

低気圧放電管の探針法による電子温度測定

蛭原 健治*・金城 善夫**

Some Electron Temperature Measurements for a Low Pressure Discharge Tube by means of Probe Method^o

Kenji EBIHARA and Yoshio IMAJO

Abstract

There are many methods such as a probe method, spectroscopic method, a microwave method to know the low pressure plasma properties.

Especially, a probe method is mainly used by the merits which this method is able to measure directly various parameters of the plasma (electron temperature and electron density) and to operate easier than the other methods.

A few works have been carried out for the glow discharge in a low pressure (10 mtorr, Ar gas), so that this experiment has been done for the purpose of expounding the characteristics of the low gas pressure tube by using a single probe method and a double probe method.

As the result, it was obtained as follows.

1) The negative glow has the greater part of the discharging column and positive column has not more than one third of the discharge column.

2) In the case of measuring the characteristics of a discharge tube which is applied more than 1 kV, the double probe method is more suitable than the single probe method.

3) A negative glow has the Maxwellian distribution for both the normal glow discharge and an initial state of the abnormal glow discharge.

4) The electron temperature, the electron density and electric conductivity is nearly equal to 5×10^4 °K, 8×10^8 cm⁻³ and 22.4 \bar{o} /m respectively. The electron temperature of cathode side is equal to about 8×10^3 °K.

5) With increasing the discharging current, the thickness of cathode dark space decreases. The characteristic curve of Vc vs. pd was experimentally extended to the region which was not exposed.

1. 緒 言

低気圧放電プラズマを知る方法として探針法（プローブ法）、マイクロ波法、分光法、レーザー光を用いる方法などがある。

特に探針法は放電の局所的なプラズマ量（電子温度や電子密度）を直接測定でき、また操作が簡単であるという利点があるため、放電現象の基礎的研究にはよく採用されている。

本実験は従来あまり探針法による測定がなされていない低い気圧（10mtorr. 封入気体アルゴン）のグロ

ー放電についてシングルプローブ法およびダブルプローブ法を用いて電子温度、電子密度を測定し、低圧放電管で生ずるグロー放電の特性を明らかにすることを目的とする。

2. 原 理

2・1 単探針法（シングルプローブ法）¹⁾

Fig. 1 に示すようにプローブを直接プラズマ内に挿入して、プローブと放電管陽極間に電圧 V_p を印加する。プローブ P と近傍のプラズマ S との間の電位差を V, 陽極と S との間の電位差を V_s とすると次式が成

* 電気工学科

** 大学院工学研究科電気工学専攻

立する。

$$V_s = V + V_p \quad (1)$$

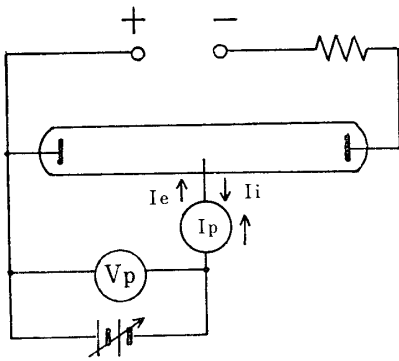


Fig. 1 Basic single probe circuit

1) V_p と V_s が等しい場合 (Fig. 2 (b) 参照), 電子やイオンは熱運動をしながらプローブにぶつかる。粒子がマックスウェル速度分布であれば粒子の平均速度は,

$$\langle v \rangle = \left(\frac{8kT_e}{\pi m} \right)^{1/2} \quad (2)$$

で与えられる。プローブ電流 I_p は電子電流 I_e とイオン電流 I_i との差で与えられるが, (2) 式よりイオンの平均速度は電子の平均速度 $\langle v_e \rangle$ に比べて非常に小さいのでイオン電流は無視でき。

$$I_p = I_e - I_i \approx \frac{e}{4} n_e \langle v_e \rangle A = I_{es} \quad (3)$$

