容量結合型高周波放電の陰極構造依存性*

久保 隆^{*1}・田中 誠^{*1}

(受理2000年11月24日, 掲載決定2001年1月6日)

Effects of Cathode Structures on Capacitive Coupling Plasma

Takashi KUBO^{*1} and Makoto TANAKA^{*1}

^{*1}(Department of Electronics, Faculty of Engineering, Hiroshima Kokusai Gakuin University,
6-20-1 Nakano, Aki, Hiroshima 739-0321)

(Received November 24, 2000, Accepted January 6, 2001)

In this paper, the dependence of the structure of cathode surroundings on the several plasma parameters was studied using the asymmetrical parallel plate radio frequency plasma reactor. In order to prevent the plasma diffusing to the cathode behind, two technical approaches have been chosen to implement the grounded metals on the surroundings. The one approach is to use the insulator and the metals, and the other is to use the metal plates only. In both cases, the two dimensional distributions of the electron densities were measured by using the self-compensated Langmuir probe.

The results indicate that the intense localization of electron density has been observed even under the pressure of 6.7 Pa.

1. 序 論

容量結合型高周波 (radio frequency: RF) 放電プラズマにおけるプラズマパラメータの2次元分布は近年盛んに研究されており¹⁻⁴⁾, この2次元分布と電極の関係も報告されている。表面加工の視点から見れば, 電極前面におけるプラズマパラメータは均一であることが望ましい場合が多い。しかし, これまでの研究によれば必ずしもこの条件は満たされているとは言えない。

通常, 2次元測定は発光分光分析による準安定原子の分布測定例が多いが^{3,4)}, プローブ法を用いた電子密度及び空間電位分布測定の例もあり, 流体モデルを用いたシミュレーションとこの実験結果とが良好一致を示している¹⁾。この研究ではRF放電の状態が電極周辺の構造の違いにより大きく変化することが報告されている。例えば電子密度の集中が電極端部に現れる, または電極—チャンパー壁の相互作用によりプラズマ密度の空間分布

はチャンパー中心から離れた場所に最大値を持つ例が報告されている。しかしこれらの測定は13.3 Pa以上のガス圧力において行われたもので, Ar RFプラズマの振る舞いに低エネルギー電子群が大きく影響する⁵⁾ 6.7 Pa以下の圧力における測定例は少ない。

そこで本研究では容量結合型RF放電について, 陰極の周りに接地金属及び絶縁体を配置することで生じる変化について比較検討を行った。特に報告例の少ない低圧下で励起されたプラズマに着目し, プローブを2次元的に走査することで, より正確なプラズマの構造解析を行うことを目的とする。

2. 実 験

Fig. 1に測定装置の概略図を示す。Arガスの圧力はピラニゲージ (ULVAC社製WP-01) の直読値6.7 Pa及び26.7 Paに調整して測定を行った。チャンパー内径20 cm, 陰極直径10 cm, 陽極直径16 cm, 電極間隔4 cmである。陰極表面材料は, Al (純度99.999%) を真鍮製の陰極表面に導通を保ちながら固定した。電子密度及び空間電位の測定には, 自己補償型ラングミュアプロ

* 平成12年10月26日 第40回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} 広島国際学院大学工学部電子工学科 (〒739-0321 広島市安芸区中野6丁目20-1)

Fig. 1 The schematic view of the experimental setup.

ープを用いた。このプローブを直線導入器の先端に固定することで、電極間のプローブの移動を容易にしている。プローブの構造及び使用法は前回すでに報告したものと同一である⁶⁾。

電極周辺の構造がプラズマに及ぼす影響を調べるために、Fig. 2 に示す2種類の構造を考える。(a)は接地した中空円板状のアルミ板 (guard ring: 外径180 mm, 内径102 mm, 厚さ0.8 mm) を陰極 (厚さ10 mm) の周りに配置したもので (a タイプ)、(b)は陰極の周りに中空円柱状のフッ素樹脂 (insulator: 外径160 mm, 内径101 mm, 厚さ10 mm) を配置し、その周りを接地したステンレス製円筒 (外径164 mm, 内径161 mm, 長さ10 mm) とアルミ円板で覆っている (b タイプ)。また、測定パラメータとして陰極—陽極間電圧の直流成分 (V_{dc}) を用いている⁶⁾。

3. 結果と考察

Fig. 3 は圧力26.7 Pa, a タイプでの測定結果で、(a) に電子密度分布を、(b) に空間電位分布をそれぞれ等高線図で示してある。径方向位置は10 mm, 軸方向位置は2 mm 間隔で測定を行った。縦軸はチャンパー中心軸からの距離 (径方向位置: r)、横軸は陰極表面からの距離 (軸方向位置: z) である。電子密度は最大値で規格化された値、空間電位は測定値を表している。 $V_{dc} = -25$ V, -50 V, -100 Vでの陰極—陽極間電圧のピーク—ピーク値 (V_{pp}) はそれぞれ100 V, 160 V, 260 V 程度である。また、陰極及び陽極表面付近はシースの存在によりプローブの使用が困難であるため⁷⁾、測定していない。 $V_{dc} = -25$ V, -50 Vにおいては密度のピーク値が $r = 40$ mm 付近に現れており、空間電位の変化とはほぼ一致している。

$V_{dc} = -100$ V, $z = 10$ mm では、電子密度は径方向にほぼ一定であり目立ったピークは存在しない。 $r = 40$ mm, $z = 10$ mm における電子温度を $V_{dc} = -50$ V 及び -100 V で比較すると、それぞれ5 eV 及び2.5 eV 程度である。これはプラズマの維持機構が α 型から γ 型に

Fig. 2 The structures around the cathode. To prevent the plasma diffusing to the cathode behind, (a) was to use the metal plates only, and (b) was to use the insulator and the metals.

