

National Cheng Kung University Institute of Space and
Plasma Sciences 108 Annual Report

研究生：林宛儀 Wan-Yi Lin

指導教授：張博宇 Po-Yu Chang

Abstract

The Metallic Ion Thruster using Magnetron E-beam Bombardment (MIT-MEB) is developed. Different from the normal ion thrusters, the MIT-MEB uses the metallic target instead of the inert gas as the propellant because the solid is high density, easy to be stored, cheap and safer. There are three parts of the MIT-MEB: a metallic evaporator, an ion accelerator, and a neutralizer. Basis in the principle of electron-beam(E-beam) evaporation, the free electrons around the thermal filament are accelerated by the high electric field and bombarded the target. When the metallic vapor passes the high-density electrons limited by a magnetic field about $0.2\sim 0.3\text{T}$ between the target and the thermal filament from a focusing magnetic, a part of the vapor will be ionized by the collision from the high-energy electrons. The ions are accelerated by the applied electric field and bring the electrons from the neutralizer to keep the thruster discharge. We used the Zn as the target to build the prototype of the MIT-MEB and test it in a high vacuum. The evaporation rate of $(2.2\pm 0.4)\times 10^{-4}(\text{g/s})$ and the ionization rate of $0.03\pm 0.008\%$ at $15\text{ kV}/1\text{ mA}$ E-beam current, and the evaporation rate of $(1.8\pm 0.3)\times 10^{-4}(\text{g/s})$ and the ionization rate of $1.0\pm 0.3\%$ at $1\text{ kV}/1\text{ 5mA}$ E-beam current were measured, so we want to find the best voltage of E-beam for the MIT-MEB. The accelerated ions have more contribution to the thrust than the vapor, so improving the ionization rate is also our goal.

Key: Ion Thruster, E-beam vapor, Solid propellant

Contents

1	磁控電子束轟擊金屬離子推進器(MIT-MEB)	6
1.1	MIT-MEB的概念	6
1.2	推進器的相關參數	7
1.2.1	蒸發率	7
1.2.2	游離率	7
1.2.3	推力	8
1.2.4	比衝(I_{sp})	9
1.3	MIT-MEB的原型機	9
2	真空系統	10
2.1	真空系統的設計	10
2.2	真空系統的操作流程	13
2.2.1	抽真空 Pumping down	14
2.2.2	破真空 Vacuum venting	15
3	擴散泵	15
3.1	真空測試	16
3.1.1	油量測試	16
3.1.2	加熱棒電壓控制	17
3.1.3	溫度控制	18
3.2	冷卻系統	18
4	實驗	20
4.1	實驗架設	20
4.2	實驗操作	21
4.3	數據重現	23
4.4	降低加速電壓 V_{acc}	24
	References	26

List of Tables

1	真空系統配件表	13
2	使用油量與最低氣壓	16
3	50 ml 的擴散油三次測試與其最低氣壓	17
4	實驗接線簡化表	21
5	未經烘烤的7組1 kV實驗	23
6	實驗前經烘烤過的3組1 kV實驗	24
7	3組250 V實驗	25
8	2組250 V實驗	25
9	5 kV、1 kV與250 V比較	25

List of Figures

1	MIT-MEB概念示意圖[1]	6
2	MIT-MEB的等效電路圖	8
3	(a) MIT-MEB原型機的剖面概念圖(b)MIT-MEB的原型機設計模型[1] (c) MIT-MEB的實際原型機	10
4	真空系統的設計與配置	11
5	真空腔的上蓋板	11
6	真空腔的下蓋板	12
7	(a)真空系統的氣流路徑(b)真空系統的支架	13
8	(a)擴散泵 (b)擴散泵原理示意圖[2]	16
9	(a)變壓器 (b)調燈器 (c)溫控器	17
10	加熱棒電壓與其對應平均氣壓	18
11	擴散泵加裝風扇示意圖	19
12	水冷設置示意圖	19
13	(a)水箱與抽水閥 (b)冷水排 (c)擴散泵、銅管與水管	20
14	實驗儀器	20
15	儀器連接示意圖與編號	21
16	The Cross Section of Electron Impact Ionization[3]	24

1 磁控電子束轟擊金屬離子推進器(MIT-MEB)

我們正在發展一種利用磁控電子束轟擊金屬靶材的離子推進器—Metallic Ion Thruster using Magnetron E-beam Bombardment (MIT-MEB)。不同於常見的離子推進器，MIT-MEB使用金屬固體取代惰性氣體當作推進劑，具高密度、易儲存、價格低廉與安全性較高等優點。

1.1 MIT-MEB的概念

如圖 1. 所示，我們的推進器有一片作為推進劑的金屬靶材(Metallic target)，而靶材的上方有兩組鎢絲，較為接近靶材的那組是當電子槍(E-gun)， I_f 與 V_f 是它的電流與電壓，另一組則是作為維持儀器電中性的中和器(Neutralizer)，它的電流電壓則是 I_{nf} 與 V_{nf} ，我們在兩組鎢絲之間放了一片加速電網(Accelerated grid)，電網與中和器之間的 I_n 是我們量測的離子電流，並在靶材與電子槍之間給予高壓(V_{acc})，電子從低壓端的電子槍往高壓端的靶材前進產生的電子流為 I_e ，而靶材下方有一組強力磁鐵(Focus magnet)作為磁力來源。

發光的燈絲的周圍會有具能量的自由電子，這些電子的溫度和給予燈絲的電流(I_f)有關，電子槍產生的熱電子被 V_{acc} 朝金屬靶材的方向加速，這些電子(e^-)會因為強力磁鐵的磁場強度變化而沿著磁力線在金屬靶材與電子槍之間來回運動形成高密度的電子雲。一部分的電子因為未被磁場限制住而脫離電子雲轟擊並加熱金屬靶材產生金屬蒸氣，這些金屬蒸氣上升時經過那團高密度電子雲。有部分粒子會被碰撞游離產生金屬離子，這些離子被 V_{acc} 加速通過加速電網(Accelerate grid)排出產生推力。為了維持整個推進器的電中性，在推進器最後放置中和燈絲，透過加熱燈絲產生熱電子，當離子離開推進器時，會從中和燈絲(Neutralizer)帶走等量的電子。

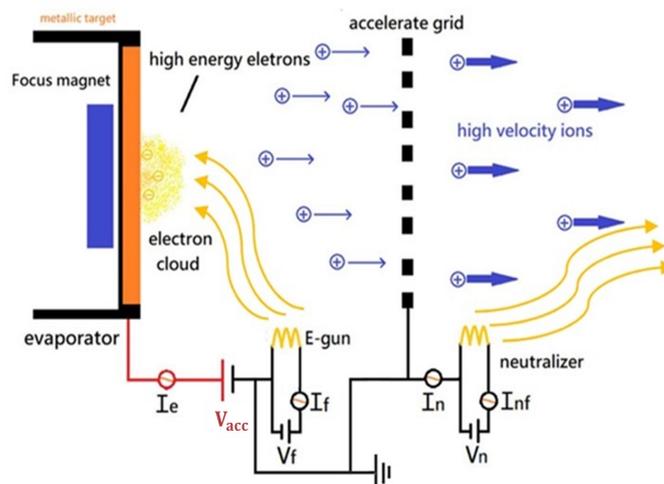


Figure 1: MIT-MEB概念示意圖[1]

1.2 推進器的相關參數

為了判斷推進器的效能，我們必須先知道幾項相關的參數，例如：蒸發率、游離率、推力和比衝。

1.2.1 蒸發率

我們藉由量測實驗前後金屬靶材的質量變化除以實驗的運作時間，計算單位時間產生金屬蒸氣的質量，如公式1.

$$\dot{m}_{\text{Metal}} = \frac{m_i - m_f}{\Delta t} \quad (1)$$

\dot{m}_{Metal} 為蒸發率， m_i 為實驗前的靶材質量， m_f 為實驗後的靶材質量， Δt 為實驗的運作時間。

1.2.2 游離率

圖2.為MITMEB的等效電路圖， R_f 和 R_n 分別為電子槍(E-gun)與中和器(Neutralizer)的燈絲電阻，電子槍的電流電壓 I_f 與 V_f ，中和器的電流電壓則是 I_{nf} 與 V_{nf} ， V_{acc} 為高電壓，正電壓在靶材(Target)而負電壓在電子槍，電子從負電壓往正電壓的方向前進產生的電子流為 I_e ，所以假設靶材與電子槍之間有個負載 R_{V1} ，而加速離開的離子會產生電流 I_{ion} ，這些離子會從中和器帶走相對應量的電子，產生與 I_{ion} 相等的中和電流 I_n 回到迴路中，所以假設中和器與靶材之間有個負載 R_{V2} 。我們可以藉由量測 I_n 得到排出的離子電流。將 I_n 除以電荷，可記算出單位時間內有多少顆離子被加速排出，而將 \dot{m}_{Metal} 除以 m_{atom} 可記算出單位時間內平均有多少顆金屬原子在蒸汽中，如公式2.所示，能得知在這些金屬原子中有多少的比例會被游離。