となる。ただし

- n_e : 電子粒子密度
- I_{es} : 電子飽和電流
- A : プローブ表面積
- e : 電子の電荷

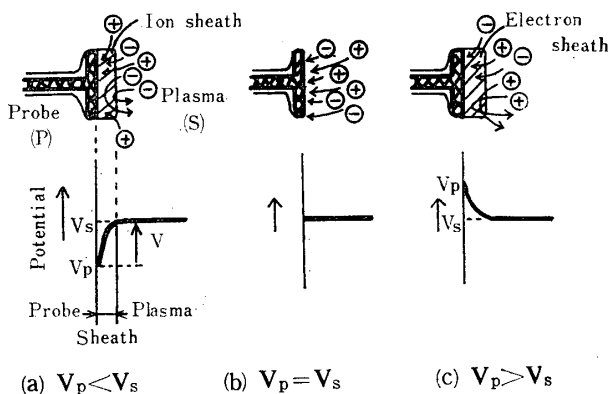


Fig. 2 Sample potential diagrams of the single probe method

2) V_p が V_s より少し低い場合 (Fig. 2 (a) 参照), プローブの前面に電圧降下部分ができ, その電界はイ

オンには加速電界, 電子には減速電界として作用する。この場合もイオン電流は無視でき

$$I_p \approx I_{es} \exp\left(-\frac{eV}{kT_e}\right) \quad (4)$$

となる。ただし

- T_e : 電子温度
- k : ボルツマン定数

3) V_p を V_s より高くすると (Fig. 2 (c) 参照), イオンには減速電界, 電子には加速電界ができる。プローブ電流は電子電流だけとなり飽和すると考えられるが, 実際には電子シース表面積が増加するので電流は増える。この増加分をプローブ表面積が A から $A(1+\delta)$ に変化したと考えると

$$I_p = I_{es}(1+\delta) \quad (5)$$

となる。

4) V_p を V_s よりずっと低くした場合, (3) 式の電子電流成分は減少して, ある点でイオン電流成分と等しくなり, $I_p = 0$ となる。この点のプローブ電位を浮遊電位 (floating potential) V_f という。

5) さらに V_p を下げていくと, プローブ電流の方向が逆になってイオン電流だけが流れるようになる。この時のイオン電流の大きさはやはり電子温度に依存し次式であらわされる。

$$I_i = K n_e \left(\frac{kT_e}{m_i} \right)^{1/2}, \quad K : \text{const.} \quad (6)$$

この1) ~ 5) まで V_p を変化させた場合に生ずる $I_p - V_p$ 特性曲線を Fig. 3 に示す。この曲線より電子

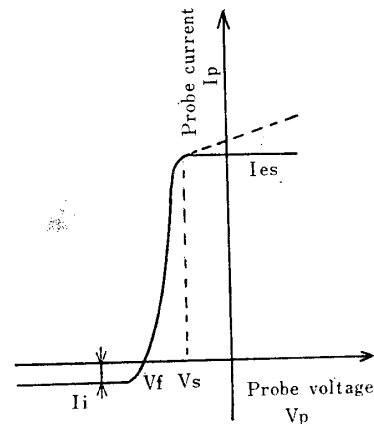


Fig. 3 Voltage-current characteristic of the single probe method

温度を求めるには次のようにする。(4)式の対数をとって整理すると,

$$\ln I_p = -\frac{e}{kT_e} V_p + \text{const.} \quad (7)$$

となって、これより y 軸に $\ln I_p$, x 軸に V_p をとればその直線の傾きから電子温度を求めることができる。更に詳細な電子温度導出の手続きは付録(1)に記す。

電子密度は(3)式あるいは(6)式から求められる。

2・2 複探針法 (ダブルプローブ法)²⁾

数 cm 離してプラズマ中に挿入された 2 本のプローブ間に電圧を印加し、その電圧電流特性によりプラズマの諸量を求める方法である。Fig. 4 に測定回路を示す。

