

A5. プラズマの基礎実験 (実験時必携帯用ダイジェスト版)

2021. 1. 14

§ 1 目的

本実験は気体放電の物理的機構を学ぶとともに、放電によって生成されたプラズマの基本的な性質を静電プローブ測定により理解することを目的とする。

§ 2 実験原理

2. 1. 概論／解説

地球上においては、理想的な容器中の気体を熱してプラズマを作ることは容易ではない。一般に実験室や工業上でプラズマを得る簡単な方法は、各種の気体放電である。更に、核融合を目的にした高温高密度の高電離プラズマを作る各種の努力が為されている。本実験では、プラズマ生成のために必要となる気体放電において基本となるパッシェンの法則を取り上げる。

実験において重要な問題はプラズマ状態を規定する主な量、例えば荷電粒子の密度、電子の温度(注意1)とそのエネルギー分布等を測定し、最終的にはこれらの輸送を解明することである。静電プローブ(探針)はプラズマ計測の1つの基本的計測手法であり、Langmuir (ラングミュア) と Mott-Smith (モット・スミス) により考案されたので、Langmuir probe (ラングミュア・プローブ) とも呼ばれている。プローブは測定装置としては、簡単であり、局所的な測定が出来る長所を持っている。しかし、直接プラズマ中に挿入して測定するために、プラズマに対して騒乱をもたらすこと、得られたデータを定量的考察する場合、解析が複雑になるという欠点がある。

(注意1) 温度の概念について

熱平衡にある気体は、あらゆる速度の粒子を含んでいて、それらの最もありうるべき速度分布は、Maxwell 分布として知られている。(2. 4. 参照) その分布の幅は温度と呼ばれる定数 T により特徴づけられる。この分布における粒子の平均運動エネルギー E と T の関係は、三次元の場合、

$$E = \frac{3}{2} k_B T$$

で与えられる。(導出省略) ここで、 $E[\text{J}]$, $T[\text{K}]$. k_B はボルツマン常数 ($=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$) である。

プラズマ物理では温度をエネルギーの単位で示すのを通例とする。次元数に関係した混乱をさけるため、温度を示すのに E ではなく、 $k_B T$ 対応したエネルギーを使う、 $k_B T = 1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{J}$ の場合、

$$T = \frac{1.60 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23}} = 11,600 \text{ [K]}$$

を得る。従って変換係数は、11,600 [K/eV] である。

2. 2. パッシェンの法則

低気圧の気体中に2個の平行平板電極において、それらに電圧をかけた場合に起こる放電現象について考える。図1において、陰極面から最初に i_0 の電子電流が流れ出した時、電子は分子との衝突し、電離を繰り返すことにより、指数関数的に増加して陽極面に達する。一つの電子が電界方向に単位長さだけ進む間に行う電離の数(衝突電離係数)を α とすると、電子の数 N の増加は、距離 x に対して、

$$\frac{dN}{dx} = \alpha N \quad (1)$$

と表される。これを解いて電流に直せば、陽極面に達する電子流は、

$$i(d) = i_0 e^{\alpha d} \quad (2)$$

で与えられる。 d は電極間距離である。電子の増加分だけイオンも増加しており、このイオンは陰極面に $i_0(e^{\alpha d} - 1)$ のイオン電流として到達する。

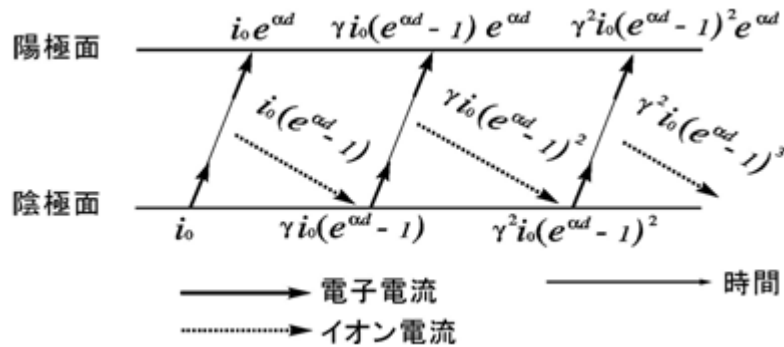


図1 低気圧下の電極間で生ずる気体の電離現象

イオンは気体分子の電離に対しは無力であるが、陰極にあたると電子を出す能力を持つので、この作用によって生ずる電子は再び気体を電離することになる。もともと電子(1次電子)を加速してこれを固体表面に当てると、固体表面から新たな電子(2次電子)が放出される。この現象を電子の2次電子放出という。1次電子をイオンに置き換えてもやはり電子の放出は起こる。これをイオンによる2次電子作用という。(イオンによる2次電子放出量は電子による量の1/100程度であるが、イオンのエネルギーはさほど大きなものを要求しない。)従って、イオンによる2次電子放出率を γ とおくと $\gamma i_0 (e^{\alpha d} - 1)$ の2次電子電流が作り出される。

