誘電体窓を多数有する縦長表面波プラズマ装置における プラズマ密度分布空間制御に関する研究

非会員 鳥羽 孝幸* 正員 板垣 敏文*
正員 桂井 誠**

Investigation of Spatial Profile Control of Electron Density in the Rectangular-Type Surface Wave Plasma Apparatus with Multi Dielectric-Windows

Takayuki Toba*, Non-member, Toshifumi Itagaki*, Member, Makoto Katsurai**, Member

The surface wave plasma (SWP) processing apparatus has been permitted to generate high-density and uniform plasmas via 2.45 GHz microwave without external magnetic fields. To enlarge the processing area of the SWP apparatus, special configuration was investigated for a rectangular-type surface wave plasma apparatus that is equipped with multi dielectric-windows. The experimental investigation of the discharge characteristics of this apparatus with four windows (each size with 10 cm × 10 cm) has been carried out. To improve electron density uniformity, two methods have been surveyed. One is to insert quartz plates between metallic window frames of the chamber to make the boundary surface between plasma flat, and the other is to place parallel conductor plates on the window surface. The combination of these methods permits the reduction of nonuniformity of the spatial distribution of the electron density less than $\pm 6\%$.

キーワード：表面波プラズマ，プロセスプラズマ，複数誘電体窓

Keywords: surface wave plasma, process plasma, multi-dielectric windows

1. はじめに

プラズマプロセスは近年半導体デバイスや液晶ディスプレイ等の製造過程において必要不可欠なものとなっている。新たなプロセスプラズマ装置に対しては、プラズマの安定性や再現性はもとより、高均一、低圧力、高密度のプラズマを擁し、大口径化が可能であることが条件となっている。ここで、プラズマ表面を伝搬する電磁波の伝搬モードのひとつである表面波によってプラズマを生成、維持する表面波プラズマ (SWP: Surface Wave Plasma) 装置が次世代プロセスプラズマ装置として期待されている。

これまで既に、半導体プロセスに適している平板状で大面積、高均一でダメージが少ないSWP源が多々開発されて

きた。例えば、スロットアンテナの直下に直径 70 mm の石英板をはめ込むことで、直径 20 cm 以上のプラズマを作る試みがなされている⁽¹⁾⁽²⁾。この装置において低圧下で遮断密度以上の高密度プラズマが生成されていることが確認されている。また、円筒型チャンバで直径 500 mm の大面積プラズマ装置も研究されている⁽³⁾。この装置では、チャンバ上部に直径 500 mm の巨大な 1 枚の石英板を設置し、マルチスロットアンテナを通して、この石英板にマイクロ波を照射している。この装置においては直径 30 cm に渡って、イオン飽和電流の不均一性が $\pm 3\%$ 以下のプラズマが生成されることが確認されている。さらに、マルチスロットアンテナに代わり、ホーンを用いて、真空容器の上部に設置された大面積の窓にマイクロ波を照射しプラズマを生成するプラズマ源⁽⁴⁾⁽⁵⁾や、スロットアンテナを用い 1000 mm × 1000 mm の大面積直方体チャンバを擁する表面波装置⁽⁶⁾⁽⁷⁾等、その他にも様々な大面積プラズマ装置^{(8)~(12)}が開発されている。

その中で、Komachi 等によって開発された方式の SWP 装置⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾は簡易な構造でかつ、大口径化等が容易であることから多くの研究がなされてきた (図 1)。

この装置では、マイクロ波電源の周波数 (2.45 GHz) で決定される遮断電子密度 ($7.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) を 1 桁以上超え

* 東京大学大学院工学系研究科電気工学

〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

Department of Electrical Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

** 東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学

〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

Department of Advanced Energy, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033

図 1 平板型表面波プラズマ装置⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

Fig. 1. Schematic drawing of the planar-type surface wave plasma apparatus⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾.

