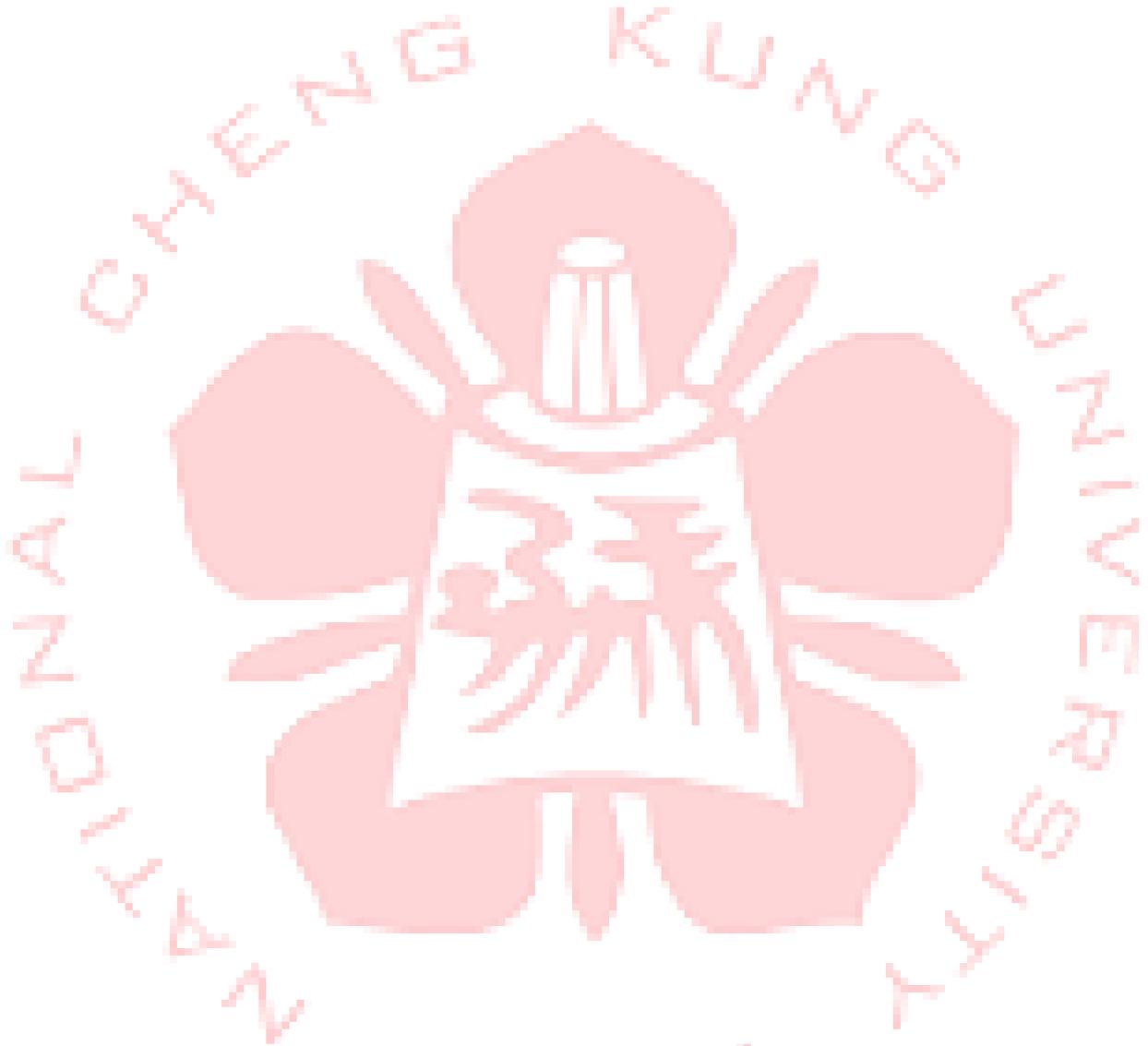


National Cheng Kung University
Institute of Space and Plasma Physics
Biannual Progress Report



研究生：楊昇樺

指導教授：張博宇 博士

中華民國一〇七年三月三十日

摘要

實驗室在未來要建造一個輸出能量為 10 kJ 的脈衝功率系統(Pulsed-power system)，是個先將能量儲存再瞬間輸出能量的系統，此系統的最大輸出電壓和電流約為 80 kV 和 500 kA，上升時間(Rise time)約為 1 μ s。因為系統的輸入需求為直流電，由電源供應器提供交流電，並用變壓器將電壓升高，再由整流器將交流電轉為直流電以提供系統的輸入。另外，系統的開關極為重要，不儘要能夠承受高電壓而不崩潰，而且開關時間要能被準確的控制，故在此特別研究其特性。我們選用的開關為間隙開關(Spark gap switch)，間隙開關之間隙距離和開關內部氣壓是影響開關的主要因素。我們一共做了 3 個開關，經過每次的改良最後選用總間隙距離為 8 mm 的開關，加入氮氣並分別量測不同氣壓下之崩潰電壓。為了控制開關啟動的時間，我們使用觸發脈衝產生器(Trigger pulse generator)來控制間隙開關。觸發脈衝產生器的輸出電壓約為 20 kV，上升時間約為 55 μ s，藉由瞬間的高壓放電去觸發間隙開關使其導通。由訊號產生器提供訊號至觸發脈衝產生器使間隙開關觸發並崩潰。為了避免脈衝訊號由間隙開關回流至訊號產生器，我們在觸發脈衝產生器和訊號產生器間用光纖做連結，將電訊號轉成光訊號以防止訊號產生器的損耗。未來，我們需要量測間隙開關之時間不準度(jitter)，並完成架設脈衝功率系統。

Abstract

A 10 kJ pulsed-power system is being built. The system stores the energy and release it in a short period of time. The expected peak output voltage and current are ~ 80 kV and up to ~ 500 kA, respectively, with a rise time of ~ 1 μ s. Since, the input of the system is a DC current, we use rectifier to transform the AC current from the power supply. On the other hands, switches play an important roles in the system. The switch has to hold high voltage without breakdown. In addition, it has to be controlled precisely in time. We picked spark gap switches for our system. The gap distance between electrodes and the gas pressure inside the spark gap switch are important factors for the breakdown voltage of the spark gap switch. We built 3 spark gap switches in total with better and better performance. The latest one has a total gap distance of 8 mm. The breakdown voltages with pressurized Nitorgen gas in different pressure were tested. In order to control the spark gap switch, we use a trigger pulse generator. The trigger pulse generator provides a ~ 20 kV trigger pulse with a rise time of ~ 55 μ s. The function generator deliver the signal to activate the trigger pulse generator and thus triggers the spark gap switch. In order to protect the function generator damaged by the reflected signal from the spark gap switch, we use fiber to connect the trigger pulse generator and

the function generator. In the future, we will test the jitter of the spark gap switch and build the whole pulsed-power system.



目錄

摘要.....	1
Abstract.....	2
圖目錄.....	6
第一章 緒論.....	8
第二章 整流器.....	10
2-1 目的.....	10
2-2 運作原理.....	10
2-3 測試方式及結果.....	14
第三章 間隙開關.....	15
3-1 簡介.....	15
3-2 目的.....	16
3-3 製作.....	16
3-3-1 第一代間隙開關.....	16
3-3-2 第二代間隙開關.....	17
3-3-3 第三代間隙開關.....	20
3-4 量測.....	22
3-4-2 第二代間隙開關.....	23
3-4-3 第三代間隙開關量測.....	24
3-5 實驗結果.....	25
3-5-2 第二代間隙開關實驗結果.....	26
3-5-2 第三代間隙開關實驗結果.....	28
第四章 氣體加壓系統.....	32
第五章 觸發脈衝產生器.....	34
5-1 簡介及目的.....	34
5-2 光訊號系統.....	35

第六章 未來工作.....	39
第七章 總結.....	40
參考文獻.....	41



圖目錄

圖 1-1 此為實驗室未來系統建設之脈衝功率系統之側視圖。	8
圖 1-2 此為實驗室未來系統建設之脈衝功率系統之上視圖及系統資訊。	8
圖 2-2-1 圖中左側為變壓器，由變壓器輸出後之右側為整流器之內部原件結構圖。	10
圖 2-2-2 此為脈衝功率控制器內部結構。	10
圖 2-2-3 圖中左側為變壓器，由變壓器輸出後之右側為整流器之內部原件結構圖。	11
圖 2-2-4 此為整流器之運作原理。	17
圖 2-3 此圖為整流器正電壓之輸出。	16
圖 3-1 此為不同氣體下之 Paschen's curve 比較圖。	13
圖 3-3-1 第一代之間隙開關。	18
圖 3-3-2 第一代間隙開關之電極。	19
圖 3-3-3 第一代之間隙開關之數據分析。	33
圖 3-3-4 第二代之間隙開關。	20
圖 3-3-5 第二代間隙開關之電極。	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-3-6 第二代間隙開關之電極頭設計圖。	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-3-7 第二代間隙開關之圓板設計圖。	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-3-8 圖中下方為第一代的間隙開關，上方為第二代的間隙開關。	23
圖 3-3-9 氣體系統總圖。	24
圖 3-3-10 氮氣鋼瓶配置圖。	26
圖 3-3-11 第三代間隙開關之側視圖。	20
圖 3-3-12 第三代間隙開關之電極頭設計圖。	28
圖 3-3-13 第三代間隙開關之外罩設計圖。	29
圖 3-4-1 第二代間隙開關系統之實驗配置圖。	30
圖 3-4-2 第三代間隙開關系統之實驗配置圖。	31
圖 3-5-1 第二代間隙開關系統實驗後分析之數據。	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-5-2 第二代間隙開關實驗量測值和 Paschen's curves 比較圖。	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-5-3 第二代間隙開關系統實驗數據之限性迴歸。	35
圖 3-5-4 第三代間隙開關系統實驗數據，為前三次實驗之總圖。	35
圖 3-5-5 第三代間隙開關系統實驗數據，為前三次實驗崩潰電壓之平均值和標準差。	38
圖 3-5-6 第三代間隙開關系統實驗數據。	36
圖 3-5-7 第三代間隙開關系統實驗數據，3 atm 下之崩潰電壓平均值和標準差之比較。	36
圖 4-1-1 系統整體觸發流程。	36
圖 4-1-2 光耦合訊號對(Optical coupling)。	30
圖 4-1-3 接受器(Receiver)和轉換器(Transmitter)。	30
圖 4-1-4 接收器電路圖。	30

圖 4-1-5 轉換器電路圖。.....31
圖 4-1-6 光耦合訊號對和觸發脈衝產生器系統。.....31
圖 4-1-7 接收器和轉換器及觸發脈衝產生器系統。.....32
圖 4-1-8 觸發脈衝產生器和光纖系統完成後之外觀。.....32



第一章 緒論

實驗室在未來想要藉由實驗來模擬太空風對於行星間的交互作用，為了產生如太陽風般的高能粒子需要電漿噴流的裝置，故建造一輸出能量為 10 kJ 的脈衝功率系統，藉由 20 顆 $1 \mu\text{F}$ 的電容儲存電能，2 顆電容串連為一組(One stage)，共十組使其並聯，並用間隙開關控制電能的釋放，電容外部用油槽做絕緣並接地，此系統的最大輸出電壓和電流約為 80 kV 和 500 kA，上升時間約為 $1 \mu\text{s}$ 。為了模擬太空環境實驗最終的電能輸出在真空腔內，並使用鋁板來連結間隙開關和真空腔。鋁板間用 Mylar 來做絕緣，此構造如同平行板傳輸線。

為了控制間隙開關建造一 8 級的馬克斯發電機(Marx generator)。馬克斯發電機最大輸出電壓約為 -40 kV，上升時間小於 5 ns，用此高頻訊號來觸發間隙開關。為了觸發此 8 級的馬克斯發電機，我們建造了低頻的觸發脈衝產生器，最大輸出電壓約為 -20 kV，上升時間約為 $55 \mu\text{s}$ ，用訊號產生器輸出一 5 V 的訊號給低頻的觸發脈衝產生器使其觸發 8 級的馬克斯發電機，再由 8 級的馬克斯發電機觸發間隙開關讓電容所儲存的電能釋放出來。為了避免訊號產生器被導通瞬間的逆向電流所損壞，在訊號產生器和低頻的觸發脈衝產生器間用光纖來做連結，在此將電訊號轉為光訊號將電完全隔絕開來。

