特殊 P I G 型 プラズマ源*

名大プラズマ研

本沢忠夫・相原秀行**

河合良信

(昭和45年10月7日受理)

Abstract

The experimental study is described of a plasma source of modified PIG-type. The source is operated in a magnetic field of moderate intensity, which changes seriously the motion of the electron component of plasma, but does not change so much that of the ion component. Since the usual plasma region of the source for various applications is separated by a grounded metallic mesh grid from the discharge region, fairly noiseless plasmas can be obtained with the source under a suitable condition in spite of the operation in a magnetic field. In addition, it is noted that for these plasmas the ion-temperature is several times higher than the electron-temperature and somewhat controllable, and that there are contained neither electronic nor ionic beams.

§1 はじめに

静磁場中で得られるプラズマは、普通種々の振動を含んでおり、noisy になってしまう場合が多い。それ故、磁場内で静かなプラズマをつくることはむずかしいが、もしそれが実現すれば、諸々のプラズマ物理の基礎実験を進めるにあたって大いに役に立つことが期待される。

また、無衝突なプラズマ中でのイオン波の振舞いは電子温度とイオン温度との比 T_e/T_i に依存して大きく変る¹⁾。例えば、イオン波の Landau damping には T_e/T_i 依存性が顕著に現われる。 $T_e \gg T_i$ ではその damping は割に弱い、 $T_e \lesssim T_i$ では非常に強い。このことから $T_e \lesssim T_i$ なる条件を意識的につくってやり、イオン波を通じてのイオン加熱を行うのもおもしろい。

以上のようなことを念頭において、我々は磁場中で動作するプラズマ源の開発を進めてきた。

* A Modified PIG-Type plasma Source

** Tadao HONZAWA, Syuko AIHARA and Yoshinobu KAWAI,
Institute of plasma physics, Nagoya University

そして、 $T_e < T_i$ なる条件を満し、而も静かなプラズマをつくることに成功した。ここではその実験の方法、結果について報告する。

§ 2 プラズマ源の概略

プラズマ源は第1図(b)に示すように円筒形をしており、その軸と磁場方向(Z 方向)とが平行になるように、一様で、中程度の強さ($B_0 = 50 \sim 400$ G)の静磁場内に設置して動作させる。そして、その構造は第1図(a)のように、外側から内側へ陽極A、放電用の棒状カソード群 K_1 、グリッドG、イオン雲中和用の棒状カソード群 K_2 の順で夫々が同心円上に配置されるようになっている。ここで K_1 とGは電氣的に接続され接地されている。また、コイルに流れる電流 I_B と静磁場 B_0 との関係を示しておくとき $I_B = 1.0$ A のとき $B_0 = 350$ G となっている。

カソード群 K_1 から放出される熱電子は AK_1 間にかかっている電場 E_1 と静磁場 B_0 のために領域Iにおいてマグネトロン運動をしながら残留ガスを電離させプラズマを発生させる。このプラズマはかなりnoisyである。こうして得られたプラズマ中のイオン成分は E_1 による加速で、或いは拡散により、グリッドG面に達し、その面を通過後は GK_2 間の電場 E_2 のために加速され、同時に K_2 から放出される熱電子により中和されて領域II内にプラズマとなって溜る。そして、最後には z 方向へ拡散していく。この際、イオン成分に対する磁場の影響はそれ程大きくないと考えて、あまり問題にしなかった。事実、我々の実験条件(Ar , $T_i \gtrsim 4$ eV, $B_0 \lesssim 350$ G)の下では、イオンのジャイロ半径はプラズマ源の大きさよりも大きくさえなっていた。こうして得られた領域II内のプラズマは、磁場中でつくられたものであるにもかかわらず、かなり静かであり、次節で記すような諸性質を有している。

第1図 プラズマ源の構造

特殊PIG型プラズマ源

そのプラズマの診断は、第2図のように、探針プローブとエネルギー分析器（ファラデー・カップ）とを使って、源から少し離れたところ（z軸上）で行った。ここで測定系をも含めた装置全体はミラー磁場内におさまられているが、そのミラー比は1.5となっている。

第2図 装置の概略図

§ 3 プラズマの諸性質

前述のプラズマ源を使って領域Ⅱ内で得られるプラズマの諸特性を探針プローブとエネルギー分析器を用いて測定した。測定は源から少し離れた地点で、磁場に沿って拡散してくるプラズマを対象に行っているが、得られた結果は領域Ⅱのプラズマの特性に近いものを与えていると考えて差し支えないであろう。