る電子密度を持ったプラズマ、いわゆる過密度プラズマが生成されることがよく知られており、表面波の役割などそのプラズマ生成機構についても詳細に研究されている^{(13)~(16)}。特に、この装置におけるテフロン板はマイクロ波の z 方向への伝播を助けるもので、その果たす役割に関しては既に研究がなされている⁽¹⁵⁾。すなわち $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 天板構造の平板型表面波プラズマ装置 (図 1) において、テフロン板がある状態とない状態で比較実験がなされ、その結果、マイクロ波入射側での過度の電力集中とプラズマの局所的発生を阻止するテフロン板の役目が明らかにされている。テフロン板がない状態ではマイクロ波入射側から数 cm の範囲で電力が吸収されてしまい、非常に不均一なプラズマとなっている。しかし、テフロン板を設置することにより、マイクロ波は、プラズマの吸収による減衰はあるものの、終端反射側までたどりつき、全面でプラズマの生成が可能であることが示されている。しかし、このテフロン板設置による均一性向上は万能というわけではなく、気体の種類 (たとえば酸素など) によっては不均一性の改善効果は小さく、誘電体窓の上に金属板を平行に設置する方法が併用されている。この、さらなる均一性の向上はシミュレーションによっても明らかにされている⁽¹⁶⁾。

ところで、この方式を大口径化する場合において、1 枚の天板で真空を封じるといった構造のまま、その寸法を拡大し大口径化した場合、真空を封じている天板である誘電体板が熱膨張による歪みや真空圧によって破損する事故が多発し、長時間にわたる動作が困難になることが報告されている⁽¹⁷⁾。

そこで、1 枚の大きな誘電体板を用いて真空を封じする方法に代って、図 2 のように複数のマイクロ波源を用意し、複数の小さい誘電体板を天板として真空を封じた細長いモジュールを多数並置することによって、加熱による天板の破損を防ぎ装置を大口径化する方法が考えられる。

この構造によって、誘電体板にかかる熱歪を分散させてその破損を防ぎ、将来数 m 角の巨大口径プラズマを生成することが可能となろう。しかし、新たな問題として誘電体板を支持する金属製梁部分がプラズマ表面部から内部

図 2 複数誘電体線路及び誘電体板を用いた平板型表面波プラズマ装置

Fig. 2. Surface wave plasma apparatus with multi-divided dielectric lines and alumina plates.

へと突出し、表面波プラズマの均一な発生を阻害する恐れがある。そこで、この装置の特性、特に窓の直下の電子密度分布を調べるために、まずマイクロ波開口部が $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ の 4 つの窓を縦方向に配列した $10\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ のサイズの 1 モジュールを製作し、その装置に関して電子密度空間分布一様性を向上させるための方法を試みた。この寸法においては、既に報告されている $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 正方形の装置^{(13)~(16)} と同じ平均マイクロ波入射電力が確保されることになる。

第 2 章は実験装置の説明、第 3 章はプラズマの電子密度、電子温度分布の測定実験、第 4 章は電子密度分布一様性向上に関する実験であり、第 5 章で結論を述べている。

2. 実験装置

図 3 に本実験装置である複数誘電体窓を用いた縦長表面波プラズマ装置の概要図を示す。ここで、マイクロ波の進行方向を z 方向、垂直方向を y 方向とする。

$130\text{ mm} (x) \times 233\text{ mm} (y) \times 490\text{ mm} (z)$ のステンレススチール SUS304 製チャンバの上部に通された梁 ($20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 、誘電体板間は 6 mm 幅、SUS304) によって 4 枚の誘電体板 (アルミナ板: $114\text{ mm} \times 114\text{ mm}$ 、厚さ 5 mm) を支え真空を封じている。各開口部は $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ となっている。ここで、4 枚の窓をそれぞれマイクロ波入射側から #1, #2, #3, #4 と呼ぶことにする。誘電体板の上に石英板 ($209\text{ mm} \times 569\text{ mm}$ 、厚さ 10 mm)、エアギャップ (15 mm) を挟んでテフロン板 (厚さ 20 mm) が設置されている。このテフロン板の上面は金属製導波路の上部カバーと密着しており、このテフロン線路に導波管から周波数 2.45 GHz のマイクロ波を導入し、プラズマ生成を行っている。

