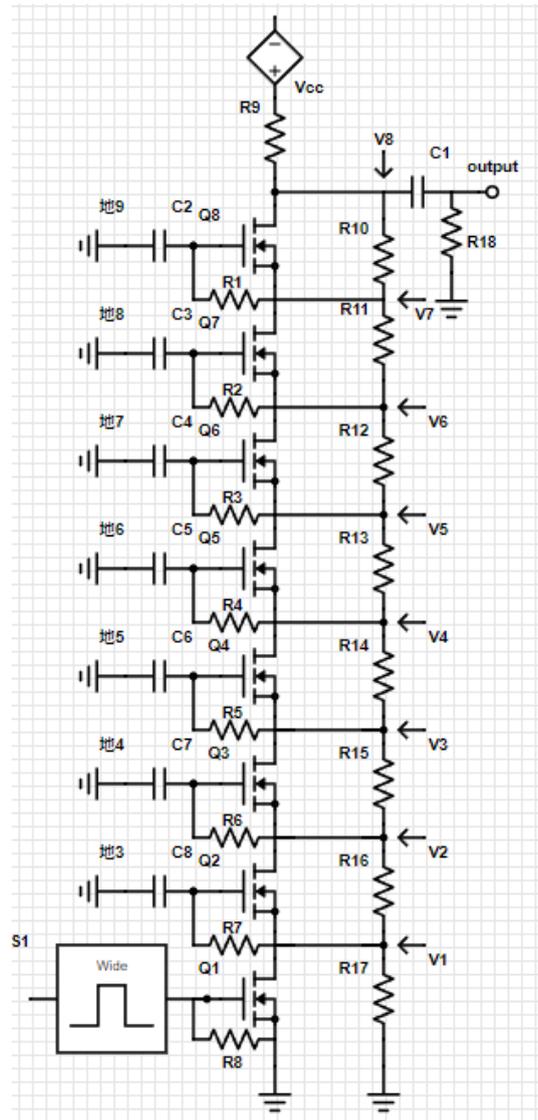


圖 6 八級 MOSFET 的設計電路

如圖 6 所示，若 $R_{10}=R_{11}=\dots=R_{17}\gg R_9$ ，透過電阻分壓可得 R10 到 R17 的每個電阻跨壓皆為 $1/8V_{CC}$ ，而 C1 會充電至 V_{CC} ，C2 會充電至 $7/8V_{CC}=V_{C20}$ ，C3 會充電至 $6/8V_{CC}=V_{C30}$ ，以此類推 C8 會充電至 $1/8V_{CC}=V_{C80}$ 。R9 除了保護電源供應器以外還有在所有 MOSFET 導通時隔離 V8 與 V_{CC} 。

當一個 20V 的訊號讓 Q1 啟動時 V1 會被拉到 0V，此時 C8 會對 MOSFET Q2 的源極和閘極間的等效電容 C_{gs} 充電至 20V。此過程可用如圖 7 之等效電路說明，當圖 6 中 V1 的電壓為 0V 時，圖 7 中的開關 S2 視為關上，此時 C8 對源極和閘極間的等效電容 C_{gs} 充電，等同電容分

