

電 気 電 子 情 報 工 学 実 験 I , II

実 験 題 目 放 電 ・ プ ラ ズ マ

担 当 教 員 名 佐 々 木 徹

遠 隔 講 義 実 施 日 令 和 2 年 6 月 2 5 日

提 出 者 学 籍 番 号 20315784

氏 名 佐 藤 凌 雅

学生実験レポートチェックリスト

チェック項目	チェック欄
レポート提出期限を再確認しましたか。	○
ファイルの形式は PDF、サイズは 10 MB 未満となっていますか。	○
ファイル名は「学籍番号（半角）.pdf」となっていますか。 例）12345678.pdf	○
レポートには、当該テーマ担当教員から指示された必要事項が記載されていますか。	○
図と表にはそれぞれ通し番号が付されていますか。また、キャプションが英語で書かれていますか。	○
参考にした書籍、文献、WEB サイト等は参考文献リストにまとめられていますか。出典のない引用は不正行為にあたります。	○
「実験レポートの書き方」を熟読し、その主旨や注意事項に添って書かれていますか。	○

- * レポートの提出期限は必ず守ってください。締め切り後の提出は受理されない場合があります。
- * チェックリストは各自の確認のために使うものです。自分の作成したレポートに対して真摯な態度で記入してください。
- * チェック項目が満足されていない場合にはレポートが受理されませんので注意してください。

1 課題

- 1.1 写真と電圧電流特性からこの放電は何放電に対応するのかをこれまでの説明をもとに考察せよ。

0.5mA付近で大きな電圧の変化が見られるため，前期グロー放電であると考察する。

1.2 パッシェンの法則

1.2.1 パッシェンの法則を導出せよ

$$\begin{aligned}\frac{\alpha}{P} &= A \exp\left(-\frac{B}{\frac{E}{P}}\right) \\ \frac{\alpha}{P} &= A \exp\left(-\frac{BP}{E}\right)\end{aligned}$$

$E = \frac{V}{d}$ を代入して

$$\begin{aligned}\frac{\alpha}{P} &= A \exp\left(-\frac{BPd}{V}\right) \\ \frac{\alpha}{PA} &= \exp\left(-\frac{BPd}{V}\right) \\ \ln\left(\frac{\alpha}{PA}\right) &= -\frac{BPd}{V}\end{aligned}$$

V について解くと

$$\begin{aligned}V_B &= -\frac{BPd}{\ln\left(\frac{\alpha}{PA}\right)} \\ &= -\frac{BPd}{\ln(\alpha) - \ln(P) - \ln(A)} \\ &= \frac{BPd}{-\ln(\alpha) + \ln(P) + \ln(A)} \\ &= \frac{BPd}{-\ln(\alpha) + \ln(P) + \ln(A) + \ln(d) - \ln(d)}\end{aligned}$$

ここで, $K_0 = \ln(A) - \ln(\alpha) - \ln(d)$ とおくと,

$$\begin{aligned}V_B &= \frac{BPd}{K_0 + \ln(P) + \ln(d)} \\ &= \frac{BPd}{K_0 + \ln(Pd)}\end{aligned}$$

なお, K_0 は

$$\begin{aligned}K_0 &= \ln(A) - \ln(\alpha) - \ln(d) \\ &= \ln\left(\frac{A}{\alpha d}\right) \\ &= \ln\left(\frac{A}{\ln(\exp(\alpha d))}\right) \\ &= \ln\left(\frac{A}{\ln(1 + \exp(\alpha d) - 1)}\right)\end{aligned}$$

$\gamma(\exp(\alpha d) - 1) = 1$ より $\gamma = (\exp(\alpha d) - 1)^{-1}$ に留意して

$$\begin{aligned} K_0 &= \ln \left(\frac{A}{\ln(1 + \gamma^{-1})} \right) \\ &= \ln(A) - \ln \left(\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \right) \end{aligned}$$

1.2.2 火花電圧 V_B を最小とする Pd 積とその時の火花電圧 V_{Bmin} を求めよ

V_B が最小となるのは $\frac{dV_B}{d(Pd)} = 0$ の時であるから,

$$\begin{aligned} \frac{dV_B}{d(Pd)} &= \frac{d}{d(Pd)} \left(\frac{BPd}{K_0 + \ln(Pd)} \right) \\ &= \frac{B \cdot (K_0 + \ln(Pd)) - BPd \cdot 1/Pd}{(K_0 + \ln(Pd))^2} \\ &= \frac{B \cdot (K_0 + \ln(Pd) - 1)}{(K_0 + \ln(Pd))^2} \end{aligned} \tag{1}$$

$\frac{dV_B}{d(Pd)} = 0$ の時は, 分子が0の時なので, $B \cdot (K_0 + \ln(Pd) - 1) = 0$ を解くと

$$\begin{aligned} B \cdot (K_0 + \ln(Pd) - 1) &= 0 \\ \ln(Pd) &= 1 - K_0 \\ Pd &= \exp(1 - K_0) \end{aligned}$$