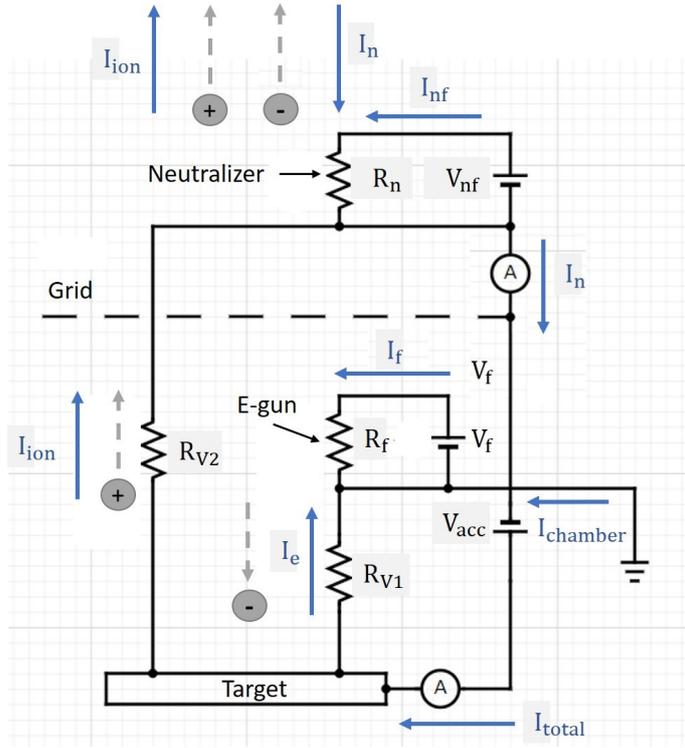


Figure 2: MIT-MEB的等效電路圖

$$\beta = \frac{I_n}{q} \times \left(\frac{\dot{m}_{\text{Metal}}}{m_{\text{atom}}} \right)^{-1} \quad (2)$$

β 為游離率， I_n 為中和電流等同與離子流 I_{ion} ， q 為電荷電量， \dot{m}_{Metal} 為蒸發率， m_{atom} 為單顆金屬原子的重量。

1.2.3 推力

我們可以根據排出的蒸氣和離子的能量來估算推力，如公式3.

$$F_{\text{total}} = F_{\text{vapor}} + F_{\text{ion}} = \dot{m}_{\text{Metal}} (1 - \beta) \sqrt{\frac{2k_B T_{\text{vapor}}}{m_{\text{ion}}}} + \dot{m}_{\text{Metal}} \beta \sqrt{\frac{2qV_{\text{acc}}}{m_{\text{ion}}}} \quad (3)$$

F_{total} 為推進器產生的總推力，推力又可以分成蒸氣產生的 F_{vapor} 與離子產生的 F_{ion} 。

$\dot{m}_{\text{Metal}}(1 - \beta)$ 為單位時間排出的未被游離的蒸氣質量，排出的速度與溫度 T_{vapor} 有關， $\sqrt{\frac{2k_B T_{\text{vapor}}}{m_{\text{ion}}}}$ 是蒸汽排出的熱速度。

$\dot{m}_{\text{Metal}}\beta$ 為單位時間排出的離子質量，排出的速度與 V_{acc} 有關， $\sqrt{\frac{2qV_{\text{acc}}}{m_{\text{ion}}}}$ 是離子被電壓加速後排出的速度。

1.2.4 比衝(I_{sp})

比衝(I_{sp})是一種用來描述推進器中推進劑使用效率的參數，表示一公斤的推進劑可持續產生一牛頓推力多久的時間，定義如公式4。若比衝越高代表轉換效率越好，意即單位質量產生的動量變化也越大。

$$I_{sp} = \frac{F_{total}}{\dot{m}_{Metal}g} = \frac{1}{g} \left[(1 - \beta) \sqrt{\frac{2k_B T_{vapor}}{m_{ion}}} + \beta \sqrt{\frac{2qV_{acc}}{m_{ion}}} \right] \quad (4)$$

因為 qV_{acc} 可產生的能量遠大於 $k_B T_{vapor}$ ，故 $\beta \sqrt{\frac{2qV_{acc}}{m_{ion}}}$ 這項尤為重要。若我們想取得越高 I_{sp} ，必須擁有越大的 β 。

1.3 MIT-MEB的原型機

我們依照1.1.小節設計出的推進器原型，整個推進器的大小大約 $56 \times 46 \times 76 \text{ mm}^3$ 。圖3(a)是推進器原型機的剖面概念圖，在半徑15 mm的金屬靶材下方3 mm堆疊放置了3個，半徑與高均10 mm的強力磁鐵而距靶材3 mm的上方是用來加熱游離的E-gun，再往上7 mm是加速電網，電網上方7 mm則是Neutealizer，再利用螺帽將M2 \times 50 mm的螺絲與靶材連接，方便之後電源供應。圖3(b)是MIT-MEB的原型機設計模型，外殼使用的是耐高溫的陶瓷，E-gun與Neutealizer都是利用焊上鱘魚夾的M3 \times 30 mm的螺絲夾外徑0.1 mm的鎢絲製作而成，使用M4 \times 10 mm的螺絲將Neutealizer、電網、E-gun與裝有強力磁鐵和靶材的四組配件組合起來。推進器所使用的螺絲螺帽都是使用不銹鋼製的，避免被磁化而影響實驗。由於實驗需在真空環境中進行，我們將須由真空腔外供電的部分，E-gun與Neutealizer的螺絲上以外負內正的方式加上 $\phi 21$ 原形電源接頭的公頭，以便之後可接上裝有外負內正的 $\phi 21$ 母頭的真空電極，而和靶材相接的M2螺絲則是利用BNC接頭與真空電極相接。圖3(c)是石英作為外殼材料製作出來的實際原型機。

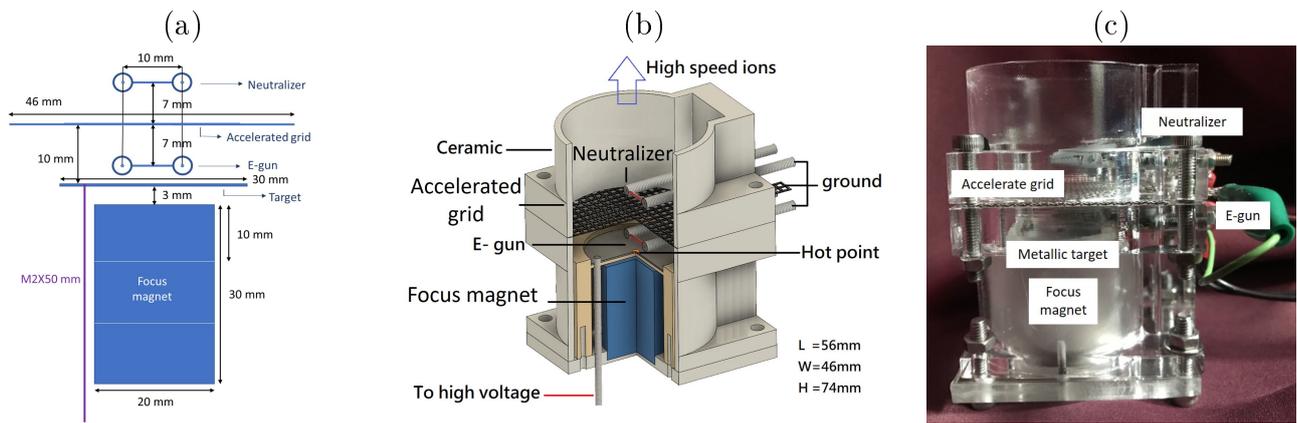


Figure 3: (a) MIT-MEB原型機的剖面概念圖(b)MIT-MEB的原型機設計模型[1] (c) MIT-MEB的實際原型機

2 真空系統

因為Neutealizer與E-gun使用的鎢絲在大氣中使用會氧化燒毀，同時為了避免過程中被加速的電子與離子和其他氣體分子碰撞而流失能量，必須使平均自由徑大於實驗環境的大小，加上為了驗證未來在太空環境中能否正常運作，推進器的實驗需要在真空中進行。所謂的平均自由徑是我們用來描述粒子間碰撞狀況的參數，指的是粒子與其他粒子之間連續兩次碰種的平均距離，若平均自由徑越大，表示無任何外加作用時粒子之間越不容易互相碰撞。為確保粒子間沒有碰撞，平均自由徑須大於真空腔的大小。在此實驗中使用的是KF50的擴散泵(diffusion pump)，此種幫浦最多能抽到 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ torr，在這壓力下的平均自由徑大約是5 ~ 50 m，所以我們需要大小遠小於這個尺度與相對應規格的真空系統。