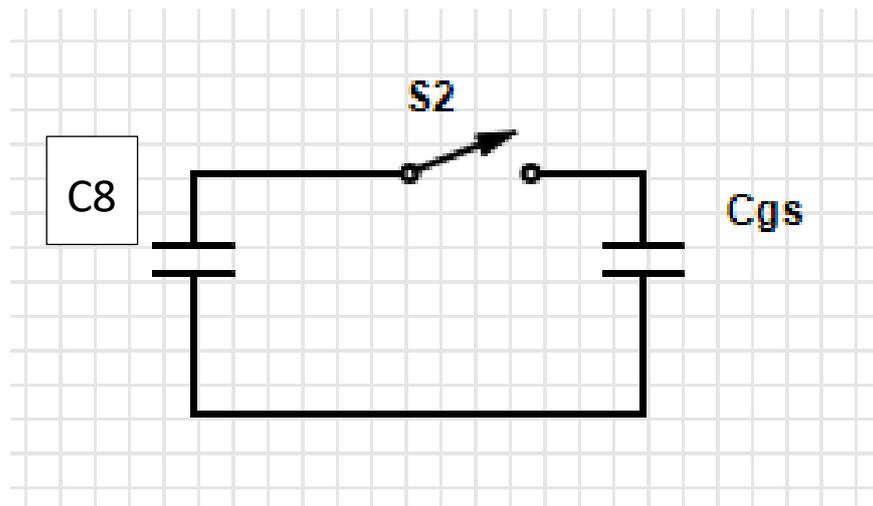


圖 7 C8 與 Q2 等效電路

壓可得 $V = V_{C80} \frac{C8}{C1+Cgs}$ ，透過電容分壓公式可以推導出

$C8 = \frac{C_{gs} \cdot 20}{V_{C80} - 20}$ 。以此類推，利用此公式計算出將各級 MOSFET 被驅動時，源極和閘極間的等效電容充電至 20 V 所需之電容 C2 - C7，而我們已知 $V_{C20} = 2 \cdot V1$, $V_{C30} = 3 \cdot V1$, ... 。以此類推可得 $C7 = \frac{C_{gs} \cdot 20}{2 \cdot V1 - 20}$, $C6 = \frac{C_{gs} \cdot 20}{3 \cdot V1 - 20}$, ... 。當所有 MOSFETs 同時啟動時 V8 的電壓會被拉到 0 V，此時電容 C1 會對負載放電在 output 點產生一個 -8-kV 的脈衝，上升速率則由 MOSFET 導通的時間決定。

