

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

**研究生：陳俊宇 Jun-Yu Chen**

**指導教授：張博宇 Po-Yu Chang**

## 摘要

此次的進度目標是建立一個教學用的托卡馬克(Tokamak)，為的是對於理解電漿相關的性質可以有更直觀的了解，並以理論去輔助，去解釋實際所看到的電漿現象，更深入去理解電漿物理。在建立托卡馬克系統之前，需要知道氣體在甚麼樣的情況之下會形成電漿，以作為點燃托卡馬克的基礎，所以會先量測 Paschen's curve，經由對照 Paschen's curve 可以確切知道氣體何種條件下會形成電漿。譬如在特定氣壓之下施加多大的電壓，氣體會因為承受不了高壓而解離形成電漿。在實驗當中是以火花間隙開關去量測 Ar 及乾燥氣體的 Paschen's curve，火花間隙開關是由一對電極組成，藉由調整電極之間間距 0.5 mm ~ 4.5 mm，電極之間的氣體壓力從 4 atm 到最低提供的氣壓，並且調整施加在電極之上的電壓直到電極之間導通，最後繪製成 Paschen's curve。

# 目錄

1	背景.....	5
2	實驗架構.....	8
2.1	氣壓範圍 1 atm~4 atm.....	9
2.1.1	氣體線路架設 .....	10
2.1.2	電路架設.....	10
2.1.3	實驗流程.....	11
2.2	氣壓範圍 0.077 atm ~ 1 atm .....	11
2.2.1	氣體線路架設 .....	12
2.2.2	實驗流程 .....	12
2.3	量測範圍小於 0.077 atm .....	12
2.3.1	氣體線路架設 .....	13
2.3.2	電路架設.....	13
2.3.3	實驗流程.....	13
2.3.4	氣壓校正.....	13
3	Paschen's curve 的量測結果 .....	21
3.1	量測範圍 1 atm ~ 4 atm .....	21
3.1.1	量測結果.....	21
3.2	氣壓範圍 0.077 atm ~ 1.0 atm .....	24
3.2.1	量測結果.....	24
3.3	量測範圍小於 0.077 atm .....	26
3.3.1	量測結果.....	26
4	繪製出完整的氫氣 Paschen's curve.....	28

5 討論 .....	32
6 結論 .....	33
附錄一 .....	34
附錄二 .....	35
附錄三 .....	36
附錄四 .....	37
附錄五 .....	37

# 1 背景

有鑑於不可再生能源如石油、天然氣、煤礦越來越少，人類勢必需要尋找不同的方式去產生電能。可再生能源是其中之一的選項，如風力發電、水力發電、太陽能發電等等。除了以上產生能源的方式，核融合發電也是具有很大的潛力產生能源方式，世界上許多國家都投入了相關的研究，期望可以得到更乾淨且永續的能源。

磁場控制核融合是研究核融合的方式之一，而磁控制核融合以托卡馬克(Tokamak)裝置來實現為主流，透過環形磁場(Toroidal magnetic field)與垂環磁場(Poroidal magnetic field)將電漿侷限在托卡馬克裝置裡面。其中環形線圈(Toroidal field coil)是用來產生環形的磁場，將電漿限制在方位角(Azimuth)的方向上，而方位角方向上的電漿會產生垂環磁場，配合環形磁場將電漿有效的限制在托卡馬克裝置裡面。

球型托卡馬克(Spherical tokamak)相對於其他類型的托卡馬克有低縱橫比的優勢，限制電漿靠近於球型托卡馬克的內部位置，相比於其他類型的托卡馬克，使用相同大小的電流，可以在電漿的內部中產生更強的磁場，提供更好約束電漿的能力。所以，我們將使用球型托卡馬克作為建構實驗腔的目標。

在進行實驗之前，我們需要知道在球型托卡馬克裡面的氣體，在何種條件之下會解離並且產生電漿。主要影響氣體解離的因素是崩潰電壓，以我們的實驗為例，當電極之間的氣體無法承受由電極提供的高壓時，這時氣體會解離成電子與離子，電子會從電極的陰極跑到陽極，而離子會從電極的陽極跑到陰極，因此在電極之間會有電流導通，而崩潰電壓表示為電極之間導通電流的臨界值，當施加在電極之上的電壓超過崩潰電壓時，這時電極之間就會發生電流導通的情況。如果想要完全了解電極的崩潰電壓，需要參考 Paschen's curve，該曲線是由崩潰電壓( $V_B$ )、電極間距( $d$ )、氣體壓力( $p$ )共三個參數所構成，描述崩潰電壓隨著不同的電極間距與氣體壓力的乘積  $p \times d$  改變的函數關係。我們藉由建構一對間距為

由置換特定厚度的壓克力圓環，搭配特定厚度的 ABS 板，來控制所需要的電極間距。而調整電極間距的方式以每 0.5 mm 為間隔做調整，接下來以電極間距為 0.5 mm 為例，需要搭配厚度為 12.5 mm 的壓克力圓環，四片厚度為 3.0 mm 的方形 ABS 板，跟一條厚度為 0.5 mm 的長形 ABS 板。而電極間距為 1.0 mm 時，則是搭配厚度為 13.0 mm 的壓克力圓環，四片厚度為 3.5 mm 的 ABS 板跟一條厚度為 1.0 mm 的長形 ABS 板，也就是說電極間距從 0.5 mm 每增加 0.5 mm，壓克力圓環的厚度須從 12.5 mm 增加 0.5 mm，四片方形的 ABS 板厚度須從 3.0 mm 增加 0.5 mm，而長形的 ABS 板厚度須從 0.5 mm 增加 0.5 mm，間距 1.0 mm 以上的情況依循以上的方式做調整。因此間距可調整的範圍為 0.5 mm~4.5 mm；所對應所需的壓克力圓環為 12.5 mm~17.0 mm；方形的 ABS 板的厚度為 3 mm~7 mm；長型 ABS 板的厚度為 0.5 mm~4.5 mm。調整電極間距為 0.5 mm 的情況安裝方式請參見附錄一。