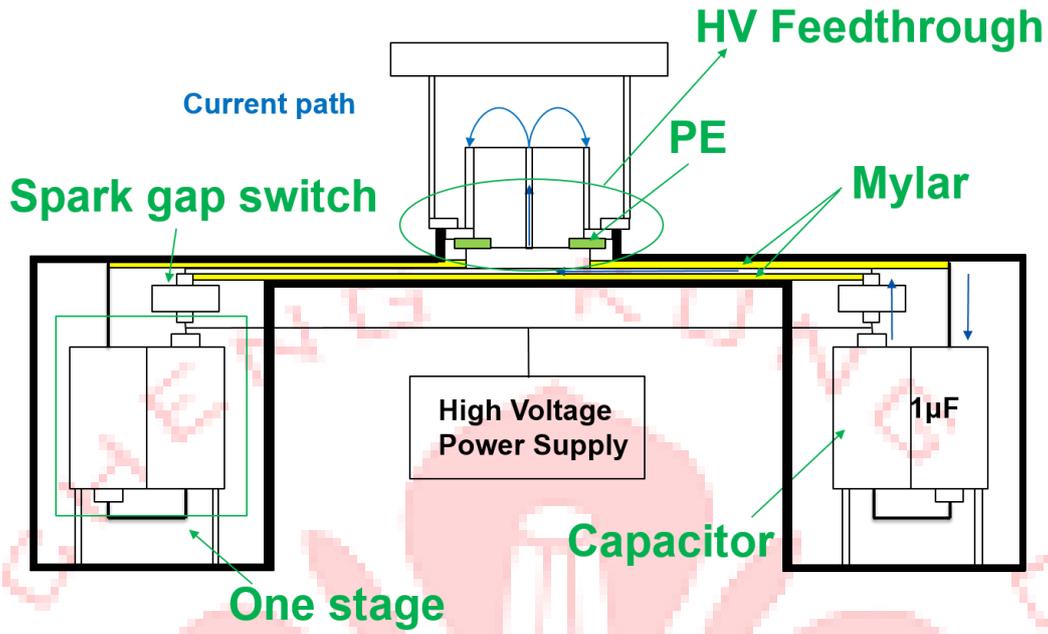


圖 1-1 此為實驗室未來系統建設之脈衝功率系統之側視圖。

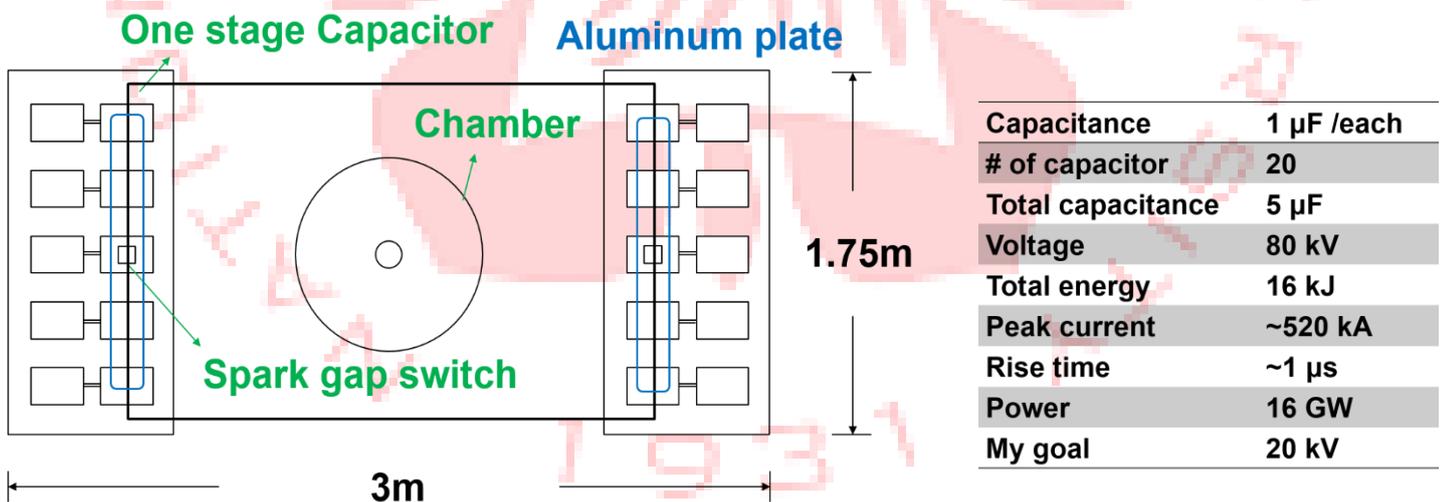


圖 1-2 此為實驗室未來系統建設之脈衝功率系統之上視圖及系統資訊。

第二章 整流器

2-1 目的

我們的脈衝功率系統需使用一個直流的高壓電源，但實驗室只有交流的高壓電源供應器，因此我們使用整流器將輸入的交流電源，轉換為兩個同時輸出的正負直流電源。

2-2 運作原理

系統所需的直流高壓供給，主要是由直流電源供應器輸出，之後藉由脈衝功率控制器(Pulsed-power controller)使訊號由直流變成交流訊號輸出。脈衝功率控制器主要是由兩組電源 G1、G2 和兩組電容 C1、C2 及四組時間開關 T1、T2、T3、T4 和兩組開關 S1、S2 所構成，如圖 2-2-2。因為系統只有一個直流電源供應器 G1，故在運作中開關 S1、S2 為關閉的以形成短路。其中時間開關 T1、T2 同時打開、同時關閉；T3、T4 也是同時開閉，藉由控制 T1、T2 和 T3、T4 來將直流輸入轉為交流輸出。若 T1、T2 關閉形成短路，T3、T4 打開形成斷路，則負載為正輸出，如圖 2-2-3；若 T1、T2 打開形成斷路，T3、T4 關閉形成短路，則負載為負輸出，如圖 2-2-4。在脈衝功率控制器的控制面板上 T_{ON+} 、 T_{OFF-} 、 T_{ON-} 及 T_{OFF+} ，其中 T1、T2 為 T_{ON+} ，T3、T4 為 T_{ON-} ， T_{OFF+} 及 T_{OFF-} 為 T1、T2、T3、T4 四個時間開關同時打開形成斷路之時間，在此我們將使用 T_{ON+} 為 15 μs 和 T_{ON-} 為 35 μs 做疊加得出較完整的正弦波交流訊號，之後在由交流線圈將電壓提升 60 倍輸出。在系統初期設定時，我們預期會用到雙極的馬克斯脈衝產生器(Bipolar Marx generator)，故設計一個整流器將此交流訊號分成一端正輸出和另一端負輸出的直流電源，如圖 2-2-1。

整流器部份主要是用兩個不同方向之二極體和電容並聯而成，而電容部分是由 3 顆 3 nF 的電容並聯而成，如圖 2-2-5。交流電源由變壓器升壓後，正輸出只會流經 D1

二極體，並經由接地端回流至變壓器的輸出端；反之，負輸出只會流經 D2 二極體，並經由接地端回流至變壓器輸出端，如圖 2-2-6。藉此來達到整流功能，同時輸出一正一負的直流電源。