A イオン電荷の中和

放電領域Ⅰで発生して後、グリッド面Gを通り抜けて領域Ⅱ内に入ってくるイオン群は自分がつくる空間電荷場でカソード K_2 の表面から熱電子を引き寄せ、中性化され、プラズマになってその領域内に溜る。もし、この中性化が不十分である場合には、そのイオン雲の空間電荷による斥力で領域ⅠからⅡへのイオンの補給は止まってしまう、その結果領域Ⅱには非常に少量のプラズマが溜るに過ぎないということになる。

上述の考え方の正しさは、実験的にも裏付けられた。カソード K_2 の温度を下げてその熱電子放出量を低下させると、密度が低く、而も中性化が不完全なイオン雲が得られた。例えば、 K_2 を off にした状態で

$$n_i \simeq 10^6 \text{ cm}^{-3}, n_e = 10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

のものが得られた。しかし、 K_2 の熱電子放出量を充分に増大させると中性化は殆んど完全に行われるようになり、同時にプラズマの密度もかなり増してくる。以下では、このようにして得ら

れたプラズマの諸性質について述べる。

B プラズマの空間分布

空間分布といっても，プラズマは磁場に平行方向（ z 方向）には割に一様に分布していると考えられるので，ここでは垂直方向（ r 方向）の分布のみを考慮することにする。

まず，電子密度 n_e の分布を考えてみると，第3図の如く， $r \simeq 0$ のところで最大となって，それから離れるにつれて急激に減少している。その分布の半値幅 d を求めてみると $d \simeq 2\text{ cm}$ 程度になっている。この d の値は，カソード群 K_2 が第1図(a)に示すように円周上に配置されている場合，その円の直径（ $\simeq 2\text{ cm}$ ）にほぼ一致している。

電子温度 T_e 及び空間電位 V_s についてみると， $r = \pm 1\text{ cm}$ の範囲にわたって夫々がほぼ一定値を示している。これは，領域 II 内のプラズマ中の電子成分の殆んどすべてのものが中和用カソード群 K_2 の表面から供給されたということを暗示しているように思われる。

第3図 プラズマの空間分布（ r - 方向）

$p = 2.2 \times 10^{-4} \text{ Torr (Ar)}$, $I_B = 1.0 \text{ A}$, $V_d = 140 \text{ V}$,
 $V_{K2} = -14 \text{ V}$

C 電子密度

プラズマの電子密度 n_e はプローブに流れ込む飽和電子電流 I_{es} から求められた。種々のパラメータによってかなり大幅に変わりますが、4図は磁場の強さ B_0 、ガス圧 P 、カソード K_2 の電位 V_{k2} 等を一定に保ちつつ、放電電圧 V_d を変えた時の n_e の変化を示している。 V_d の増加と共に急増してゆく様子がうかがえる。

第4図 プラズマ密度 n_e と放電電圧 V_d との関係

$P = 2.2 \times 10^{-4} \text{ Torr (Ar)}$, $I_B = 1.0 \text{ A}$, $V_{k2} = -20 \text{ V}$

第5図には、 B_0 、 P 、 V_d を一定に保つた状態で n_e が V_{k2} にどのように依存しているかを示した。ここでは、磁場の強さ(コイルに流れる電流 I_B で表示)をパラメータとして変えている。この図から n_e は I_B には余り依存せず、 V_{k2} が低下する程($|V_{k2}|$ は増加) n_e は増えていることがわかる。これは、放電領域Ⅰ内で生じ、拡散でグリッド面へ到達するイオンを領域Ⅱ側へ引き込む作用が V_{k2} を低下させる程増すためであると解釈される。

第5図 n_e と中和用カソードの電位 V_{K2} との関係

$p = 2 \times 10^{-4}$ Torr (Ar), $V_d = 140$ V

ガス圧 P の変化に伴う n_e の増減の模様を第6図に示す。 P を増せば放電領域内のプラズマの密度も増大するから n_e が増すのは当然といえるが、 n_e が飽和状態になりたす理由をはっきりしていない。