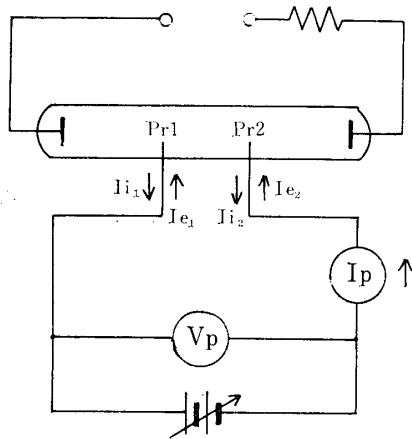


Fig. 4 Basic double probe circuit

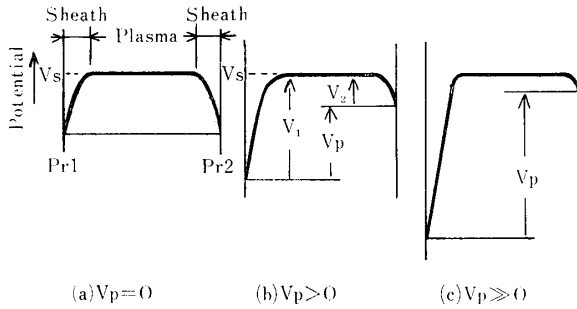


Fig. 5 Sample potential diagrams of the double probe method

Fig. 5 (a) は $V_p = 0$ の時の電位状態をあらわしたものである。この場合にはプローブ 1 (P_{r1})、プローブ 2 (P_{r2}) とも前述の浮遊電位にありプローブに電流は流れない。 V_p を増加していくと P_{r2} の電位はプラズマの電位に近づき、 P_{r1} の電位はプラズマの電位より遠ざかる。ゆえに P_{r2} は $V_p = 0$ の時より多くの電子を集め、一方 P_{r1} が集める電子は減る。この状態を同図(b)に示す。さらに V_p を大きくしていくと、同図(c)に示すように P_{r1} に向う電子はすべて反発されるようになる。また P_{r2} の電位はより一層プラズマ

の電位に近づき、 P_{r2} に流入する電子はほぼ一定になる。イオンはいずれの場合にも吸引されるので、プローブには常にほぼ一定のイオン電流が流れ込んでいく。 V_p を逆に印加した時には P_{r1} と P_{r2} が入れかわるだけで粒子のふるまいは上記と同様である。

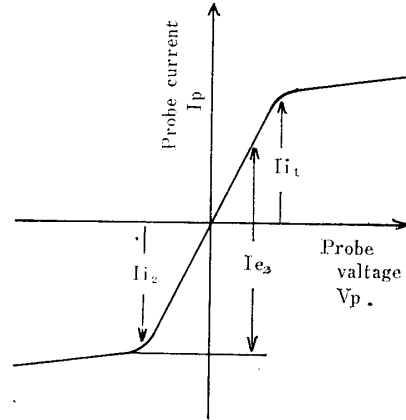


Fig. 6 Voltage-current characteristic of the double probe method

Fig. 6 に複探針法の $I_p - V_p$ 特性曲線の例を示す。この曲線より電子温度を求めるには次のようにする。 P_{r1} および P_{r2} に流れるイオン電流と電子電流をそれぞれ I_{i1} , I_{i2} , I_{e1} , I_{e2} とすると、キルヒホッフの法則より

$$I_p = I_{i1} - I_{e1} = I_{e2} - I_{i2} \tag{8}$$

(8)式を変形し、総イオン電流を ΣI_i とすれば

$$I_{i1} + I_{i2} = \Sigma I_i = I_{e1} + I_{e2} \tag{9}$$

ここで、 I_{e1} , I_{e2} は単探針法の所で述べたように次式であらわされる。

$$I_{e1} = I_{es1} \exp\left(-\frac{eV_1}{kT_e}\right) \tag{10}$$

$$I_{e2} = I_{es2} \exp\left(-\frac{eV_2}{kT_e}\right) \tag{11}$$

ただし、

I_{es1} , I_{es2} : P_{r1} , P_{r2} の飽和電子電流

V_1 , V_2 : P_{r1} および P_{r2} とそれぞれの近傍のプラズマの間の電位差 (Fig. 5 参照)。

これらの式より次式が得られる。

$$\ln\left(\frac{\Sigma I_i}{I_{e2}} - 1\right) = -\left(\frac{e}{kT_e}\right)V_p + \text{const.} \tag{12}$$

(12)式から電子温度を決定する方法には 2 つの方法がある。

1) 等価抵抗法

$I_p - V_p$ 特性で $V_p = 0$ 付近の I_p の傾斜のみから電子温度を求める方法である。(12)式を変形整理すると、

$$T_e = \frac{e}{k} (G - G^2) R_0 \Sigma I_i \tag{13}$$

となる。ただし

$$\Sigma I_i = [I_{i1} + I_{i2}] V_p = 0$$

$$G = \left[\frac{I_{e2}}{\Sigma I_i} \right]_{V_p=0}$$

$$R_0 = \left[\frac{dV_p}{dI_p} \right]_{V_p=0}$$

2) 対数プロット法

$\ln\{(\Sigma I_i / I_{e2}) - 1\}$ を y 軸に、 V_p を x 軸にとってグラフを描き、その傾きから温度を求める方法である。