2.1 真空系統的設計

圖4.是真空系統的設計與配置。我們選擇使用內徑 200 mm、高 250 mm、厚度 5 mm 的石英管當作主要腔體，這個大小遠小於 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ torr時的平均自由徑。

由於上下兩個不銹鋼蓋板是為了用來密封腔體，它們可開洞的範圍必須在半徑10 mm 的圓之內，之後再在洞口焊上KF系列的法郎，好銜接盲板、真空計、幫浦焊真空電極等真空配件，但空間限制加上固定用的卡箝具一定體積，蓋板開洞的數量與位置必須事先設計，如Fig5.與Fig6.。

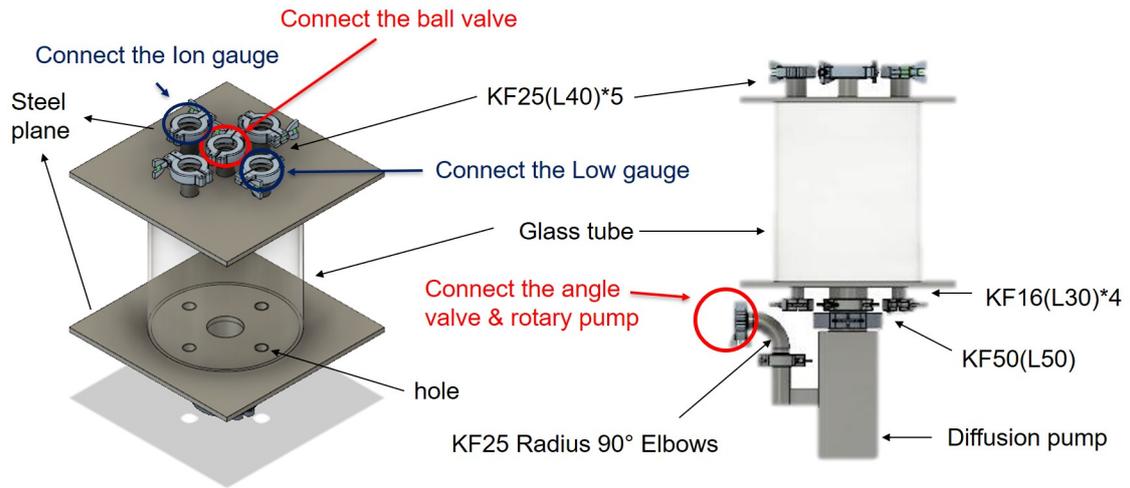


Figure 4: 真空系統的設計與配置

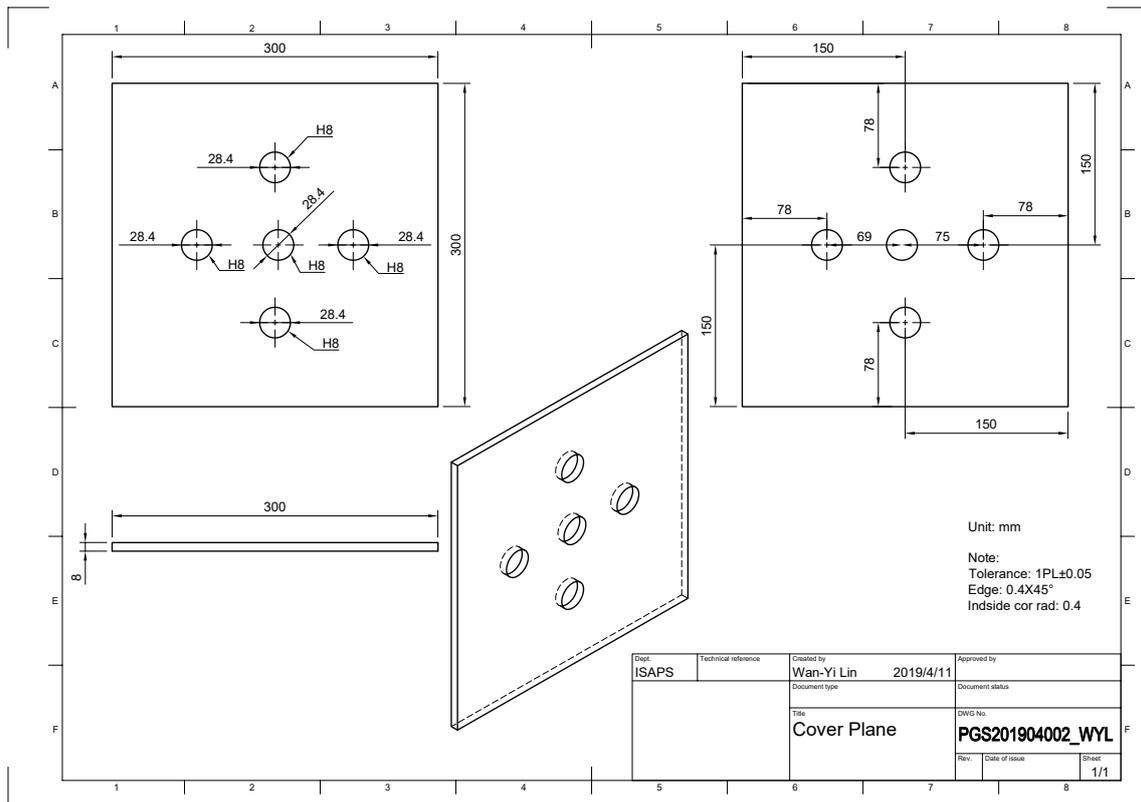


Figure 5: 真空腔的上蓋板

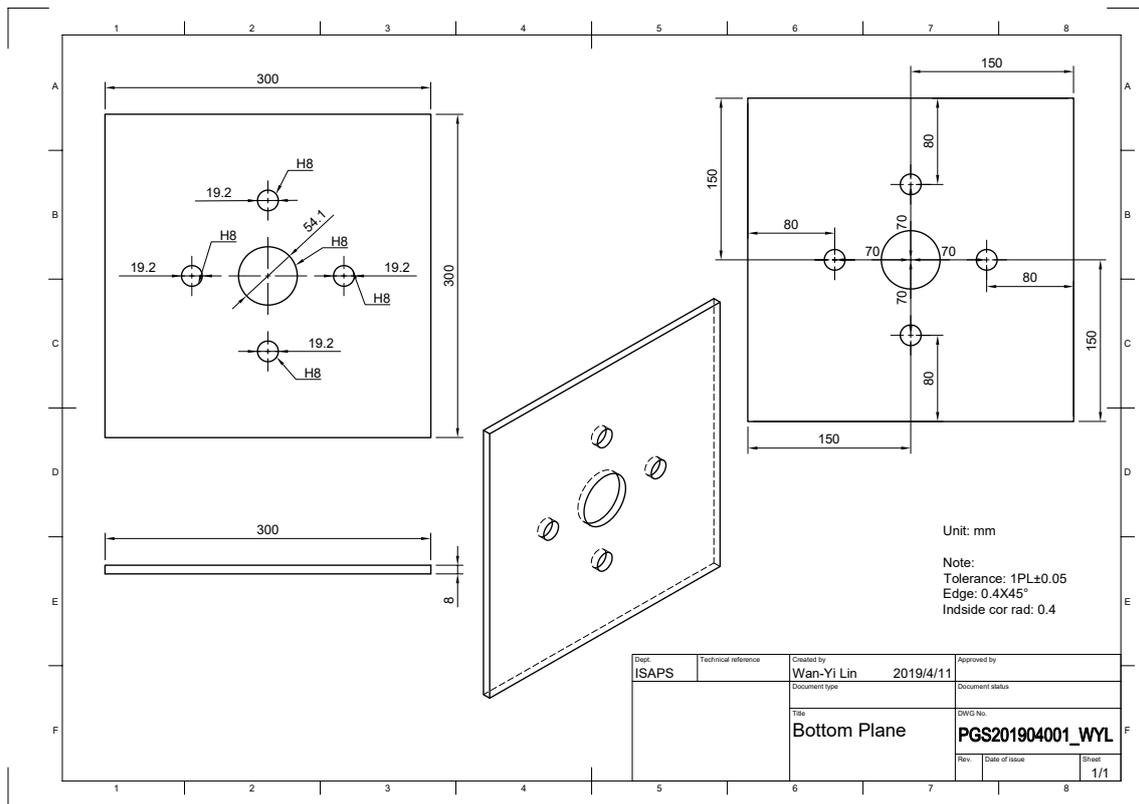


Figure 6: 真空腔的下蓋板

為了達到空間的最佳利用與操作方便，上蓋板使用的是五個KF25的法郎，絕大部分的配件會銜接在上蓋板，而下蓋板會有一個KF50的法郎用來接擴散泵，安插四個KF16的法郎，利用高度落差使它們有足夠的空間安插卡箱，而真空腔與兩個蓋板之間會有3 mm 厚的橡膠墊圈，避免兩者直接接觸破壞真空腔。為了方便擴散泵連接粗抽泵(Rotary pump)，我們加裝一個KF25的90°彎管(KF25 Radius 90° Elbows)。