第6図 n_e とガス圧 p (Ar) との関係

$I_B = 1.0$ A, $V_d = 140$ V, $V_{K2} = -10$ V

特殊PIG型プラズマ源

D 電子温度と空間電圧

前の小節Bでも述べたように、電子温度 T_e とプラズマの空間電位 V_s とは空間的にはプラズマ全域にわたってほぼ一様になっている。 T_e についてみると、これは種々のパラメーターによってはそれ程大きな増減を示さず、 $0.6 \sim 2.0$ eVの範囲で僅かな変化がみられるに過ぎない。

第7図からわかることは、 T_e は V_d には殆んど影響されていないことである。

第7図 電子温度 T_e 、プラズマの電位 V_s の V_d 依存性

$p = 2 \times 10^{-4}$ Torr (Ar), $I_B = 1.0$ A, $V_{K2} = -20$ V

第8図 T_e と V_{K2} との関係 $p = 2 \times 10^{-4}$ Torr (Ar), $V_d = 140$ V

しかし第8図が示している如く、中和用カソードの電位 V_{K2} には多少依存しているらしい。磁場が極めて弱い場合 ($I_B = 0.2$ A) を別にすると、

$I_B \gtrsim 0.5$ Aの状態では V_{K2} が減少 ($|V_{K2}|$ は増加) する程 T_e は増す傾向にあるといえる。また、 T_e のガス圧 P に対する依存性も顕著ではない。

(第10図参照)

次に V_s について考えると, V_{K2} 以外のパラメーターに対し殆んど影響されていない。(第7図と第10図参照)しかし, V_{K2} には大いに関係している。第9図からわかるように, V_s は V_{K2} に比例して変る。

第9図 V_s と V_{K2} との関係 $p = 2 \times 10^{-4}$ Torr (Ar),
 $V_d = 140$ V

第10図 T_e , V_s の p 依存性 (Ar) $I_B = 1.0$ A, $V_d = 140$ V,
 $V_{K2} = -10$ V

特殊PIG型プラズマ源

両者の差 $V_s - V_{k2} = -13V$ が I_B に殆んどよらず一定値に保たれていることはどういう理由によるものかは定かではないが、恐らくその差は電子とイオンのジャイロ半径に大きな差があるためによって生ずるのであろう。この考えによれば、源直下では $V_s \simeq V_{k2}$ となっているが、 z 方向に離れるにつれて V_s と V_{k2} には差が生じてくることになる。

E イオン温度

この実験では、イオン温度 T_i はファラデー・カップを用いてイオンのエネルギー分布を測定し、その分布の高エネルギー側への傾斜から算出する方法で求めている。

ところで、この T_i は、 T_e が各種パラメーターには余り依存せず一定値 ($\sim 1eV$) に近い値を示したのに反して、各パラメーターによってかなり増減することが観測された。

第11図には T_i と V_d との関係が示されているが、これから、 V_d を増すと T_i も増大してゆく様子がうかがえる。

第11図 イオン温度 T_i と V_d との関係

$p = 2 \times 10^{-4}$ Torr (Ar), $I_B = 0.3$ A, $V_{k2} = -3$ V

T_1 (eV)

また, T_1 の中和用カソードの電位 V_{K2} に対する依存性を示すと第12図のようになるが, これからいえることは $I_B \gtrsim 0.4$ A では T_1 は余り I_B にはよらないこと (このことは第13図からもうかかえる), また $V_{K2} \simeq -10$ V 近傍で最大となるような僅かな V_{K2} 依存性を示していることの二つである。

←

第12図 T_1 の V_{K2} 依存性

$p = 2.2 \times 10^{-4}$ Torr (Ar)
 $V_d = 140$ V

T_1 (eV)

第13図 T_1 の磁場強度 B_0 に対する依存性

(I_B : コイル電流) $p = 2 \times 10^{-4}$ Torr (Ar),
 $V_d = 140$ V, $V_{K2} = -3$ V

特殊PIG型プラズマ源

更に、 T_i とガス圧 P との関係は第14図に示すようになっている。これから、 T_i は I_B の如何によらず、 P の増加と共に多少増大する傾向にあるといえよう。この理由は、イオンは領域 I 内の電場 E_1 や領域 II 内の電場 E_2 によって加速され運動エネルギーを得るが、このエネルギーが粒子同志の衝突のため熱化される割合が P の増加と共に大きくなることにあるように思われる。