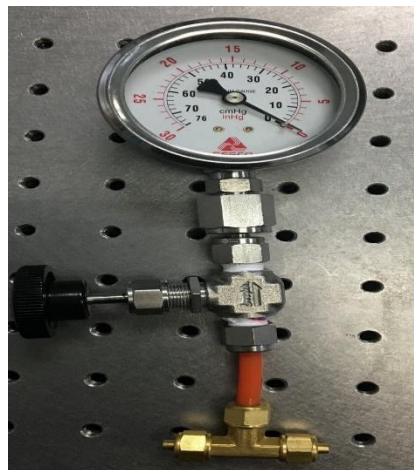
## 2 實驗架構

我們量測 Paschen's curve 的氣壓條件主要分為三個不同的區段：

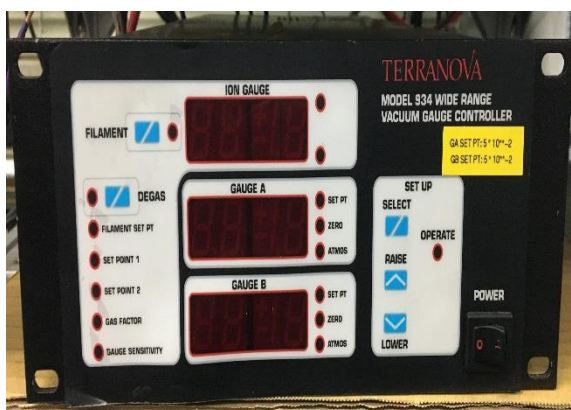
- (1) 第一個區段為氣壓值在 1 atm~4 atm 區間，此量測條件屬於正壓的情況，需使用指針式正壓氣壓計(圖五)作為量測氣壓的儀器。
- (2) 第二個區段氣壓值大於 0.077 atm 小於 1.0 atm，並在此區間量測三個氣壓值，分別為 0.077 atm、0.5 atm、1.0 atm 這三個氣壓，量測氣壓所使用的儀器為指針式負壓氣壓計(圖六)作為量測氣壓的儀器。
- (3) 第三個區段氣壓值小於 0.077 atm，在此區間量測氣壓值使用的是數位式氣壓計(圖七)作為量測。



圖五、指針式正壓氣壓計



圖六、指針式負壓氣壓計



圖七、數位式氣壓計

## 2.1 氣壓範圍 1 atm~4 atm

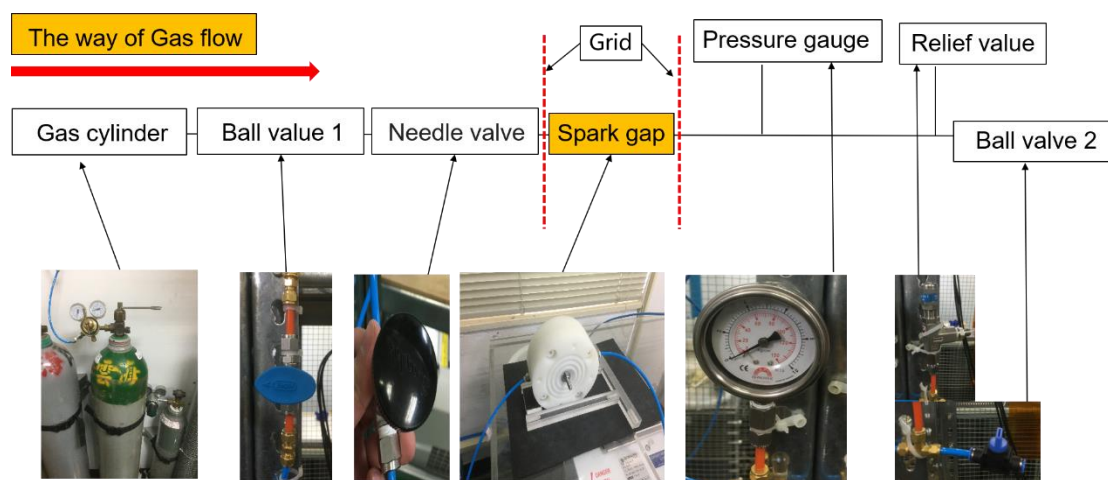
此氣壓範圍為正壓，所以需要在火花間隙開關灌入加壓氣體。

### 2.1.1 氣體線路架設

將火花間隙開關的氣路架設方式如圖八所示，氣體行徑的路徑依序是從氣瓶(Gas cylinder)出發，經過球閥 1(Ball valve 1)、針閥(Needle valve)、穿過電網(Grid)進入高電壓區域，進入於火花間隙開關中，再穿過電網(Grid)回到低電壓區域，最後由球閥 2(Ball valve 2)排出。

線路當中的洩壓閥(Relief valve)為系統氣壓太大時自動釋放氣壓的安全裝置。火花間隙開關的氣壓條件為 1 atm ~ 4 atm，所以設定洩壓閥(Relief value)在實驗腔內部壓力為 5 atm 時釋放氣壓。

實驗的前置作業主要是將球閥 2(Ball valve 2)關閉，並打開氣瓶通入實驗所需的氣壓，並開始實驗，詳細的操作方式於附錄一有說明。



圖八、氣體管路架設

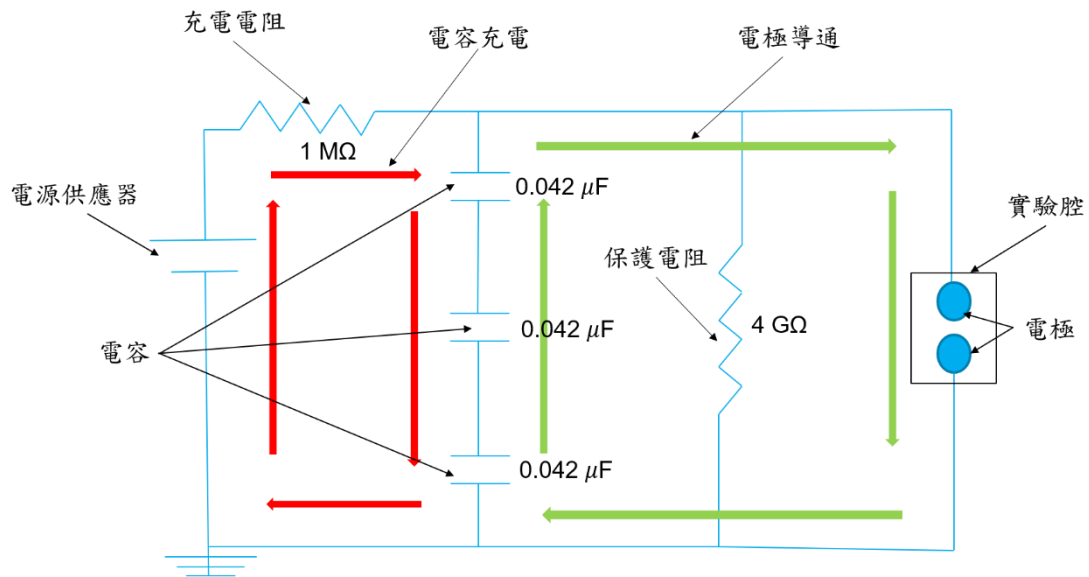
### 2.1.2 電路架設

電路的電路圖如圖九所示，所使用的電源供應器如圖十所示，電路圖中 4 GΩ 的電阻為保護電阻，當實驗操作完後，如果電容並沒有被放電完全，這個電阻就可以起到保護的作用，意思是這個電阻可以消耗電容之中尚未釋放完的能量，防止危險發生。以我們實驗室為例，定義安全的電壓值  $V_{safe}=10\text{ V}$ ，以放電

