誘導結合型プラズマにおける高周波電流測定の
改善とその応用*川田 博昭^{*1}・彌永 英倫^{*1}・松永 崇^{*1}・村田 顕二^{*1}

(受理1999年12月2日, 掲載決定2000年2月5日)

Improvement of Radio Frequency Current Measurement for
Inductive Coupled Plasma and its ApplicationsHiroaki KAWATA^{*1}, Hidetomo IYANAGA^{*1},
Takashi MATSUNAGA^{*1} and Kenji MURATA^{*1}(Department of Physics and Electronics, College of Engineering,
Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuenchou, Sakai, Osaka^{*1})

(Received December, 2, 1999, Accepted February 5, 2000)

Both the current flowing through an antenna coil and the voltage supplied to the coil were measured for Ar inductive coupled plasmas (ICP) at a pressure of 13 Pa. By using the cancel circuit we measured the difference of the antenna coil currents between no plasma load and ICP. The measurement system was improved in order to reduce both radio frequency (RF) noises and waveform distortions. The impedance is presented when the cancel circuit is used. A simple method to obtain the value of the coupling coefficient is presented. The current measured with the cancel circuit could be related to the plasma current much better than that without the cancel circuit. The values of the coupling coefficient increased as the RF power increased, and ranged between 0.3 and 0.5 in our experiment.

1. はじめに

誘導結合型プラズマは低圧力で高密度のプラズマが得られるため、プロセス用のプラズマとして注目されている。誘導結合型プラズマの特性を調べるため、アンテナコイルにかかる高周波 (RF) 電圧とコイルを流れる高周波電流の波形を測定する方法がある。しかし、このとき測定される電流はアンテナコイルの自己インダクタンスに流れる電流とプラズマを流れる電流, I_p , の和となる。アンテナコイルの自己インダクタンスが小さい時, I_p は全電流のわずかな部分となり, I_p の正確な測定は難しい。前報ではアンテナコイルの自己インダクタンスに

流れる電流を打ち消し, I_p を正確に測定する方法を提案した¹⁾。その後, 測定系のひずみ等が測定に悪影響を及ぼしていることがわかったので, 測定系の改善を行なった。本報告では測定系の改良点を示し, 新しい測定系で行った結果を示す。また, 等価回路を用いて, 測定結果より誘導結合型プラズマの特性を考察する。

2. 実験方法

Fig. 1 に実験装置の概略図を示す¹⁾。上ふたは厚さ10 mm のパイレックスガラス製, プラズマ励起用のアンテナコイルは矩形断面の1ターンコイル (断面: 20 mm × 15 mm, 平均半径: 90 mm) である。市販の1/100プローブを用いてコイル間の電圧を直接測定した場合, プローブのアース線を通じて測定系にノイズが入ることがわかった。このときでも電圧の測定は支障なく行えるが,

* 平成11年11月12日 第40回真空に関する連合講演会で講演

^{*1} 大阪府立大学工学部電子物理工学科 (〒599-8631 堺市学園町1-1)

Fig. 1 Schematic view of the experimental system.

全電流の1/8程度となる I_p の測定には悪影響があることがわかった。そこで、アンテナコイルの外周に1ターンのピックアップコイルを設け、これに誘起される電圧よりコイル間の電圧を測定した。ピックアップコイルの出力電圧は1/100プローブで直接測定されたコイル間電圧と正比例することを確認し、出力電圧の校正を行った。アンテナコイルを流れる電流は自作の10ターンのロゴスキーコイルを用いて検出した。ロゴスキーコイルはRF電力供給線 (Fig. 1, Power line), アース線 (Fig. 1, Earth line) の両方に設けた。ピックアップコイル, ロゴスキーコイルから電圧波形, 電流波形を取り出す測定系を Fig. 2 に示す。ロゴスキーコイルの出力は500 Ω の抵抗, 市販の1/10プローブ, 積分回路を通して電流波形として取り出した。500 Ω の抵抗はロゴスキーコイルのインダクタンスと1/10プローブの容量の共振で生じる振動のエネルギーを吸収し, 高調波の歪みを軽減する。アンテナコイルの自己インダクタンスに流れる電流を打ち消す Cancel 回路の構成は前報と同じである。電圧波形の一部を Attenuator, Phase Shifter を通して振幅, 位相を適当に調整して電流波形との和をとり, 無放電時に測定される電流が0になるようにした。電流波形と電圧波形の位相差, ϕ , は電圧波形に対して電流波形が遅れる場合を正の値とした。このため, インピーダンスのリアクタンス成分が誘導性の時 ϕ は正の値となる。電流値の校正は50 Ω の純抵抗を用いて行った。電源からのRF電力, P_{RF} , は市販の通過型のRF電力計で測定した。