電容名稱	電容值(pf)
C2	60
C3	30
C4	20
C5	15
C6	10
C7	10
C8	9

表 2 各級電容值

1.3 實驗測試

我們製作了一個兩級的測試電路來了解可能會遇到的問題，如圖八所示。

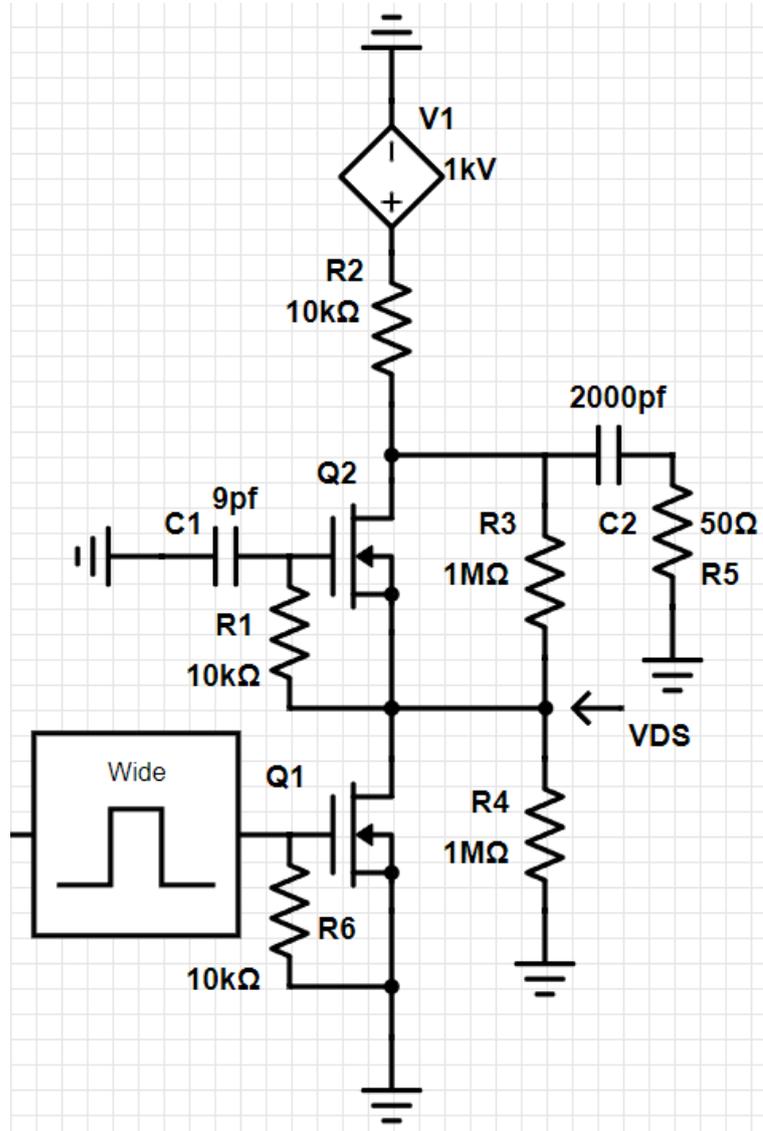


圖 8 兩級高壓脈衝電路

在我們的兩級測試電路中，我們使用的 MOSFET 型號為 TSM1NB60，此 MOSFET 最高可承受 600 V 的電壓，驅動時需要閘極及汲極的跨壓為 20V，其源極及汲極腳位之

間等效電容為 222 Pf。每一個 MOSFET 在此電路中分別會有 500 V 的跨壓，因此預期能產生 -1-kV 的脈衝。

實驗結果如圖 9 所示，兩級脈衝電路可以產生峰值為 -1-kV 的脈衝電壓，除此之外，我們透過如下之分析計算上升時間。首先，針對時間等於零的前 100 個點，取這些點電壓的平均並加上 3 個標準差視為 MOSFET 啟動前的電壓 V_0 ，再取第一個 $|V| > |V_0|$ 的點，視其為第一個向下掉的點並取其時間 t_0 。另為定義產生峰值電壓的時間為 t_{max} ，則上升時間 $t_{rise} = t_{max} - t_0 = 35 \text{ ns} \pm 2 \text{ ns}$ ，其中誤差為一個標準差。

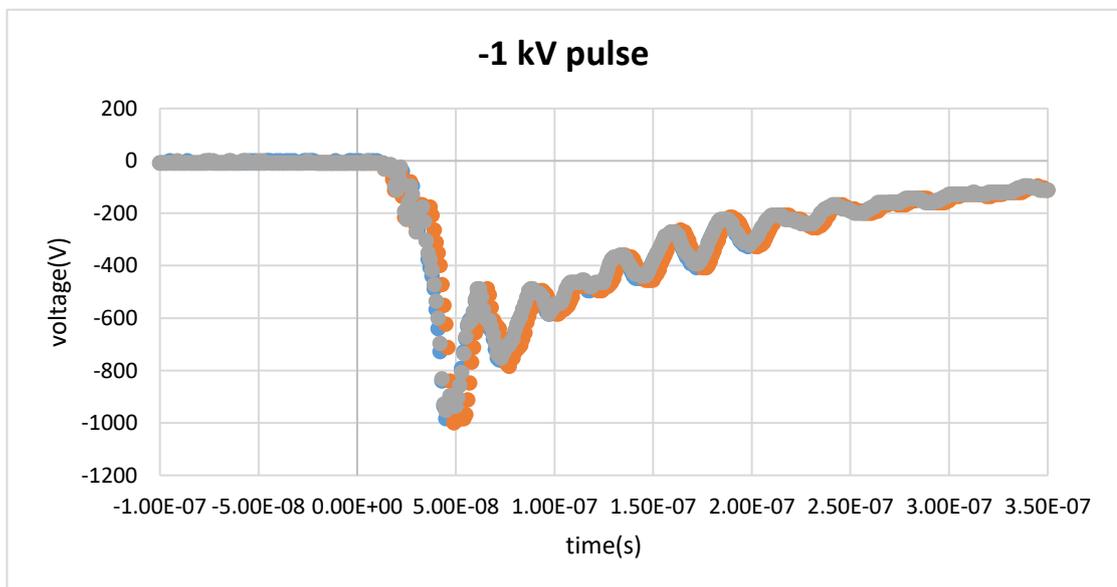


圖 9 -1kV 脈衝

實驗中我們發現 MOSFET 極易損壞，其原因為當系統啟動時，如圖 10 紅色箭頭所示，電容 C2 透過 MOSFETs

對負載 R5 放電，放電時的峰值電流 $I_{\max} = \frac{V}{R} = \frac{1000}{50} = 20 \text{ A}$

的脈衝電流，而我所使用的 MOSFET 最高只能承受 1 A 的脈衝電流，導致 MOSFET 損壞。因此，我們打算提高負載的電阻值到 100Ω ，來降低放電電流峰值，並且更換能承受脈衝電流為 90A 的 MOSFETs，以便保護接下來所需使用之 MOSFETs 不會受損。