この2次電子も上で述べたのと同じような衝突電離を繰り返して、陽極面で $\gamma i_0 (e^{\alpha d} - 1) e^{\alpha d}$ の電流となる。これらの過程は等比級数的に繰り返されて、陽極面での電子電流の合計は、

$$i = i_0 e^{\alpha d} + i_0 e^{\alpha d} \gamma (e^{\alpha d} - 1) + i_0 e^{\alpha d} \left\{ \gamma (e^{\alpha d} - 1) \right\}^2 + \dots = \frac{i_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \quad (3)$$

となる。式 (3) で分母が零すなわち、

$$\alpha d = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) = \Phi = \text{const.} \quad (4)$$

の時には自続放電の条件となり放電が開始する。(放電の自続条件を示しているのは、なぜか？(考察))

衝突電離係数 α は、Townsend (タウンゼント) によって経験的に、電界 E 、圧力 p に対して以下のような依存性を持つことが知られている。

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp \left(-\frac{Bp}{E} \right) = A \exp \left(-\frac{Bpd}{V} \right) \quad (5)$$

ここで、 V は電極間電圧、 A, B は定数で気体の種類によって異なる値を持つ。(表 1 参照)

表 1 パッシェンの法則における A, B の値。
(参考文献 [3] p56 より単位系を変えて転載)

<i>Gas</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>E/p</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E/p</i>
	<i>m⁻¹Pa⁻¹</i>	<i>V / (mPa)</i>	<i>V / (mPa)</i>	<i>m⁻¹Pa⁻¹</i>	<i>V / (mPa)^{1/2}</i>	<i>V / (mPa)</i>
He	2.26	25.6	15.0 - 113	3.31	12.1	75.2
Ne	3.01	75.2	75.2 - 301	6.17	14.7	188
Ar	9.02	135	75.2 - 451	22.0	23.1	526
Kr	12.8	180	75.2 - 752	26.8	24.5	677
Xe	19.5	263	150 - 602	49.1	31.3	903
Hg	15.0	278	113 - 451			
H ₂	3.76	97.7	113 - 451			
N ₂	9.02	257	75.2 - 451			
N ₂	6.62	207	20.3 - 150			
Air	11.3	274	75.2 - 602			
CO ₂	15.0	350	376 - 752			
H ₂ O	9.77	218	113 - 752			

従って、式 (4) (5) より、

$$V = \frac{Bpd}{\ln \left\{ \frac{Apd}{\Phi} \right\}} \quad (6)$$

となり。この式は放電開始電圧が圧力と電極間距離との積に依存することを示しており、これをパッシェンの法則という。式 (6) で特徴的なことは、放電開始電圧 V が最小となる (pd) の値が存在し、その値は、気体の種類、電極の材質によって異なることである。(図 2 参照、ただし図中 pd [cm · Torr] = 1.33 × pd [m · Pa] に注意せよ。)

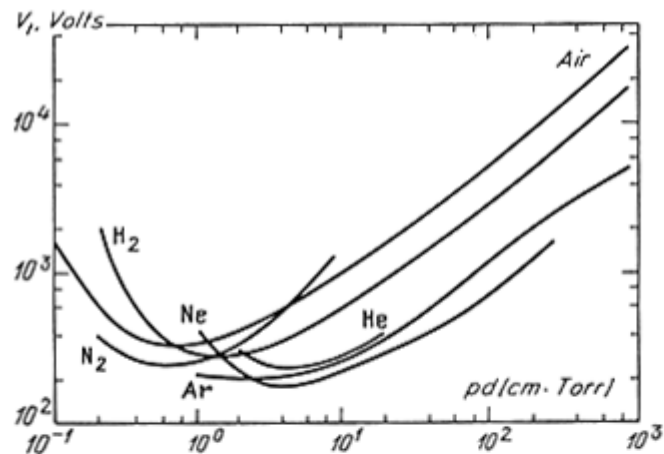


Fig. 7.2. Breakdown potentials in various gases over a wide range of pd values (Paschen curves) on the basis of data given in [7.1, 2]

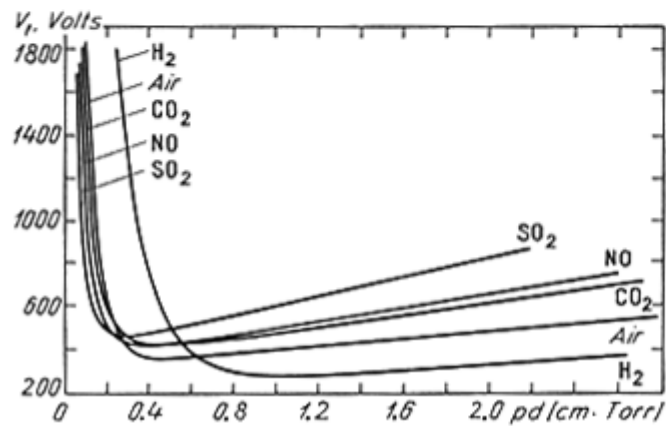


Fig. 7.3. Paschen curves on an enlarged scale [7.3]

図2 パッシェンの曲線. (参考文献 [3] p134 より転載)

2. 3. 直流グロー放電

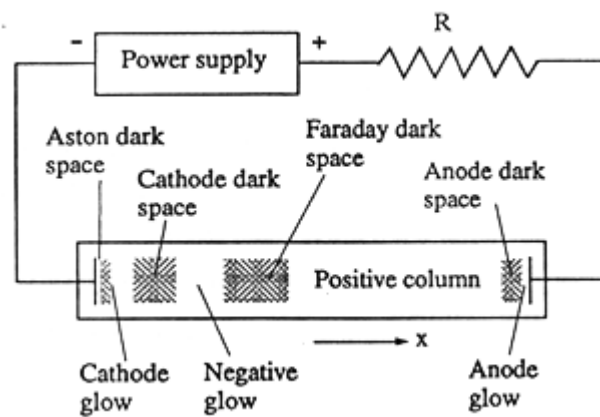


図3 グロー放電の概略図.