Fig. 2 Block diagram of I and V measurement system.

Fig. 3 Equivalent circuits of an inductive coupled plasma. (a) Basic equivalent circuit and (b) T shape equivalent circuit for (a).

放電は圧力13 Pa の Ar で行った。

3. 理 論

1ターンのアンテナコイルを用いた誘導結合型プラズマは, アンテナコイルとプラズマともに1ターンのコイルが電磁誘導で結合したトランスと考えられる²⁾。アンテナコイルのインダクタンスを L_c , プラズマの電流路によるインダクタンスを L_p , 両コイル間の相互インダクタンスを M とすると, 最も基本的な等価回路は Fig. 3(a) となる。この等価回路のトランス部をT字型で示したのが Fig. 3(b) である。ここで Z_p はプラズマのインピーダンスである。前報では $L_c = L_p$ としてインピーダンスを求めたが, アンテナコイルの電流路とプラズマの電流路の形状が異なる場合 $L_c = L_p$ とはならない。そこで $L_c \neq L_p$ としてキャンセル回路がない場合のアンテナ

Fig. 4 Current and voltage waveforms for the H mode discharge at $P_{RF}=100$ W, (a) with the cancel circuit and (b) without the cancel circuit.

Fig. 5 Dependences of RF voltage and RF current on RF power without the cancel circuit.

コイルのインピーダンスを計算すると次のようになる。

$$Z = \frac{-\omega^2(1-k^2)L_c L_p + j\omega Z_p L_c}{Z_p + j\omega L_p} \quad (1)$$

ここで k は結合係数で $M = k\sqrt{L_c L_p}$ という関係がある。キャンセル回路によりアンテナコイルの自己インダクタンス L_c に流れる電流を打ち消すことは、等価回路で $-j\omega L_c$ のインピーダンスを Fig. 3(b) のようにつないだことになる。このときのインピーダンスは次のようになる。

$$Z = \frac{1}{k^2} \frac{L_c}{L_p} Z_p + j \frac{(1-k^2)}{k^2} \omega L_c \quad (2)$$

プラズマを流れる電流 I_p はキャンセル回路を入れて測定される電流 I と次のような単純な関係となる。

$$I = k \sqrt{\frac{L_p}{L_c}} I_p \quad (3)$$

4. 結果と考察

本装置では P_{RF} が約 100 W のとき E 放電から H 放電

Fig. 6 Dependences of RF voltage and RF current on RF power with the cancel circuit.

The Rogowski coil was coupled to either earth line (solid line) or power line (dashed line).