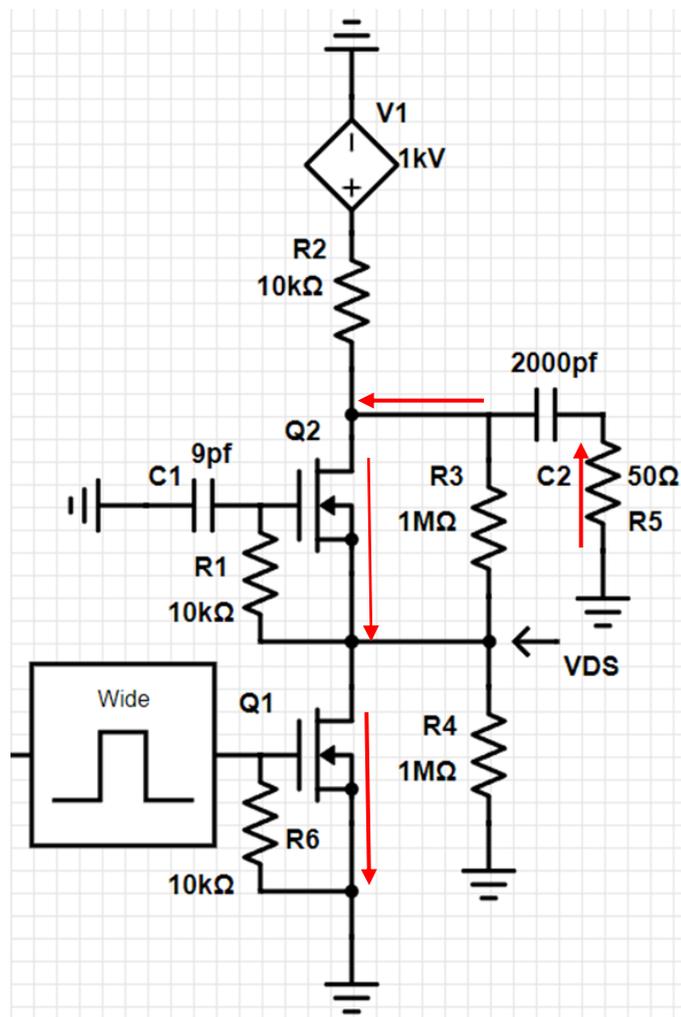


圖 10 脈衝電流方向

二、 軌道間隙開關研磨流程

- 拋光的目標物:
 - 1.軌道間隙開關的放電電極(如圖 11)及刀鋒電極(如圖 12)。
- 所需工具:
 - 1.砂紙(Rough:150,320,400, Fine:2000)。
 - 2.鑽石膏 Diamond Pastes(W3.5-Rough, W2.5-Fine, W1.5-The finest)。
 - 3.電動拋光機。
 - 4.羊毛拋光磨頭。
 - 5.實驗護目鏡。
 - 6.乳膠手套。
 - 7.異丙醇(Isopropanol, IPA)。
- 進行流程:
 - 1.帶乳膠手套。
 - 2.在焊桌上進行研磨。
 - 3.將砂紙裁切為正方形。
 - 4.在砂紙背面紀錄砂紙編號。
 - 5.用砂紙開始研磨電極。
 - 6.用編號 150 的砂紙磨電極約 30 分鐘，約 10 分鐘左右可換取新的同編號砂紙繼續磨。