更に詳細な電子温度導出の手続きは付録(2)に記す。

3. 実験装置

放電管は Fig. 7 に示すように内径 70 mmφ、軸長 500mm でアルゴンガスが 10 mtorr. で封入されている。電極は 30 mmφ の円板で材料はモリブデンである。

プローブは円筒プローブと平面プローブを用い、その形状を Fig. 8 に示す。材料はタングステンである。各プローブを陰極側から Pr 1, Pr 2, …… , Pr 6 と呼ぶことにする。

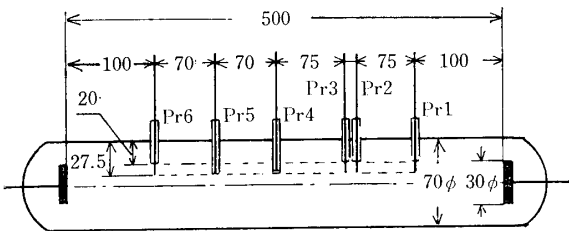
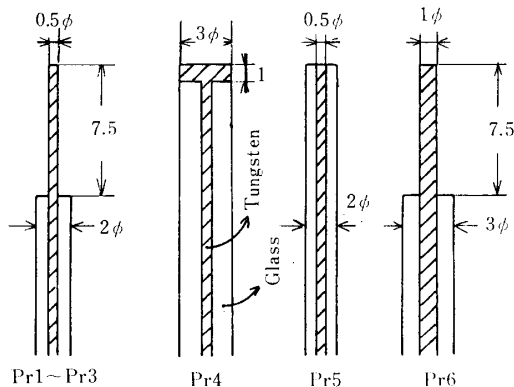


Fig. 7 Discharge tube



Cylindrical probe Plane probe Plane probe Cylindrical probe

Fig. 8 Probe configuration

放電用の電源回路は Fig. 9 に示すような半波整流倍電圧方式にし、出力電圧の調整は電圧調整器を使用する。なお D はダイオード (SRH 25C), C はコン

デンサー (2 μF, 耐圧 20kV), Tr は単相変圧器 (5 kVA, 2次電圧 6.6kV) である。

プローブ電圧は蓄電池と可変抵抗器によって 0 ~ 450V まで可変できる。

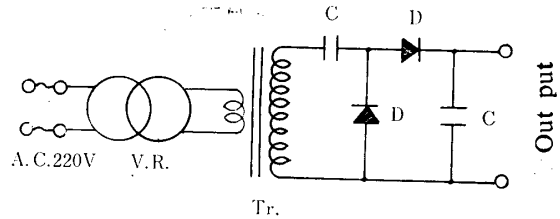


Fig. 9 Source circuit

4. 実験結果と考察

4.1 グロー放電特性

Fig. 10 は放電管のグロー放電領域における電流-電圧特性曲線を示す。dV/dI が負, 0, 正に対してそれぞれ前期, 正規, 異常グロー放電になっている。前期グロー放電で V が低下する理由は、電離が容易になること、および損失が減少するというプロセスが生ずるためであると考えられる³⁾。

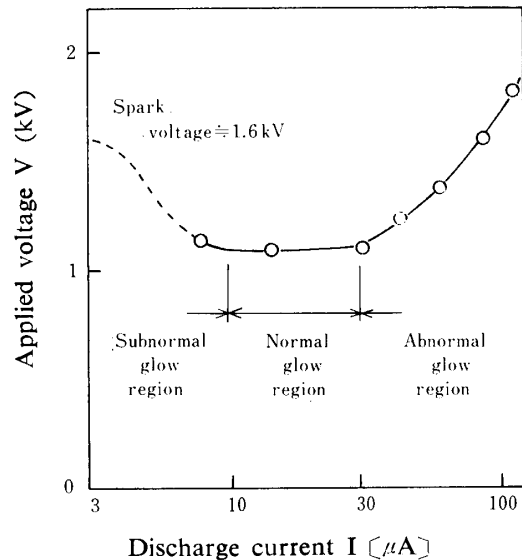


Fig. 10 Discharging characteristics of applied voltage vs. current

このグロー放電で現われる代表的な発光状態を Fig. 11 に示す。陰極近傍には赤紫色の陰極グローがあり、その陽極側にはクルックス暗部、負グローが現われる。風光色に光る負グローは徐々に暗くなってフェラデー暗部に移行し、その陽極端にはもっとも明るくかつ境界のはっきりした陽光柱があって陽極に到る。