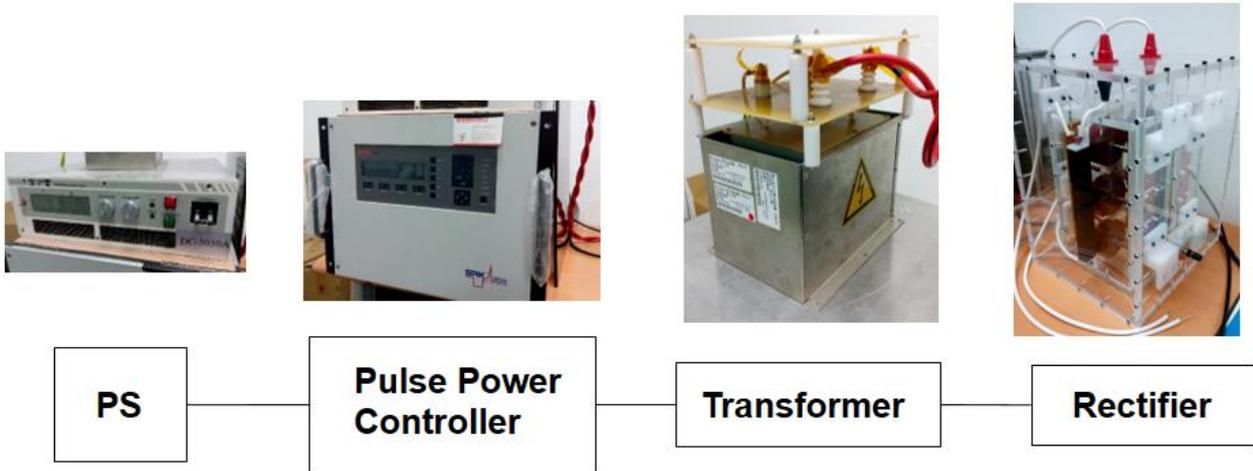


圖 2-2-1 此為電源輸出之流程圖由左而右依序是電源供應器、脈衝功率控制器、變壓器、整流器。

Symmetric / Asymmetric bipolar pulse pattern

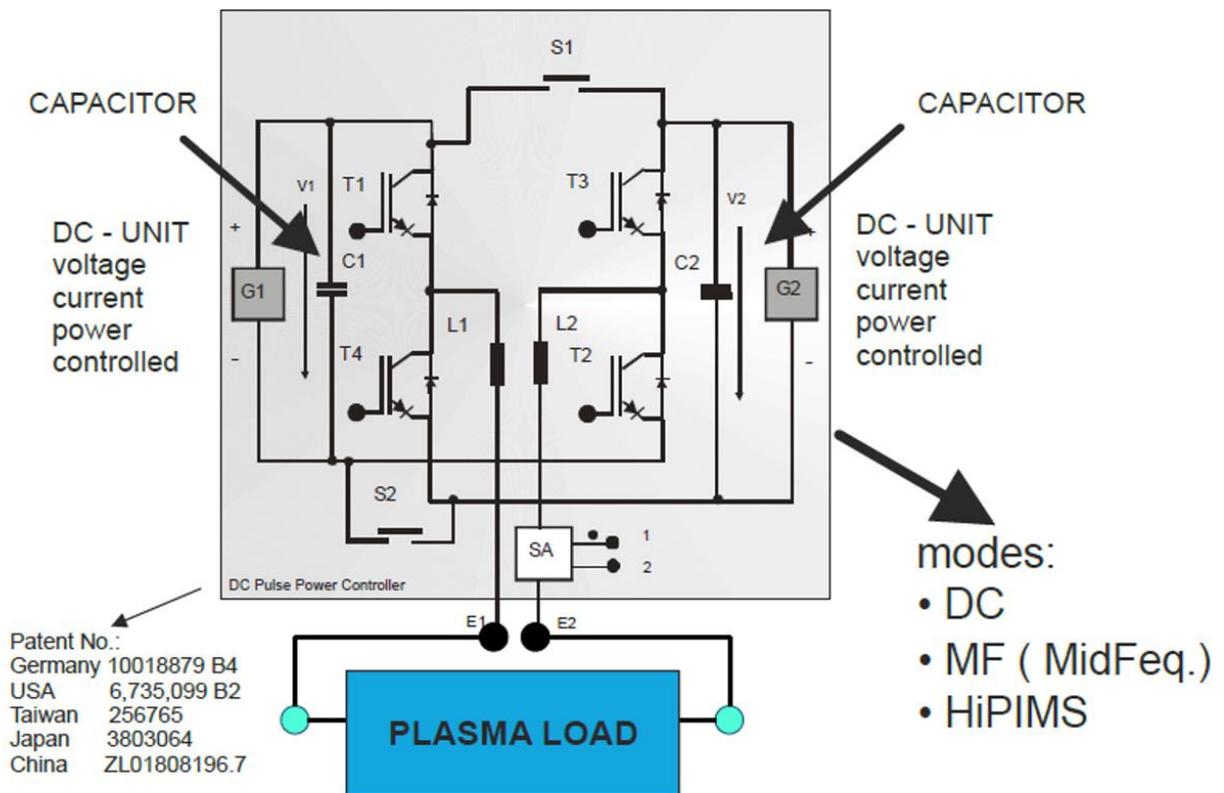


圖 2-2-2 此為脈衝功率控制器內部結構。

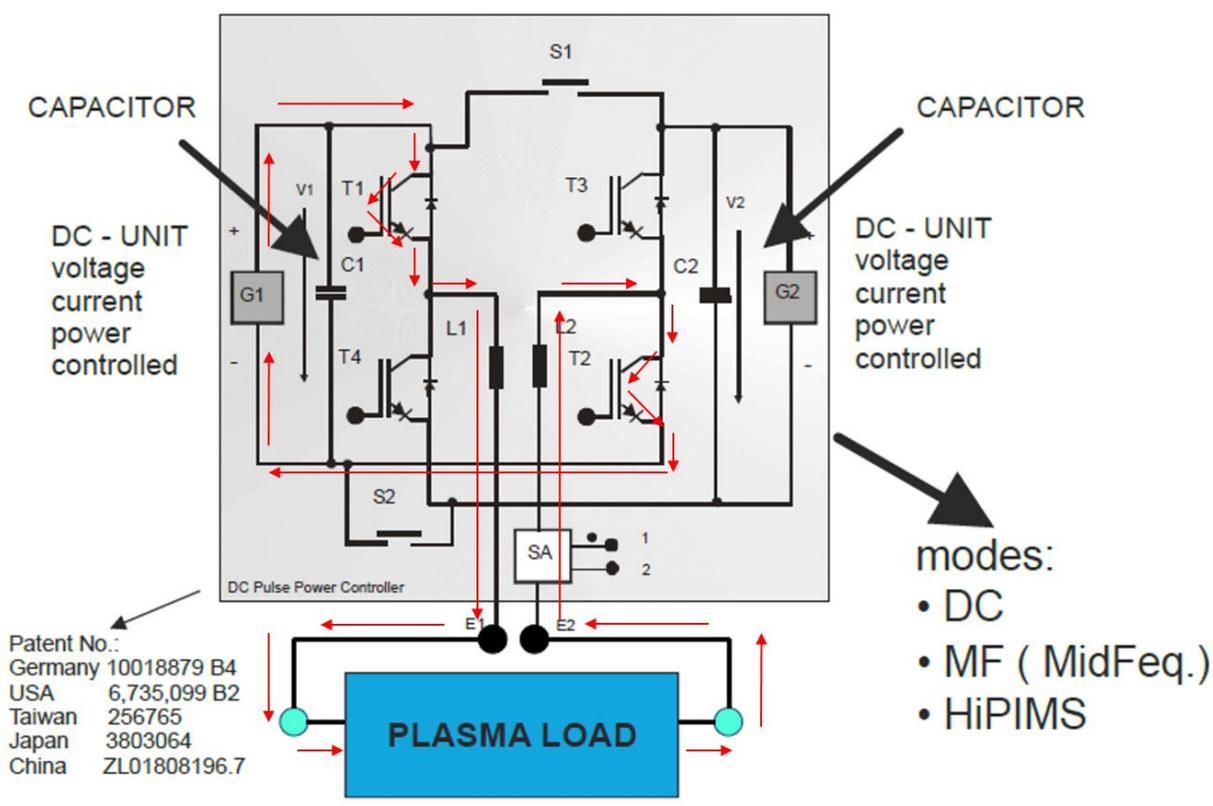


圖 2-2-3 此為脈衝功率控制器 T1、T2 短路之電流路徑。

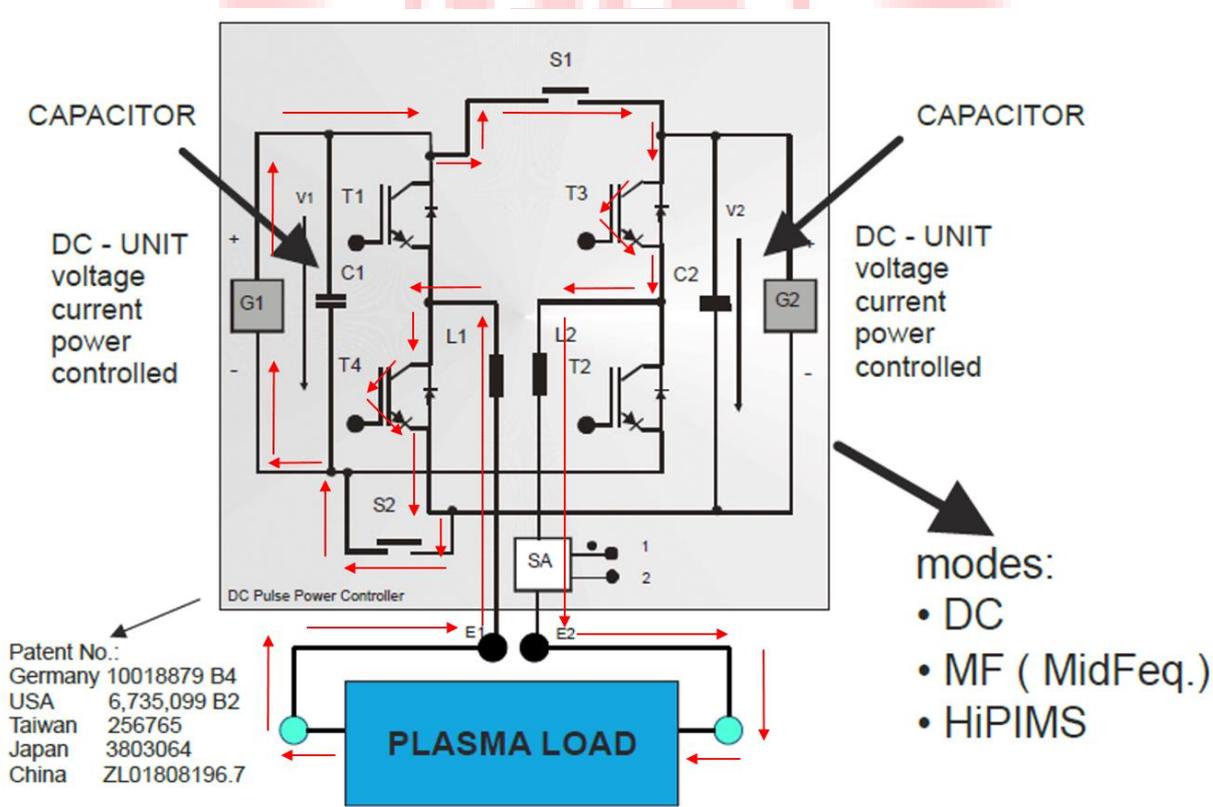


圖 2-2-4 此為脈衝功率控制器 T3、T4 短路之電流路徑。

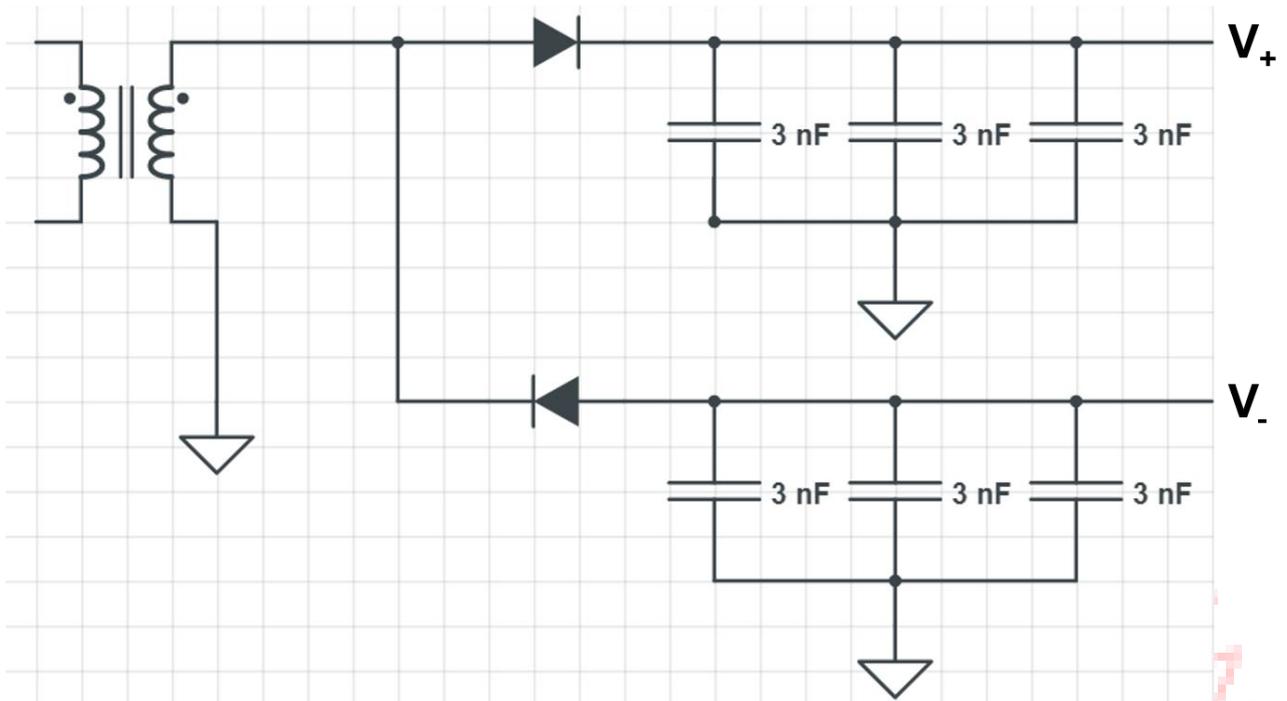


圖 2-2-5 圖中左側為變壓器，由變壓器輸出後之右側為整流器之內部原件結構圖。

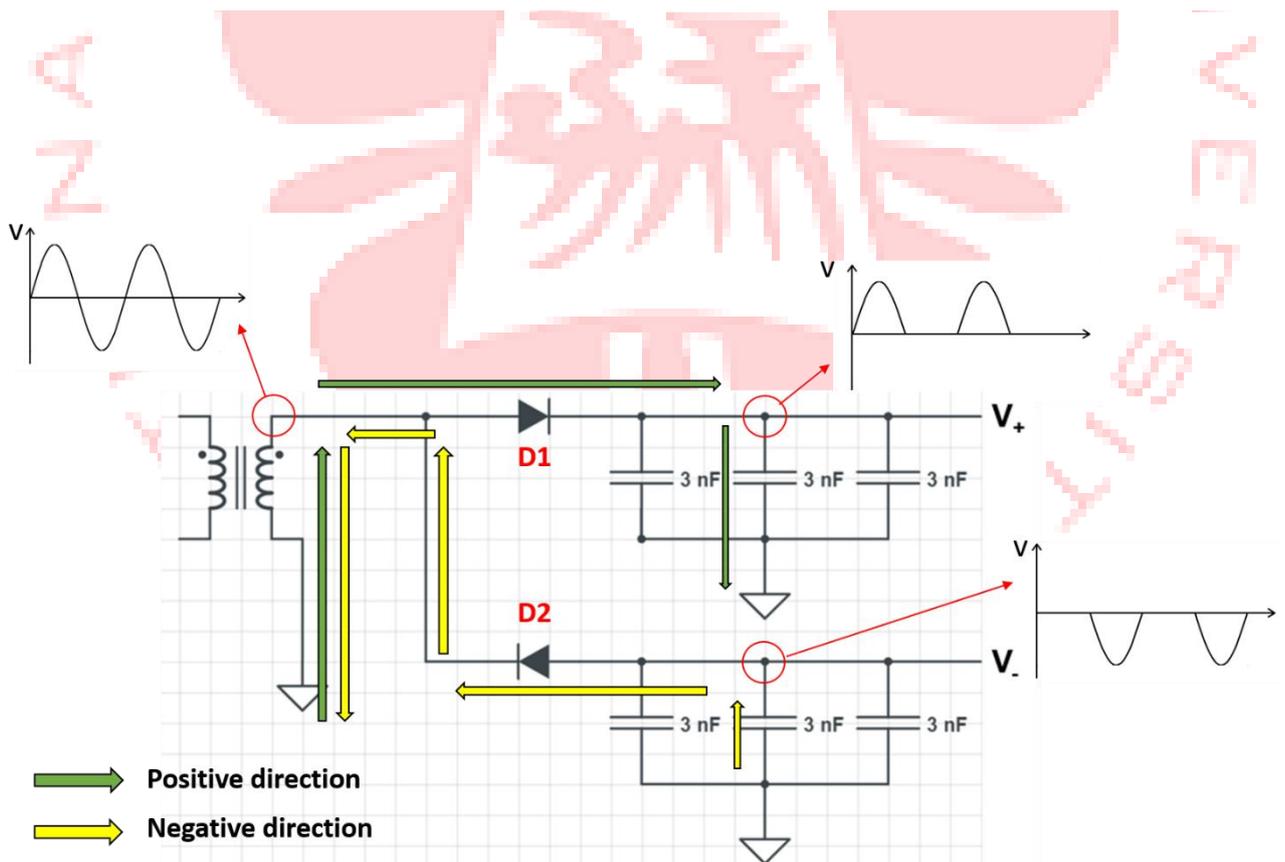
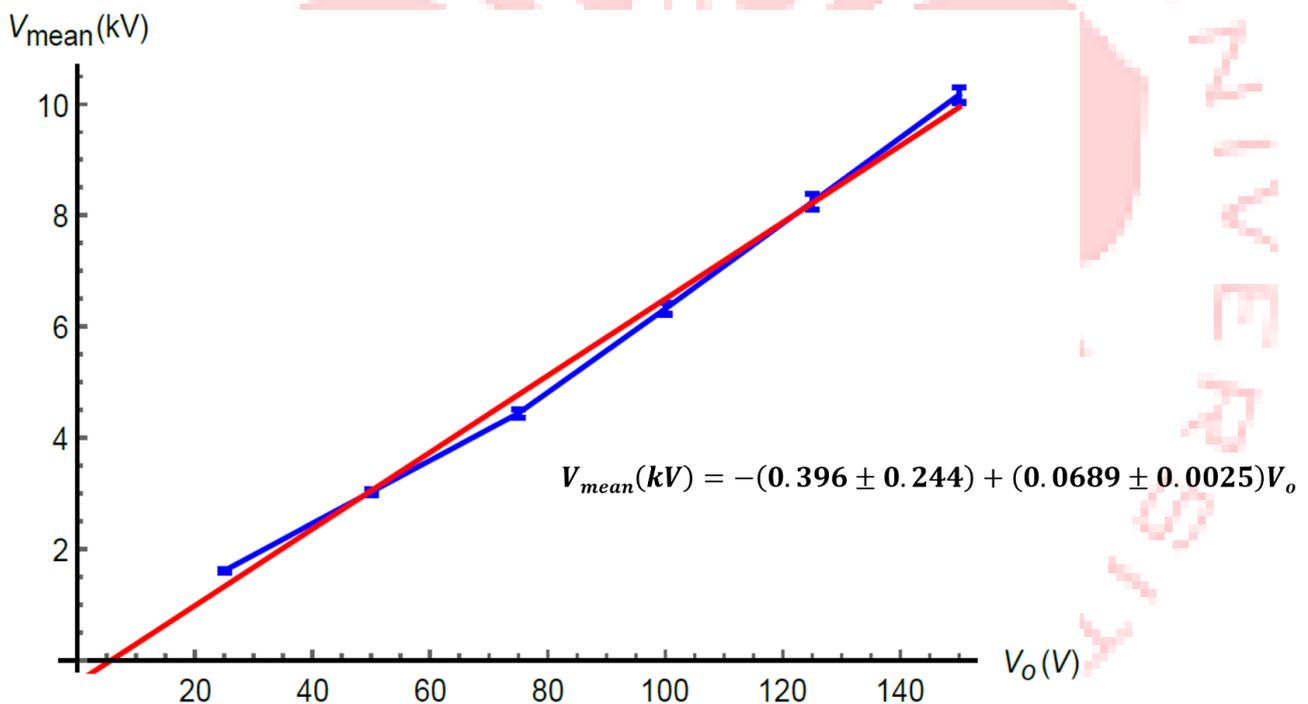


圖 2-2-6 此為整流器之運作原理。

2-3 測試方式及結果

實驗上藉由調整第一級的直流電源供應器，再量測最末端由整流器輸出的正負電壓值，並透過高壓探棒將訊號送至示波器。我們選擇由電源供應器提供 25 V、50 V、75 V、100 V、125 V 和 150 V 這六個數值做量測，並對數據做線性迴歸分析，得到輸入(V_o)與輸出(V_{mean})之間的關係為 $V_{mean}(kV) = 0.0689V_o(V) - 0.396$ ，經分析後若系統需要 30 kV 的電壓，則電源供應器需要提供約 440 V 的電壓。



V_o (V)	25	50	75	100	125	150
V_{mean} (kV)	1.61±0.03	3.03±0.05	4.44±0.08	6.32±0.1	8.24±0.14	10.17±0.14

圖 2-3 此圖為整流器正電壓之輸出，其中 V_o 為交流電源供應器輸出， V_{mean} 是整流器的輸出平均值。

(Experiments//20170714_Rectifier_Sheng//Rectifier analysis)

第三章 間隙開關

3-1 簡介

間隙開關(Spark gap switch)主要由兩個不相碰的電極(Electrodes)及兩電極間氣體所構成。兩電極間可以承受電壓使電流無法導通，在此情形下視為斷路。當兩電極間的電壓過高，以至於使間隙間的氣體游離，產生路徑形成像閃電一般的放電，我們稱之為“崩潰(Breakdown)”，而其導通電壓稱為“崩潰電壓”，在崩潰發生時開關為短路。因此，藉由間隙開關的耐壓及崩潰現象可將其作為一個高壓開關。而影響這電壓的主要因素為間隙的氣壓及兩電極間間隙距離，此項關係滿足 Paschen's law。

Paschen's law 是指在兩電極間開始形成電弧或放電之崩潰電壓(Breakdown voltage)和電極間氣體壓力及電極間距之乘積的函數關係，為一條彎曲的曲線，如圖 3-1。可表示為 $V = \frac{apd}{\ln(pd)+b}$ ，其中 p 為間隙中的氣體壓力， d 為間隙距離， a 和 b 皆為常數，此常數和氣體成分有關。

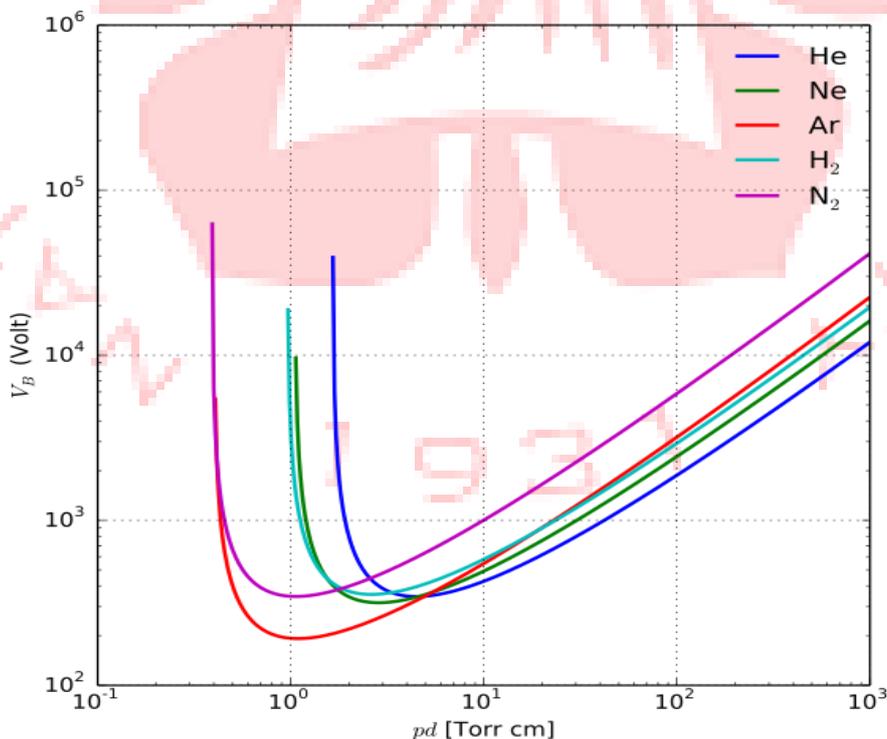


圖 3-1 此為不同氣體下之 Paschen's curve 比較圖。

3-2 目的

實驗室所要架設的系統為脈衝功率系統，此系統為一個儲存能量並在一瞬間放出能量的系統，系統所需之開關必須能承受高功率，具有控制性，能承受大電壓，在每次放電後此開關不受到傷害，使用上具有重複性，且在製作上不困難等要素，間隙開關(Spark gap switch)滿足上述需求，故我們選其當作系統的開關。

3-3 製作

製作上共有三代的間隙開關，第一代為“黃梅鳳(Mei-Fung Huang)”學姐所完成，主要目的是要了解間隙開關在一大氣壓下不同間隙距離之崩潰電壓。第二代增加了氣體系統，讓間隙開關可填入氣體增加氣壓。第三代則由二代的量測數據選擇一個固定的間隙距離，並量測在此距離下不同氣壓之崩潰電壓。

3-3-1 第一代間隙開關

在製作上我們先用簡易的螺帽當兩端的電極，並用壓克力圓管將其封閉。螺帽為M8的螺帽頭(Anchor nut)，如圖 3-3-1，壓克力管長為110mm，內外直徑各為40mm及60mm，如圖 3-3-2。製作的目地是在了解間隙開關的基本特性，在一大氣壓下不同間距對於崩潰電壓之關係。製作完後做了放電實驗並分析放電中的數據，且完成了數據分析，以上部分是由我的學姊“黃梅鳳”所完成。