移行する際現れる電子温度の変化である⁸⁾。この電子温度の差を考慮すると $V_{dc} = -100$ V では -25 V, -50 V の場合と比較して、電極から放出される2次電子のプラズマ維持機構に対する寄与が増大していると考えられる。 $V_{dc} = -25$ V, -50 V, において電子密度のピークがチャンパー中心から離れた場所に現れる原因が、電極に挟まれた空間外での電離の発生¹⁾であると仮定すると、 $V_{dc} = -100$ V では電極—チャンパー壁間で発生する電子が電極間に存在する放電に及ぼす影響が減少することで、陰極前面での電子密度の均一性が向上したと考えることができる。

Fig. 4 にガス圧6.7 Pa, a タイプでの測定結果を電子密度について示す。 $V_{dc} = -25$ V, -50 V, -100 V に対しそれぞれ $V_{pp} = 80$ V, 135 V, 250 V 程度である。 $V_{dc} = -25$ V では径方向に均一であるが、印加電圧が上昇するに従い $r = 20$ mm 付近に電子が集中する。密度が高い領域に存在する電子はそのほとんどが低エネルギー電子である。つまり母ガスの圧力が低くなり低エネルギー電子群の存在が顕著になると、局所的な密度上昇が現れる。

Fig. 5 に圧力6.7 Pa, b タイプでの電子密度の測定結果を示す。 $V_{dc} = -25$ V, -50 V, -100 V に対しそれぞれ $V_{pp} = 87$ V, 140 V, 250 V 程度である。 $V_{dc} = -25$ V, -50 V では径方向に良い均一性を示すが、 $V_{dc} = -100$ V では $r = 30$ mm から40 mm にかけて密度が急激に減少している。

$V_{dc} = -100$ V, $z = 14$ mm において、チャンパー中心付近に存在する電子は低エネルギー (0.5 eV) であり、 $r = 30$ mm から陰極端部にかけて存在する電子には低エネルギー電子群が存在しない。また $z = 14$ mm, $r = 0 \sim 30$ mm での空間電位の変化は0.3 V 程度であるが、 $r = 30$ mm から40 mm にかけて電位が1 V 程度低くなっていることを考慮すると、空間電位の差によりチャンパー中心軸付近に低エネルギー電子が閉じ込められていることが分かる⁹⁾。

Fig. 3 The electron densities (a) and plasma potential (b) at 26.7 Pa. The structure around the cathode was shown in Fig. 2(a).

26.7 Pa の条件下でも b タイプの電極構造を用いると径方向の密度変化が少なくなる。これらの結果より、電極の周りに誘電体を配置した後接地された金属を用いてプラズマの広がりを防止すると、陰極前面における電子密度の均一性は向上するが、低エネルギー電子群が存在する条件下では局所的に電子密度が高くなることが分かる。

4. ま と め

プラズマが陰極の背後に拡散することを防ぐために、陰極の周りに配置する金属の構成を変えた場合に生じるプラズマの変化を、プローブを用いて2次的に測定した。金属板のみで構成した場合26.7 Pa の条件下で、陰極—チャンパー壁間でのプラズマ発生が原因と考えられる局所的な電子密度の上昇が、チャンパー中心軸から離

れた場所で観測された。一方、誘電体を用いると、電子密度の空間的な均一性が向上した。

6.7 Pa の条件下では、電極間電圧の上昇に伴い局所的な電子密度の上昇が観測され、この現象は誘電体を用いた場合でも同様であった。これは低エネルギー電子群が電位差によって特定の空間に閉じ込められているためである。

【文 献】

- 1) J. P. Boeuf and L. C. Pitchford: Phys. Rev. E, **51** (1995) 1376.
- 2) J. P. Boeuf, Ph Belenguer and T. Hbid: Plasma Sources Sci. Technol., **3** (1994) 407.
- 3) E. Augustyniak, S. Filimanov and J. Borysow: J. Appl. Phys., **86** (1999) 4767.
- 4) T. Kitajima, Y. Takeo, N. Nakano and T. Makabe: J.

0.3-0.4 0.4-0.5 0.5-0.6 0.6-0.7 0.7-0.8 0.8-0.9 0.9-1

Fig. 4 The electron densities at 6.7 Pa. The structure around the cathode was shown in Fig. 2(a).

0.3-0.4 0.4-0.5 0.5-0.6 0.6-0.7 0.7-0.8 0.8-0.9 0.9-1

Fig. 5 The electron densities at 6.7 Pa. The structure around the cathode was shown in Fig. 2(b).

Appl. Phys., **84** (1998) 5928.

- 5) V. A. Godyak and R. B. Piejak: Phys. Rev. Lett., **65** (1990) 996.
- 6) 久保 隆, 田中 誠: 真空, **43** (2000) 314.
- 7) N. Hershkovits: in *Plasma Diagnostics volume 1*, edited by O. Auciello and D. L. Flamm (Academic Press, New

York, 1989).

- 8) Y. P. Rizer, M. N. Shneider and N. A. Yatsenko: *Radio-Frequency Capacitive Discharge*, (CRC, Boca Raton, 1995).
- 9) Vladimir Kolobov and Valery A. Godyak: IEEE Trans. Plasma Sci., **23** (1995) 503.