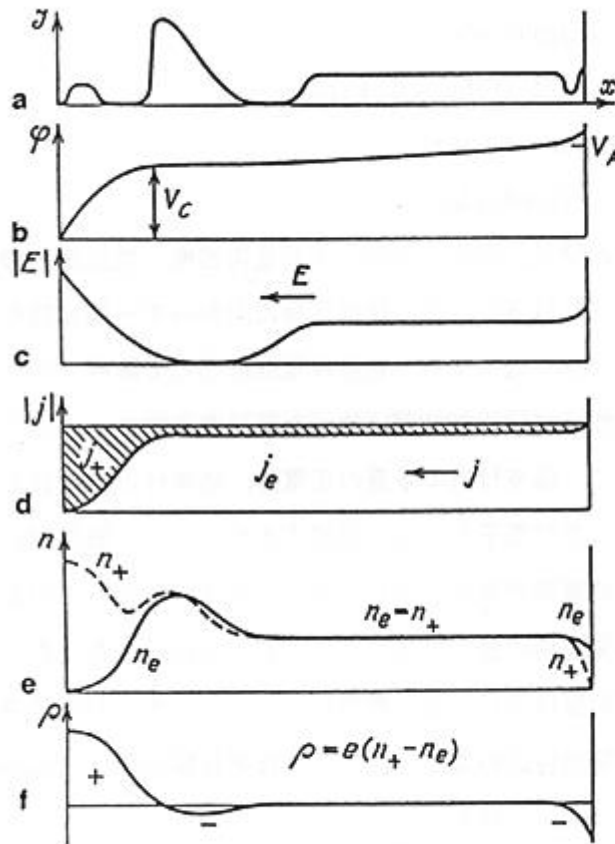


Fig. 8.2. Glow discharge in a tube and the distribution of: (a) glow intensity, (b) potential ϕ , (c) longitudinal field E , (d) electronic and ionic current densities j_e and j_+ , (e) charge densities n_e and n_+ , and (f) space charge $\rho = e(n_+ - n_e)$

図4 グロー放電における各物理量の軸方向分布.

(参考文献[3] p169 より転載)

2. 4. 静電プローブ(シングルプローブ)測定原理

プローブは普通小さい電極をプラズマ中に挿入し、プラズマに対し正又は負のバイアス電圧 V_p を加えてプローブに流れる電流 I_p の特性を調べる。図7はグロー放電に対する測定装置の概略図である。図8は典型的なプローブの電流電圧 ($I_p - V_p$) 特性である。この特性の定量的な理論は複雑であるが、最も簡単な磁界が弱く、シース (sheath) の厚さがプローブの大きさに比べて小さい場合を考える。図8の特性は正負の電流に関して非対称性を示すが、この原因は、電子はイオンより熱運動の速度が速いので、プローブに流れる電子電流はイオン電流より遥かに大きいことによる。図8のように、A, B, C の3領域に分けて述べる。

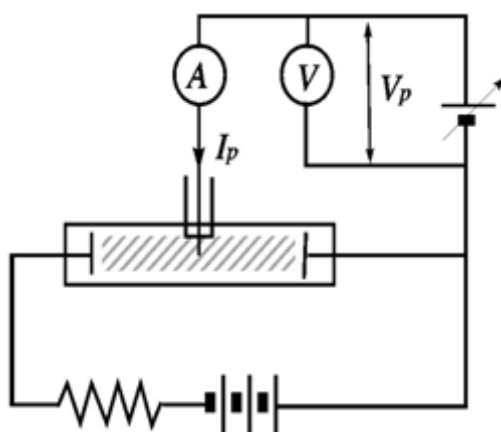


図 7 プローブ測定の概略図

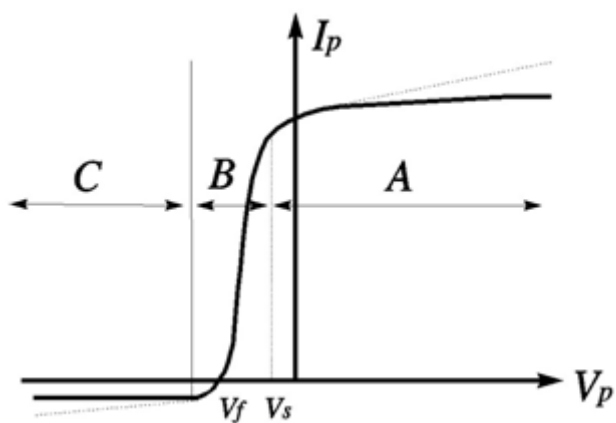


図 8 シングルプローブの電流電圧特性

(a) A 領域

プローブ電圧 V_p がプラズマと同じ電圧（空間電位） V_s と等しくなると、電場がプローブの周りに出来ない。そのため荷電粒子（イオンと電子）が熱運動でプローブに入る。 V_p が V_s より正に増やしていくと、電子はプローブの方に加速され、イオンは、反発される。このようにプローブの周囲が正電圧にあるためイオンが反射され、電子のみ存在する薄い層がプローブに接して形成されたものを電子シースという。プローブの周囲の電子シースの外側では殆ど電場のない状態になり、 $V_s < V_p$ では、熱運動に従って全ての電子がプローブに入り、電子電流は飽和する。これを電子飽和電流という。これを I_{es} とすると、