根據Fig7.(a)的氣流路徑，避免停止運作時油氣倒抽，我們在粗抽泵與擴散泵之間有一個角閥(Angle valve)，而上蓋板上的球閥(Ball valve(1))是用來將真空腔破真空的。

因為擴散泵在為冷卻時無法破真空，為了節省時間，我們在真空腔與擴散泵之間加了一個擋板閥將兩者切開，可以先將真空腔破真空，以便在等待擴散泵冷卻的時間中可以先處理真空腔內的實驗相關物件，並在擴散泵與粗抽泵之間放一個球閥(Ball valve(2))來破此段真空。

因為擴散泵會具有高溫，且希望擴散泵發揮它的最大效用，我們利用三種尺寸的角鋼組合成整個系統的支架，如圖7.(b)。

真空系統所使用到的配件與其規格整理在表1。

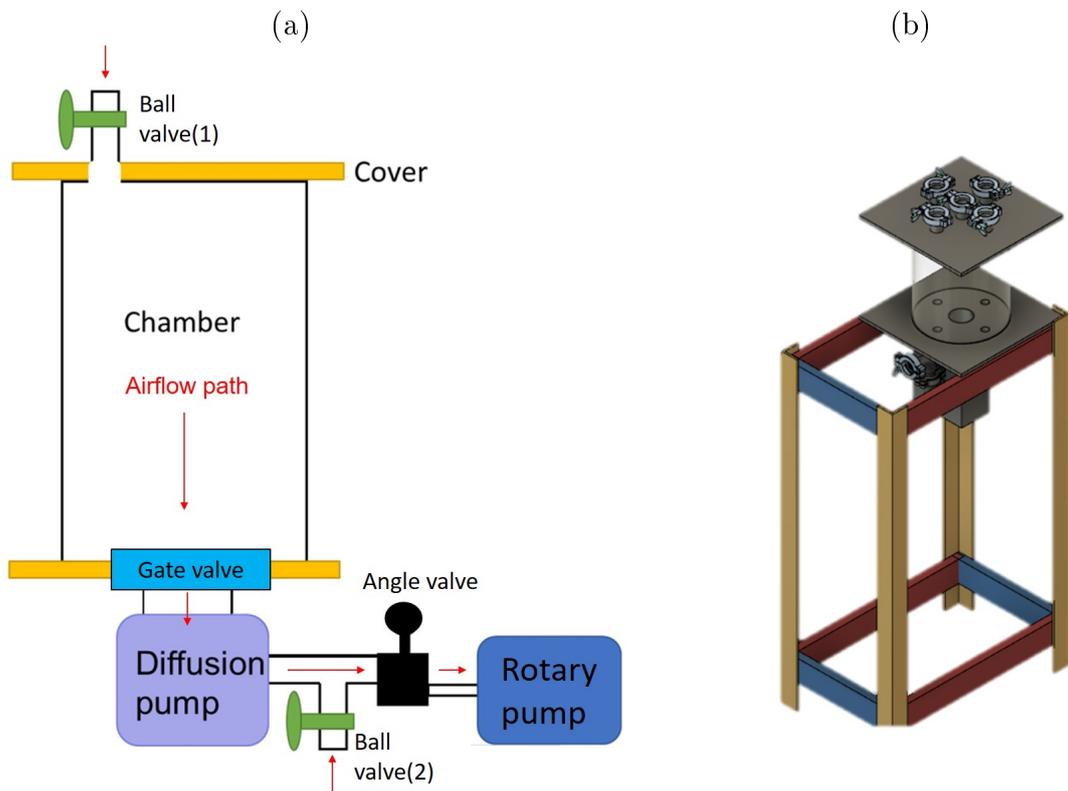


Figure 7: (a)真空系統的氣流路徑(b)真空系統的支架

Table 1: 真空系統配件表

Item	Number	Size(unit: mm)	Specification
Chamber(Glass tube)	1	$\phi : 200/\delta : 5/L : 250$	
Steel plane	2	$300 \times 300 \times 8$	
KF50 Flange	1	L:50	
KF25 Flange	5	L:40	
KF16 Flange	4	L:30	
KF25 Radius 90° Elbows	1		
KF 25-T	1		
Diffusion pump	1		KF 50 (https://is.gd/HGEoVG)
Rotary pump	1		ULVAC GLD-136D
Angle valve	1		KF25
Flapper valve	1		KF50
Ball valve	2		KF25
Ion gauge	1		DUNIWAY T-KF25 / ZJ-27
Low vacuum gauge	1		CVG101 Worker Bee / ZJ-52T
Screw-free Angle(yellow)	4	L:900	
Screw-free Angle(red)	4	L:500	
Screw-free Angle(blue)	4	L:300	

2.2 真空系統的操作流程

為了避免操作不當破壞真空系統與其配備，我們為抽真空與破真空設計了操作流程。

2.2.1 抽真空 Pumping down

1. 確認粗抽閥(角閥)與閘閥開啓。

Open the angle valve and the gate valve.

2. 球閥(1)和球閥(2)關閉。

Close the ball valve(1) and the ball valve(2) .

3. 開啓粗抽泵。

Turn on the rotary pump.

4. 確認低真空計低於 10^{-1} torr (10 Pa)。

Check the low vacuum gauge if the pressure in the chamber is less than 10^{-1} torr (10 Pa).

5. 打開擴散泵。

Turn on the diffusion pump.

6. 確認低真空計低於 5.0×10^{-2} torr (6.7 Pa)或擴散泵已開啓超過一小時。

Check the low vacuum gauge if the pressure in the chamber is less than 5.0×10^{-2} torr (6.7 Pa) or the diffusion pump has been turned on for over one hour.

7. 可開啓高真空計(Ion gauge)。

Turn on the ion gauge.

注意：氣壓大於 5.0×10^{-2} torr (6.7 Pa)不可開啓高真空計，且不使用高真空計時記得關閉避免燒壞。

Note: The ion gauge can't be turned on when the pressure in the chamber is higher than 5.0×10^{-2} torr (6.7 Pa) or the diffusion pump hasn't been turned on for over one hour, and should be turned off if it is not used.

8. 確認高真空計低於 4.5×10^{-5} torr (6.0×10^{-3} Pa)。

Check the ion gauge if the pressure in the chamber is less than 4.5×10^{-5} torr (6.0×10^{-3} Pa).

9. 可開始做實驗。

10. We can start doing the experiment.

2.2.2 破真空 Vacuum venting

1. 關掉高真空計。

Turn off the ion gauge.

注意：高真空計必須關閉以免燒壞。

Note: The ion gauge has to be turned off if it will be damaged.

2. 關掉擴散泵。

Turn off the diffusion pump.

3. 關閉閘閥。

Close the gate valve.

4. 打開球閥(1)將真空腔破真空。

Open the ball valve (1) to vent the chamber.

5. 等待擴散泵的溫度冷卻至 35°C 以下。

Wait until the diffusion pump cools down to less than 35°C.

注意：擴散泵未冷卻前不可破真空。

Note: Do not vent the diffusion pump before it cools down.

6. 關閉角閥。

Close the angle valve.

7. 關閉粗抽泵。

Turn off the rotary pump.

8. 打開球閥(2)破擴散泵的真空。

Open the ball valve (2) to vent the diffusion pump .