第14図 T_i の p 依存性 (Ar)

$$V_d = 140 \text{ V}, V_{K2} = -10 \text{ V}$$

以上のように、この種のプラズマ源でつくられたプラズマにおいては T_i は T_e より 2~8 倍大きくになっていることは確かである。このことは、このプラズマの特徴の一つといえる。

F 振動の抑制

プラズマ中に存在する振動の検出にはプローブを用い、それからの信号をオシロスコープに導き観察を行った。

検出される主たる振動は或る一、二の周波数に限られる場合が多く、white noise 的になるのはまれであった。この周波数は各種パラメータの選び方によって 1 KHz 程度から 300 KHz 程度まで大幅に変わりうるが、その変わり方については、ここでは詳しくは調べていない。

それよりも、この実験では、できるだけ静かなプラズマをつくるという立場から、それらの振動をどの程度抑えうるかを問題にした。そのために、§ 2 でも触れたように、プラズマ源の構造上の面で工夫をこらした。動々の振動が起き易い放電領域 I と静かなプラズマを発生させる領域

Ⅱとを接地されたグリットGで隔離するようにしたのである。このようにすることて、領域Ⅰの振動がGによりかなりノールトされ、領域Ⅱのプラズマは割に静かになることが実験でも確認された。その効果は、例えば、或る条件の下で、グリット無しの場合、振幅 $\tilde{V}_{pp}=70\sim 200\text{ mV}$ もあった振動が、グリットを付けることにより $\tilde{V}_{pp}=1\sim 10\text{ mV}$ にも抑えられたことに現われている。

グリットの振動に対するノールト効果は、 V_d を余り大きく($>200\text{ V}$)したり、 I_B を小さく($\lesssim 0.2\text{ A}$)したりすると、放電領域Ⅰのプラズマの密度が増大し過ぎグリット作用が効かなくなるためか、減少してしまい、領域Ⅱのプラズマもよりnoisyになる。しかし、 $I_B \gtrsim 0.4\text{ A}$ 、 $V_d < 200\text{ V}$ 、 $p \lesssim 3 \times 10^{-4}\text{ torr}$ では振動の振幅が $\tilde{V}_{pp} \lesssim 5\text{ mV}$ であるような静かなプラズマが割に簡単に得られる。

§ 4 結 び

この報告では、中程度の強さ($50\sim 400\text{ G}$)の一樣な磁場中で動作する新しい形のプラズマ源とそれによって得たプラズマの諸性質について述べた。このプラズマ源は後方拡散型プラズマ源²⁾の変形とも或いはPIG型プラズマ源の変形ともいえる。その一つの特徴は放電でプラズマを発生させる領域と色々な目的のためにプラズマを溜めておく領域とを接地したグリットによって隔離することにより、放電領域で発生し易い振動・雑音がプラズマ溜めの方に伝わらないようにできる点にある。そのため、磁場中でありながら、割に静かなプラズマを発生させうる。しかし、グリットの振動に対するノールト効果は、放電領域のプラズマの密度が増大してきてグリット作用がなくなる位になると、激減してしまい、得られるプラズマもnoisyになってしまう。したがって、より密度の高い静かなプラズマを得るためには網の目の細かいフリットを用いねはならない。

もう一つの特徴としては、得られるプラズマのイオン温度が電子温度よりも数倍高いことである。これは、電子温度はneutralizer表面の温度やそれとプラズマとの間の接触電位差によって決定されるので割に低温($\sim 1\text{ eV}$)に保たれるのに反し、イオン温度の方は放電用電場 E_1 ($\sim 40\text{ V/cm}$)やグリット面からの引き出し電場 E_2 ($\sim 10\text{ V/cm}$)による加速で得たエネルギーの幾分か温度化されるので高温になり易いことによるものと思われる。

更に、この種のプラズマ源ではマクネトロン運動をさせて電子の行程をのばせるので、低いカス圧の下で放電を起させうる点、それから、ヒームを含んでいない点も特徴といえよう。

最後に、色々と有益な助言をしてくださった高山一男教授に謝意を表しておきたいと思います。

参 考 文 献

- 1) B.D.Fried and R.W. Gould: Phys. Fluids, 4 (1961) 139
- 2) K.Takayama, H.Ikegami and S.Aihara: Proc. 8th Intern.
Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Vienna (1967) 552