$$I_{es} = \frac{1}{4} S n_e \langle v_e \rangle \quad (16)$$

ここで、 S はプローブ前面のシースの表面積、 e は電子の電荷 ($e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$)、 n_e は電子密度、 $\langle v_e \rangle$ は電子の平均速度である。 $1/4$ の因子はシースの表面で密度が半分になること、及び表面の法線に対する方向余弦の半球での平均の値が $1/2$ となることによる。

平面プローブでは、 S は殆どプローブ表面積と等しいが、円柱状プローブでは、 V_p の上昇に従い、電子シースの厚さが厚くなるため表面積は増大して、図 8 の点線のように I_{es} は斜めに上昇する。この時は、 $V_p = V_s$ で、 $S =$ プローブの表面積となる。Maxwell 速度分布に従う電子については、式 (16) は、

$$I_{es} = S n_e \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m} \right)^{1/2} \quad (17)$$

となる。ここで k_B はボルツマン定数 ($k_B = 1.381 \times 10^{-23}$ [J/K]), m は電子の質量 ($m = 9.109 \times 10^{-31}$ [kg]) である。

(b) B 領域

プローブ電圧 V_p を下げていくと V_s 以下で電流が減少する。 $V_p - V_s = V$ が負になるため電子電流 I_e は徐々に減るとともに、イオン電流 I_i が流れる。 I_e が減るのは、遅い成分をもった電子は負の電圧 V のためにプローブに流入することが出来なくなり、 $m v_1^2 / 2 = -eV$ で与えられる v_1 より大きい速度成分の電子のみプローブに入る。従って V の電圧の時の I_e は、

$$I_e = S n_e \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m} \right)^{1/2} \exp \left(\frac{eV}{k_B T_e} \right) \quad (18)$$

となる。

プローブ電流 I_p は電子電流 I_e と反対方向に流れるイオン電流 I_i との差であるから $I_p = I_e - I_i$ であり、これと式 (18) より、

$$I_p + I_e = I_e = S n_e \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m} \right)^{1/2} \exp \left(\frac{eV}{k_B T_e} \right)$$

又上式は、式 (17) より、

$$I_p + I_i = I_{es} \exp \left\{ \frac{e(V_p - V_s)}{k_B T_e} \right\} \quad (19)$$

更に、 V_p を下げると図 8 にて、 $V_p = V_f$ のところで、 $I_p = 0$ となる。この時の V_f を浮遊電位 (floating potential) という。 $V_p = V_f$ では $I_e = I_i$ であり、電流は消しあっているのに、絶縁して $I_p = 0$ になるように挿入した物体と同じ電位である。

放電管のガラス壁等はこの電位であるが、 $V_f < V_s$ だからプラズマに対しては負に帯電している。 $V_p < V_s$ では、幾らかの電子が反発され、イオンより数が減り、プローブ周辺には薄いイオンシースが作られている。

(c) C 領域

V_p を更に下げると、 $V = V_p - V_s$ は負の大きい電位となり、速い速度を持つ電子でさえプローブに入らなくなる。イオン電流は、C 領域で平面電極では一定の値 $I_p = I_i$ となる。これをイオン飽和電流 I_{is} という。円柱状プローブでは、電子飽和電流と同様に、イオンシ

ースが厚くなるために、表面積が増大し、 I_i は V_p を負に増すに従い、図8の点線のように下がる。

(d) 電子温度 T_e と電子密度 n_e の測定

式(19)の両辺の対数をとると、

$$\log(I_p + I_i) = \text{const.} + \frac{e(V_p - V_s)}{k_B T_e} = \text{const.} + 11,600 \frac{V_p}{T_e} \quad (20)$$

となる。ここで、 V_p は[V]、 T_e は[K]の単位である。

従って、図8の $I_p - V_p$ 特性より、 I_i を定め、更に V_p に対して $\log(I_p + I_i)$ をプロットすれば、図9のようなグラフが得られる。

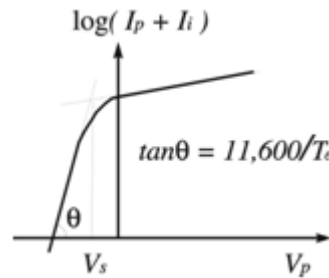


図9 電子温度の決定方法.