3 擴散泵

從圖8(a)是擴散泵的主要結構，底部是一個具有加熱棒(heater)的油槽(oil tank)，而上方是冷卻用的風扇(fan)，在中間有個KF25的接口可以連接粗抽泵將氣體分子抽走。擴散泵的運作原理如圖8(b)所示，藉由加熱棒加熱汽化油槽中的擴散油，這些油氣形成分子流，高速上升後從噴嘴(Nozzle)向下噴出，當低密度的氣體分子擴散進入幫浦的腔體內時，會被迫進入

分子流，一起被往下帶，分子流會遇見被風扇冷卻的幫浦腔壁時會凝結成油滴回到油槽，因此使用時常可以聽見油滴低落的聲音，而這些氣體分子被擊落則會被粗抽泵抽走，使真空腔可以達到高真空狀態，

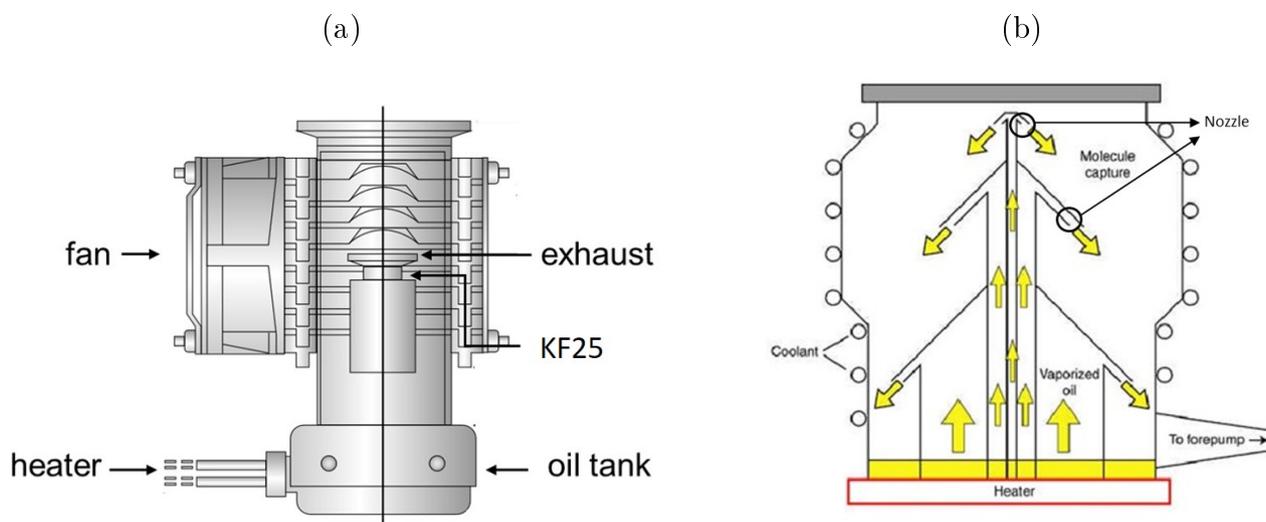


Figure 8: (a)擴散泵 (b)擴散泵原理示意圖[2]

3.1 真空測試

擴散泵理論上可以抽到 10^{-6} torr(大約 10^{-4} Pa)，但我們遲遲無法達到這個真空度，所以我們針對使用的油量、加熱棒效能控制，以及冷卻系統這些條件做測試與調整。

3.1.1 油量測試

我們先使用不同容量的油來做測試，將與測試所得的最低氣製成表2。

Table 2: 使用油量與最低氣壓

油量(ml)	最低氣壓(torr)
30	1.0×10^{-3}
40	1.6×10^{-3}
50	1.1×10^{-3}
60	1.8×10^{-3}
80	9.5×10^{-2}

由表2.我們可知道30 ml和50 ml的擴散油效果最好，但為了避免油量太少而讓擴散泵容易燒乾，我們選擇50 ml 的油量再實驗三次確認這條條件的可靠度。

表3.中的第三次實驗拿掉了真空腔，只單獨測試擴散泵本身的效能，但仍未達到它該有的真空度。

Table 3: 50 ml 的擴散油三次測試與其最低氣壓

編號	最低氣壓(torr)
1	1.0×10^{-3}
2	1.0×10^{-3}
3	5.8×10^{-4}

3.1.2 加熱棒電壓控制

因為僅是油量的控制無法有效的達到高真空，所以我們決定藉由加熱棒的電壓改變加熱速率來改善。

測試方法是將加熱棒接在圖9(a)中的變壓器上，用160 V以上的電壓抽一段時間後，每調整一次電壓後都等待至少1小時，然後紀錄當時12組的氣壓值取平均。

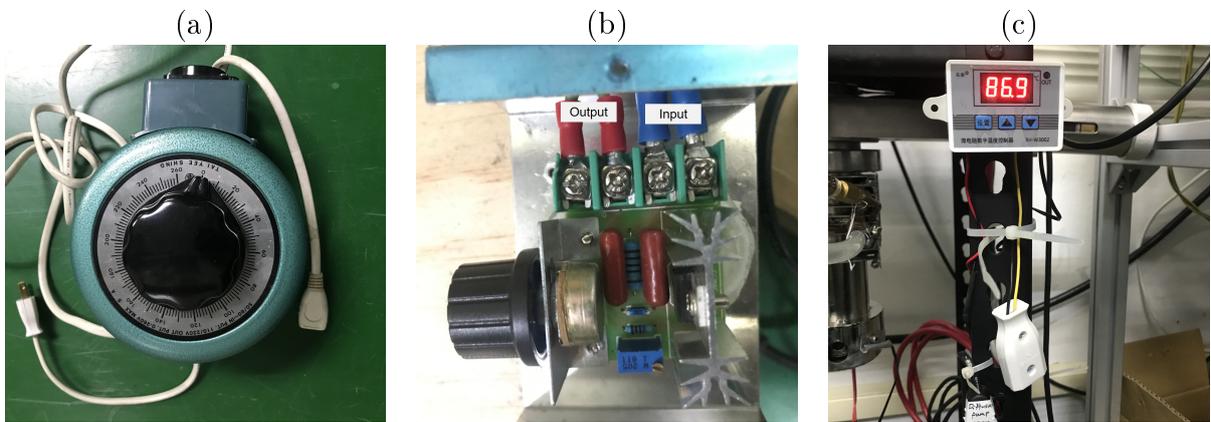


Figure 9: (a)變壓器 (b)調燈器 (c)溫控器

圖10是加熱棒電壓與其對應平均氣壓，電壓為175~185 V 時能得到較低的氣壓，我們選用185 V作為電壓的選擇，因為電壓高一點可以加快加熱速度，減少抽真空所需的時間。

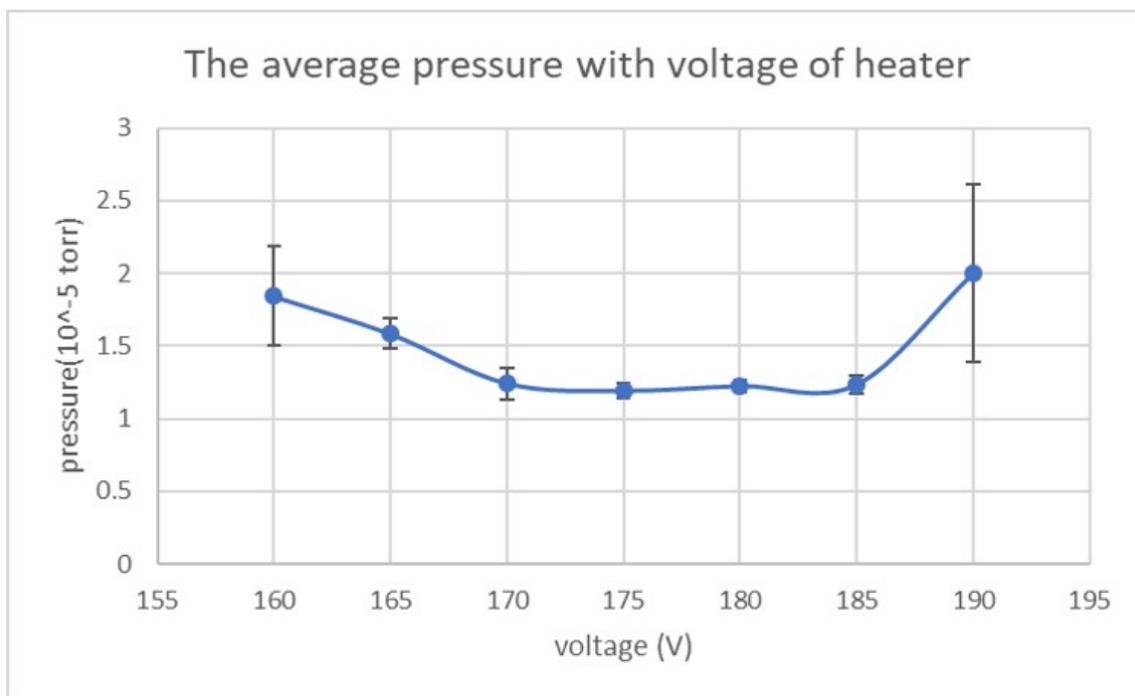


Figure 10: 加熱棒電壓與其對應平均氣壓

由於變壓器太占空間，且使用上必須與實驗室其他人輪流使用較為麻煩，我們改用圖9(b)的調燈器來控制，但因為變壓器刻度的值與實際輸出地值有差異，在185 V時三用電表量到的是198 V，所以我們讓調燈器輸出地值為198 V。