公式  $V(t)=V_0 * \frac{1}{C} e^{-\frac{t}{RC}}$  去計算，達到安全電壓  $V_{safe}=10\text{ V}$  所需要的時間，其中  $V_0$  為



初始電壓，C 表示為電容值，R 表示為放電電阻的電阻值，t 表示為放電時間。  
 $V(t)$  表示為安全電壓值以  $V_{\text{safe}}=10 \text{ V}$  帶入，系統中三個並聯的電容承受的最高電壓以  $50 \text{ kV}$  為上限，放電公式中的  $V_0$  以  $50 \text{ kV}$  帶入，R 電阻值以放電電阻值  $R=4 \text{ G}\Omega$  帶入，C 電容值以三個  $\sim 40 \text{ nF}$  電容串聯的值  $C=14 \text{ nF}$  帶入。由以上參數可以得到達到 t 安全電壓的時間約是 8 分鐘。



圖九、火花間隙開關系統線路圖



圖十、Spellman SL 30 電源供應器

### 2.1.3 實驗流程

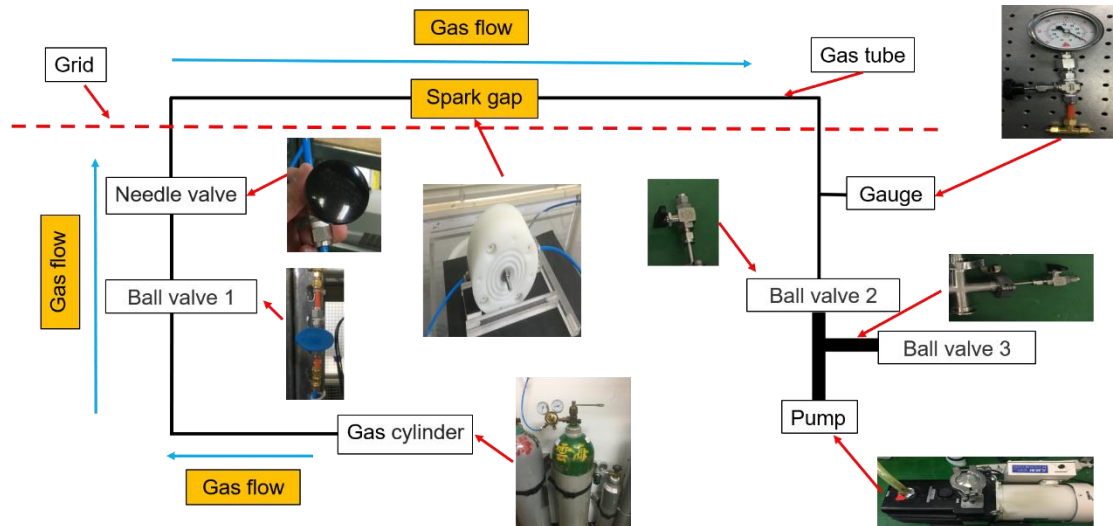
參見附錄二。

## 2.2 氣壓範圍 0.077 atm ~ 1 atm

此區屬於負壓，火花間隙開關做量測，只量測到氣壓值為  $0.077 \text{ atm}$  的原因，是因為指針式負壓計可以量測到最低且準確的氣壓值為  $0.077 \text{ atm}$ 。另外，因為手動控制氣壓進入系統中的關係，選擇了三個比較容易控制的氣壓值做量測，所以選擇  $1 \text{ atm}$ 、 $0.5 \text{ atm}$ 、 $0.077 \text{ atm}$  這三個條件。

### 2.2.1 氣體線路架設

架設圖如圖十一所示，氣路的前半段如 2.1.1 氣體線路架設方式一樣，後段為氣體進入為球閥 2(Ball value 2)，最後進入幫浦(Pump)。球閥 3(Ball value 3) 的功用為破真空裝置，當系統內處於負壓的情況之下，打開球閥 3 使系統內的氣壓上升。



圖十一、架設 Paschen's curve 氣體管路氣壓值 0.077atm、0.5atm、1.0atm

### 2.2.2 實驗流程

電路的架設維持不變，但電源供應器改用圖十二的 HB-Z103-20AV 電源供應器規格。流程放參見附錄三。



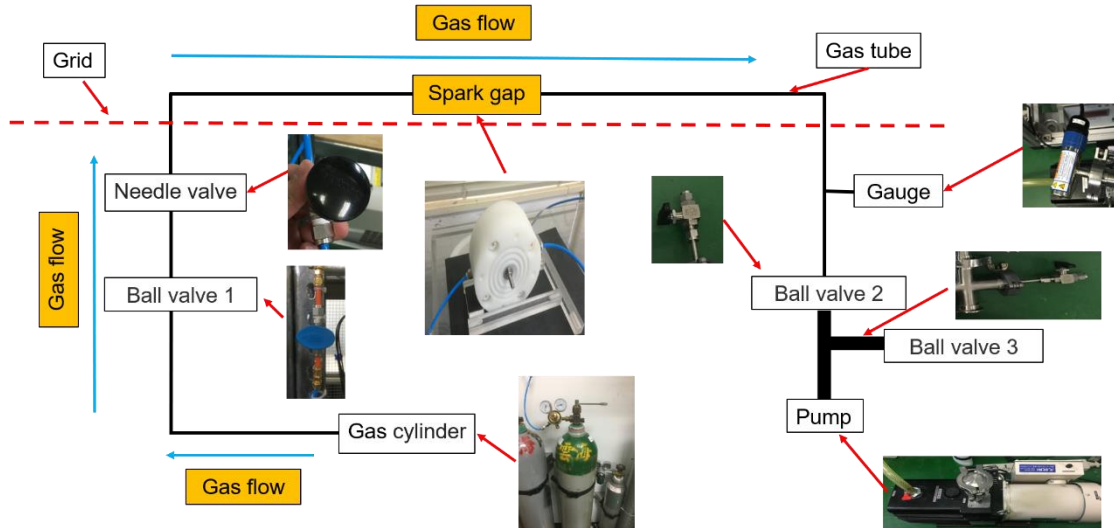
圖十二、HB-Z103-20AV 電源供應器

## 2.3 量測範圍小於 0.077 atm

在此氣壓條件之下需要使用數位式氣壓計作為氣壓計。

### 2.3.1 氣體線路架設

氣體線路架設如圖十三所示，所使用的 gauge 為數位式氣壓計如圖九所示，在氣壓小於 0.077 atm 時做使用。



圖十三、Paschen's curve 氣體管路架設

### 2.3.2 電路架設

與 2.1.2 相同，並使用圖十二的 HB-Z103-20AV 電源供應器。

### 2.3.3 實驗流程

參見附錄四。

### 2.3.4 氣壓校正

為了要保護氣壓計不被火花間隙開關導通時產生的電磁脈衝 (Electromagnetic Pulse, EMP) 打壞，所以氣壓計的位置是放至在電網之外。因此最終所量測的氣壓值不是火花間隙開關裡面真實的氣壓值，需要再對氣壓計做校正。校正過程中將使用兩個數位式氣壓計 Blue gauge 與 Yellow gauge，如圖十四、圖十五。