そのときの傾斜が $11,600/T_e$ を与え、これより電子温度 T_e が求められる。

また、電子密度 n_e に関しては、式(17)より、

$$n_e = 4.02 \times 10^{15} \frac{I_{es}}{S T_e^{1/2}} \quad (21)$$

ここで、 I_{es} は[A]、 S は[m²]、 T_e は[K]、 n_e は[m⁻³]の単位である。図9の折れ曲がり点の電圧 V_s における電子飽和電流 I_{es} とプローブ表面積 S と T_e により、式(21)から、 n_e が求められる。

イオン電流は電子電流より遥かに小さく、更に詳しい理論ではイオン電流 I_i は式(17)のような式、即ち $I_i = S e n_i \langle v_i \rangle / 4$ (n_i はイオン密度、 $\langle v_i \rangle$ はイオンの平均速度)とならず、電子温度にも依存する。この為、イオン温度 T_i を求めることは困難である。

プローブ測定に関しては、ここで説明したシングルプローブの他に種々のものがあり、その1例としてダブルプローブ測定法に関して補足説明4に記す。

測定対象のプラズマが時間的変動する場合の測定には注意を要する。また、強磁場中において、電子はイオンに比べて磁場影響を受けやすく、A領域の電子飽和電流領域は抑制される。そして空間電位 V_s 見かけ上小さく測定される。この場合、 V_s は V_f と T_e から評価し、 n_e はC領域のイオン飽和電流領域に直線fittingして、この V_s まで外挿して I_{is} を求めて評価する。詳しくは参考文献を参照されたい。[8]

§ 3 実験方法

本実験は高電圧を扱うのでその危険を認識して感電にはくれぐれも注意すること。
また真空ポンプ、ガラス製放電管、バルブ操作(場合によってはボンベ)等の真空機器の取り扱いにも注意すること。事故や故障等が生じた場合は速やかに担当教員に報告して対処すること。

3. 1 真空装置

放電開始電圧測定、並びにプラズマを直流放電によって発生させるためには、真空容器及び排気装置が必要である(補足説明5参照)。排気装置としては、油回転ポンプ(Rotary pump, 到達真空度～数 Pa(注意2))を使用して、ステンレススチールの真空容器(直径50.5 mm, 長さ420mm)及び2つのガラスの真空容器(内径42mm, 160 長さ及び200mm)内をほぼ数 Pa まで排気する。この状態で、空気を真空容器内に流入させ一定の圧力($p=20$ Pa)に保つ。直流放電等が行われている時は、電極からガス(不純物)が放出され、また僅かではあるが真空容器の内壁からもガスが放出される。

従って、これらの放出ガスを排気装置で排気しつつ、常に新鮮な空気を流入させることにより、真空容器の中性気体の純度を保ち、直流放電の安定化を図る。

[実験装置の始動方法]

図10に真空装置の概略図を示してある。操作は次のように行えば良い。

- (1) ストップバルブが閉じられていることを確認し、リークコックを閉じる。
- (2) ロータリーポンプのスイッチを入れ、1分程度暖気運転を行う。
- (3) 真空バルブをあける。
- (4) ピラニ真空計のスイッチを入れ、時刻と真空度を記録しておく。
- (5) 真空度が3 Pa 迄下がったら、以下のようにして、空気を真空容器内に流入させる。
尚、上記真空度に到達するのに約3分程度要する。
- (6) ニードルバルブの目盛が零であることを確認する。ニードルバルブは非常にデリケートなものであるから、調整には充分慎重に行うこと。特に零よりも閉めすぎると壊れるので注意せよ。
- (7) ストップバルブを開く。
- (8) ピラニ真空計を見ながら、慎重にニードルバルブを左にゆっくり回して、真空容器内に空気を流入させる。圧力が30～40Pa 前後になるようにニードルバルブを調節し、そのときの圧力をピラニ真空計で読み取る。尚、一旦ニードルバルブを動かした場合、真空度が落ち着くまで時間を要するので注意し、調整具合を把握するまで繰り返すこと。