3.1.3 溫度控制

圖9(C)是溫度控制器，利用供電與斷電將加熱的物品控制在一定的溫度區間中。我們將溫度感應固定在擴散泵的油箱(oil tank) 外側，利用熱傳導的方式去大約知道擴散油的加熱狀況，但熱傳導的速度太慢，導致溫度判斷不夠及時，供電與斷電的時機不對造成擴散油加熱不穩定，影響了擴散泵的效能，而無法使用此種方法控制擴散泵。

我們並未將溫度感測拆除，仍可利用它稍微判斷擴散泵的加熱與冷卻狀況。

3.2 冷卻系統

由於擴散泵是利用冷卻的油滴撞擊氣體分子來抽真空，若溫度差越大，它的效能則越好。最開始我們是在圖8(a)風扇(fan)的前方加裝另一個同樣空氣流向的風扇，利用一推一拉的方式增加冷卻風力，如圖11。

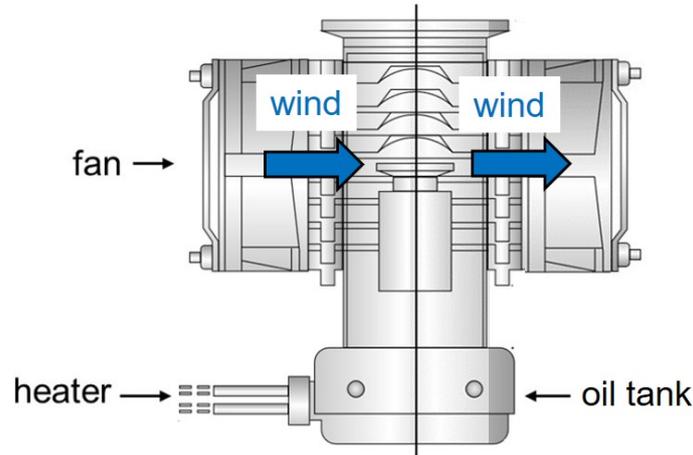


Figure 11: 擴散泵加裝風扇示意圖

為了使溫差更大，我們後來使用了水冷系統，水冷設置如圖12，冷卻擴散泵後的熱水會經過冷水排被風扇冷卻，並藉由抽水機將冷卻水送到擴散泵，來達到水冷系統的循環。

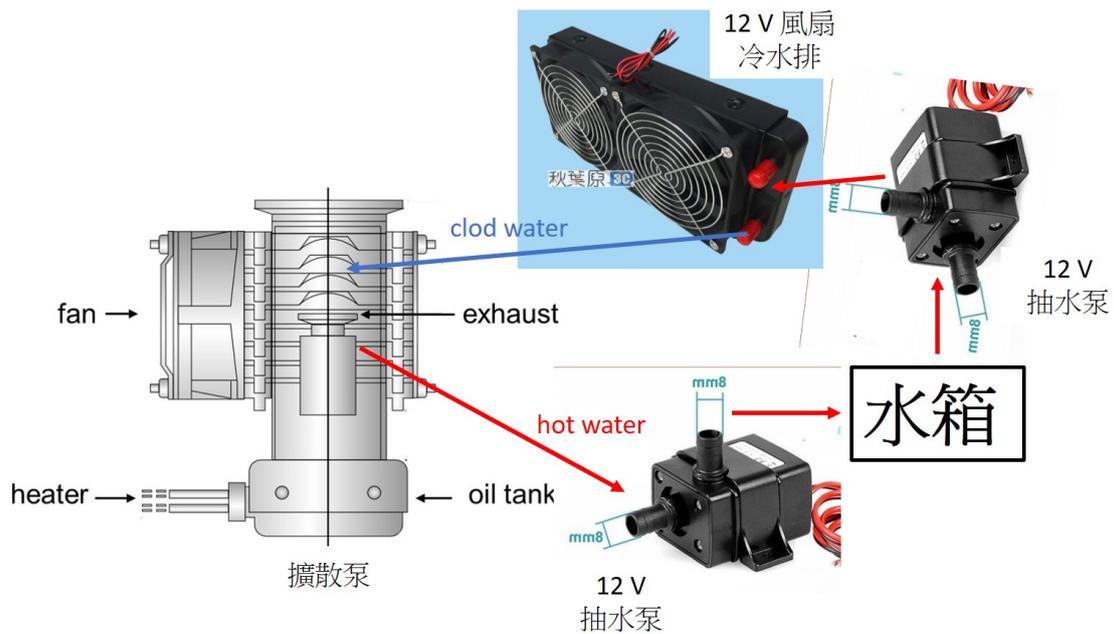


Figure 12: 水冷設置示意圖

圖13是水冷系統的實際圖，兩個抽水機從水箱抽水送進水冷排冷卻，再從水管進入安裝在擴散泵上的銅管，原因是金屬導熱比較快，冷卻速率較高，為了增加冷卻效率所以使用銅管來接觸擴散泵，並在隙縫中塞入鋁箔或塗上導熱膏增加接觸面積，將熱量帶走的水會回到水箱中在繼續被利用。

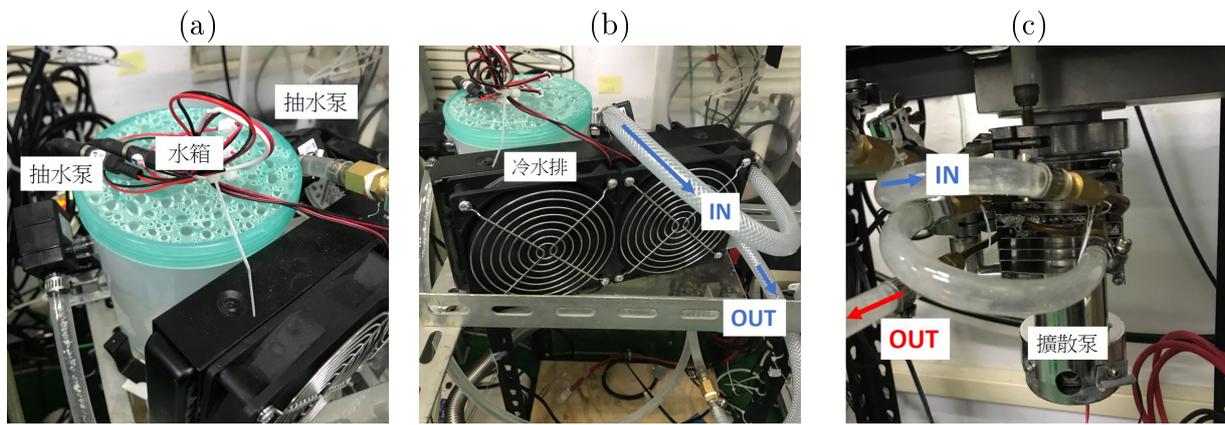


Figure 13: (a)水箱與抽水閥 (b)冷水排 (c)擴散泵、銅管與水管

4 實驗

雖然擴散泵最終只能抽到 3×10^{-5} torr，但它的平均自由徑已遠大於我們的真空腔，故在此真空度便可開始進行我們的實驗。

4.1 實驗架設

在進行實驗前，必須依照圖1來架設儀器。我們需要供應E-gun和Neutralizer的燈絲發光用的電源供應器，以及用來給予高壓的高壓電源供應器，還有量測離子流大小的安培計(三用電表)，如圖14所示。