に移行した。 $P_{RF}=100$ W のとき Fig. 2 の測定系の V , I での出力電圧の一例を Fig. 4 に示す。ここでは、Earth line に結合させたロゴスキーコイルを用い、Low pass filter はつないでいない。また、キャンセル回路なしは Integrator からの出力を直接測定した場合である。キャンセル回路をつなぐことにより電流波形の振幅は約 1/8 となった。キャンセル回路をつないだときの電流波形もほぼ正弦波となった。これより前報でみられたキャンセル回路をつないだときの波形のひずみは測定系の不備から生じたものであることがわかる。Low pass filter をつなぎ高調波によるひずみの影響をなくしたときの電圧、電流の実効値、 V_{RF} , I_{RF} の RF 電力依存性を Fig. 5, Fig. 6 に示す。Fig. 5 は Earth line に結合したロゴスキーコイルを用いキャンセル回路をつなぐに電流波形を測定したときの結果、Fig. 6 は Power line と Earth line に結合したロゴスキーコイルを用いキャンセル回路をつないで電流波形を測定したときの結果を示している。 $P_{RF}=100$ W で E 放電から H 放電に移行すると V_{RF} が減少する。これはプラズマを流れる電流で発生する磁界による相互誘導でアンテナコイルに逆起電力が発生するためである。キャンセル回路がない場合、 V_{RF} の減少により自己インダクタンスを流れる電流も減少するため I_{RF} も減少する (Fig. 5)。しかし、キャンセル回路をつなぐと E 放電から H 放電に移行したとき I_{RF} は急増する (Fig. 6)。これよりキャンセル回路をつないだときの I_{RF} はプラズマをながれる電流をよく反映していると考えられる。H 放電時の電流、電圧の位相差はキャンセル回路をつながない場合 $\phi \sim 90^\circ$ 、キャンセル回路をつないだ場合 $\phi \sim 75^\circ$ となった。プラズマで消費される電力は $V_{RF} I_{RF} \cos \phi$ となる。 $\cos \phi$ が 1 より小さいため

Fig. 7 Dependence of the coupling coefficient on RF power with the cancel circuit.

プラズマで消費される電力は $V_{RF}I_{RF}$ より小さくなる。プラズマとアンテナコイル間に容量結合がある場合、アース側の電流の一部はチャンバーに流れるため、ロゴスキーコイルを Power line に結合させたときと Earth line に結合させたときで電流値に差がでると思われる。しかし、本装置では容量結合による電流成分が小さいのでこの差が確認できなかった。

Z_p のリアクタンス成分が(2)式の第2項に影響しない場合、キャンセル回路をつないで測定されるインピーダンスの虚数部 $\text{Im}(Z)$ は(2)式より、

$$\text{Im}(Z) = \frac{(1-k^2)}{k^2} \omega L_c \quad (4)$$

となる。 ωL_c は無放電時のアンテナコイルのインピーダンスであるので、(4)式より k が求められる。プラズマ中の電子のエネルギー分布を $T_e = 3 \text{ eV}$ のマックスウェル分布とすると Ar の圧力が 13 Pa のとき、電子の衝突周波数 $\nu_m \sim 300 \text{ MHz}$ となる³⁾。 $P_{RF} = 150 \text{ W}$ のとき、

$Z = 10 + j48 \Omega$ であった。電源の角周波数を ω とするとプラズマの電気伝導度の虚部は実部の ω/ν_m となる⁴⁾。そこで Z_p のリアクタンス成分が Z の虚部に及ぼす影響を Z の実部の ω/ν_m 程度と考えると 2.8Ω となる。 Z の虚部は 48Ω であるので Z_p のリアクタンス成分が Z の虚部におよぼす影響は小さいという仮定は妥当なものと考えられる。(4)式より求められた k と RF 電力の依存性を Fig. 7 に示す。RF 電力の増加とともに k も徐々に増加していることがわかる。これは RF 電力の増加によりプラズマ密度が増大し、表皮効果によりプラズマの内部に電流が流れにくくなり、電流経路がアンテナコイルに近づくためと考えている。

5. ま と め

誘導結合型 Ar プラズマにおけるコイル電圧とコイル電流の測定を行った。コイルの自己インダクタンスを流れる電流をキャンセルする回路をつないでコイル電流を測定した。キャンセル回路をつないだときのインピーダンスの理論式を求めた。コイルとプラズマの結合係数を簡単に求める方法を提案した。実験より、キャンセル回路をつないで測定される電流はプラズマ電流をよく反映していることがわかった。結合係数は RF 電力の増大とともにすこしずつ増大することがわかった。

【文 献】

- 1) 川田博昭, 本多 稔, 松永 崇, 村田顕二: 真空, 42 (1999) 337.
- 2) R. B. Piejak, V. A. Godyak and B. M. Alexandrovich: Plasma Sources Sci. Technol., 1 (1992) 179.
- 3) C. Beneking: J. Appl. Phys., 68 (1990) 4461.
- 4) A. T. Bell: *Techniques and Applications of Plasma Chemistry* (edited by J. H. Hollahan and A. T. Bell), (John Wiley & Sons, 1974) p. 17.