この様な状態にセットしてから、次節以降で述べる方法で各種の実験を行う。

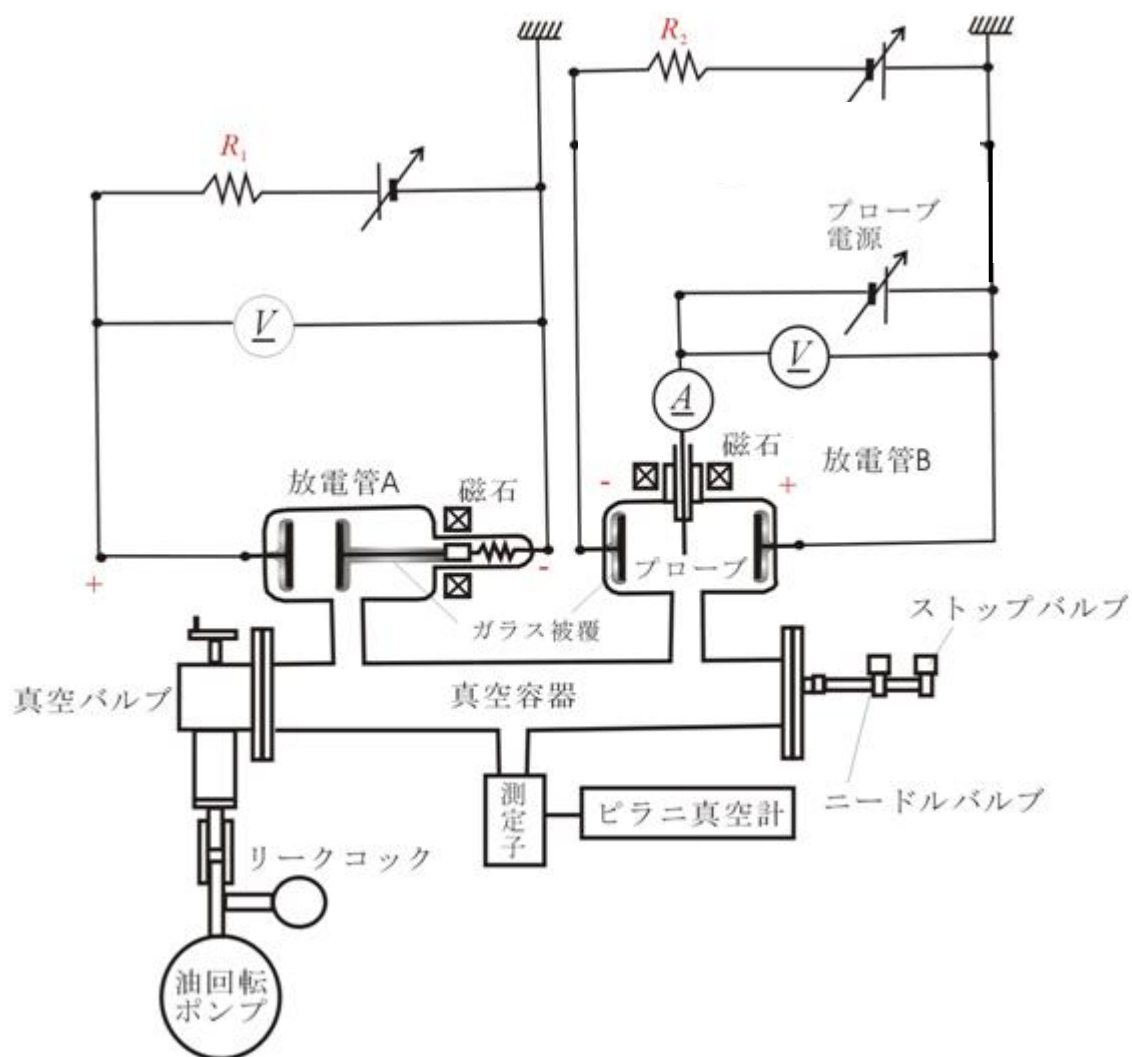


図 10 実験装置の概略図(放電開始電圧測定, 並びにプローブ測定回路)

[実験装置の停止方法]

実験が終了したら, 次のようにして, つまり前と逆の方法で装置をとめる.

- (9) 電極に電圧印加中であれば電圧を零にする. 直流放電中であれば, 放電を中止する.
- (10) ニードルバルブを右に回して止める. この時, 破損の恐れがあるので零よりも廻し込みすぎないようにせよ.
- (11) ガラスの放電管をしばらく冷却する.
- (12) 圧力が下がり, 実験開始時の到達圧力に達することを確認する.
- (13) ピラニ真空計のスイッチをオフの状態にし, ストップバルブを閉める.

- (14) 直ちに真空バルブを閉める。
- (15) 油回転ポンプのスイッチを切る。
- (16) リークコックを開けて油回転ポンプ内を 1 気圧にする。(これを怠ると油回転ポンプ内のオイルが上がってしまうので絶対に忘れないこと。)

(注意2) $1 \text{ Torr} = 1 \text{ mmHg} = 133.3 \text{ Pa}$, $\text{Pa} = \text{Pascal} = \text{N/m}^2$

3. 2 実験 I (放電開始電圧の測定)

- (1) 放電管 A を用いて実験を行う。
- (2) 図 10 を参考にして結線する。感電にはくれぐれも注意すること。
- (3) 電極間距離 d (5~20 mm) をパラメータにし、ニードルバルブを調整して空気の圧力 p を変化させて、放電開始電圧 (V_{st}) を測定する。この時、 pd [$\text{m} \cdot \text{Pa}$] 積は 0.2 ~10 の範囲とするが、図 2 を参考にして V_{st} が最低になる付近の pd から測定を始めること。尚、電極材料は銅 (Cu) である。
- (4) 高圧電源の電流調節つまみを最低位置から半回転している (目盛り 0.5 (10mA)) ことを確認する。電圧調整つまみがゼロであること、並びに極性切り替えつまみが output off であることを確認する。
- (5) 極性切り替えつまみを正にして、電極間に徐々に、高圧電源より、電圧を印加して、放電開始した時点における電圧を読み取る。尚、感電には充分注意せよ。
- (6) 放電開始後は、速やかに印加電圧を下げる。尚、放電開始後の持続放電時は、放電開始電圧よりも電圧が降下するので注意せよ。
- (7) 実験結果は片対数グラフにプロットしながらすすめること。また、測定結果は、表 2 のように整理すること。
- (8) 放電開始電圧 V_{st} のバラツキが大きい時は、何度か測定し、それらを総てプロットし、併せて平均値も区別して記入すること。
- (9) 電極間距離は、磁石で動かして設定すること。この時ガラス管の取扱は慎重に行い、破損せぬように。電極間距離の設定は 3 種類以上とする。
- (10) パッシェンの法則が確認できるか確かめよ。出来なければ再度実験を繰り返すこと。
- (11) 表 1 を参考にして、各電極距離に於ける測定結果をもとにそれぞれの実験データを、式 (6) に当てはめ、二次電子放出係数 γ を求めよ。この時パッシェンの法則の適用範囲 (E/p) に注意すること。又、得られた γ の V_{st} に対する依存性を調べよ。