- 7.用編號 320 的砂紙磨約 20 分鐘，約 10 分鐘左右可換取新的同編號砂紙繼續磨。
- 8.用編號 400 的砂紙磨約 10 分鐘。
- 9.用編號 2000 的水砂紙加水研磨約 20 分鐘。
- 10.確認磨到電極上的燒焦痕跡大都消失，第一階段的拋光完成，如圖 13。
- 11.拿出電動拋光機，將羊毛拋光磨頭裝上，準備進行第二階段拋光。
- 12.戴上實驗護目鏡。
- 13.取一張大拭淨紙擋在衣服前，以防止研磨時鑽石膏噴濺到衣服。
- 14.使用 Rough(W3.5)鑽石膏均勻塗抹在電極上，如圖 14。
- 15.利用電動拋光機進行拋光，將羊毛磨頭平行於電極方向左右移動，把電極表面完整磨一次。
- 16.鑽石膏會從原本的粉紅色轉為黑色，再將黑色膏均勻塗抹在表面上，重新磨一次。
- 17.重複步驟 14~16 兩次共三次。
- 18.改用 Fine(2.5)鑽石膏重複 14~16 共兩次。
- 19.該用 The Finest(W1.5)鑽石膏重複 14~16 共兩次。

20. 確認電極上的燒焦痕跡都消失，脫下實驗護目鏡。
21. 用異丙醇(Isopropanol, IPA)清潔電極，第二階段的拋光完成。
22. 拋光過程中的所造成的桌面污漬用衛生紙沾少許酒精，將其擦拭乾淨。
23. 將用到的工具放回原位，拋光完成，如圖 15。



圖 11 未拋光前電極照片(有燒焦痕跡)



圖 12 刀鋒電極照片



圖 13 用砂紙研磨後照片



圖 14 將鑽石膏均勻塗抹在電極上

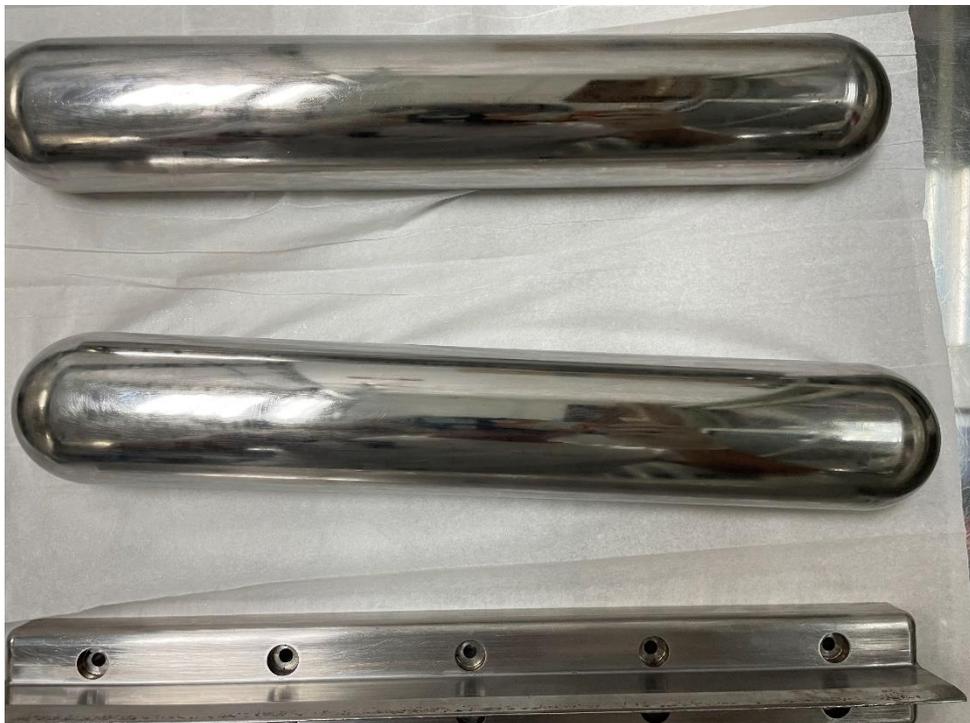
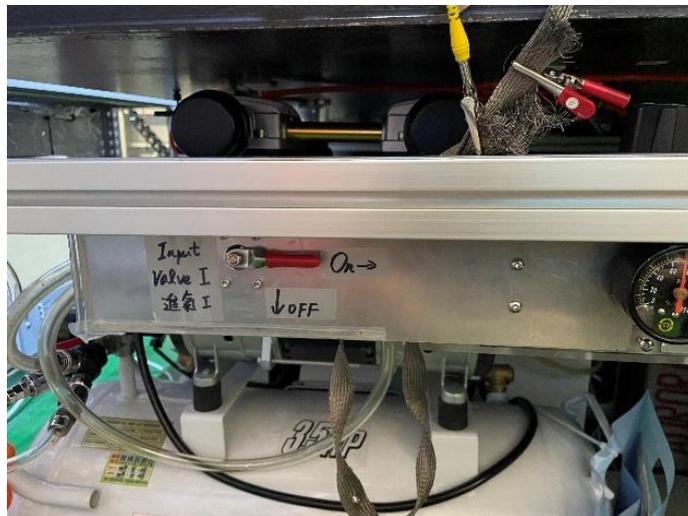