圖十四、Blue gauge



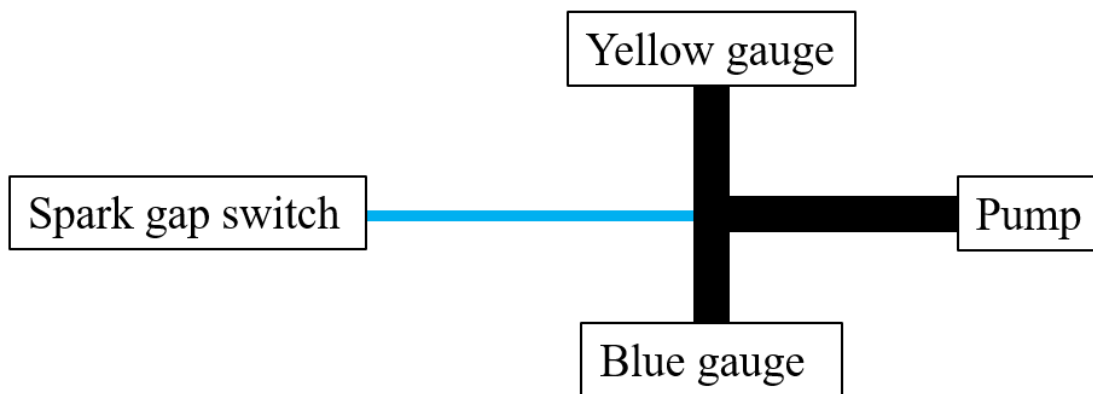
圖十五、Yellow gauge

氣壓校正分成三個步驟去做調整氣壓：

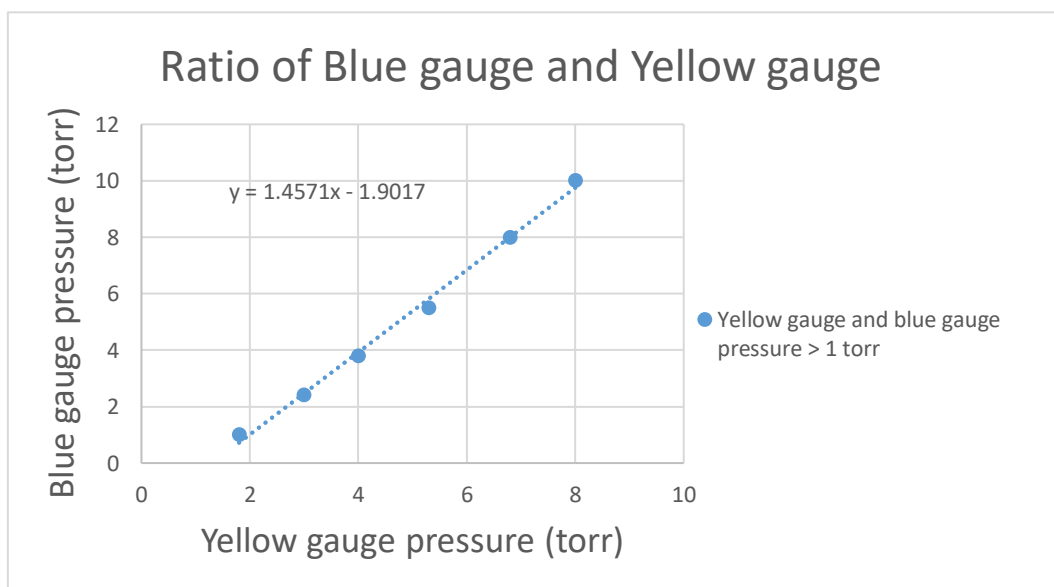
(1) 第一個步驟：

找到 Blue gauge 與 Yellow gauge 的比率關係。由於理想上在做氣壓校正時需要兩個完全相同的氣壓計去量測，但在我們實驗室當中沒有兩個量測結果完全相同的氣壓計，所以首先需要將這兩個氣壓計去做相關性的校正。將 Blue gauge 與 Yellow gauge 同時擺放在 Spark gap switch 之後、pump 之前，如圖十六所示，圖中藍色線段的部分為 PU 細管，黑色線段為 KF25 不銹鋼管。這樣的擺放方式 Blue gauge 與 Yellow gauge 量測的氣壓應該是相同的，但是因為每支氣壓計不完全相同，所以量測出來的氣壓值是不同的。所以透過量測相同氣壓，到 Blue gauge 與 Yellow gauge 的比率關係，量到的關係圖如圖十七、圖十八、圖十九，圖十七表示 Blue gauge 和 Yellow gauge 量測氣壓都大於 1 torr 時，Blue gauge 和 Yellow gauge 之間的氣壓關係為  $y = 1.4571x - 1.907$ ，y 表示為 Yellow gauge 的氣壓值，x 表示為 Blue gauge 的氣壓值。圖十八表示 Blue gauge 和 Yellow gauge 量測氣壓都在區間 1 torr~0.3 torr 時，Blue gauge 和 Yellow gauge 之間氣壓的關係為  $y = 1.0717x - 0.2103$ ，y 表示為 Yellow gauge 的氣壓值，x 表示為 Blue gauge 的氣壓值。圖十九表示 Blue gauge 和 Yellow gauge 都小於 0.3 torr 時，Blue gauge 和 Yellow gauge 之間的氣壓關係為  $y = 0.4091x - 0.0187$ 。