圖 3-3-1 第一代間隙開關之電極。

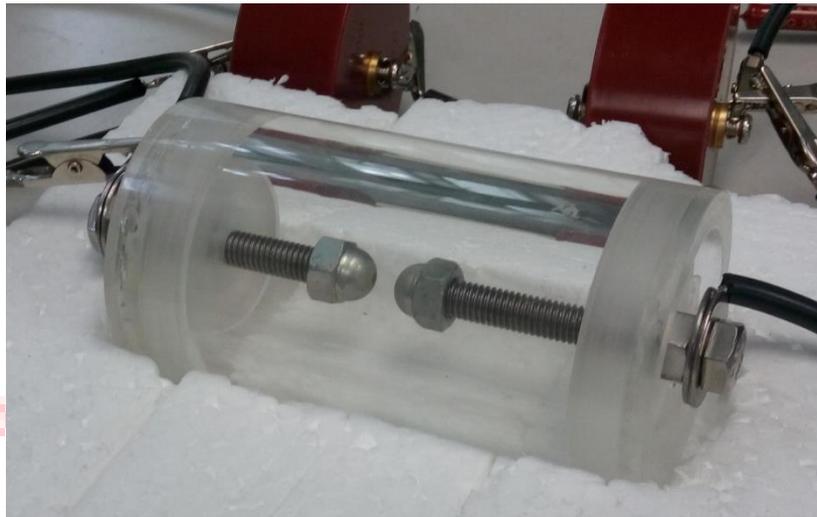


圖 3-3-2 第一代之間隙開關。

3-3-2 第二代間隙開關

我們想要進一步了解氣體壓力和間隙距離對於崩潰電壓的關係，因此做了第二代版本的間隙開關，如圖 3-3-3。兩電極的材料為紅銅，形狀為一圓板，如圖 3-3-4，圓板直徑為 30mm，在圓板邊緣為圓弧狀以避免尖端放電，圓弧的直徑為 10mm，如圖 3-3-5。外罩是用壓克力和鋁板所完成，外罩長 140mm，鋁板直徑為 140mm，並在鋁板上開孔至入氣管，氣管為 1/4 吋的 NPT 牙，如圖 3-3-6，可在間隙開關內加入氣體。

第二代開關將第一代開關做了兩點改進：(1)電極的部分由圓頭換為平板 (2)第二代開關可以進行氣體加壓。圖 3-3-7 為第一代和第二代的完成圖。

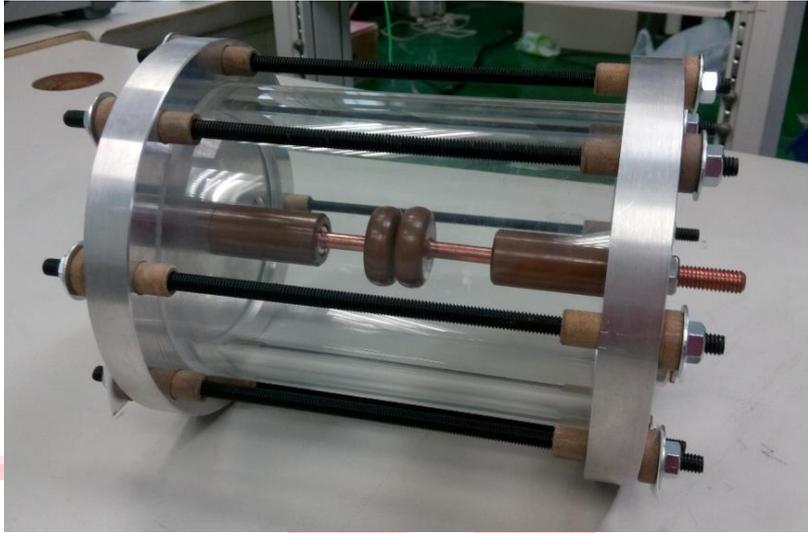


圖 3-3-3 第二代之間隙開關。



圖 3-3-4 第二代間隙開關之電極。

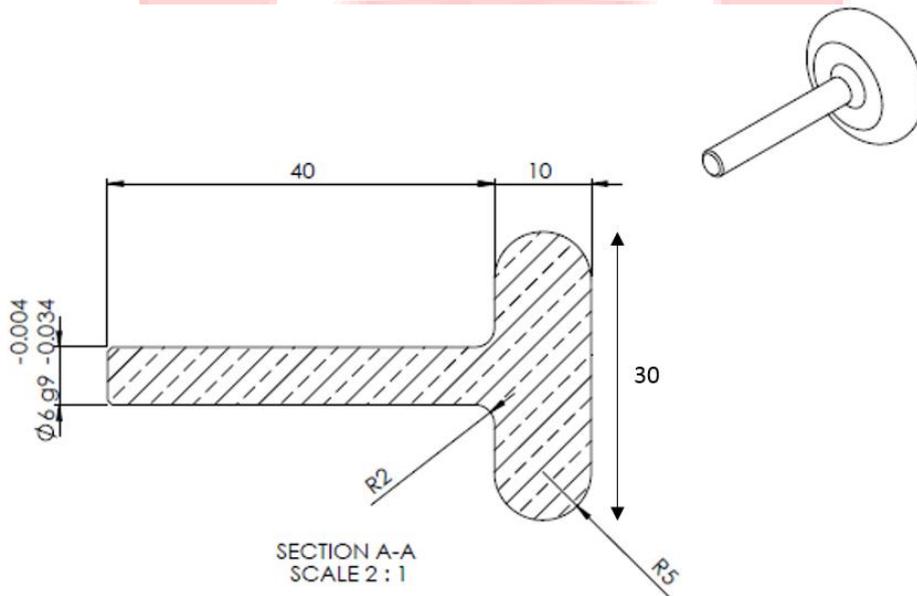


圖 3-3-5 第二代間隙開關之電極頭設計圖。

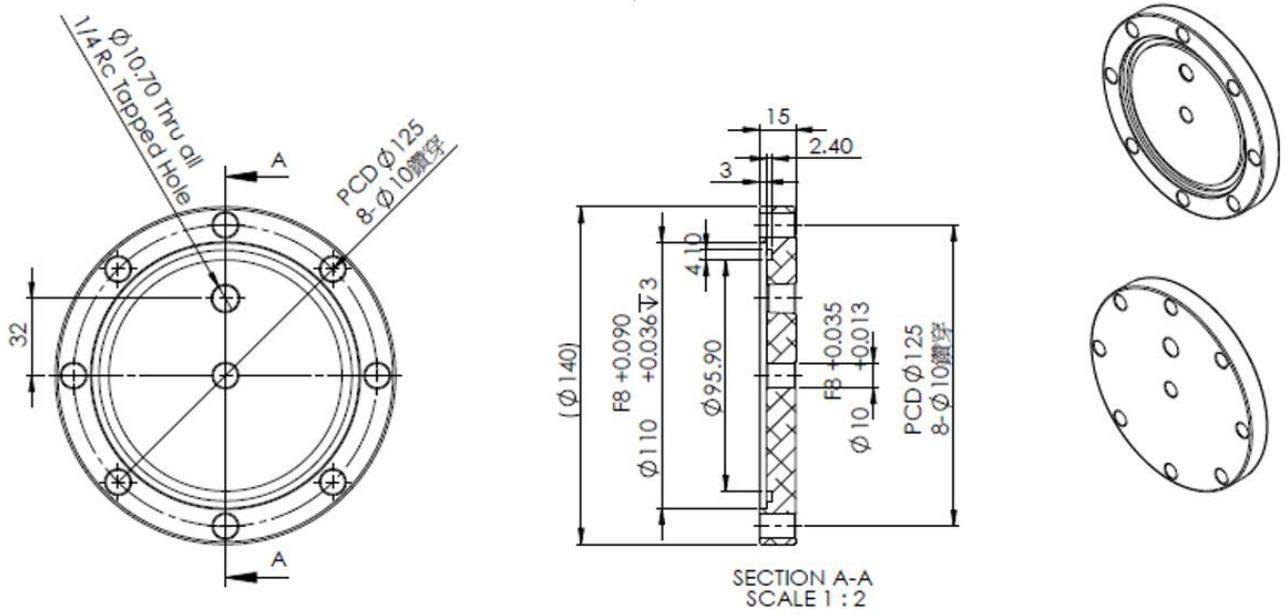


圖 3-3-6 第二代間隙開關之圓板設計圖。

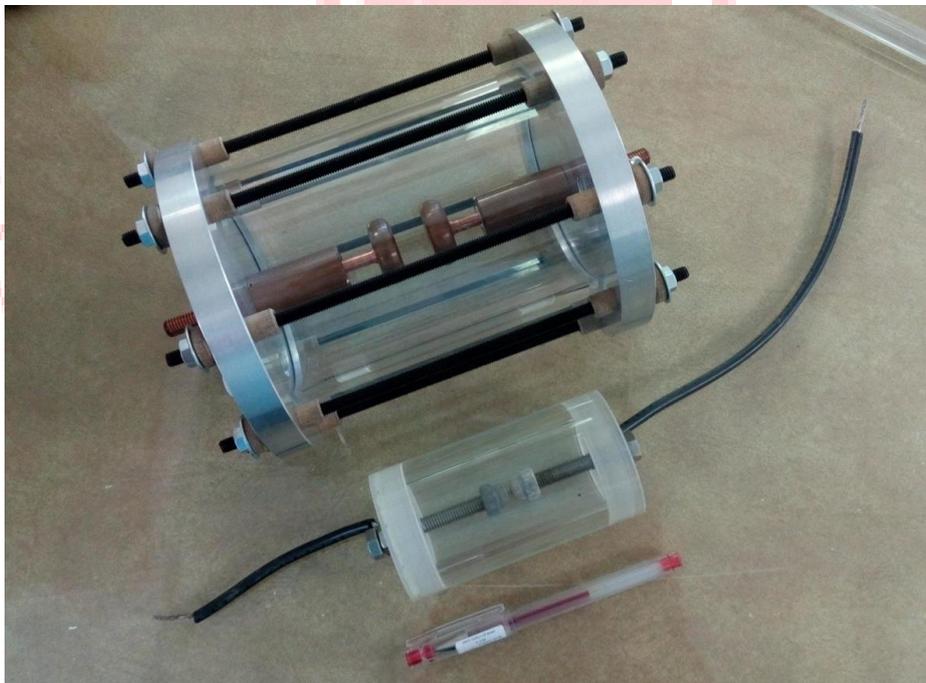


圖 3-3-7 圖中下方為第一代的間隙開關，上方為第二代的間隙開關。

3-3-3 第三代間隙開關

完成了第二代間隙開關後，依照第二代間隙開關的實驗數據，我們做了一個符合脈衝功率系統所需要的間隙開關，如圖 3-3-8。開關內部填充加壓氮氣，此開關中的電極間距不能改變，崩潰電壓由氮氣壓力控制，兩電極的形狀和第二代間隙開關一樣，如圖 3-3-9，使用的材料為黃銅，且在兩電極中多了一片黃銅板。改用黃銅的原因是黃銅熔點較紅銅高，且價格便宜，因此在第三代間隙開關中皆用黃銅來做測試。兩電極的間距是固定的，黃銅板至兩電極之間距各為 4 mm，總間距是 8 mm。外罩的部分是用聚乙烯(Polyethylene)，製作時加上多處凹槽，目的是藉由路徑變長達到提高電阻的作用以防止漏電，效用相當於礙子，如圖 3-3-10。此間隙開關是由我的指導教授“張博宇(Po-Yu Chang)”所設計，再由我去機械系的機械工廠加工完成。第二代和第三代間隙開關的不同在於外罩的部分，第三代間隙開關有較好的絕緣效果，第二代間隙開關在電壓高於 20 kV 時會有漏電的情形發生，但第三代間隙開關即使電壓高於 70 kV 仍不會發生漏電情形。再者第三代間隙開關的體積較小，特別是電流方向之長度縮小許多，目的是減少間隙開關之電感值。除此之外，第三代間隙開關多了觸發用的平行板，用於控制此開關的啟動與否。