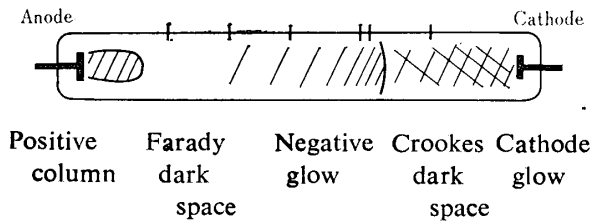


Fig. 11 Fluorescence

Fig. 12 は放電電流を変化させた場合のプラズマ柱の様子を写真撮影したもので、露出時間は10秒である。左側が陽極で右側が陰極である。陰極近傍の管壁は陰極飛散現象 (sputtering) のため管壁が黒くなってプラズマ柱は見えない。

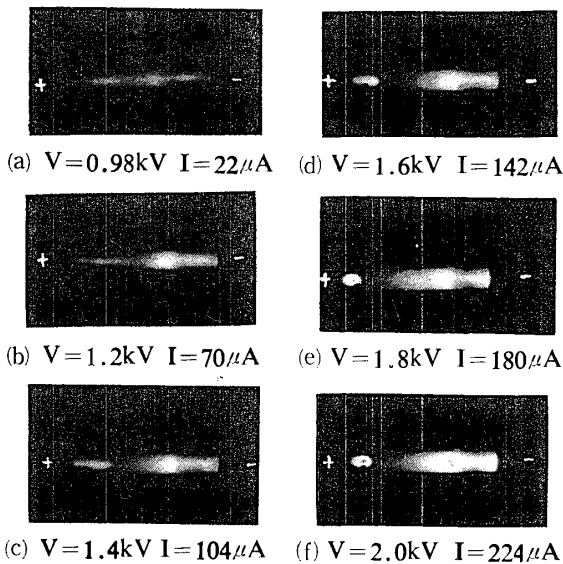


Fig. 12 Variation of fluorescence

4・2 浮遊電位分布, 電子温度, 電子密度

4・2・1 浮遊電位分布

Fig. 13 に浮遊電位分布を示す。この装置では直接陰極部の電界を測定することはできないので、負グローの陰極端にある Pr 2 の浮遊電位と陰極電位との差を距離で割った値を電界の強さとすれば、放電電流 $20\mu\text{A}$, $42\mu\text{A}$, $100\mu\text{A}$ についてそれぞれ 50V/cm , 60V/cm , 90V/cm となった。放電電流の増加に伴って電界が強くなっているのは、陰極表面に現われる正空間電荷が増すからである。

4・2・2 電子温度, 電子密度

本実験では負グロー領域 (Pr 4: 単探針, Pr 2 Pr 3: 複探針) での $I_p - V_p$ 特性を得た。

1) シングルプローブによる測定

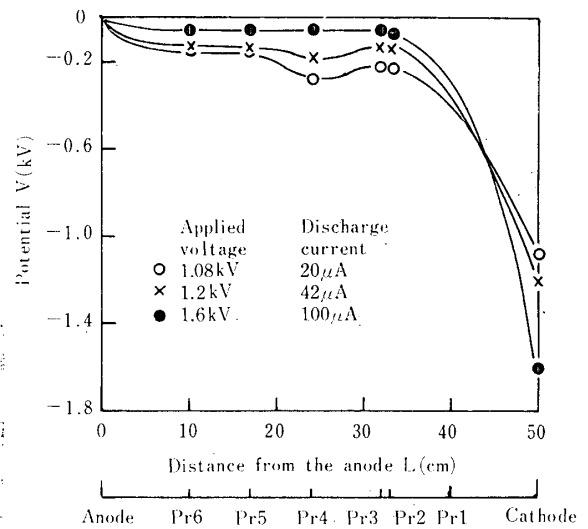


Fig. 13 Floating potential distribution

放電電流を変化させた時の Pr 4 の特性を Fig. 14 に、この特性曲線から求めた電子温度 T_e , 電子密度 n_e を Table 1 に示す。陽光柱の領域および陰極暗部では V_p と $\ln I_p$ が比例せず電子温度の導出は困難であった。これはこの領域における粒子が非マックスウェル速度分布をしているためであると思われる。