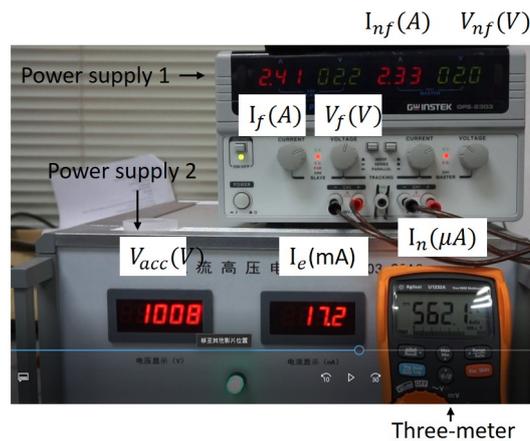


Figure 14: 實驗儀器

為了方便將真空腔外的儀器和真空腔內的推進器做連接，我們將它們編號，如圖15。

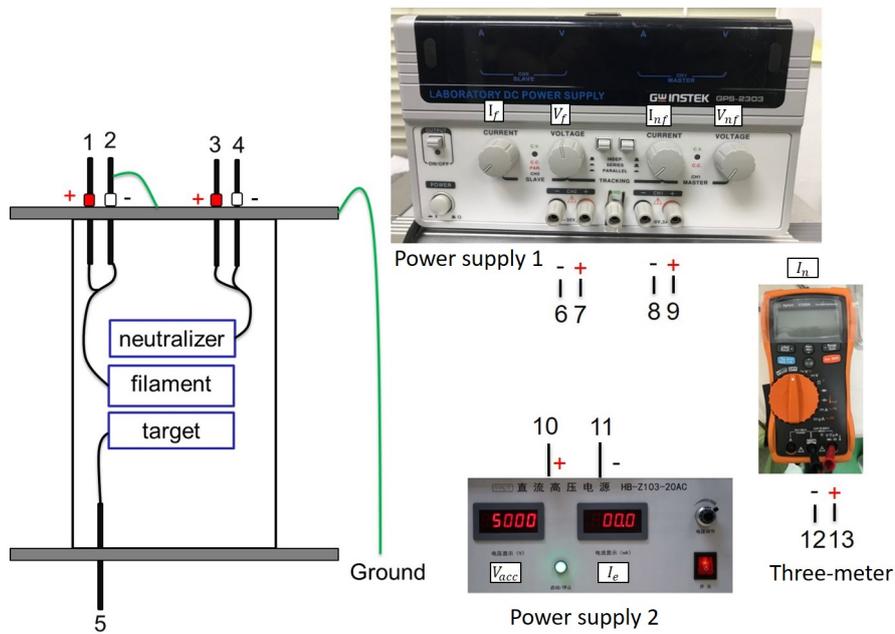


Figure 15: 儀器連接示意圖與編號

推進器上的E-gun與neutralize電極是利用 $\phi 21$ 的公母頭與真空電極連接，而target是利用BNC接頭與真空電極連接，方便我們從真空腔外藉由真空電極送電。由於必須透過真空電極來連接真空腔內外，我們以真空電極當主要位置，對應其需要連接的的編號製成表4。因為這裡的加速電網(accelerate grid)和E-gun的負極一樣接地，所以已經事先將電網與E-gun的負極在MIT-MEB內部相接，故未出現在線路的列表中。

Table 4: 實驗接線簡化表

項目	編號	需連接編號
filament +	1	7
filament -	2	6, 11, 12, Ground
neutralizer +	3	9
neutralizer -	4	8, 13
target	5	10

4.2 實驗操作

參考圖14.

1. 將沒有放磁鐵與靶材的推進器放入真空腔並接上真空電極。
2. 抽至 4.5×10^{-5} torr (6.0×10^{-3} Pa)。
3. 烘烤推進器。

- (a) 將E-gun與neutralize接上電源供應器1(Power supply 1)。
 - 備註:參照圖15，將1和7、2和6、3和9、4和8用雙頭鱷魚夾線連接。
 - (b) 打開電源供應器1，並開啓output。
 - (c) 將 V_f 與 V_{nf} 轉到3 V以上。
 - (d) 再將 I_f 與 I_{nf} 轉至2 A使燈絲發光加熱烘烤推進器。
 - 備註:因爲使用的是電流控制(cc)，電壓 V_f 與 V_{nf} 給的不夠會造成無法供應足夠的 I_f 與 I_{nf}
 - (e) 觀察氣壓計。
 - (f) 當氣壓上升後開始下降或烘烤兩個小時後可排除附著的水氣。
4. 關閉E-gun與neutralize。
 5. 破真空取出推進器，並馬上測量推進器中放置靶材的平台與靶材的重量。
 - 備註:因爲實驗過程受熱融化卻未形成蒸氣的鋅會附著在放置靶材的平台上，故一起測量可取得更準確的蒸發率。
 6. 將裝有靶材與磁鐵的推進器放入真空腔內抽真空至大約 4.5×10^{-5} torr (6.0×10^{-3} Pa)。
 7. 再次烘烤推進器排除拆裝推進器過程中附著的些微水氣。
 8. 將所有真空電極與儀器依照圖15與表4做連接。
 9. 打開高壓的電源供應器2(Power supply 1)，調整到此次實驗所需電壓 V_{acc} 。
 10. 打開E-gun使用的電源供應器，緩慢調整 I_f 並觀察 I_e ，直到 I_e 爲目標電流值。
 - 備註：由於燈絲能承受的電流有限， I_f 不可超過3 A。
 11. 給予neutralizer電流 I_{nf} 電壓 V_{nf} (目前 I_{nf} 使用 2.33 A)。
 12. 利用相機記錄所有數值，包含氣壓變化與實驗時間。
 - 備註:實驗時間依照 V_{acc} 做調整，若此次易使靶材打穿，縮短實驗實驗時間，如五分鐘，若此次實驗不易使靶材質量產生變化，則拉長實驗時間，如一小時。
 13. 破真空後取出推進器測量推進器中放置靶材的平台與靶材的重量靶材實驗後的質量。

14. 將相機記錄到的數據用相同的時間間格擷取出來輸入Excel。

備註:時間格可依實驗時間的長短做調整,短時間,如五分鐘,可每10秒記錄一次,若為長時間,如一小時,可每一分鐘記錄一次。

15. 利用取得的數據根據公式(1)和(2)計算出蒸發率和游離率。

4.3 數據重現

為了確認整個系統與流程的正確性,我們必須重現學論文中, V_{acc} 為1 kV實驗平均蒸發率為 $(1.8 \pm 0.3) \times 10^{-5}$ g/s與平均最高游離率為 1.0 ± 0.3 % 的結果。

根據表5的結果,我們可以知道這7組平均的蒸發率(\dot{m})是 $(2.4 \pm 0.2) \times 10^{-4}$ g/s,大於以往的數據 $(1.8 \pm 0.3) \times 10^{-5}$ g/s十倍,但平均游離率(β_{avg}) $(1.1 \pm 1.8) \times 10^{-2}$ %與平均最高游離率(β_{max}) $(4.5 \pm 3.8) \times 10^{-2}$ %卻小於以往的 1.0 ± 0.3 %。

因為每次實驗結束必須使用鹽酸與清水清理被金屬蒸氣弄髒的推進器,但由於陶瓷吸水,這些水分除了造成實驗前後的質量誤差外,也會在實驗過程中被燈絲的熱影響從附著的陶瓷中脫離,一方面可能和電子與離子產生碰撞造成能量損失影響加速,另一面這些大分子也一起轟擊靶材產生過多的金屬蒸氣,造成系統不穩定容易Arcing,使數據無法良好重現。

Table 5: 未經烘烤的7組1 kV實驗

Number	Date	\dot{m} (g/s)	β_{avg} (%)	β_{max} (%)
1	2019/09/05	1.7×10^{-4}	$(2.2 \pm 2.2) \times 10^{-2}$	7.5×10^{-2}
2	2019/09/06	2.0×10^{-4}	$(1.9 \pm 1.9) \times 10^{-4}$	1.4×10^{-2}
3	2019/09/11	1.0×10^{-4}	$(6.7 \pm 73.0) \times 10^{-4}$	3.3×10^{-2}
4	2019/09/19	1.4×10^{-4}	$(8.9 \pm 29.0) \times 10^{-4}$	6.0×10^{-3}
5	2019/10/18	2.2×10^{-4}	$(8.4 \pm 51.0) \times 10^{-4}$	2.7×10^{-2}
6	2019/10/29	2.6×10^{-4}	$(6.0 \pm 10.0) \times 10^{-3}$	4.9×10^{-2}
7	2019/11/01	2.7×10^{-4}	$(4.8 \pm 3.1) \times 10^{-2}$	1.1×10^{-1}
	AVG	$(2.0 \pm 0.6) \times 10^{-4}$	$(1.1 \pm 1.8) \times 10^{-2}$	$(4.5 \pm 3.8) \times 10^{-2}$

而表6是事先烘烤推進排除水氣後再進行的3組1 kV實驗,結果顯示平均蒸發率(\dot{m})是 $(4.8 \pm 6.6) \times 10^{-5}$ g/s,對比未烘烤前的1 kV實驗的平均蒸發率 $(2.4 \pm 0.2) \times 10^{-4}$ g/s,是更接近原始的 $(1.8 \pm 0.3) \times 10^{-5}$ g/s,但事實上3組實驗的蒸發率的標準差非常大,比未烘烤前的實驗更加不穩定。不過,事先烘烤過的1 kV實驗的均游離率(β_{avg}) $(6.0 \pm 5.4) \times 10^{-1}$ %與最高平均游離率(β_{max}) (1.4 ± 1.1) %是較為接近原始的最高平均游離率為 1.0 ± 0.3 %,表示經過事先烘烤排除水氣影響的推進器游離效果更佳也更符合預設使用情況。因此,之後的實驗均會事先烘烤過推進器排除水氣,再測量靶材質量,然後進行實驗。