圖 3-3-8 第三代間隙開關之側視圖。

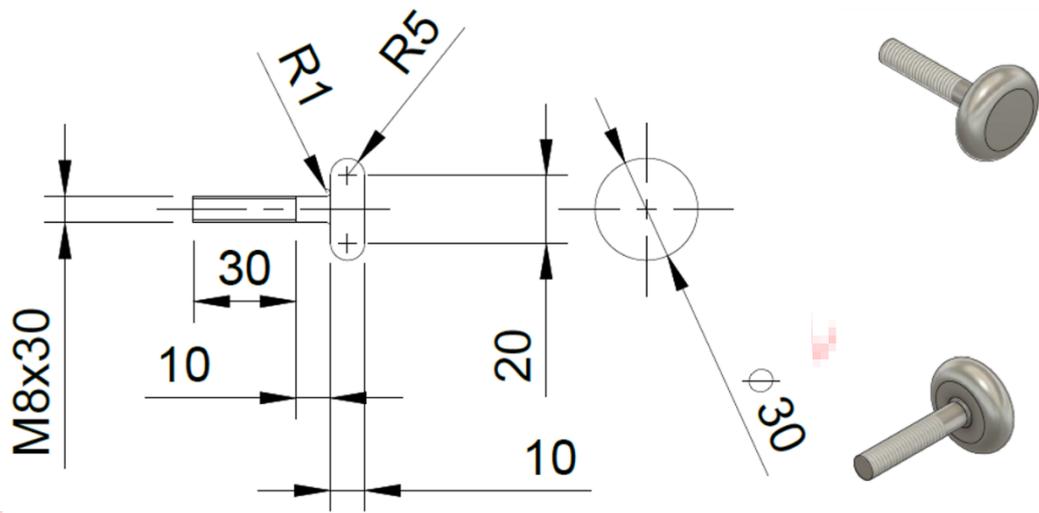


圖 3-3-9 第三代間隙開關之電極頭設計圖。

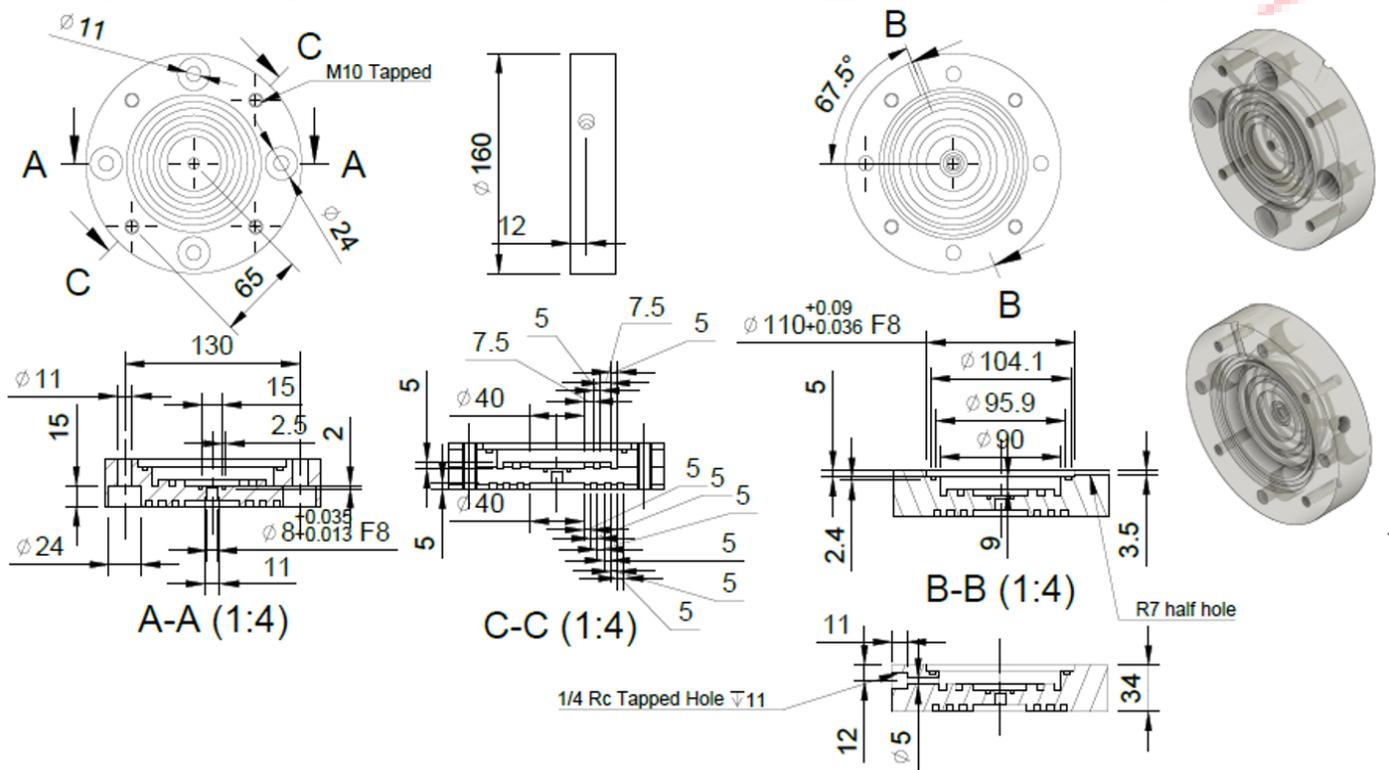


圖 3-3-10 第三代間隙開關之外罩設計圖。

3-4 量測

3-4-1 第一代間隙開關

第一代間隙開關共做了三種不同的量測方式，第一種方式為直流電源供應器串連一 $100\text{ M}\Omega$ 的電阻並直接對第一代間隙開關放電，如圖 3-3-11；第二種方式為直流電源供應器串連一 $100\text{ M}\Omega$ 的電阻並將間隙開關並聯一 3 nF 的電容進行放電，如圖 3-3-12；電三種方式為使用觸發脈衝產生器直接對第一代間隙開關放電，如圖 3-3-13。

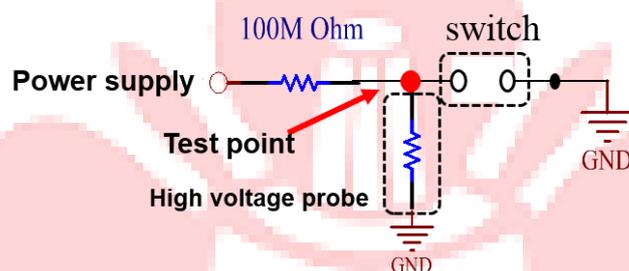


圖 3-3-11 第一代間隙開關之實驗配置圖。

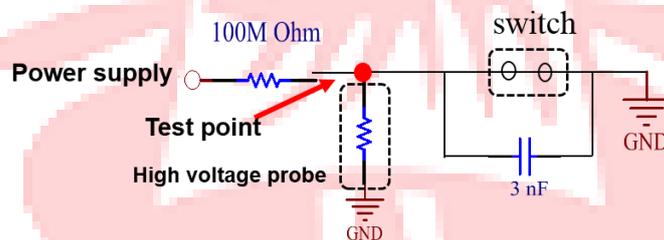


圖 3-3-12 第一代間隙開關之實驗配置圖。

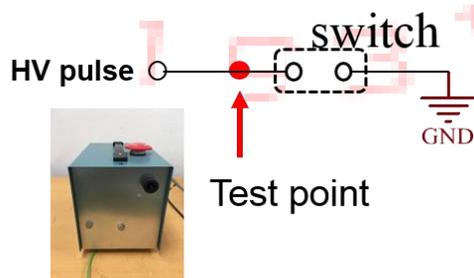


圖 3-3-13 第一代間隙開關之實驗配置圖。

3-4-2 第二代間隙開關

第二代的間隙開關在量測上使用 40 nF 的電容來進行充放電，在間隙開關未導通的期間電容充電，達到導通時電能從電容瞬間輸出並形成迴路，如圖 3-4-1。系統上使用 1 kΩ 的電阻和二極體來保護電源供應器，二極體可以限制電流方向，確保電流不會逆流至電源供應器；而 1 kΩ 的電阻是防止電源供應器輸出過高的功率，在間隙開關崩潰導通的瞬間電流會以交流的形式輸出，當訊號為負值時，間隙開關和電源供應器間會有一比原先大 1~2 倍的電壓差，此時電源供應器若無法負荷會使得儀器受損，故置入一 1 kΩ 電阻使此電壓跨接於電阻兩端，達到減少電源供應器輸出的效果。為了安全考量在 40 nF 的電容和間隙開關間並聯兩 10 GΩ 的電阻，目的是若間隙開關沒有導通，可透過對電阻的放電使電容內部儲存的電可藉由電阻消耗剩餘的電能以達到安全需求。

在實驗上在間隙開關內分別加入 1 atm、1.5 atm、2 atm、2.5 atm、3 atm 的氮氣，在此之壓力為絕對氣壓，即 1 atm 為真實之一大氣壓，量測崩潰電壓與壓力及間隙距離的關係。

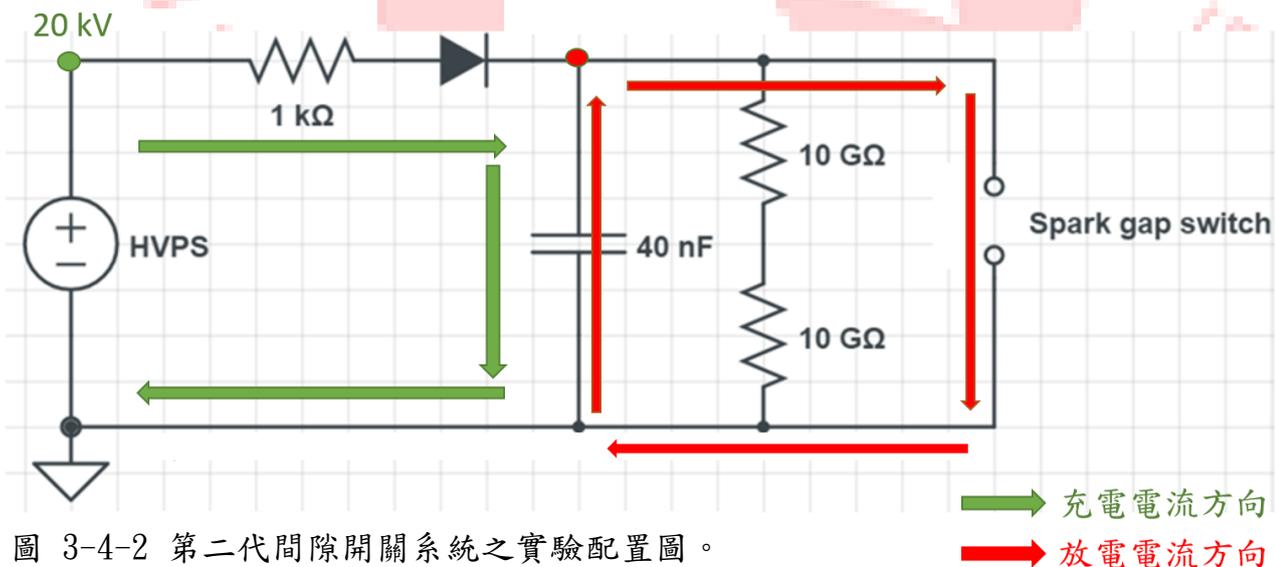


圖 3-4-2 第二代間隙開關系統之實驗配置圖。

3-4-3 第三代間隙開關量測

第三代的間隙開關實驗配置和第二代大致相同，此次實驗除了電源供應器外之儀器皆放置於鐵箱內部，且在鐵箱外側多加了 $100\ \Omega$ 之電阻，如圖 3-4-2，其目的是為了保護實驗人員。若實驗中發生非預期性跳電，此電阻可以迫使電流在系統內消耗，以降低意外發生之風險。實驗目的為了解第三代間隙開關在不同氣壓下之穩定性，加入氮氣壓力和第二代一樣分別為 $1\ \text{atm}$ 、 $1.5\ \text{atm}$ 、 $2\ \text{atm}$ 、 $2.5\ \text{atm}$ 、 $3\ \text{atm}$ 。

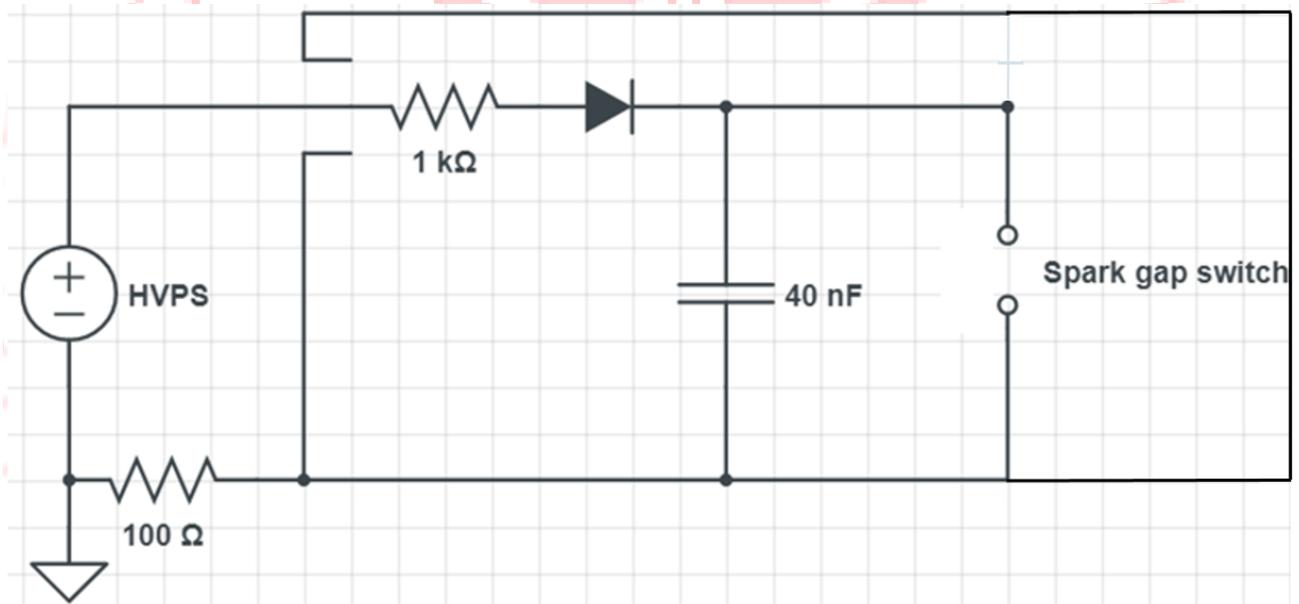


圖 3-4-3 第三代間隙開關系統之實驗配置圖。

3-5 實驗結果

3-5-1 第一代間隙開關實驗結果

第一代間隙開關之實驗結果如圖 3-5-1。在 1 atm 和相同間隙距離下，三種量測方式中發現觸發脈衝產生器能承受較高的崩潰電壓，依次是間隙開關沒有並聯電容和間隙開關有並聯電容。藉由此次的實驗可以看出 1 atm 下崩潰電壓和間隙距離的關係。

Breakdown voltages

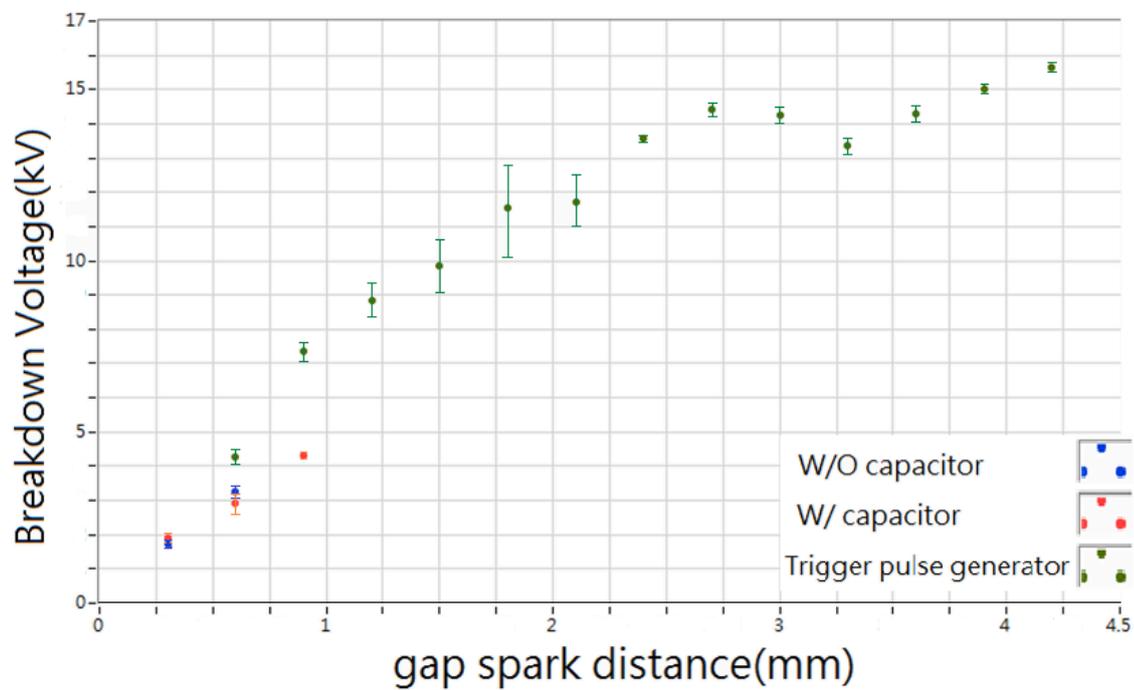


圖 3-5-1 第一代之間隙開關在一大氣壓下崩潰電壓與間隙距離間的關係。

3-5-2 第二代間隙開關實驗結果

第二代間隙開關之實驗結果如圖 3-5-2。在間隙間距 4.2 mm 且氣壓大於 2.5 atm 時，會因為電壓過大而使得間隙開關漏電。雖然有嘗試解決此問題，但即使用了絕緣膠帶並將間隙開關立起來實驗也無法達到絕緣的效果，故圖 3-5-2 中間隙距離 4.2 mm 無氮氣壓力 2.5 atm 和 3 atm 之量測數據，且在 1.5 atm 會有點浮動是因為壓力計上 1~2 atm 並非線性，故量測出來結果會高於原先的 1.5 atm。實驗數據分析後發現和 Paschen's curves 相當吻合，如圖 3-5-3，我們也從此數據製作我們第三代的間隙開關。第三代的間隙開關為了達到耐電壓 80 kV，且設計上已確定要放置觸發平板，故上下電極各要能承受 40 kV 的耐電壓，由圖 3-5-4 上可得知，不同間隙距離會有不同對應之氣壓值，間隙距離越小所需之氣壓值越大。譬如 4 mm 大約對應 3.3 atm。在考量上不會選擇太小之間隙距離，因為這在機械加工上的精度要相對準確，如 2 mm，而太大的間隙距離又不行，因為太大的間隙距離會引起較大之電感值，這對系統整體而言是不利的，故我們選擇 4 mm 的寬度來當第三代間隙開關之間隙距離。