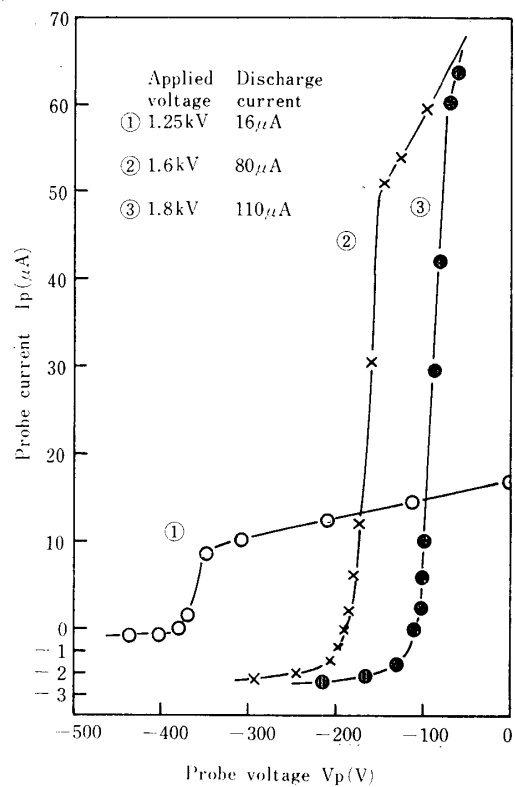


Fig. 14 Voltage-current characteristic of the single probe method

Table 1 Experimental results measured by the single probe method

| Parameter | State | Abnormal glow discharge | | |
|---------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| | Normal glow discharge | | | |
| Applied voltage [kV] | 1.25 | 1.6 | 1.8 | 2.3 |
| Discharge current [μ A] | 16 | 80 | 110 | 290 |
| Electron temperature [$^{\circ}$ K] | 41000 | 45000 | 46000 | 10000 |
| Electron density [cm^{-3}] | 1.5×10^8 | 8.5×10^8 | 8.4×10^8 | 2.2×10^9 |

2) ダブルプローブによる測定

ダブルプローブ (Pr 2, Pr 3 を使用) による測定結果を Table 2 に示す. 電子温度を求めるには前述のように等価抵抗法と対数プロット法があり, 両者は放

電電流が約 $100 \mu\text{A} \sim 160 \mu\text{A}$ ではほぼよい一致を示している. 放電電流が小さい場合, また大きすぎる場合にも共に粒子は非マックスウェル分布を示した.

Table 2 Experimental results measured by the double probe method

| Parameter | State | Abnormal glow discharge | | |
|--|-------|-------------------------|------|------|
| | | | | |
| Applied voltage [kV] | | 1.4 | 1.5 | 1.6 |
| Discharge current [μ A] | | 111 | 137 | 160 |
| Electron temperature by logarithmic plot method [$^{\circ}$ K] | | 11000 | 7100 | 4800 |
| Electron temperature by equivalent resistance method [$^{\circ}$ K] | | 11000 | 6700 | 4500 |

4.2.3 電気伝導度

ボルツマン理論によれば電子ガスを仮定した場合, 電気伝導度は $\sigma = ue / (m\nu_m)$ であらわされる. 負グローの陽極側の平均粒子密度 $n = 8 \times 10^8 \text{cm}^{-3}$ を代入すると, $\sigma = 22.4\bar{\sigma} / m$ となった. ただし衝突周波数 ν_m は文献¹⁾ により $\nu_m = 10 \times 10^5 \text{sec}^{-1}$ (at 10 mtorr.) を用いている.

4.3 放電電流の増加に伴う陰極暗部の厚さの減少

放電電流の増加に伴って陰極暗部 (陰極グロー, クルックス暗部) の厚さは減少する. Fig. 12 の写真から厚さを求め, 陰極降下電圧 V_c との関係を図. 15

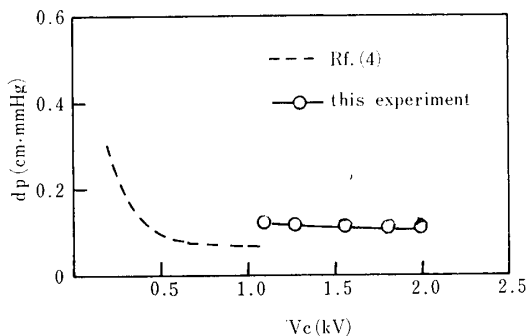


Fig. 15 Relation between cathode fall V_c and pd

に示した. 点線は文献⁴⁾ のデータであるが, 本実験値は点線の延長上にはほぼよい一致を示している. 本実験のような V_c が高い領域ではほぼ飽和状態になっている.