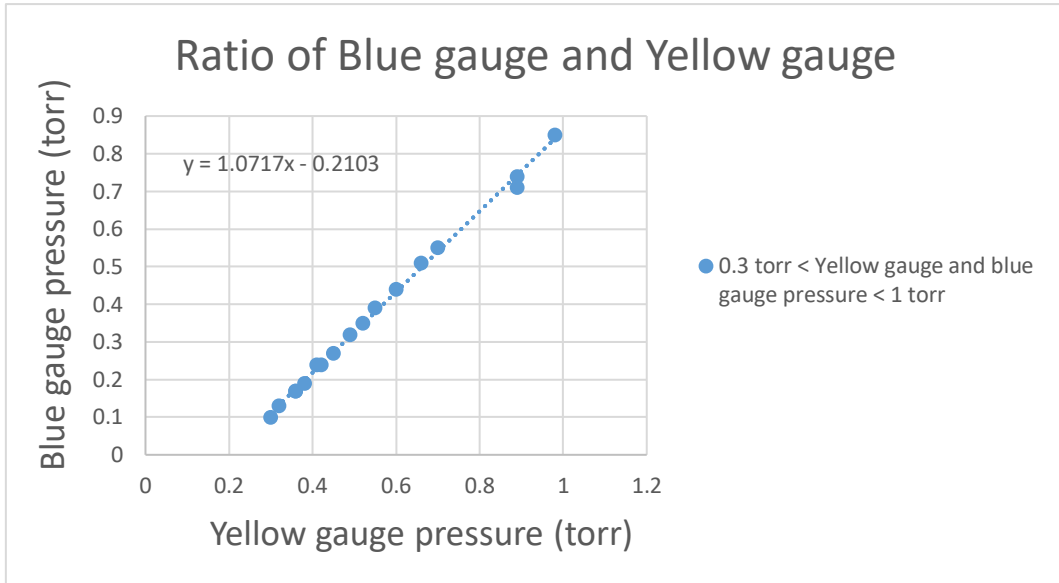
。



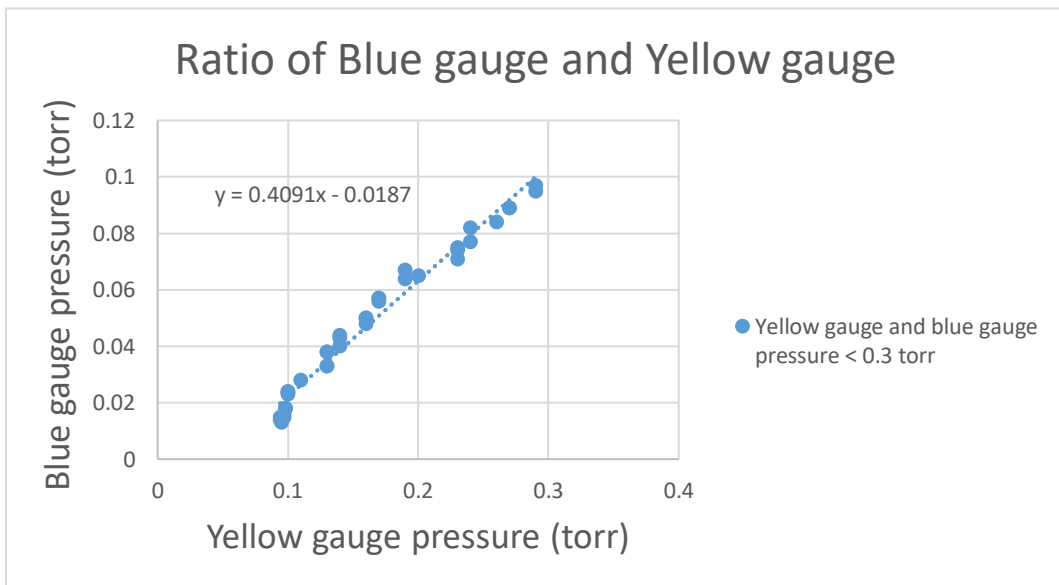
圖十六、電子式氣壓計擺放圖(步驟一)



圖十七、Blue gauge 和 Yellow gauge 量測氣壓大於 1 torr



圖十八、Blue gauge 和 Yellow gauge 量測氣壓 1 torr ~ 0.3 torr

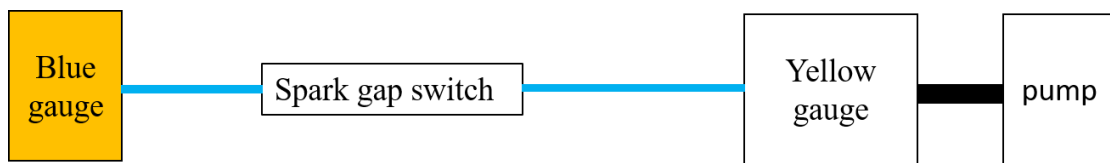


圖十九、Blue gauge 和 Yellow gauge 量測氣壓小於 0.3 torr

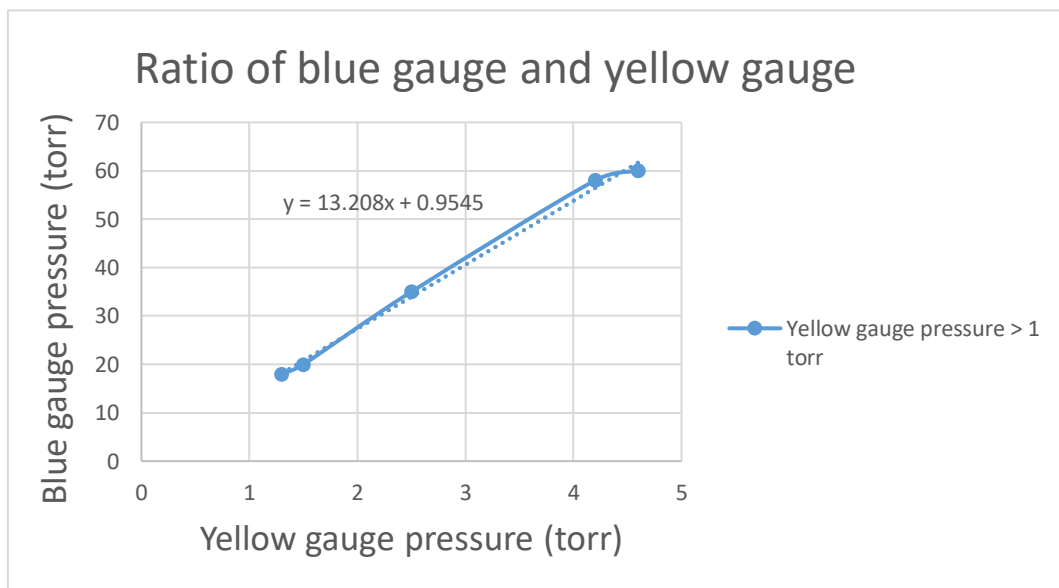
(2) 第二個步驟：

是量測 Blue gauge 和 Yellow gauge 的氣壓關係圖，但是氣壓計的擺放位置與步驟一擺放的不同，擺放的方式如圖二十二，Blue gauge 在火花間隙開關之前，