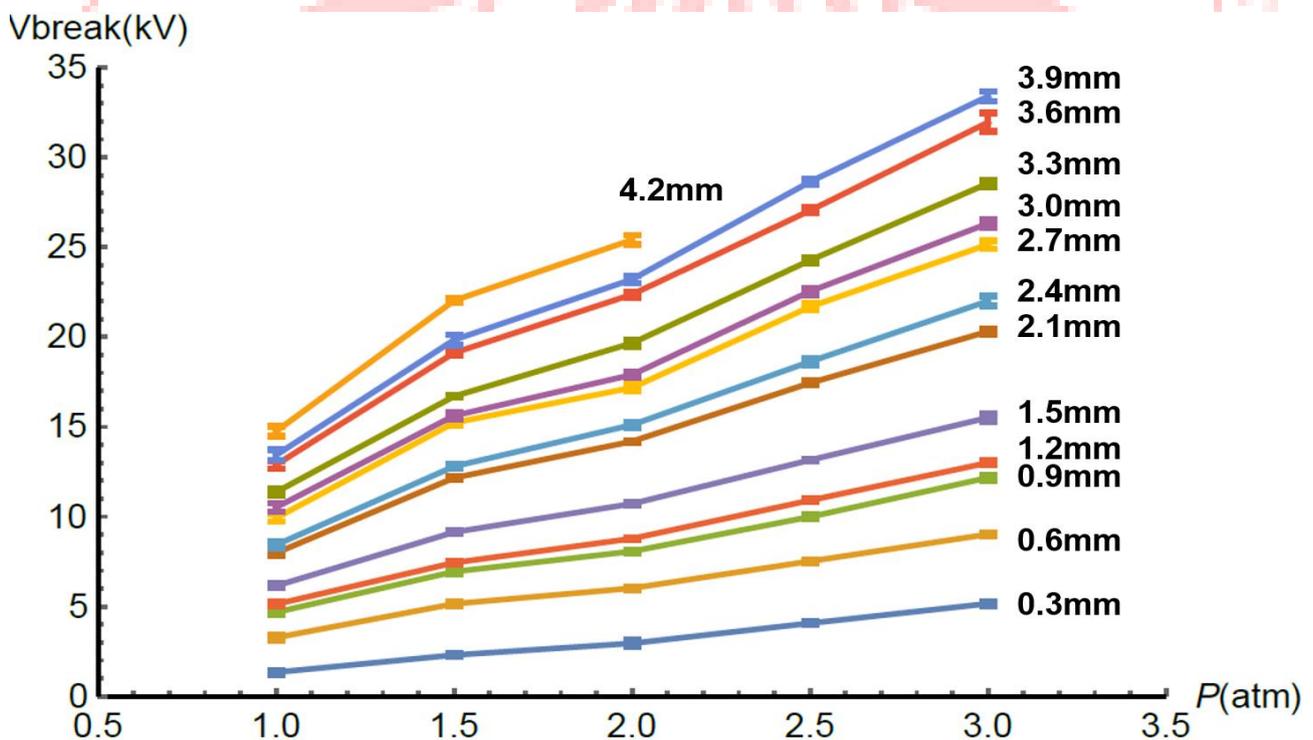


圖 3-5-2 第二代間隙開關系統實驗後分析之數據。

(Experiments//20171230_Spark_gap_witch_Ver2_Sheng//Spark gap analysis)

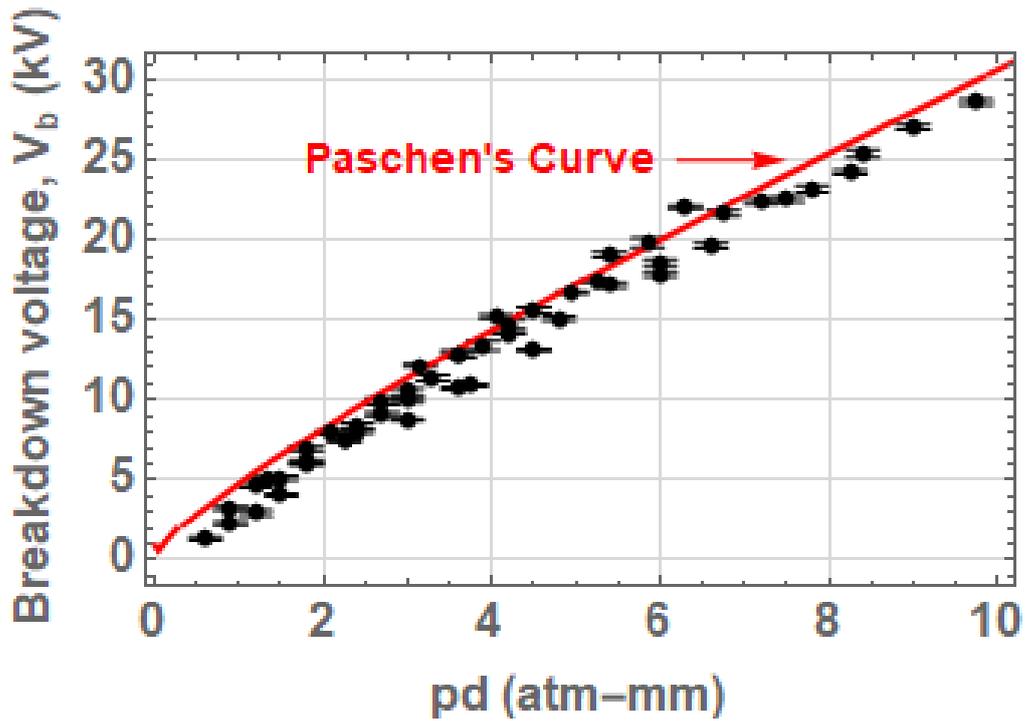


圖 3-5-3 第二代間隙開關實驗量測值和 Paschen's curves 比較圖。

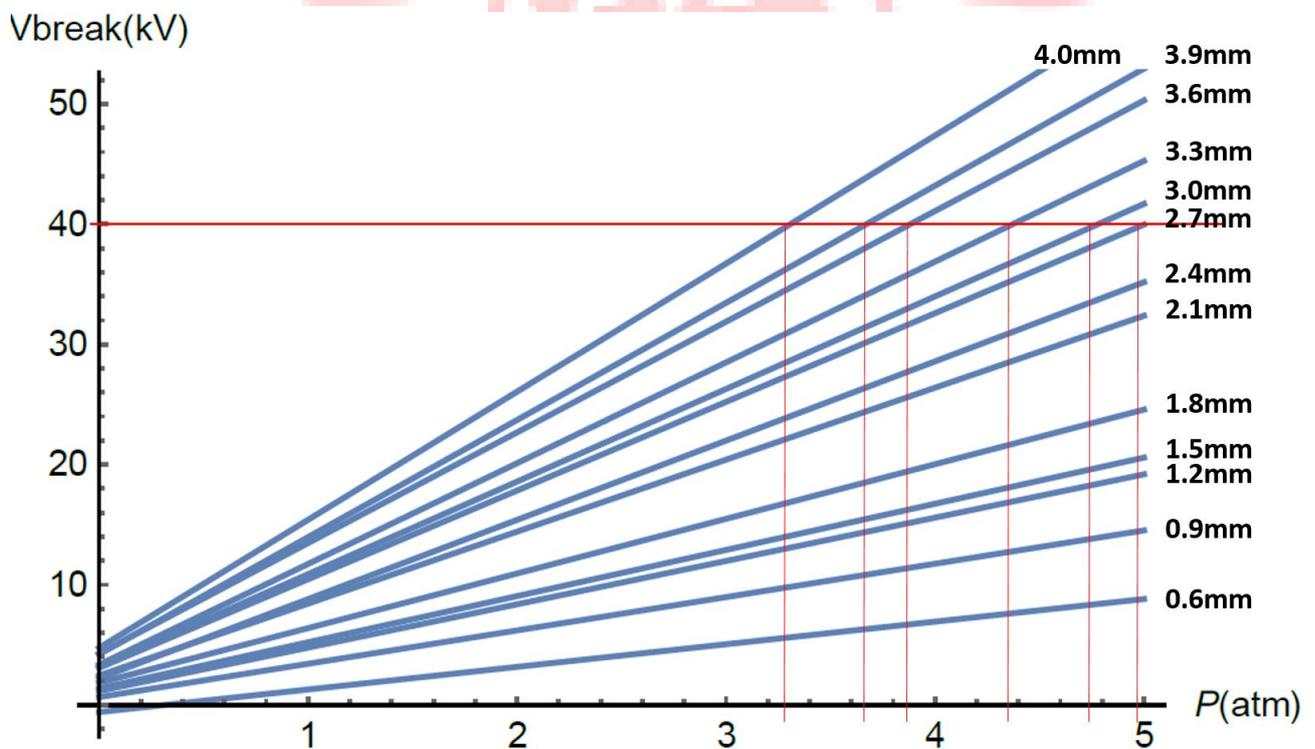


圖 3-5-4 第二代間隙開關系統實驗數據之限性迴歸。

(Experiments//20171230_Spark_gap_witch_Ver2_Sheng//Spark gap Linearly)

3-5-2 第三代間隙開關實驗結果

第三代間隙開關之量測目的為了了解此開關之穩定性，因此不同壓力分別各做了 200 次放電測試，分 a、b、c、d 四次實驗，前三次實驗(a、b、c)各測試 50 次放電。每次實驗方式為在 1 atm 下放電 50 次，再增加氣壓至 1.5 atm 並放電 50 次，依此完成至 3 atm。在完成 a、b 後，將間隙開關打開並清洗研磨電極之表面，爾後在執行 c 實驗。發現清洗前後其實沒有太大區別如圖 3-5-5 及圖 3-5-6 所示。最後一次(d)是在 3 atm 下連續放電 200 次，如圖 3-5-7 及圖 3-5-8 所示。所以四次實驗中 1~2.5 atm 各完成 150 次放電，3 atm 完成了 350 次放電。實驗結果在 2 atm 下非常穩定，符合我們的預期，但在大於 2.5 atm 時就變得相當不穩定，原因還在探討中，未來會考慮使用不同材料之電極來實驗；或者在每次放電後就更換一次氣體。實驗結果在 1 atm 下承受 20 kV 是沒有問題的，但在 3 atm 下定性而言約能承受 55 kV，因為脈衝功率系統要求為 80 kV，故這問題在未來需要被解決。

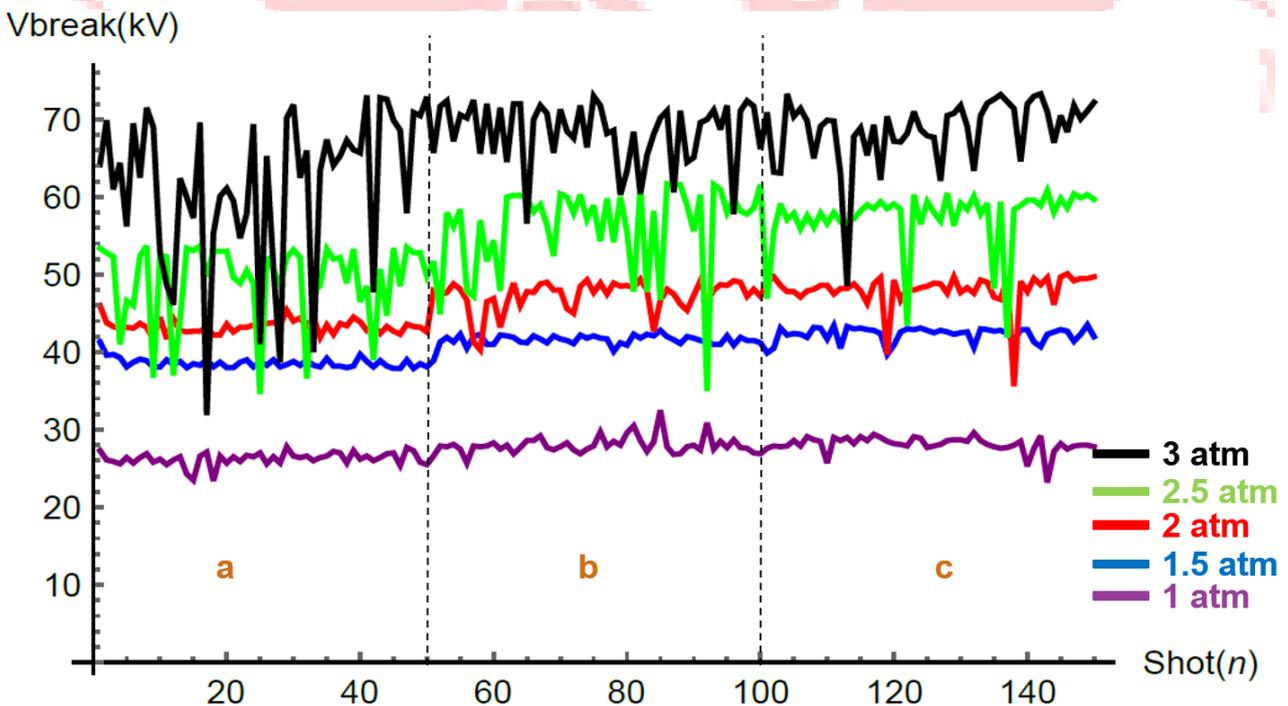
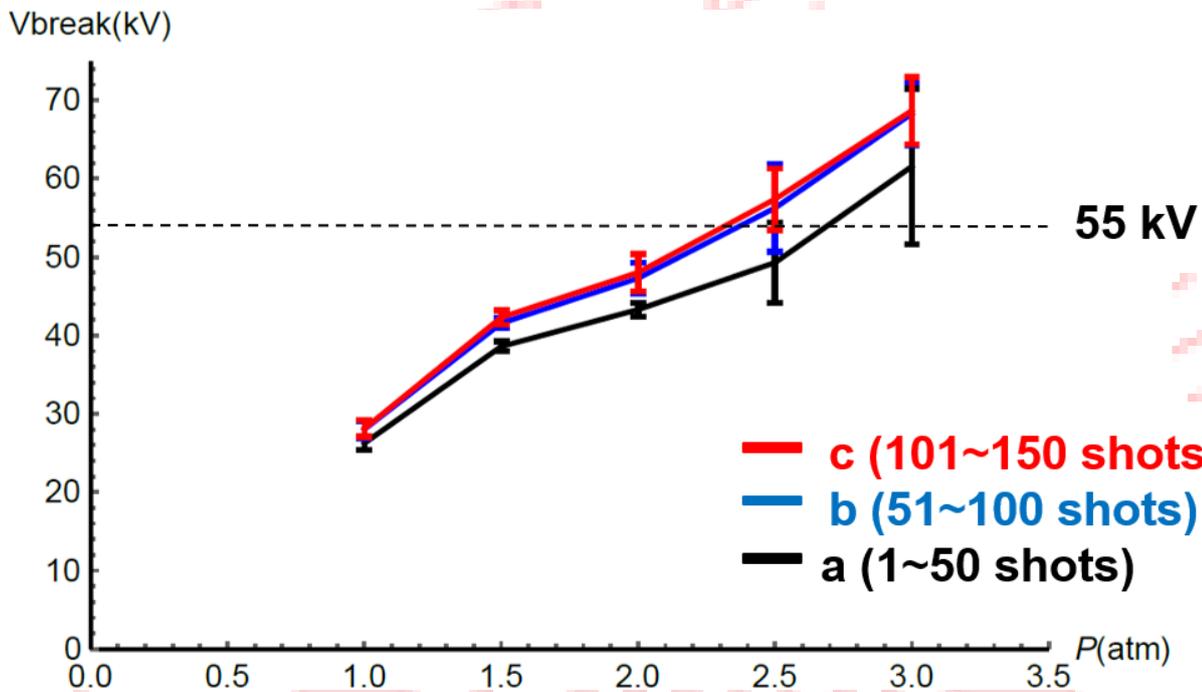