5. 結 言

低気圧アルゴン放電管で発生されるグロー放電の探針法による計測を行なった結果, 以下のようなことが明らかになった.

- 1) 負グローが放電柱の大部分を占め, 陽光柱領域は軸長の 1/3 に満たない.
- 2) 放電電圧が kV オーダー以上なる放電管ではシングルプローブによる測定は困難で, ダブルプローブの方が適している.
- 3) 正規グロー放電と初期の異常グロー放電の負グローで, 粒子はマックスウェル分布を示した.
- 4) 負グローの陽極側の電子温度, 電子密度, 電気伝導度はそれぞれ, $T_e \approx 5 \times 10^4 \text{K}$, $n_e \approx 8 \times 10^8 \text{cm}^{-3}$, $\sigma = 22.4\bar{\sigma} / m$, 陰極側の電子温度は $T_e \approx 8 \times 10^3 \text{K}$ であった.
- 5) 放電電流の増加に伴い陰極暗部の厚さは減少する. 本実験は文献⁴⁾ では与えられていない領域に対す

る V_c - p_d 特性を得た。

終りに、日頃ご指導を賜わる佐伯節夫助教授に深く感謝の意を表わす。また本実験を行なうにあたり御協力いただいた大崎堅助手に謝意を表わす。

参 考 文 献

- 1) 八田吉典：気体放電，近代科学社 (1960) P 116
- 2) E O. Jonson & L. Malter, Phys. Rev., 80, 58 (1930)
- 3) A. von Engel 原著，山本賢三・奥田孝美訳：電離気体，コロナ社 (1968) P 207
- 4) 文献3) の P 212

(昭和48年9月14日受理)

付 録

(1) 単探針法による電子温度の決定について

(7)式において $\ln I_p$ を y 軸に， V_p を x 軸にとってグラフを描けばその傾きから電子温度が求まるが，片対数グラフから電子温度を求めるためには自然対数に換算する必要がある。そこで $V_p = V'$ なる点を決め，その時の I_p を I_p' とし， I_p'/e (e は自然対数の底) なる点の V_p を V'' とすれば，

$$I_p' = I_{es} \exp\left(-\frac{eV'}{kT_e}\right) \quad (付1)$$

$$\frac{I_p'}{e} = I_{es} \exp\left(-\frac{eV''}{kT_e}\right) \quad (付2)$$

(付1) 式を (付2) 式で割って整理すると

$$|V'' - V'| = \frac{k}{e} T_e \quad (付3)$$

となり， $\Delta V = |V'' - V'|$ を求めれば簡単に電子温度を求めることができる。

一例として Fig.14②のプロープ特性をとって片対数グラフに示したのが Fig. 16 である。 $I_p' = 10\mu A$ の時 $V' = -176.1V$ ，また $I_p'/e = 3.7\mu A$ の時 $V'' = -180.0V$ から

$$T_e = \frac{e}{k} |V'' - V'| = 45000^\circ K \quad (付4)$$

を得る。

(2) 複探針特性による電子温度の決定について

一例として放電電流 $137\mu A$ ，放電電圧 $1.5KV$ の複探針特性を Fig. 17 に示す。

(i) 等価抵抗法

$|V_p|$ 大なる所で接線をひき特性曲線とはずれる点をそれぞれ A, B, 接線の延長上縦軸との交点を A', B' とする。 $V_p = 0$ の時の I_2 としては AA' を 4 : 1 に内分した点を取り， I_{11} は BB' を 4 : 1 に内分した

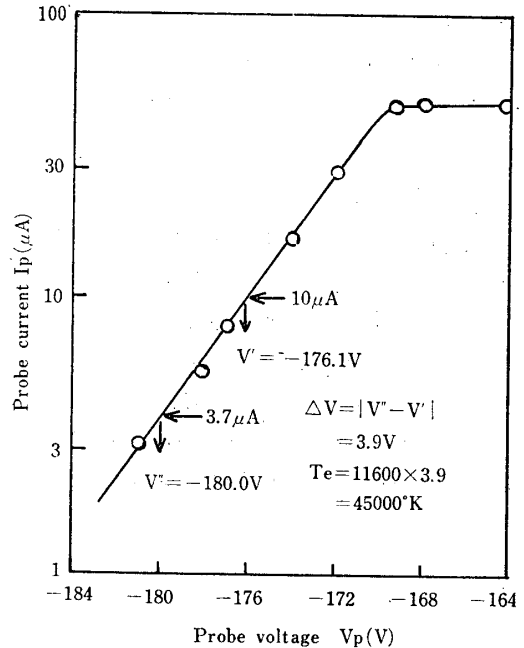


Fig. 16 Single probe temperature determination plot ($V = 1.6KV$, $I = 80\mu A$)