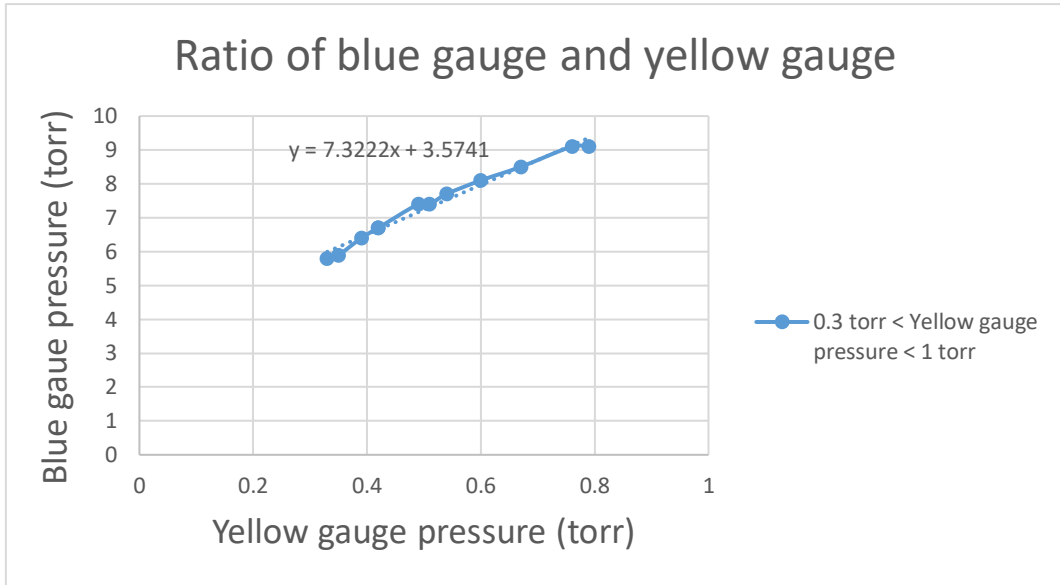
Yellow gauge 則在幫浦之前，圖二十中藍色線段的部分為 PU 細管，黑色線段為 KF25 不銹鋼管。圖二十一表示 Yellow gauge 的氣壓大於 1 torr 時的情況  $y = 13.208x + 0.9545$ ，y 表示為 Yellow gauge 的氣壓值，x 表示為 Blue gauge 的氣壓值，圖二十二表示 Yellow gauge 的氣壓在區間 1 torr ~ 0.3 torr 時的情況  $y = 7.3222x + 3.5741$ ，y 表示為 Yellow gauge 的氣壓值，x 表示為 Blue gauge 的氣壓值，圖二十三表示 Yellow gauge 的氣壓小於 0.3 torr 時的情況  $y = 24.431x - 1.6066$ ，y 表示為 Yellow gauge 的氣壓值，x 表示為 Blue gauge 的氣壓值。



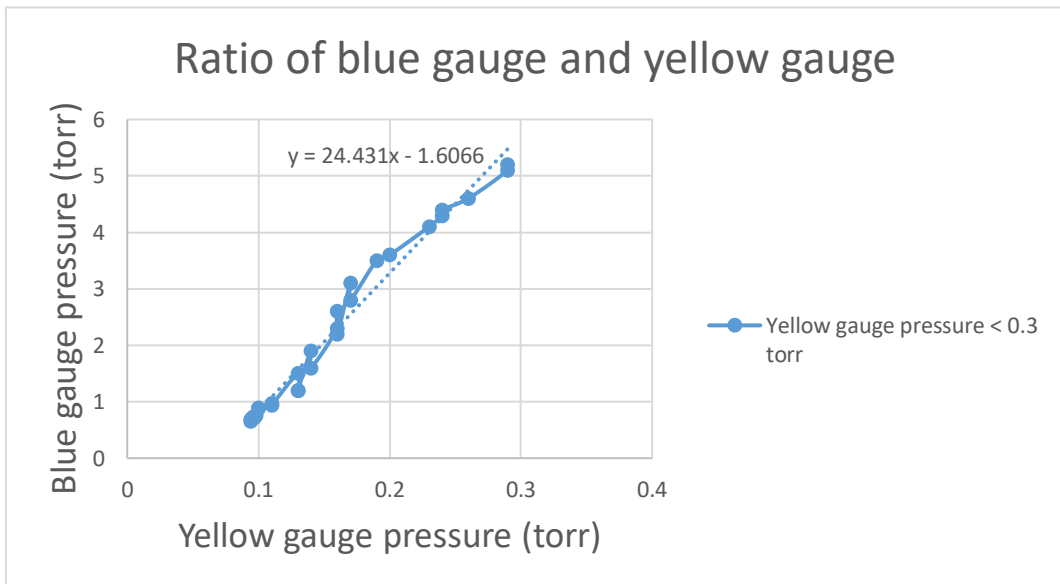
圖二十、電子式氣壓計擺放圖(步驟二)