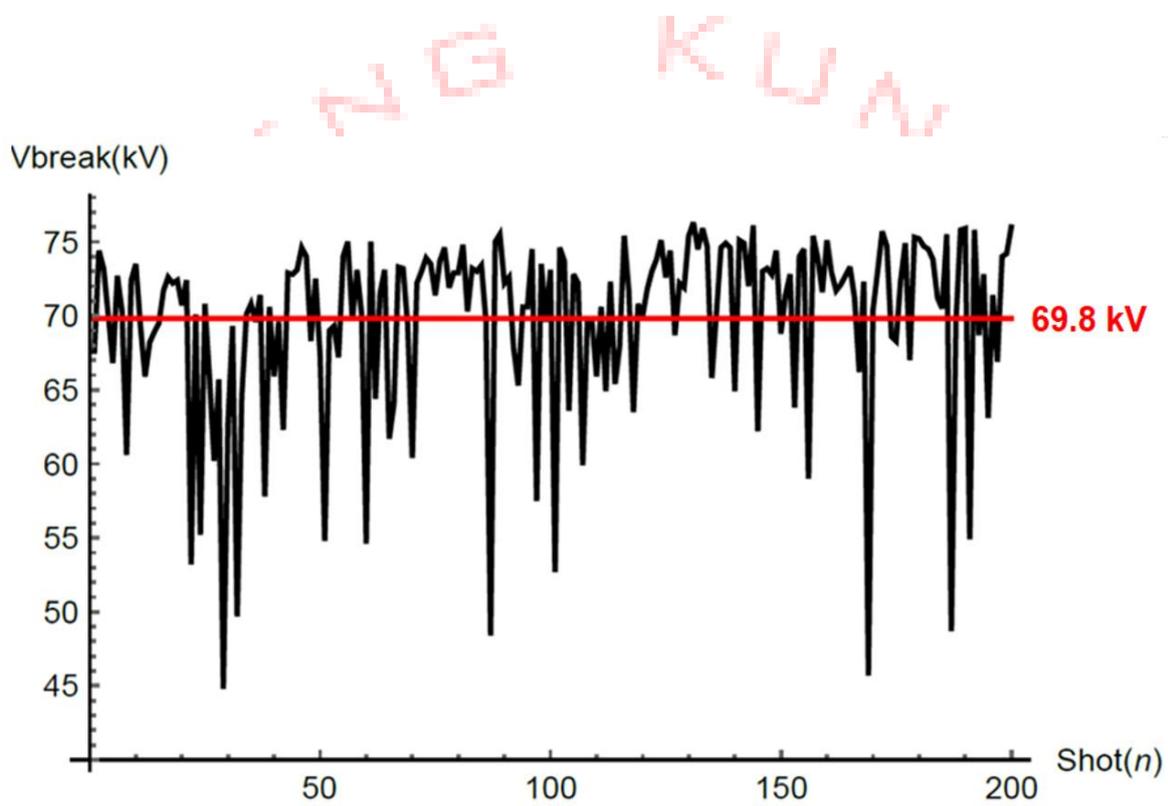
圖 3-5-5 第三代間隙開關系統實驗數據，為前三次實驗之總圖。

(Experiments//20171219_New_spark_gap_switch_test_Sheng//Spark gap switch for all shots)



$V_{break}(kV)$ \ $P(atm)$	1 atm	1.5 atm	2 atm	2.5 atm	3 atm
a(V_{ave} , std%)	26.25, (3%)	38.59, (2%)	43.30, (2%)	49.23, (10%)	61.55, (16%)
b(V_{ave} , std%)	28.02, (4%)	41.56, (2%)	47.30, (4%)	56.26, (10%)	68.29, (6%)
c(V_{ave} , std%)	28.11, (4%)	42.30, (2%)	48.03, (5%)	57.38, (7%)	68.68, (6%)

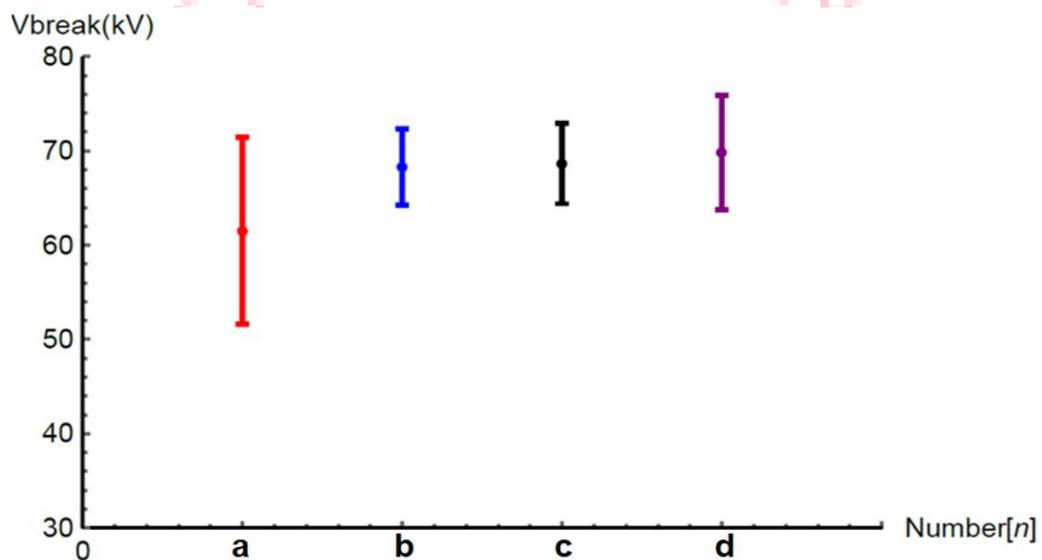
圖 3-5-6 第三代間隙開關系統實驗數據，為前三次實驗崩潰電壓之平均值和標準差。
 (Experiments//20171219_New_spark_gap_switch_test_Sheng//Spark gap switch for comparison of average diagram)



	V_{ave} (kV)	STD(%)	V_{min} (kV)
Spark gap switch	69.8	6.05 kV (8.7%)	44.8

圖 3-5-7 第三代間隙開關系統實驗數據，為第四次實驗崩潰電壓總圖和平均值及標準差之數據。

(Experiments//20171219_New_spark_gap_switch_test_Sheng//Spark gap switch 4)



	a	b	c	d
V_{ave} (kV)	61.55	68.29	68.68	69.8
STD (%)	9.91 kV (16%)	4.06 kV (6%)	4.27 kV (6%)	6.05 kV (8.7%)

圖 3-5-8 第三代間隙開關系統實驗數據，為 3 atm 下四次實驗之崩潰電壓平均值和標準差之比較。

(Experiments//20171219_New_spark_gap_switch_test_Sheng//4 times comparison for 3 atm)

第四章 氣體加壓系統

為了放電實驗必須再間隙開關中灌入氣體，我們建造了氣體加壓系統。我們使用氣體流量控制器來控制氣體的輸入，後端使用穩壓閥(relief valve)來限制系統內的最高氣壓值，若系統絕對氣壓高於 4.2 atm，穩壓閥會自動洩氣以確保系統的安全，如圖 4-1。實驗上我們用氮氣來填充間隙開關，加壓氣體由鋼瓶提供，鋼瓶上有主閥、分壓閥、總壓錶及分壓錶，如圖 4-2，主閥開起為逆時針方向；分壓閥開起為順時針方向。以下為操作流程。

啟動:	關閉:
<ol style="list-style-type: none"> 1. 關圖 4-1 中的 switch1 2. 開圖 4-1 中的 switch2 3. 開鋼瓶主閥 4. 開鋼瓶分壓閥直到分壓錶讀值為 3 5. 開 switch1 6. 開 MFCR 總開關 7. 將 MFCR 數值旋鈕調至 1.0 8. 開 MFCR 氣體開關 9. 關 switch2 10. 當圖 4-1 中壓力計達到所需之壓力時，將 MFCR 氣體開關關上 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 關鋼瓶主閥 2. 開圖 4-1 中的 switch2 3. 當總壓表 and 分壓錶讀值皆為 0 時關鋼瓶分壓閥 4. 將 MFCR 數值旋鈕調至 0 5. 關 MFCR 氣體開關 6. 關 MFCR 總開關 7. 關 switch1

若實驗中要更換氣體時需遵守以下操作流程:

更換氣體流程
<ol style="list-style-type: none"> 1. 關 MFCR 氣體開關 2. 開圖 4-1 中的 switch2 3. 確認圖 4-1 中的壓力計讀值為 0 4. 關圖 4-1 中的 switch2 5. 開 MFCR 氣體開關 6. 確認圖 4-1 中的壓力計讀值為實驗操作之氣壓值 7. 關 MFCR 氣體開關

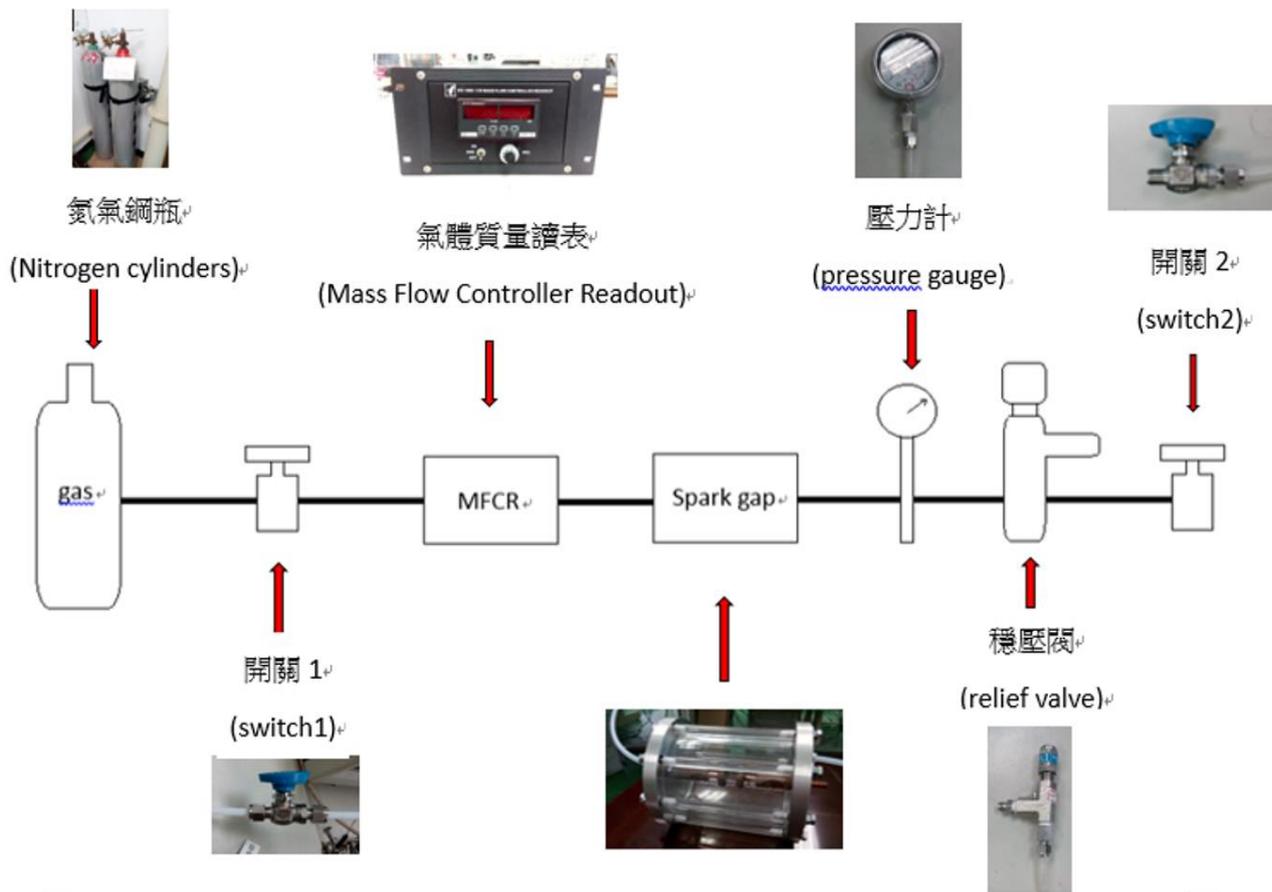


圖 4-1 氣體系統總圖。

分壓錶 (Partial pressure gauge) 總壓錶 (Total pressure gauge) 主閥 (Main valve)



分壓閥 (Partial pressure valve)

圖 4-2 氮氣鋼瓶配置圖。

第五章 觸發脈衝產生器

5-1 簡介及目的

觸發脈衝產生器(Trigger-pulse generator)主要功能為提供瞬間之高電壓，在此用來觸發 8 級的馬克斯發電機(Marx generator)。脈衝功率系統需要一個非自發性的開關來控制系統能量的輸出，藉由訊號產生器輸出 5 V 的訊號，來啟動觸發脈衝功率產生器來觸發 8 級的馬克斯發電機，再由 8 級的馬克斯發電機來觸發間隙開關來使系統達到導通，將電容內部之電能釋放。總系統電流的上升時間約為 $1.2 \mu\text{s}$ ，8 級的馬克斯發電機最大輸出電壓超過 -40 kV ，上升時間小於 5 ns ，故在系統上間隙開關和馬克斯發電機間會放置一高通濾波器。我們的觸發脈衝產生器可輸出上升時間(Rise time)約為 $55 \mu\text{s}$ ，電壓約為 -20 kV 的脈衝訊號。在馬克斯發電機和觸發脈衝產生器間放置一低通濾波器，以防止逆向電流達到保護上游儀器之功能，如圖 5-1-1。