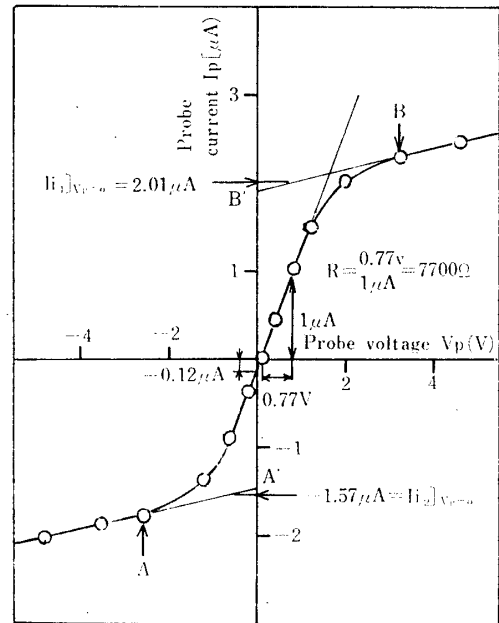


Fig. 17 Equivalent Resistance Method (Applied voltage $V = 1.5kV$ Discharge current $I = 137\mu A$)

点をとると， $I_{2[V_p=0]} = 3.58\mu A$ ， $I_{1[V_p=0]} = 2.01\mu A$ となる。よって $\Sigma I_{i[V_p=0]} = 1.57 + 2.01 = 3.58\mu A$ 。次に $V_p = 0$ の時の曲線の傾きは $V_p = 0$ の点で接線の傾きを求めればよいから $R = dV_p/dI_p|_{V_p=0} = 7700\Omega$ 。 I_{e2} は図に示したように $I_{2[V_p=0]} - |I_p| = 1.57 - 0.12$

$=1.45 \mu A$ で、 $G=I_{e2}/\Sigma I_i=1.45/3.58=0.405$ となる。これらを(13)式に代入すれば

$$T_e=11600 \Sigma I_i R(G-G^2)=6700^\circ K$$

を得る。

(ii) 対数プロット法

等価抵抗法と同様に折れ曲がりの点 A, B を求め、その点の I_p を基準の I_{i1}, I_{i2} とする。 $\Sigma I_i=I_{i1}+I_{i2}=2.28+1.87=4.15 \mu A$ であるから、これを用いて $\Gamma=(\Sigma I_i/I_{e2})-1$ を計算し片対数グラフにあらわしたのが Fig. 18 である。 $\Gamma=2.718$ (自然対数の底) の時の V_p は $-0.40V$, $\Gamma=1$ の時の V_p は $0.21V$ だから

$$T_e=11600(0.21+0.40)=7100^\circ K$$

となる。

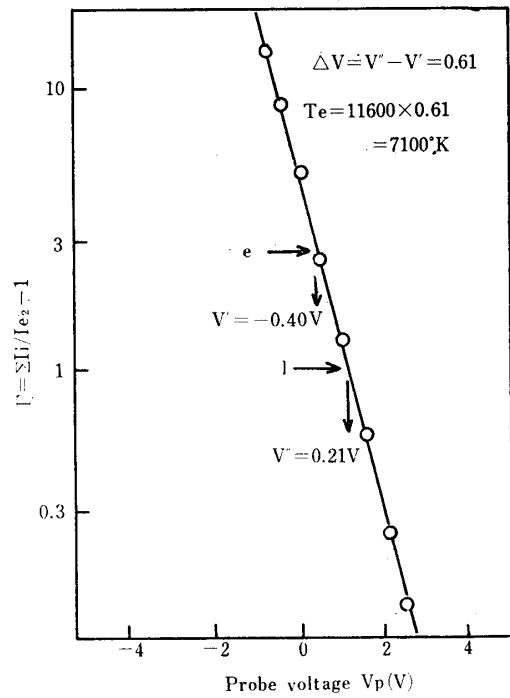


Fig. 18 Logarithmic plot method
($V=1.5kV, I=137 \mu A$)