Table 6: 實驗前經烘烤過的3組1 kV實驗

Number	Date	\dot{m} (g/s)	β_{avg} (%)	β_{max} (%)
1	2019/12/30	2.7×10^{-6}	$(1.2 \pm 0.7) \times 10^0$	2.7×10^0
2	2020/01/02	1.2×10^{-4}	$(2.1 \pm 2.1) \times 10^{-1}$	7.5×10^{-1}
3	2020/01/06	1.7×10^{-5}	$(3.8 \pm 1.9) \times 10^{-1}$	7.7×10^{-1}
	AVG	$(4.8 \pm 6.6) \times 10^{-5}$	$(6.0 \pm 5.4) \times 10^{-1}$	$(1.4 \pm 1.1) \times 10^0$

4.4 降低加速電壓 V_{acc}

根據圖16中可以知道，鋅原子可被電子游離的碰撞截面積在60 eV時最大，而之前的實驗 V_{acc} 控制在1 kV與5 kV，遠大60 eV，從圖中可知碰撞截面積會是遠小於60 eV時的碰撞截面積，而碰撞截面積太小是我們認為游離率無法提升的原因之一，所以我們期望降低 V_{acc} 後可看到更佳的游離率。

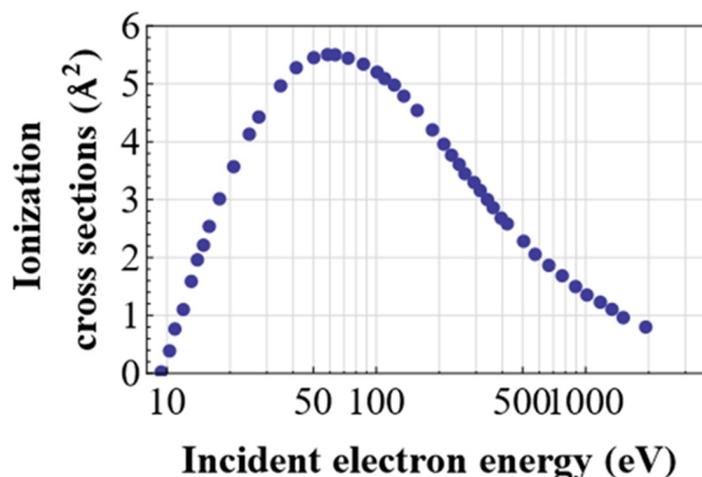


Figure 16: The Cross Section of Electron Impact Ionization[3]

我們首先選擇250 V作為最低的 V_{acc} ，然後逐步增加至1 kV，預計在這範圍內可找到最佳的 V_{acc} ，使游離率最佳化。

雖然此範圍電壓依舊大於60 eV，但電子的能量會受到電場磁場影響加減速，而我們並不知道蒸氣被電子游離的實際位置，當給予的電壓太小會造成電場太小，電子與蒸氣相遇的位置可能會因電子加速不夠而使蒸氣無法被游離，也可能使得離子無法獲得足夠的能量加速排出。

表7是3組250 V，但第一組的實驗時間明顯太短，以至於質量差異不易測量，蒸發率其實為不準值，計算出來的游離率也大於其他兩組太多，無法當作參考。

Table 7: 3組250 V實驗

Number	Date	Time(s)	$\Delta m(\text{g})$	$\dot{m}(\text{g/s})$	$I_e(\text{mA})$	$\beta_{\text{avg}}(\%)$	$\beta_{\text{max}}(\%)$
1	2020/01/17	360	1.0×10^{-4}	2.8×10^{-7}	8.5	$(2.7 \pm 2.4) \times 10^0$	3.2×10^1
2	2020/01/20	600	7.0×10^{-4}	1.2×10^{-6}	10.1	$(6.8 \pm 1.4) \times 10^{-1}$	8.3×10^{-1}
3	2020/01/22	1140	3.9×10^{-3}	3.5×10^{-6}	5.8	$(6.1 \pm 1.7) \times 10^{-1}$	8.3×10^{-1}
	AVG		$(1.6 \pm 2.1) \times 10^{-3}$	$(1.6 \pm 1.6) \times 10^{-6}$	8.1 ± 2.2	$(9.3 \pm 15.0) \times 10^0$	$(1.1 \pm 1.8) \times 10^0$

表8是移除差異過大的那組後剩餘的兩組實驗結果，平均蒸發率為 $(2.3 \pm 1.6) \times 10^{-6} \text{g/s}$ ，而平均游離率為 $(6.5 \pm 0.5) \times 10^{-1} \%$ ，平均最高游離率為 $(8.3 \pm 0.0) \times 10^{-1}$ 。

Table 8: 2組250 V實驗

Number	Date	Time(s)	$\Delta m(\text{g})$	$\dot{m}(\text{g/s})$	$I_e(\text{mA})$	$\beta_{\text{avg}}(\%)$	$\beta_{\text{max}}(\%)$
1	2020/01/20	600	7.0×10^{-4}	1.2×10^{-6}	10.1	$(6.8 \pm 1.4) \times 10^{-1}$	8.3×10^{-1}
2	2020/01/22	1140	3.9×10^{-3}	3.5×10^{-6}	5.8	$(6.1 \pm 1.7) \times 10^{-1}$	8.3×10^{-1}
	AVG		$(2.3 \pm 2.3) \times 10^{-3}$	$(2.3 \pm 1.6) \times 10^{-6}$	7.9 ± 3.1	$(6.5 \pm 0.5) \times 10^{-1}$	$(8.3 \pm 0.0) \times 10^{-1}$

我們將 V_{acc} 為250 V的實驗平均數據與1 kV與5 kV的實驗平均數據做比較，如表9。若250 V的實驗想維持和另外兩種電壓一樣15 W的功率必須將電子流(I_e)提升到60 mA，而由於電子流的大小取決於E-gun燈絲的溫度，E-gun的電流(I_f)越大表示溫度越高，溫度越高表示燈絲表面的熱電子越容易被電場拉出，產生的電子流越大，但再提升電子流的過程中， I_f 會達到燈絲可負荷的極限，燈絲會直接燒斷無法使用，所以我們只能使用8 mA的電子流，此時的 I_f 大約在不會燒斷的安全值2.33 A，此時的功率僅有2 W。

在1 kV與5 kV的實驗中，平均蒸發率在降低 V_{acc} 時亦會跟著降低。然而，250 V實驗中的功率與 V_{acc} 同時降低，我們無法確認蒸發率降低的主要原因是較低的功率或是較小的 V_{acc} ，且250 V的平均最高游離率也未如期望的增加，反而還小於1 kV時的平均蒸發率，表示此推進的粒子運作並非如我們思考的簡單，還有更深的物理必須探討。

Table 9: 5 kV、1 kV與250 V比較

$V_{\text{acc}}(\text{V})$	$I_e(\text{mA})$	Power(W)	$\dot{m}(\text{g/s})$	$\beta_{\text{max}}(\%)$
5000	3	15	$(2.2 \pm 0.4) \times 10^{-4}$	$(3.0 \pm 1.0) \times 10^{-2}$
1000	15	15	$(1.8 \pm 0.3) \times 10^{-5}$	$(1.1 \pm 0.3) \times 10^0$
250	8.1 ± 2.2	2.0 ± 0.8	$(9.3 \pm 15.0) \times 10^{-6}$	$(8.3 \pm 0.0) \times 10^{-1}$

References

- [1] Kuo-Yi Chen. Development of metallic ion thruster using magnetron electron-beam bombardment. Master's thesis, National Cheng Kung University, Institute of Space and Plasma Sciences, 2019.
- [2] Diffusion pump working principle(<https://diffusionpumpoil.com/pages/diffusion-pump-working-principle>).
- [3] Rahla Naghma Debdeep Ghoshal Jaspreet Kaur, Dhanoj Gupta and Bobby Antony. Electron impact ionization cross sections of atoms. *Canadian Journal of Physics*, 93(6):617–625, 2015.

附錄

實驗的raw data均放在雲端Thecus中，路徑為

1. Shares\WYL\Data\YYYYMM\YYYYMM-MMDD.csv，YYYY為年份，MM為月份，DD為日期，依實驗日期分類
2. Shares\WYL\Data\OO\YYYYMM-MMDD.csv，OO為電壓值，例如:1 kV、250 V，依電壓分類，包含此電壓的統整資料