電子密度及び電子温度分布の測定には可動トリプルプローブを用いている。トリプルプローブの各先端部はタングステン製の円筒形状プローブ ($\phi = 1.25\text{ mm}$ 、高さ 5 mm) となっており、絶縁を考慮し、その周囲をアルミナチューブで皮膜している。このプローブをチャンバ側壁及び底部に設けられた観測用窓から挿入して実験を行った。また、 75 GHz

図 3 複数誘電体窓を用いた縦長平板型表面波プラズマ装置

Fig. 3. Schematic drawing of the rectangular-type surface wave plasma apparatus with multi dielectric-windows.

のマイクロ波干渉計を用い $y = 90$ mm における z 方向電子密度平均値を測定し、プローブ計測から得られた電子密度平均値と比較を行っている。

3. プラズマ特性に関する実験

3.1 放電観察 アルゴンを封入した放電の様子を観察した結果、圧力が低く (50 mTorr 以下)、かつマイクロ波電力も低い (500 W 以下) 条件下においては、プラズマは 4 枚の開孔部のうち、マイクロ波入射側である #1 や #2 の領域でしか生成されないが、逆にマイクロ波電力が大きくなると (750 W 以上)、全ての開口窓で生成されるようになることがわかった。

次にマイクロ波電力を最大値から下げてゆくと、まず、反射側の窓 #4 でプラズマが生成されなくなり、次第に #3, #2 とプラズマが生成されなくなっていく様子が観測された。その一方で、マイクロ波入射側である #1 の窓では電力の大きさに関わらず、常にプラズマが生成されている。一方、圧力の変化においては、低圧になるに従って、奥の方の #4 や #3 の窓でプラズマが生成されにくくなり、#1 や #2 の窓にプラズマが集中し、全体として不均一なプラズマとなる。ただし、低圧力で放電が集中している #1 や #2 の窓では、その窓においては全体に発光が広がっており、各々の窓直下ではほぼ均一に放電している。

3.2 電子密度、電子温度計測 前章で述べた可動トリプルプローブを用い、電子密度および電子温度の鉛直下方向 (y 方向) への空間分布を測定した。実験条件はマイクロ波電力: 250 ~ 750 W, アルゴンガス圧力: 10 ~ 100 mTorr, 流量: 20 sccm である。

#1 のアルミナ天板中心地点 ($x = 0$ mm, $z = -180$ mm) における y 方向電子密度、電子温度分布を図 4 に示す。

電子密度分布を見ると、マイクロ波電力 250 W においても、そのピークの値が遮断密度 (マイクロ波周波数 2.45 GHz に対して $0.74 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) を大きく上回っていることがわかる。電子密度分布は天板から離れるに従い単調減少するのではなく、一旦 2~3 cm の距離で増加してピークを迎えてから減少している。一方、電子温度分布は天板から単

図 4 アルミナ天板 #1 における電子密度、電子温度のマイクロ波電力依存性 [(a), (c)], およびガス圧力依存性 [(b), (d)]

Fig. 4. Electron density profiles [(a), (b)] and temperature profiles [(c), (d)] along y axis at the center of #1 window; (a), (c) dependency on microwave power; (b), (d) dependency on Ar gas pressure.

調に減少し、天板から数 cm 離れるとほぼ一定になっている。電子密度分布のマイクロ波電力依存性を見ると、分布の形状は電力を変化させても殆ど変わらず、電子密度の大

きさは電力に比例して大きくなっている。圧力依存性を調べると、圧力が低くなるに従い、電子密度分布のピークの位置が境界から離れている。これは、低圧になる程、チャンバ中心部へとプラズマがより多く拡散していくためと考えられる。

電子温度分布のマイクロ波電力および圧力への依存性を見ると、その形状、値の大きさ共にほぼ変わらず、あまり依存性が見られない。筆者らは、単一の誘電体窓を有する SWP 装置を用いた実験においても、同様な測定結果を得ている⁽¹⁵⁾。