$Pd = \exp(1 - K_0)$ を V_B に代入すると,

$$\begin{aligned} V_{Bmin} &= \frac{BPd}{K_0 + \ln(Pd)} \\ &= \frac{B \exp(1 - K_0)}{K_0 + \ln(\exp(1 - K_0))} \\ &= \frac{B \exp(1 - K_0)}{K_0 + 1 - K_0} \\ &= B \exp(1 - K_0) \end{aligned}$$

1.2.3 空気の場合の火花電圧-pd積のグラフを作成せよ. なお, $A=15[\text{cm}^{-1}\text{Torr}^{-1}]$, $B=365[\text{Vcm}^{-1}\text{Torr}^{-1}]$, $\gamma=0.02$ とし, 縦軸を V_B , 横軸pd積は $[\text{Pa m}]$ の単位系で記述すること.

$$A=15[\text{cm}^{-1}\text{Torr}^{-1}]=11.25[\text{m}^{-1}\text{Pa}^{-1}]$$

$$B=365[\text{Vcm}^{-1}\text{Torr}^{-1}]=273.8[\text{Vm}^{-1}\text{Pa}^{-1}] \text{より, } K_0=1.051 \text{となるので,}$$

$$V_B = \frac{273.8Pd}{1.051 + \ln(Pd)} \tag{2}$$

となる.

これをグラフで表すとFig.1に示すようになる.

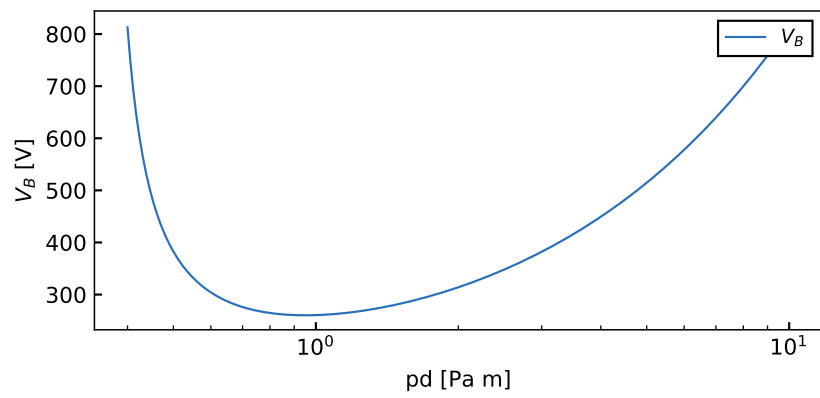


Fig.1 Paschen Curve

1.3 電子温度と電子密度を求める

1.3.1 プローブ電圧 V_p -プローブ電流 I_p 特性のグラフを作る

作成したグラフをFig.2に示す.

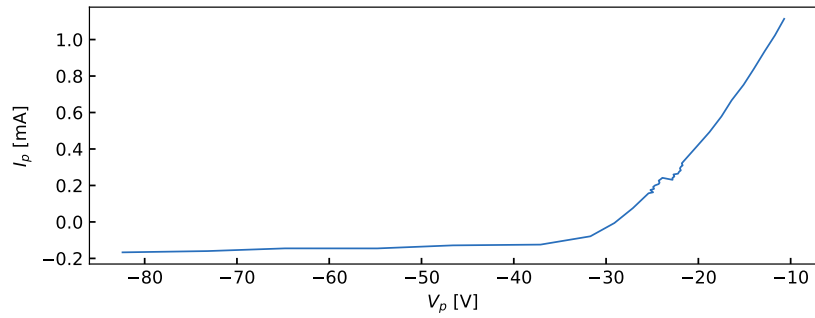


Fig.2 Graph of V_p - I_p characteristics

1.3.2 作ったプローブ電圧 V_p -プローブ電流 I_p 特性からイオン飽和電流を求める

イオン飽和領域の傾きが緩やかな領域を延長し, y軸との交点がイオン飽和電流 I_{is} となる. 直線はイオン飽和領域の6点から最小二乗法を用いて引いた. 作成したグラフをFig.に示す. 最小二乗法によって求めた直線の切片から, イオン飽和電流 I_{is} は0.087[mA]であることがわかった.

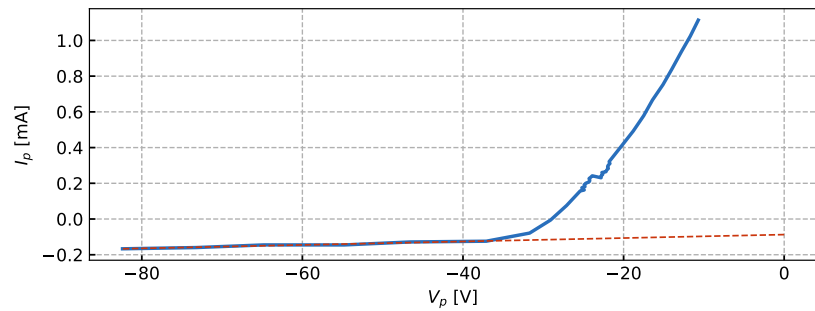


Fig.3 Graph of V_p - I_p characteristics

1.3.3 求めたイオン飽和電流を使って, プローブ電圧 V_p -プローブ電流 I_e 特性を作る

プローブ電流 I_p , 電子電流 I_e , イオン電流 I_i の間には以下の関係が成立する.

