シートプラズマによる H^- , D^- イオン電流の測定法と確認

浦 本 上 進*

(昭和60年3月18日 受理)

Measuring Method and Confirmation of H^- , D^- Ion Current by Sheet Plasma

Jōshin URAMOTO

(Institute of Plasma Physics, Nagoya University, Nagoyashi, Aichi)

(Received March 18, 1985)

Usually, it is very difficult to separate an electron current from H^- or D^- ion current under volume production, because both electrons and H^- or D^- ions are extracted from a discharge plasma in H_2 or D_2 gas. However, H^- or D^- ion current by volume production in the sheet plasma can be easily separated from electron current by using the weak magnetic field applied to the sheet plasma itself. Then, if the H^- or D^- ion current is compared with positive ion (mainly H_3^+ or D_3^+) current which is extracted by changing sign of the acceleration voltage from plus (for H^- or D^- ion) to minus, the H^- or D^- ion current can be confirmed more exactly.

1. はじめに

シートプラズマ中で H^- , D^- イオンが効率よく空間生成 (Volume Production) されることはすでに本誌に発表されている^{1,2)}. しかしながら, 質量分析器で H^- , D^- イオンの存在と相対値 (その Faraday Cup への電流値) を測定しても, 引き出された H^- , D^- イオンの全電流を決定することは困難である. 何故なら, 同符号の荷電粒子である電子も同時に加速されて引き出され, その分離が一般に簡単でないからである.

この論文ではシートプラズマが沿っている弱磁場 (50~80 gauss) を利用して, H^- , D^- イオン電流と電子電流を分離する簡単な方法を実験的に示し, また水素, 重水素の正イオンを引き出し比較することによって確認する方法を示す.

2. 実験装置と測定法

Fig. 1 は H^- , D^- イオン電流をシートプラズマから引き出し測定する実験装置の構成図であり, シートプラズマの断面 (S.P.), H^- , D^- イオンの加速引き出し電極

(L, M, E) 及び移動型 Faraday Cup (F.C.) が示されている. シートプラズマはすでに発表した様に, 厚みが約 1.0 cm (密度の半値幅), 幅が約 14 cm であり, z 軸方向の磁場 B_z に沿って生成されている. 3 枚の H^- , D^- イオン引き出し電極には約 4 cm² の面積に 6 mmφ の引き出し孔が 9 ケ開けられている. 第 1 引き出し電極 L のバイアス電圧はプラズマの浮動電位近く ($V_L \approx -5V$) に設定され, 第 2 引き出し電極 (M) と第 3 引き出し電極 (E) の電位 V_M と V_E は H^- , D^- イオンのエネルギーに対応して変えられている (V_M は V_E の約 13%²⁾ に保たれている). V_M, V_E の極性は負イオン (H^-, D^-) を引き出すときは正であり, 正イオン (H_3^+, D_3^+ が主) を引き出すときには負に変えられる. Fig. 1 で Faraday Cup 移動の範囲の磁場 B_z は約 50 gauss である. Fig. 2 に H_2 ガス ($\sim 1.5 \times 10^{-3}$ Torr) の放電で陽極電流約 8A のときの負電流 (H^- イオン電流と電子電流, $I^- + I_e$) 或いは正イオン電流 (H_3^+ イオン電流, I^+) と, 第 3 引き出し電極 E (加速エネルギーを決定) と Faraday Cup 間の距離 y' の関係が示されている. Fig. 2 からわかるように正イオン電流 I^+ は y' に依存しない. これに対して負電流 ($I^- + I_e$) は y' に依存し, 加速電圧 $V_E = 1$ kV では $y' > 1.5$ cm で減少し一定になり,

* 名古屋大学プラズマ研究所 (名古屋市千種区不老町)

Fig. 1 Schematic Diagram of H⁻ or D⁻ Ion Current Measurement.

S.P.: Sheet Plasma (14 cm wide and 1.0 cm thick).

z: Direction along S.P.

B_z: Axial Magnetic Field along S.P.

GT: Glass Tube.

L: First Extraction Electrode with 9 apertures of 6 mmφ.

M: Second Extraction Electrode with 9 apertures of 6 mmφ.

E: Third Extraction Electrode with 9 apertures of 6 mmφ.

F.C.: Faraday Cup to measure Total H⁻ or D⁻ Ion Current.

y': Distance between E and F.C.

e: Accelerated Electrons.

I⁻: H⁻ or D⁻ Ion Current.

I⁺: H₃⁺ Ion Current.

$V_E = 3.5$ kV では $y > 3.5$ cm で減少し一定になる。これは次のように電子のサイクロトロン半径 (Fig. 1 参照) から説明できる。即ち、電子のサイクロトロン半径 r_{ce} (cm) は電子のエネルギーを V_E (eV)、磁場を B_z (gauss) とすれば

$$r_{ce} = \frac{3.4\sqrt{V_E}}{B_z} \quad (1)$$

であり、この実験条件で $B_z = 50$ gauss とすれば $V_E = 1$ kV に対して $r_{ce} = 2.0$ cm, $V_E = 3.5$ kV のとき $r_{ce} = 4.0$ cm となる。かくして Fig. 2 に示した負電流 ($I^- + I_e$) が減少し一定に近づく距離は電子のサイクロトロンカットオフ半径に近いことがわかる。一方、 $B_z \approx 50$ gauss の弱磁場は、イオンに対してはそのエネルギーが 1 kV 以上であれば軌導に殆んど影響しない。何故なら H⁻ 或いは H⁺ イオンのサイクロトロン半径 r_{ci} (cm) は

$$r_{ci} = \frac{1.4 \times 10^2 \sqrt{V_E}}{B_z} \quad (2)$$

であり、 $B_z \approx 50$ gauss, $V_E = 1$ kV とすれば、 $r_{ci} \approx 89$ cm となるからである。従って H⁻, H₃⁺ イオン電流はこの実験の弱磁場に影響されないで y' によって変らない。結局電子電流のみがカットされて H⁻ (D⁻ イオンも同様) イオン電流が測定可能になる。