次に $y = 40 \text{ mm}$ (アルミナ天板から 40 mm 、梁から 20 mm の位置) における電子密度、電子温度の z 方向分布の測定結果を図 5 に示す。

電子密度分布を見ると、 $z = -23 \sim -13 \text{ cm}$ の付近が最も大きな値となっている。これは窓 # 1 の位置と一致している。また $z = -12, 0, 12 \text{ cm}$ の地点で電子密度が局所的に落ち込んでいるが、これは梁が存在する位置と一致しており、この部分ではプラズマは生成されないため、その直下で電子密度が低い値となっていると考えられる。窓 # 1 ($z = -23 \sim -13 \text{ cm}$) や窓 # 2 ($z = -11 \sim -1 \text{ cm}$) の部分では、常にプラズマが生成され、その電子密度の大きさもカットオフ密度以上となっている。しかし、窓 # 3 ($z = 1 \sim 11 \text{ cm}$)、窓 # 4 ($z = 13 \sim 23 \text{ cm}$) と奥に行くにしたがって電子密度が急激に減少し、プラズマが殆ど生成されなくなる。これらの結果は放電の様子を観測した結果とほぼ一致している。この結果より、以前の装置 (図 1) で Ar ガスに対して有効に機能したテフロン板の効果⁽¹⁵⁾が、今回の構造においては十分に働かず、金属梁の影響が勝り、プラズマが不均一になっていることがわかる。

また、低圧になるに従って # 1 の窓では電子密度が高くなり、窓 # 3、# 4 では低くなっている。これは低圧になると放電の不均一性が増し、# 3、# 4 の窓での放電が停止する結果、マイクロ波のエネルギーが # 1 や # 2 の窓に集中して注入されるためと考えられる。

電子温度分布を見ると、常にプラズマが生成されているマイクロ波入射側において、電子温度は $2 \sim 4 \text{ eV}$ の範囲でほぼ一定である。一方、マイクロ波反射側では、大電力や高圧でプラズマが反射側まで生成されている時は入射側とほぼ同じ、またはやや高い程度である。しかし、プラズマの電子密度が低いときは数 eV 高い値が計測されている。これは、次項で検証するように、電子密度が遮断密度以下となり、マイクロ波電界がプラズマ中へと進入しているためと考えられる。

3.3 電界分布 ここで、チャンバ中の z 方向の電界強度分布を $y = 90 \text{ mm}$ (密度ピーク位置よりかなり下部である) において、シールドループアンテナ⁽¹⁴⁾ ⁽¹⁵⁾を用いて計測した。

マイクロ波電力が 500 W の場合、および 1000 W の場合の測定結果を図 6 に示す。アルゴンガス圧はいずれも 50 mTorr である。

図 5 電子密度、電子温度の z 方向分布 ($y=40 \text{ mm}$) :
[(a), (c)] マイクロ波電力依存性,
[(b), (d)] 圧力依存性

Fig. 5. Electron density profiles [(a), (b)] and temperature profiles [(c), (d)] along z axis at $y = 40 \text{ mm}$: (a), (c) dependency on microwave power; (b), (d) dependency on Ar gas pressure.

図 6 z 方向マイクロ波電界強度分布

Fig. 6. Microwave field intensity along z axis, at $x = 0$ mm, $y = 90$ mm.

図から明らかなように、マイクロ波電力が小さい (500 W) 場合に、# 3 および # 4 の窓の下方において、電界強度が際立って大きくなっている。このことから、電子密度が低いときは電子温度が高くなるという前節に述べた結果 (の一つ) が次のように解釈できる。すなわち、低電力、低圧力のもとでは、窓 # 3、# 4 の下方の電子密度が遮断密度以下となるため、電界はその強度を保ったまま容易に下方に浸透していき、これによって電子温度が高くなる。

4. 電子密度均一性向上に関する実験

従来型の、単一の誘電体窓を有する装置では、上部に設置したテフロン板によって均一なプラズマが生成されることが確認されている。しかし、今回の装置では、前節に述べたように、長いマイクロ波伝播路および金属製の梁の存在により、テフロン板のプラズマ均一化効果が半減していることがわかった。そこで、本装置における電子密度分布の均一化を図る手法として、以下の二つを検討した。