$$I_p = I_e + I_i \quad (3)$$

このとき、イオン飽和電流 I_{is} がイオン電流 I_i とおおよそ等しいと仮定すると

$$\begin{aligned} I_p &= I_e + I_{is} \\ I_e &= I_p - I_{is} \end{aligned} \quad (4)$$

以上を踏まえて、プローブ電圧 V_p -プローブ電流 I_e 特性を描くと、Fig.4が得られる

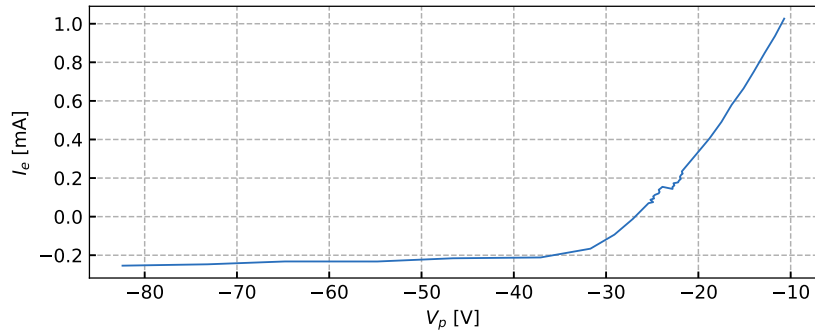


Fig.4 Graph of V_p - I_e characteristics

1.3.4 3.で作った特性から工夫をして、電子温度を出す

$\frac{d}{dV_p} \ln(I_e(V)) = \frac{e}{k_B T_e}$ より、電子温度 T_e は以下で求められる。

$$T_e = \frac{e}{k_B} \cdot \left(\frac{d}{dV_p} \ln(I_e(V)) \right)^{-1} \quad (5)$$

ここで、 $\frac{d}{dV_p} \ln(I_e(V))$ を求めるために、Fig. V_p - $\ln(I_e)$ 特性を描く。

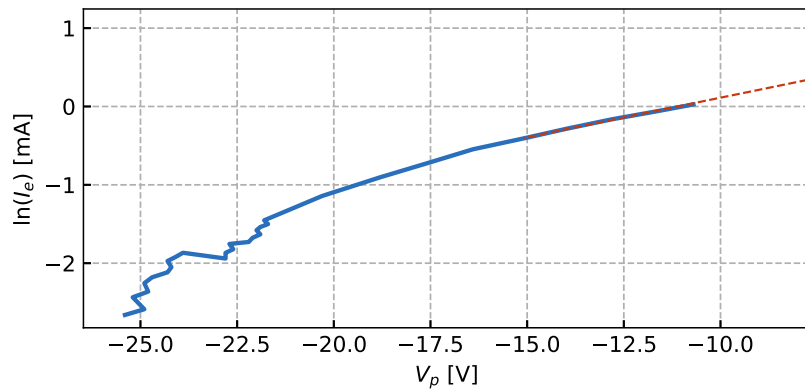


Fig.5 Graph of V_p - $\ln(I_e)$ characteristics

このグラフにおいて、橙色の線は V_f 近傍の接線であり、この傾きが $\frac{d}{dV_p} \ln(I_e(V))$ となる。
 $\frac{d}{dV_p} \ln(I_e(V))$ は0.10であることがわかった。よって、電子温度 T_e は $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$,

$e = 1.6 \times 10^{-19}$ であることに留意して

$$T_e = \frac{e}{k_B} \cdot \left(\frac{d}{dV_p} \ln(I_e(V)) \right)^{-1} = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23}} \cdot (0.1)^{-1} = 115942 \quad (6)$$

1.3.5 4.で求めた電子温度を利用して、電子密度を求める。なお、プローブ表面積 S_p は $5 \times 10^{-5} \text{m}^2$ とする。
また、電子密度の単位を示すこと。

$$\begin{aligned} I_{is} &= \exp\left(-\frac{1}{2}\right) en_e S_p \sqrt{\frac{k_B T_e}{M_i}} \\ n_e &= I_{is} \left(\exp\left(-\frac{1}{2}\right) e S_p \sqrt{\frac{k_B T_e}{M_i}} \right)^{-1} \\ &= 8.7 \times 10^{-5} \left(\exp\left(-\frac{1}{2}\right) \cdot 1.6 \times 10^{-19} \cdot 5 \times 10^{-5} \cdot \sqrt{\frac{1.38 \times 10^{-23} \cdot 115942}{40 \times 1.6 \times 10^{-27}}} \right)^{-1} \\ &= 3.58 \times 10^{14} [\text{m}^{-3}] \end{aligned} \quad (7)$$