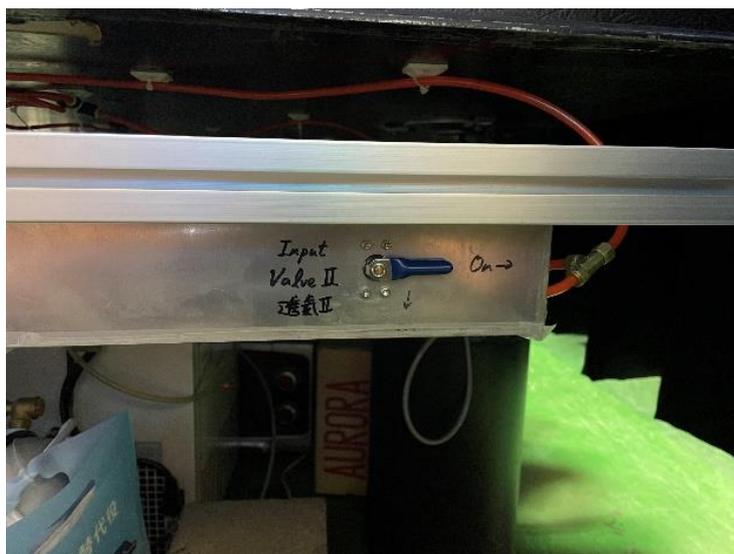
圖 15 用電動拋光機研磨完照片

三、氣壓幫浦換水流程

- 更換週期:每七天一次。
- 所需工具:
 1. 圓形鋁盤。
- 進行流程:
 1. 將光學桌與氣壓幫浦間開關轉至 OFF。



2. 將光學桌與光學桌氣壓計開關轉至 OFF。



3. 將氣壓幫浦的開關向後推關閉。



4. 用噴氣槍對地將氣壓幫浦內氣壓洩至 1.5 kPa(注意不可對人噴氣)。



5. 將圓形鋁盤放置在放氣開關下。



6. 承接噴出之液體緩慢打開加壓幫浦下放氣開關至氣體完全排出 (注意不可一次將開關轉至全開)。
7. 關閉放氣開關。
8. 打開氣壓幫浦開關。
9. 等待氣壓幫浦停止發出聲音。
10. 將其與氣壓幫浦間開關轉至 ON
11. 將光學桌氣壓計與光學桌間開關轉至 ON。
12. 紀錄完成放水日期與預計下次放水日期。
13. 將裝有廢液容器拿去廁所水槽倒掉。
14. 用清水清洗容器。
15. 將容器擦拭乾淨。

四、警示開關盒子

目前使用黏膠方式固定警示開關盒子，但久了容易掉落。因此利用 Fusion360 繪製警示開關盒子工程圖(見附錄)，再利用 3-D 列印機所印出盒子(如圖 16)。