表 2 放電開始電圧測定結果

電極材料_____. 電極直径_____. 動作ガス種_____.

電極間距離 $d[\text{m}]$	圧力 $p [\text{Pa}]$	Pd 積 $[\text{Pa} \cdot \text{m}]$	放電開始電圧 $V_{\text{st}}[\text{V}]$	E/p (V_{st}/pd)	Φ	γ
$d_1=0.005$	P1 P2 : : :					
$d_2=0.01$	P1 P2 : : :					

3. 3 実験 II (プラズマの発生とプローブ測定)

①プラズマの発生

ガラスの放電管 B を用いて、次のようにしてプラズマを発生させる。

なお、本実験は担当教員 (TA) 立会いのもとに行うこと。

- (1) 直流放電させるための回路は、図 10 に示されている。電極のアースの取り方が放電開始電圧測定の場合と異なるので注意すること。
- (2) プローブは一番引き抜いた状態にしておく。(電極距離は 100mm)
- (3) 空気圧力が 70~100 Pa になるように、ニードルバルブで調節する。
- (4) 放電電源のスイッチを入れる前に、電圧目盛が、零 (左に一杯) になっているかどうか確認する。そして、放電開始後、定電流電源となるように、そして放電時に放電電流 $I_d = 5$ (or 10) mA となるように、電流の調整ダイヤルを 0.25 (or 0.5)

回転（約 5（or10mA））させておく．

（５）放電電源のスイッチを入れて陽極，陰極間に直流電圧を印加して放電させる．

（放電電源は，最大 1000V 迄出るので充分注意して取り扱うこと．）

（６）放電開始後，電圧調整ダイヤルを約 950V 程度に設定しておく．

（７）圧力 p と放電維持電圧 V_d を読み取り，放電の様子を観察する．

（８）放電維持電圧は圧力設定後も時々僅かに変動するからその範囲を記録しておく．

②シングルプローブによる測定

A. 電子温度・密度の測定法

図 1 1 のような平面プローブが直流グロー放電プラズマ（陽光柱プラズマ）に挿入されている．プローブの大きさは，直径 2.0mm である（可動距離 45mm）．このプローブと陽極との間にプローブ電圧 V_p を印加して，プローブに流れるプローブ電流 I_p （但し，電子電流を正とする）を図 1 0 のような回路で測定する． $V_p = -50 \sim 40V$ ， $I_p = -1 \sim 1000 \mu A$ であり，測定レンジ並びに極性に注意すること．測定結果は，図 1 2 のようになり，イオン電流 I_i の大きい領域に接線を引いた点線が I_i を表しており，これから電子電流 $I_e = I_p + I_i$ が得られる．（図 1 2 の両矢印部分）

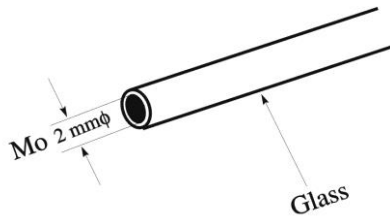


図 1 1 シングルプローブ概略図

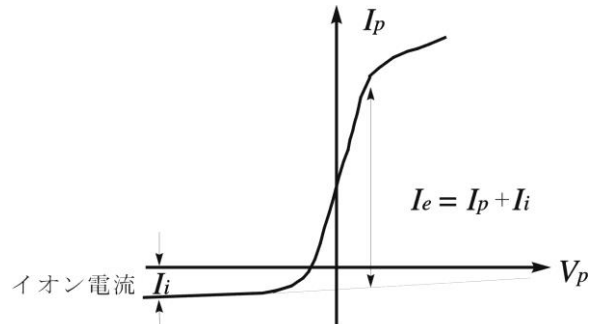


図 1 2 電子電流 I_e とイオン電流 I_i

$$I_e = Sen_e \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m} \right)^{1/2} \exp \left\{ \frac{e(V_p - V_s)}{k_B T_e} \right\},$$

$$\log I_e = 0.434 \cdot \frac{e(V_p - V_s)}{k_B T_e} + \log \left[Sen_e \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m} \right)^{1/2} \right] \quad (2.2)$$

（ \log は常用対数： $\log e^x = 0.434x$ ）片対数．

であるから， $I_e - V_p$ を片対数グラフにプロットすると図 1 3 のようになる．左側の直線部分 A の傾きから電子温度 T_e が求まり，更に右側の直線部分に引いた接線 B と接線 A との交点 Y から，プラズマの空間電位 V_s (space potential) と飽和電子電流 I_{es} (electron saturation current) が判る．