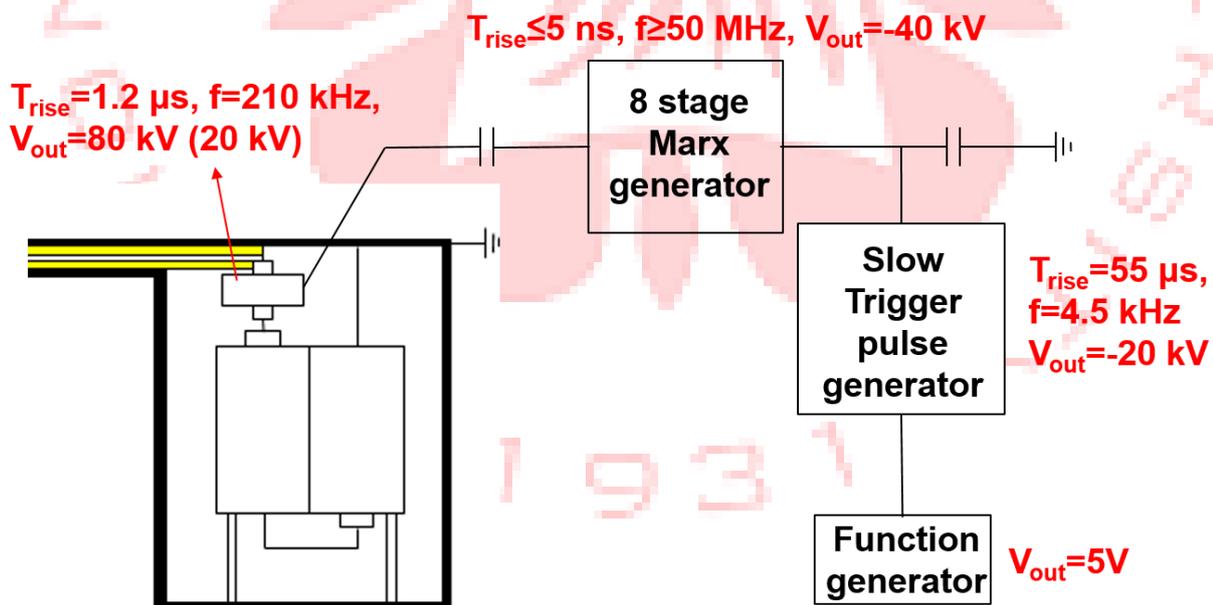


圖 5-1-1 系統整體觸發流程。

5-2 光訊號系統

我們在觸發脈衝產生器上建置了新的光訊號系統，此系統和原先的不同處在於原本的光耦合訊號對(Optical coupling，如圖 5-1-2)是一個單獨原件，舊系統是將此原件放在觸發脈衝產生器內，連接訊號產生器和觸發脈衝產生器，如圖 5-1-6。新的光訊號系統是把原先的光耦合訊號對分成一個接受器(Receiver)和一個發射器(Transmitter)，中間用光纖(Fiber)將兩元件接連，是一個保護儀器的裝置。目的是可以將兩個使用電訊號的系統用光訊號分開，如圖 5-1-7。若脈衝功率系統產生電訊號的問題，如間隙開關崩潰導通後產生之電磁脈衝(Electromagnetic pulse)，或導通後之交流電產生逆向電流灌回至觸發脈衝產生器，此電訊號不會延著光纖流至另一個電訊號系統。

製作上，我將接受器留至原先的觸發脈衝產生器內，將發射器移至觸發脈衝產生器外，並用一個金屬盒收納。金屬盒內有一個發射器、啟動發射器之 IC、接收訊號端子、5V 輸入端子，其中 5V 的輸入端子是為了啟動發射器的電源，是用 USB 接頭完成，其中 USB 接頭內部是由四條電線所組成，分別為紅、白、綠、黑四種顏色，紅線為電源輸入 Vcc(+5V)，白線為負訊號線 USB Data-，綠線為正訊號線 USB Data+，而黑線為接地線 GND，如圖 5-1-9。



圖 5-1-2 光耦合訊號對(Optical coupling)。



圖 5-1-3 接受器(Receiver)和轉換器(Transmitter)。

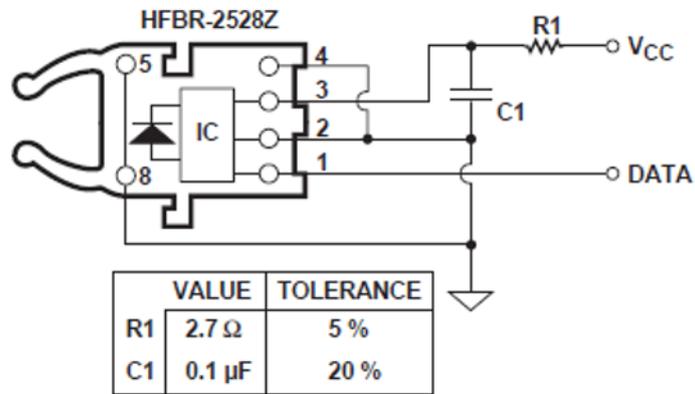


圖 5-1-4 接收器電路圖。

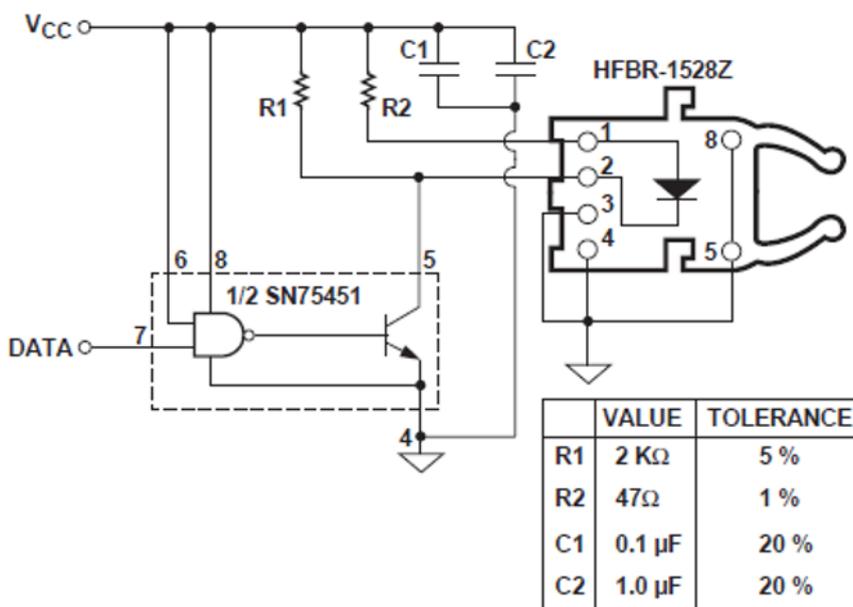


圖 5-1-5 轉換器電路圖。

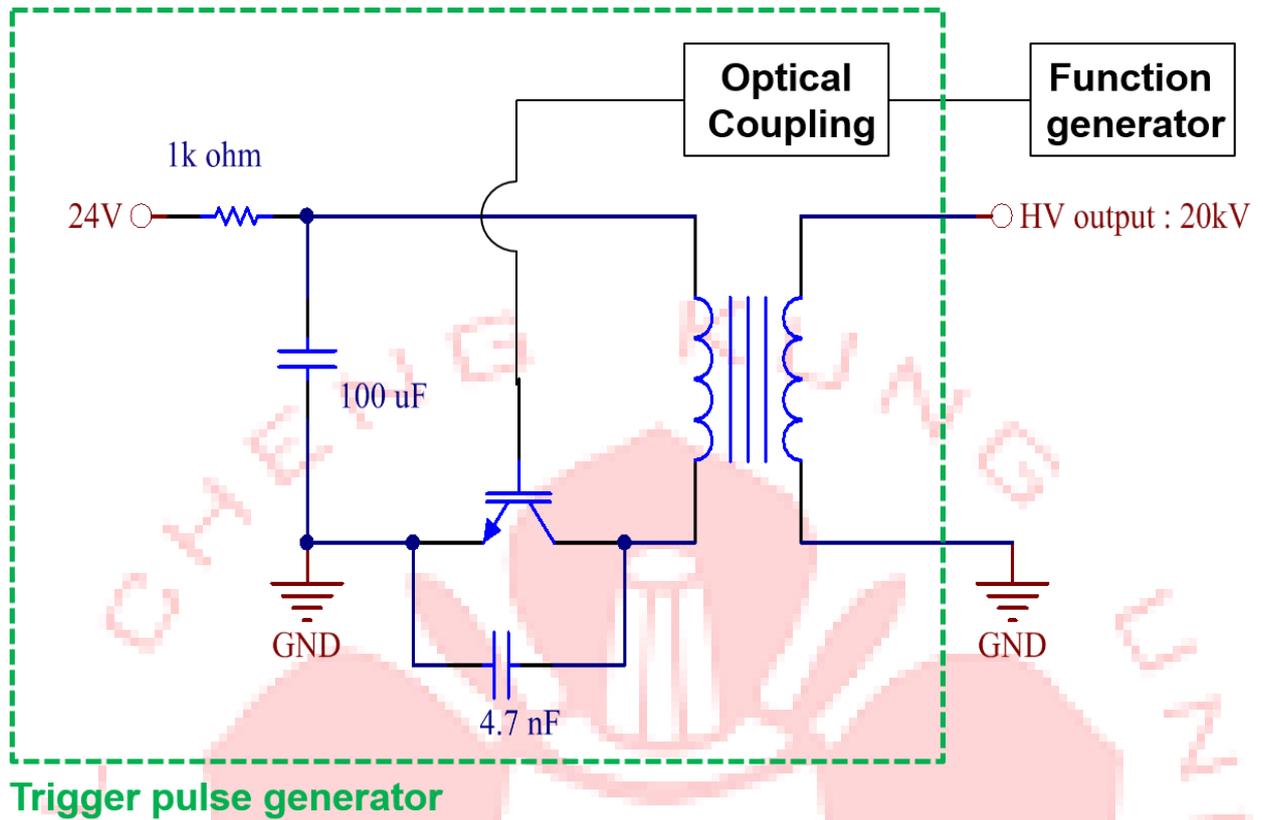


圖 5-1-6 光耦合訊號對和觸發脈衝產生器系統。

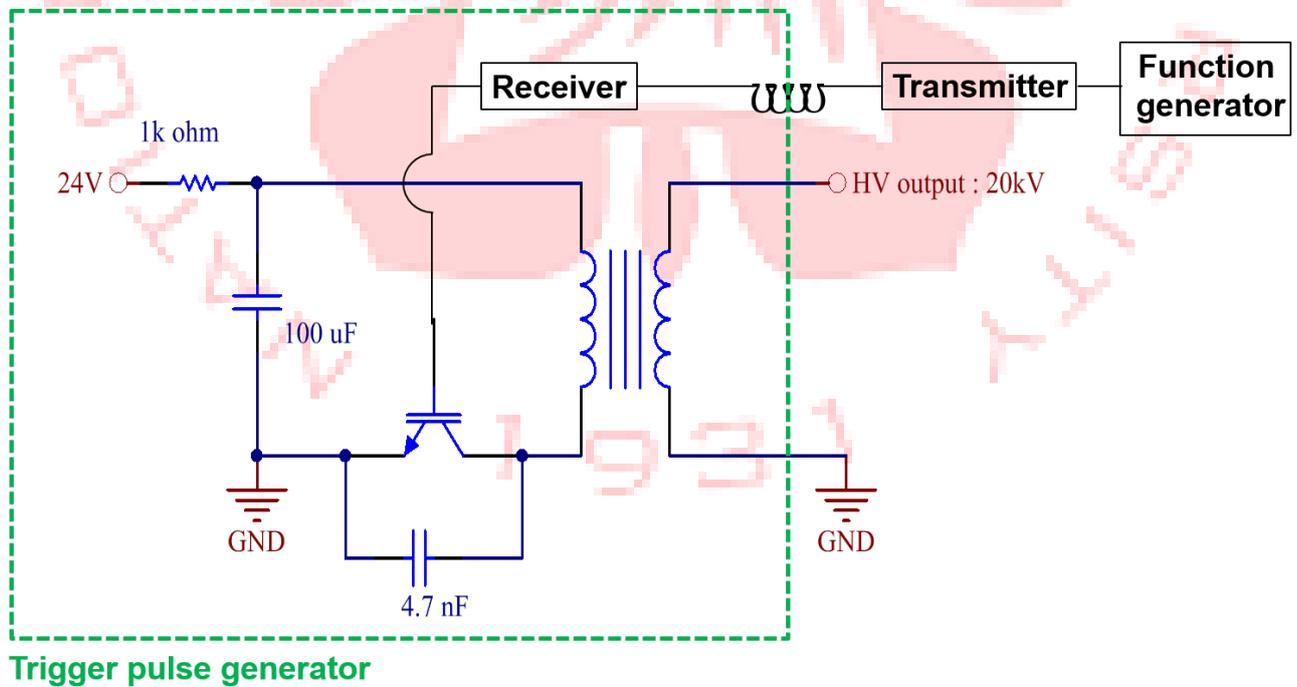


圖 5-1-7 接收器和轉換器及觸發脈衝產生器系統。

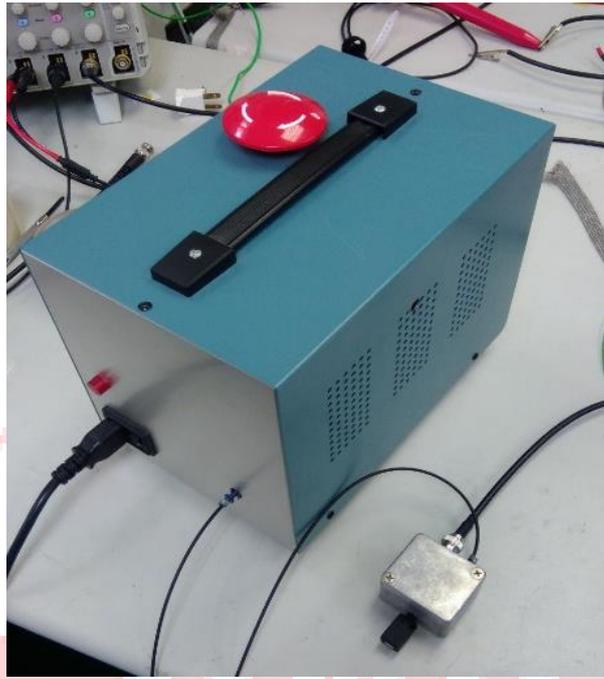


圖 5-1-8 觸發脈衝產生器和光纖系統完成後之外觀。



圖 5-1-9 USB 接頭內部線路。

第六章 未來工作

1. 完成間隙開關之時間不準度(jitter)測試。
2. 架設 One stage，其中 One stage 是由兩個脈衝功率系統所需要的 $1\mu\text{F}$ 電容所串連而成。
3. 量測 One stage 的電流及電壓，並了解 One stage 的系統特性，可推估整體系統之電感值及電流。
4. 設計平行板傳輸線給未來的脈衝功率系統，需求為較低之電感值。
5. 設計真空腔所需之高壓通孔，在未來真空艙內部為真空而平行板傳輸線為高電壓，必須要先了解在此介面會發生的情況並加以設計。

第七章 總結

目前已完成間隙開關，不儘自行去機械工廠加工完成間隙開關，且測試了不同氣壓下之放電，並將放電後的資訊完成的數據分析。其中有發現在 2.5 atm 下崩潰電壓會不穩的狀況，有待改善。但在 20 kV 的輸出上已沒有問題，可以著手進行新的進度。

在觸發脈衝產生器上已將原先的光耦合訊號對換成光訊號系統，可以確實保護訊號產生器不會受到高電壓崩潰後之交流訊號的回衝。

現階段已完成觸發間隙開關的條件，接下來是要測試間隙開關之時間不準度，是脈衝功率系統的重要參數，若完成此量測在開關的控制上也可告一個段落。在平行板電容間的介電質 Mylar 還需做抗電壓測試，以防止未來系統放電時跳電。且為了架設系統還需要製造 One stage 的框架以方便搬運及保護電容，架設完電容即可將金屬平板、Mylar 及間隙開關一一放入系統進行架設工作。

參考文獻

- [1] 黃梅鳳 (2017) Rust remover using small pulse-power system, National Cheng Kung University, Taiwan
- <http://www.9yjk.com/Usb%E6%95%B0%E6%8D%AE%E7%BA%BF%E6%8E%A5%E7%BA%BF%E5%9B%BE/>