圖二十一、Yellow gauge 測氣壓大於 1 torr



圖二十二、Yellow gauge 量測氣壓 1 torr ~ 0.3 torr

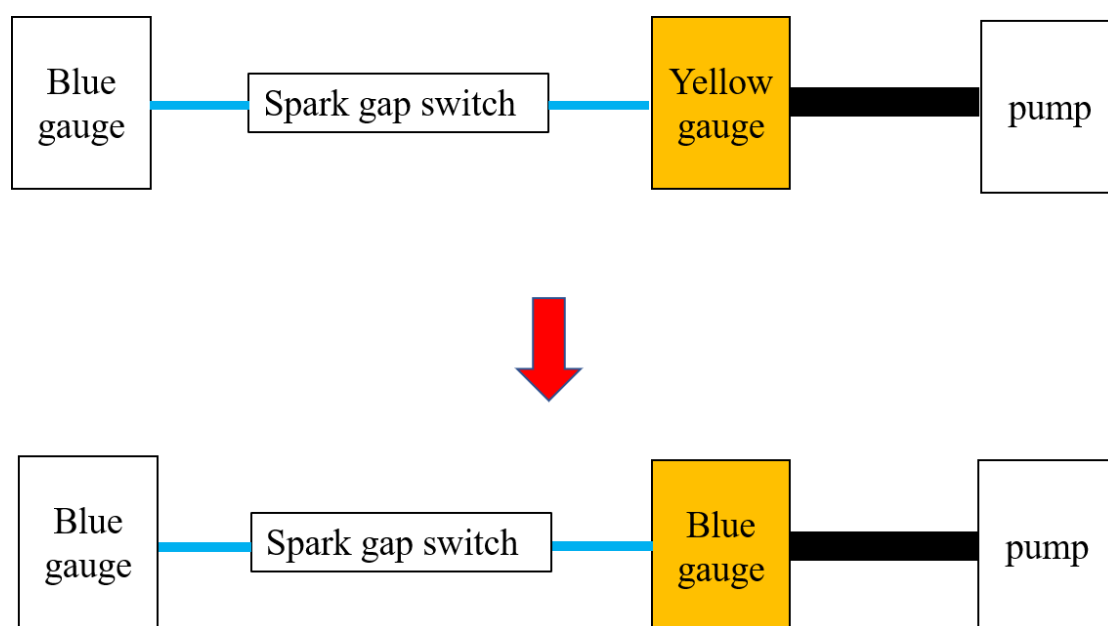


圖二十三、Yellow gauge 量測氣壓小於 0.3 torr

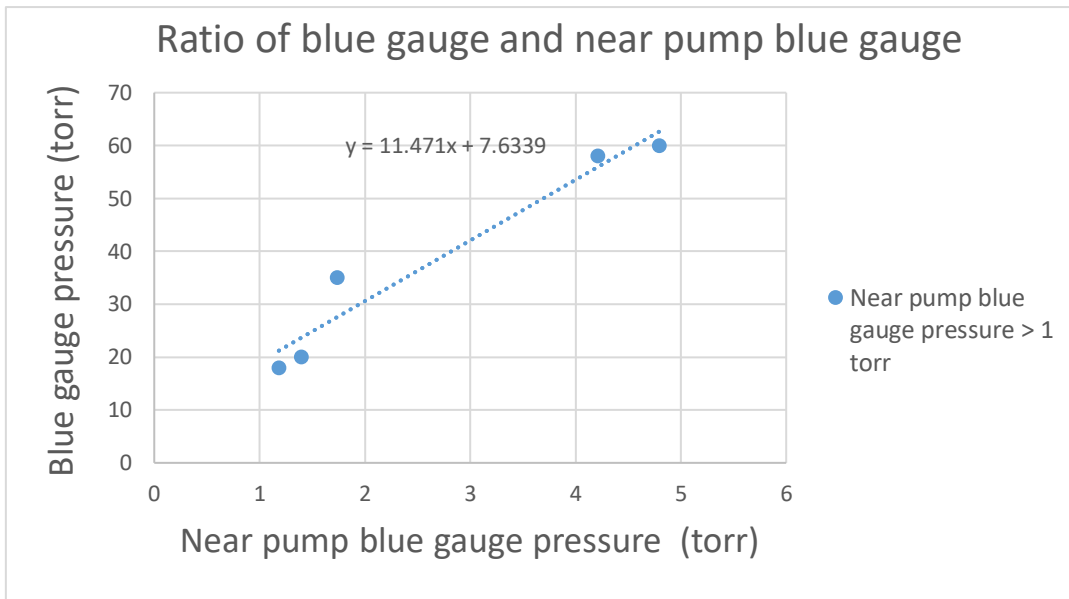


(3) 第三個步驟：

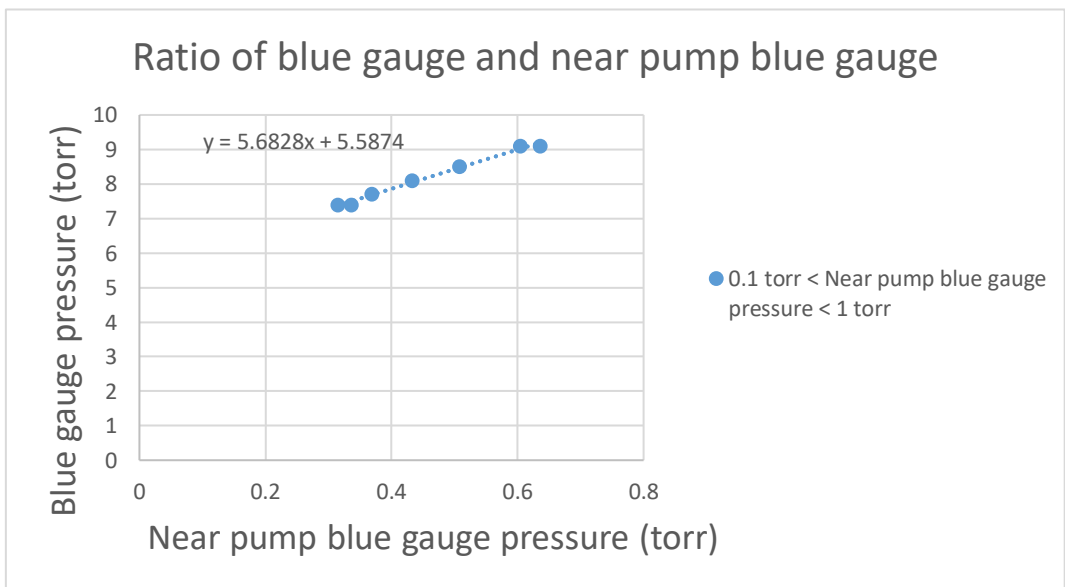
是將步驟二 Yellow gauge 的部分，經由步驟一的 Blue gauge 與 Yellow gauge 的轉換關係換成 Blue gauge，如圖二十四所示，也就是說完成步驟三之後，會得到兩個完全一樣的 Blue gauge 讀值，一個擺放在火花間隙開關之前較靠近火花間隙開關，另一個擺放在火花間隙開關之後較靠近幫浦。圖二十五表示為靠近幫浦的藍色氣壓計氣壓在 1 torr 以上，與火花間隙開關之前的藍色氣壓計之間氣壓的關係  $y = 11.471x + 7.6339$ 。圖二十六表示靠近幫浦的藍色氣壓計在區間 1 torr ~ 0.1 torr，與實驗腔之前的藍色氣壓計之間氣壓的關係  $y = 5.6828x + 5.5874$ 。圖二十七表示靠近幫浦的藍色氣壓計在 0.1 torr 以下，與實驗腔之前的藍色氣壓計之間氣壓的關係  $y = 60.187x - 0.5061$ 。經由圖二十五、圖二十六、圖二十七的氣壓關係圖得知，當我知道靠近幫浦的藍色氣壓計的氣壓大小為多少，可以回推較靠近實驗腔的藍色氣壓計氣壓為何，以得到實驗腔真實的氣壓值。



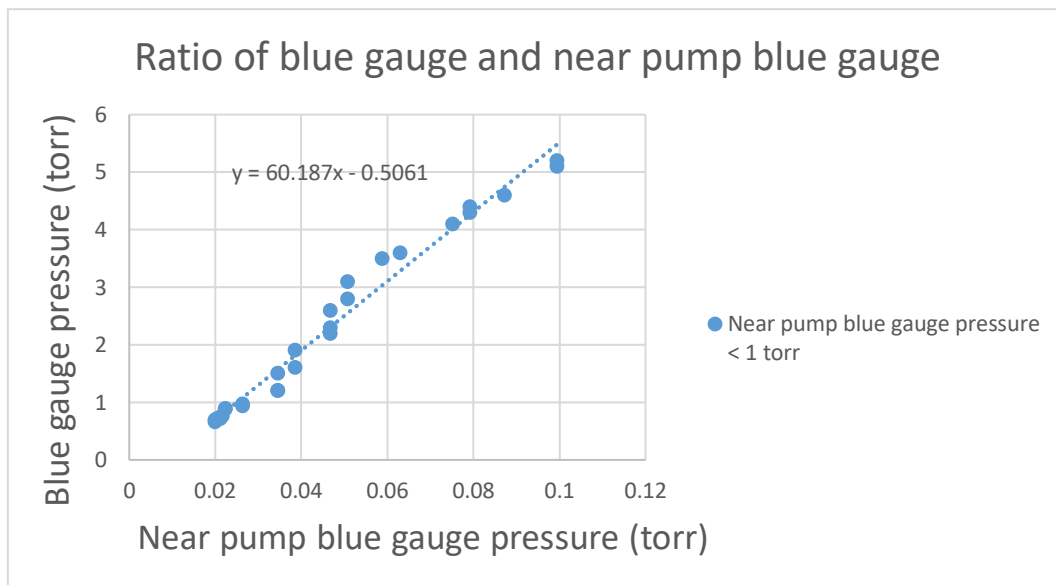
圖二十四、電子式氣壓計擺放圖



圖二十五、Near pump blue gauge pressure 量測氣壓大於 1 torr 以上



圖二十六、Near pump blue gauge pressure 量測氣壓 0.1 torr~1 torr



圖二十七、Near pump blue gauge pressure 量測氣壓小於 0.1 torr

### 3 Paschen's curve 的量測結果

Paschen's curve 分為三個氣壓範圍量測(1) 4 atm~1 atm、(2) 1 atm~0.077 atm、(3) 0.077 atm 以下。最後組成完整的 Paschen's curve。