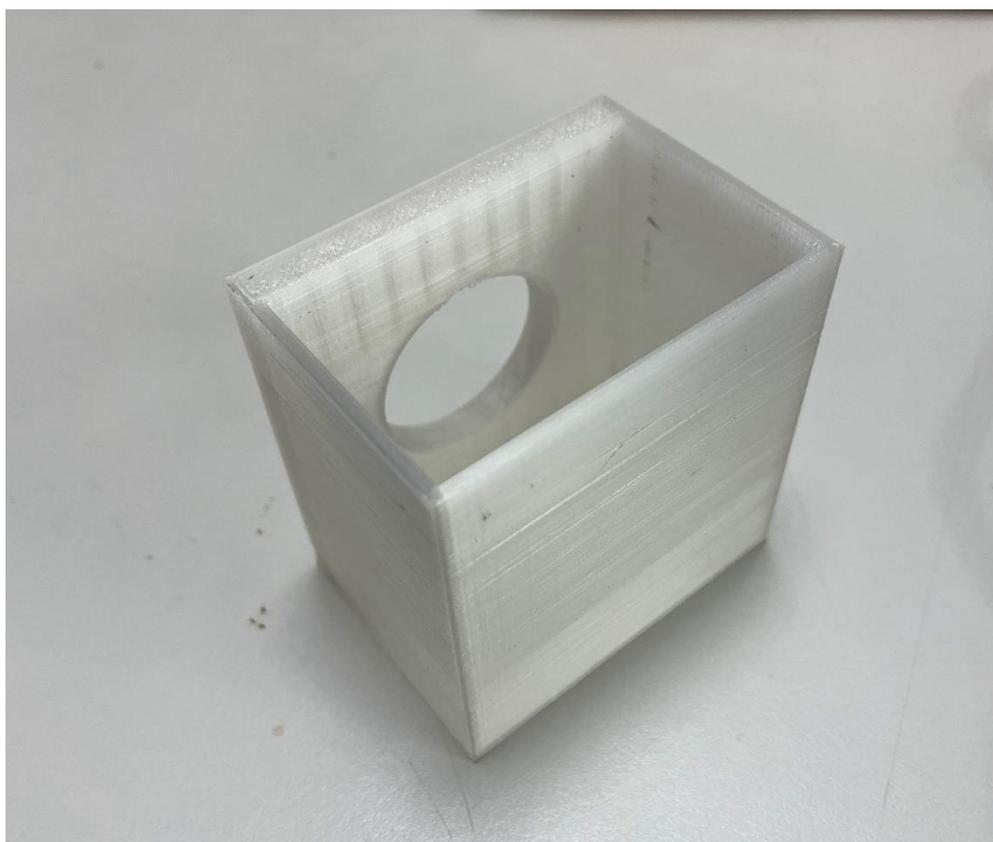


圖 16 3-D 列印警示該開關盒子

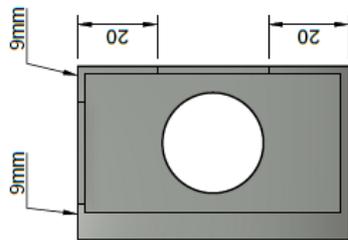
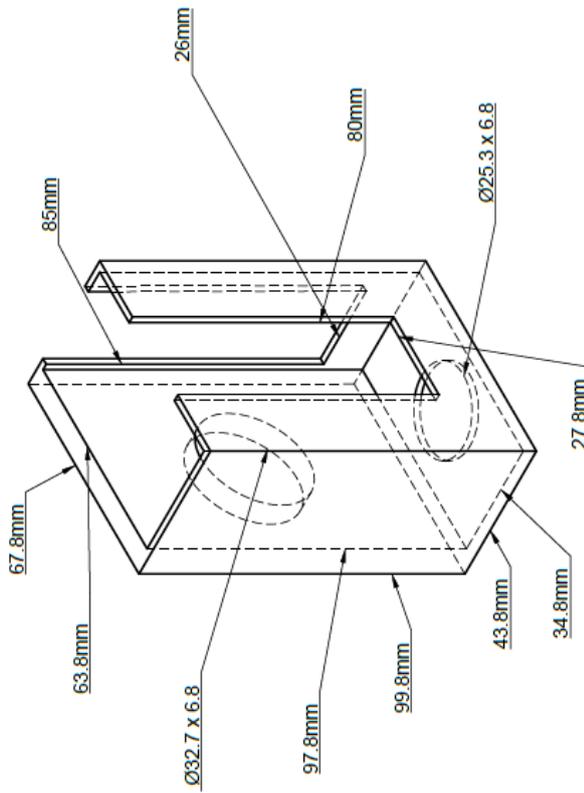
然而，量測成品與工程圖相比後，發現圓形挖孔直徑會縮小 0.3mm，而邊長則是在 x, y, z 方向皆會多 0.2mm。除此之外，未注意警示開關盒子側邊有突起導致盒子無法使用，根據第一次失敗經驗修改之工程圖如附錄。最後，改使用適用於金屬的黏膠，將開關直接固定在抽風櫃側邊。