以上のようにシートプラズマから引き出された H⁻ イオン電流は、そのシートプラズマの磁場を利用して電子を簡単に分離できる。即ち、H⁻ イオン電流は Fig. 1 で $y' > r_{ce}$ に Faraday Cup を置くことによって測定できる。

この測定法で放電電流 I_A と H⁻ イオン電流 I^- 及び水素の正イオン (H₃⁺) 電流 I^+ の関係を調べた例を Fig. 3 に示す。実験条件としては H₂ ガスの圧力が 2×10^{-3} Torr になっている以外はすでに発表した装置^{1,2)} の条件と同じである。

Fig. 3 で、放電電流 $I_A < 100$ A に対してはほぼ Fig. 2 と同様な H⁻ イオン電流と H₃⁺ イオン電流の比 $I^-/I^+ \approx 0.7 \sim 0.8$ を保って I^- , I^+ が増大していることがわ

Fig. 2 Dependences of Negative Current ($I^- + I_e$) and Positive Current I^+ on Distance y' between E electrode and Faraday Cup F. C..

I^- : Negative Ion Current (H^-).

I_e : Electron Current.

I^+ : Positive Ion Current (H_3^+).

V_E : Acceleration Voltage.

かる ($I_A > 100 \text{ A}$ に対しては容器がガラス管のため、熱的な問題があり、次の金属容器で測定する予定)。

3. 質量分析器による確認

Fig. 3 で示した H^- , H_3^+ イオン電流と放電陽極電流 I_A の関係を、Fig. 4 に示したような 90° 偏向型の磁場による質量分析器^{1,2)}で、電子電流が流入しないように ($y' > r_{ce}$ に配置) して調べたのが Fig. 5 と Fig. 6 である。まず Fig. 5 に H^- と H_3^+ イオンの存在と相対的な電流比 ($1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ の質量分析器の Faraday Cup への各々電流から決定) が確められている。

次に、その質量分析器の Faraday Cup に入る H^- , H_3^+ イオン電流 I_M^- の放電陽極電流 I_A に対する依存性が Fig. 6 に示されている。

Fig. 6 で注目すべき点は、Fig. 3 では H^- , H_3^+ イオン電流 I^- , I^+ が、放電陽極電流 I_A にほぼ比例しているのに対し、質量分析器への各々電流 I_M^- , I_M^+ は、放電陽極電流 I_A が増大すると I_A に比例しなくなることである。この原因としては、磁場で H^- , H_3^+ イオンビームを 90° 偏向するのでイオンビームの電流が大きくなるとその空間電荷効果が大きくなり、イオンビームが拡がるためと考えられる。即ち、その $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ の Faraday Cup への流入電流がイオンビームの拡がりで減少する。しかしながら、その相対的電流比 I_M^-/I_M^+ は Fig. 3 の H^- , H_3^+

Fig. 3 Dependence of Positive Ion Current I^+ (H_3^+) and Negative Ion Current I^- (H^-) on Discharge Anode Current I_A (in Sheet Plasma).

V_E : Acceleration Voltage.

Fig. 4 Schematic Diagram of Mass Analysis for (H^- , D^-) Ion or (H^+ , H_2^+ , H_3^+) Ion.

MA: Mass Analyser (90° Type, Curvature Radius of 6 cm).

B_M : Magnetic Field of MA.

F.C.: Faraday Cup (1 cm $\times$ 1 cm).

I_M^- : Negative Current to F.C.

I_M^+ : Positive Current to F.C.

(L, M, E): Three Electrodes for Extraction.

イオン電流の比 I^-/I^+ に近いことがわかる。

4. 終りに

空間生成による H^- , D^- イオンを引き出し、その全電流の正確な測定を試みる時、電子電流との分離が極めて困難なことはよく経験する。しかし、シートプラズマで H^- , D^- イオンを空間生成するときには、そのシートプラズマに沿っている弱磁場を利用して簡単に電子電流を分離し、 H^- イオン (D^- イオンも同様) 電流を測定できるので便利である。

文 献

- 1) 浦本上進: 真空 27 (1983) 600
- 2) 浦本上進: 真空 27 (1983) 610

Fig. 5 Mass Analysis Patterns by Mass Analyser (MA).

B_M : Magnetic Field of MA.

I_M^- : Negative Ion (H^-) Current to Faraday Cup (F.C.).

I_M^+ : Positive (H_3^+) Current to Faraday Cup (F.C.).

V_E : Acceleration Voltage.

Fig. 6 Dependences of H^- Ion Current (I_M^-) and H_3^+ Ion Current (I_M^+) on Discharge Anode Current I_A .

V_E : Acceleration Voltage.