#### 3.1 量測範圍 1 atm~4 atm

##### 3.1.1 量測結果

實驗量測到的 Paschen's curve 為球型電極的崩潰電壓 vs 火花間隙開關內部氣壓乘以電極間距，也就是  $V_b \text{ sphere vs } pd$ ，如圖二十八、圖二十九所示。可以發現不同間距量測的結果並未重疊，原因來自於電極為球型，電場隨著間距的變化關係並非線性關係。我們期望知道平板電極的 Paschen's curve，然而實驗量

計為電子式氣壓計。在實驗的過程中幫浦會一直對系統抽氣，此時氣壓計擺放的位置靠近火花間隙開關與遠離火花間隙開關，會影響量測到火花間隙開關裡面的氣壓值，最後透過校正兩組氣壓計的方式，使得兩組氣壓計量測的氣壓值是一樣的，校正的方式在 2.3.4 之中有說明。

Paschen's curve 告訴我們在 Paschen's curve 曲線發生轉折之前，火花間隙開關內部氣體壓力下降時，預期的崩潰電壓應該也要下降。然而，一開始在量測的過程中發生在 0.01 atm 以下的氣壓條件崩潰電壓，竟高於 0.077 atm、0.5 atm、1.0 atm 氣壓條件下的崩潰電壓。後來找到原因出在 0.01 atm 以下所量測到的氣壓值是不正確的。經由 2.3.4 的方式，對氣壓計做校正，修正了 0.01 atm 以下的氣壓讀值後，得到完整且連續的 Paschen's curve。

## 6 結論

經由量測後，最後獲得 Ar 及乾燥氣體的 Paschen's curve，氣壓範圍從 4.0 atm 到最低提供的氣壓值。由 Paschen's curve 曲線可以得知，在何種情況之下氣體會解離而形成電漿。以我們的實驗為例，氣壓值在 0.005 atm 附近最容易點燃電漿，也就是說在這個氣壓值區間，可以用最低的電壓值去點燃電漿。然而，當增加氣體壓力接近到 4 atm 時，與減少氣體壓力接近到 0.0005 atm 時，電漿將越不容易被點燃，需要使用相對於氣壓值在 0.005 atm 時，更高的電壓值去點燃電漿。所以，以 Paschen's curve 曲線作為點燃托卡馬克的基礎，就可以知道不同種類的氣體，需要注入多少的氣壓於托卡馬克實驗腔之中，與施加多少的電壓於電極之上，氣體會因為承受不了高壓而解離，在最後托卡馬克裡面的電漿被點燃起來。

10. 打開電源供應器對電容進行充電動作。
11. 當達到崩潰電壓時，電源供應器的電壓值會歸零。
12. 紀錄電源供應器歸零前的最大電壓，為崩潰電壓。
13. 按下 SL 30 電源供應器的 HV OFF 綠色按鈕，暫停電源供應器。
14. 打開 Ball value 2 釋放管線中的氣體。
15. 關閉 Ball value 2。
16. 做下一次實驗。

### 附錄三

1. 關閉 Ball value 1。
2. 關閉 Needle valve。
3. 關閉 Ball value 2。
4. 關閉 Ball value 3。
5. 打開 Pump。
6. 打開 Gas cylinder 調整到所需的氣壓值。
7. 接下來打開 Ball value 1。
8. 打開 Ball value 2。
9. 緩慢打開 Needle valve，使得系統內的氣體置換成與 Gas cylinder 相同的氣體。
10. 關閉 Needle valve，使得管路繼續抽真空，直到氣壓計上讀值顯示接近 0 atm。
11. 關閉 Ball value 2。
12. 緩慢打開 Needle valve，並且持續觀看氣壓計的讀值。
13. 等讀值顯示到所需氣壓時。
14. 關閉 Needle valve。

15. 打開電源供應器進行放電動作。

## 附錄四

1. Ball value 1 關閉。
2. Needle value 關閉。
3. Ball value 2 打開。
4. Ball value 3 關閉。
5. 打開 Pump 抽氣抽到  $1e-2$  Torr。
6. 將 Gas cylinder 打開氣壓顯示 1kg 重。
7. Ball value 1 打開至一半。
8. 微調 Needle value 開關，將氣體送進系統中。
9. 調整送氣率使得它與抽氣率平衡並得到所需的壓力讀值。
10. 打開電源供應器進行放電。

## 附錄五

$a$  = radius of sphere electrode

$\frac{d}{2}$  = half distance of gap

$Z_0$  = distance between the center of sphere electrode and a half of gap

$$Z_i = Z_0 - \frac{a^2}{Z_0 + Z_{i-1}}$$

$$A_i = \frac{q_i}{q_0}, \quad A_0 = \frac{q_0}{q_0} = 1, \quad q_0 = \text{charge of sphere}$$

$$A_i = \frac{a}{Z_0 + Z_{i-1}} A_{i-1}$$

V<sub>bavg sphere</sub> = average breakdown voltage of sphere electrode

$$E_{z \text{ total}} = \sum_{i=0}^{\infty} E_{iz} = a * (V_{\text{bavg sphere}/2}) * \left( \sum_{i=0}^{\infty} \left( \frac{A_i}{(z-z_i)^2} - \frac{A_i}{(z+z_i)^2} \right) \right)$$

$$\frac{E_{z \text{ total}}}{(V_{\text{bavg sphere}/2})} = a * \left( \sum_{i=0}^{\infty} \left( \frac{A_i}{(z-z_i)^2} - \frac{A_i}{(z+z_i)^2} \right) \right)$$

$$\frac{E_{z \text{ total}}}{(V_{\text{bavg sphere}/2})} * (V_{\text{bavg sphere}/2}) = E_{z \text{ total}}$$

V<sub>bavg equivalent plate</sub> = average breakdown voltage of sphere-sphere electrode equivalent to average breakdown voltage of flat-flat electrode

$$E_{z \text{ total}} * d = V_{\text{bavg equivalent plate}}$$