五、未來工作

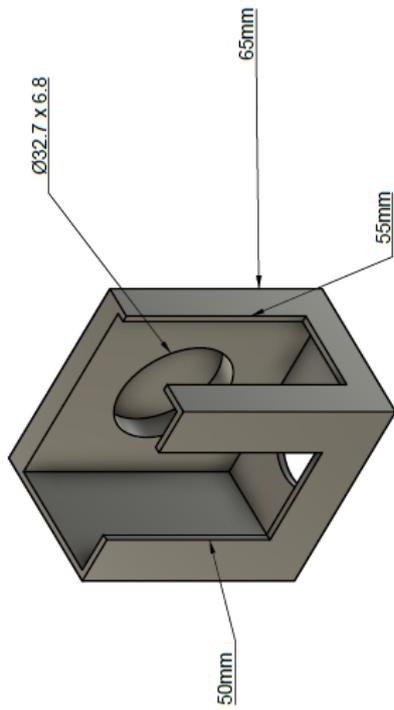
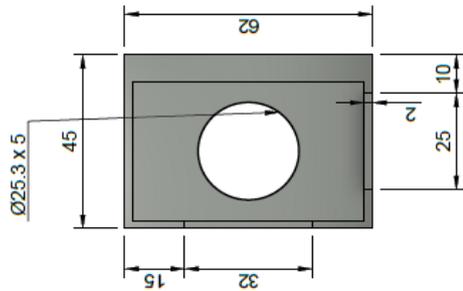
1. 繼續完成可以產生 -8-kV 的高壓脈衝產生器，並將負載提高至 $100\ \Omega$ 以降低系統啟動時所產生的脈衝電壓，並計算新購買 MOSFETS 對應各級所需電容值。
2. 量測完成後高壓脈衝產生器所產生電壓波形以及上升時間。
3. 完成雷射法拉第箱的製作。
4. 觀察學長操作實驗學習，並觀看實驗室學長姊的論文來更加了解 PGS 系統，並開始自己的研究計畫。

六、總結

兩極測試脈衝產生器如我們預期的可以產生 -1-kV 的脈衝，且上升時間為 $35\ \text{ns} \pm 2\ \text{ns}$ ，透過測試電路發現當系統啟動時，所產生的脈衝電流會傷害 MOSFET，且串聯在電源前之電阻不僅只有保護電源供應器功能，還有在系統啟動時隔離電源確保持輸出電容另一端電壓拉到地的功能，透過繪製警示開關盒子，更加熟練 Fusion 360 的使用以及了解 3-D 列印與工程圖所產生的誤差。



Dept. SAPS	Technical reference	Created by 新宇 劉	2021/10/6	Approved by	
		Document type		Document status	
		Title	L.adjust	DWS No.	PPL202110004_LIU2
				Rev.	B
				Date of issue	2021/10/08
				Sheet	1/1



Dept. SAPS	Technical reference	Created by 哲宇 劉	Approved by 2021/10/17
		Document type	Document status
		DWS No. PPL202110002_LIU2	
		Title Small.adjust	Rev. Date of issue B 2021/10/07
			Sheet 1/1