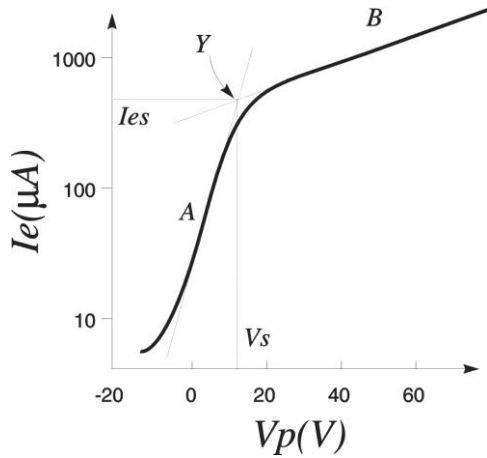


図 1.3 プローブによる電子温度 T_e
電子密度 n_e の求め方の説明図

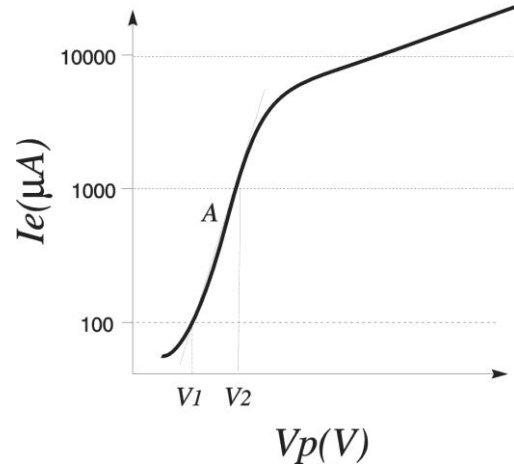


図 1.4 プローブによる電子温度 T_e
電子密度 n_e の平易な求め方の説明図

図 1.3 の直線 A から T_e を求めるには、次のようにすれば良い。

図 1.4 のように I_e の立ち上がり直線部分の値が 1桁異なる V_p が、 $V_p = V1, V2$ の時 (各々 $I_e = 100, 10000 \mu A$) とすると、式 (2.2) 式より、

$$1 = 0.434 \cdot e^{\left(\frac{V2 - V1}{k_B T_e} \right)}$$

であるから、

$$T_e = 0.434 \cdot e^{\left(\frac{V2 - V1}{k_B} \right)},$$

より温度が求められる。即ち、

$$T_e = (V2 - V1) \times 5035 \quad [K]$$

または、

$$T_e = (V2 - V1) \times 0.434 \quad [eV]$$

($V1, V2$ の単位は[V])

のように電子温度が求められる。

図 1.3 で求められた飽和電子電流 I_{es} から、電子密度 n_e が次のようにして求められる。

式 (1.7)

$$I_{es} = S e n_e \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m} \right)^{1/2}$$

より、 S はプローブの表面積、 T_e 、 I_{es} はプローブ特性より与えられ、 e 、 m 、 k_B は既知である。従って、

$$n_e = 4.02 \times 10^{15} \frac{I_{es}}{ST_e^{1/2}} \quad [\text{m}^{-3}]$$

(I_{es} の単位は[A], S は[m²], T_e は [K])

或は,

$$n_e = 3.73 \times 10^{13} \frac{I_{es}}{ST_e^{1/2}} \quad [\text{m}^{-3}] \quad (23)$$

(I_{es} の単位は[A], S は[m²], T_e は [eV])

で, n_e が求められる.

B. 実験条件

既に前節で述べた方法により, 以下の測定をおこなう.

B-1) 放電電流, 並びにガス圧力に対する依存性

- (1) 直流グロー放電を行い, ガス圧力 40Pa になるように, ニードルバルブを調節する.
- (2) プローブを引き抜いて先端が放電管壁と同位置になるように, 磁石を用いて設定する.
- (3) 放電電流 $I_d = 5$ (or 10mA) とに対してプローブ電流電圧特性を測定し, 実験進行中はグループで 1 枚グラフ化しながら進める.
- (4) 時間的余裕がある場合には, 上記と同様の実験をガス圧力 60Pa の場合について行え.
- (5) グラフ化した図を担当教員に提示して, 実験結果の妥当性に関してチェックを受けること.
- (5) プローブ電流電圧特性から T_e , n_e , V_s を求めよ. これらの値は放電電流やガス圧力の違いでどのように変化するか調べよ.

B-2) 径方向分布測定 (余裕があれば)

プローブの先端を電極の中心軸上になるように設定して上記の実験を行え.

(ガス圧力 40Pa, 放電電流 $I_d = 5$ (or 10) mA)

§ 4 考察／検討／研究

4. 1 実験レポートの提出内容

実験レポートは以下の内容に纏めて提出すること。

- ・ 実験 I (放電開始電圧の測定) の結果
測定条件・測定値の表・グラフ
 γ 係数の導出過程と値
- ・ 実験 II (①プラズマの発生と②プローブ測定) の結果
測定条件・測定値の表・グラフ
 T_e, n_e の導出過程のグラフと値
- ・ 考察
A: 与えられた課題（実験終了時に担当教員より指示）
B: 各自独自の考察