4・1 実験 1: 金属梁間領域への石英板挿入によるプラズマ表面平坦化 電子密度、電子温度を計測した結果、電子密度はチャンバ上部を渡っている梁の下方において密度が大きく減少していることがわかった。これは、大きさが 20 mm の梁の存在により、プラズマ表面波の z 方向への伝播が阻止され、また同時に天板直下で生成されたプラズマの z 方向への拡散が阻止されるためであると考えられる。

そこで、チャンバ上面の梁による表面の凹凸を減らすため、単純に梁の寸法を小さくする方法が考えられるが、機械的強度の観点から、またさらに水冷用流路を断面内に確保することが将来的に必要となるであろうことを考慮すると、これ以上小さくすることは困難である。そこで、図 7 のように、梁と梁の間の凹んだ領域にその形状と同形の石英板を挿入することによってプラズマチャンバ上部の凹凸をなくし、プラズマ表面の平坦性を向上させることを試みた。

まず、放電の様子を観察したところ、石英を入れる前とは異なり、 z 方向のほぼ全面にプラズマが拡散し生成されている様子が見られた。また、数 10 mTorr 以下の低圧下においても、 z 方向に関して局所的にプラズマが偏在する

図 7 縦長表面波プラズマ装置の改良

Fig. 7. The rectangular-type surface wave plasma apparatus with quartz plates.

ということがなくなっている。

次に、電子密度分布、電子温度分布について、石英板を入れた場合と入れない場合 (図 5) の比較をするため、 $y = 40$ mm (石英を挿入したためチャンバ上部の境界からは 20 mm の地点になる。プロセス領域はさらにその下 50 mm 程度と想定する) における z 方向電子密度、電子温度分布を図 5 と同じ条件下において測定した。その結果を図 8 に示す。

同図に示されるように、プラズマが z 方向全体に広がっており、図 5 の結果とは異なり、電子密度、電子温度共により均一になっている。電子温度は図 5 の結果より、やや高くなっているが、これは梁の間を石英で埋めたため、測定地点がチャンバ上部から 20 mm の距離となり、境界に近づいたため電子温度が上昇したものと考えられる。また、電子密度は、 z 方向に局所的に集中するのではなく全体に拡散しているため、そのピークの値は図 5 の場合よりも低くなっている。

ここで、 $y = 90$ mm (石英を挿入した装置では境界から 70 mm の位置) の地点における z 方向電子密度分布を計測し、石英を挿入することによって凹凸を埋めた場合と埋めていない場合との比較を示した実験結果が図 9 である。

図 9 (a) の石英板を埋めていない場合は前述のように、マイクロ波入射側に電子密度が極端に偏る実験結果が得られているが、 $y = 90$ mm の位置まで下がると拡散の効果によって $y = 40$ mm の位置における分布に比べ均一度は向上している。しかし、まだ反射側にいくに従って電子密度が減少している分布となっており、全体的な均一さは十分でない。一方、図 9 (b) の石英板を埋め込んだ場合はどの圧力においても電子密度分布はほぼ均一になっており、均一性の向上が認められる。

また、この時の結果において、石英板を埋め込んだ場合 (with quartz)、埋め込んでいない場合 (without quartz) について、30 cm の範囲 ($z = -15$ cm $\sim$ +15 cm, $y = 90$ mm) における平均電子密度は表 1 のようになる。

ここで、電子密度の平均値において、括弧内に併記された値はマイクロ波干渉計によって計測した値を示している。

また、同範囲における均一性 ($= \pm \frac{\max n_e - \min n_e}{2 \times \text{average } n_e}$) を見ると、圧力が 10 mTorr の場合、石英板を挿入していないときは $\pm 60\%$ 強であったものが、約 $\pm 6\%$ まで改善してい

図 8 石英板を挿入した電子密度，電子温度の z 方向分布：[(a), (c)] マイクロ波電力依存性，[(b), (d)] 圧力依存性

Fig. 8. Electron density profiles [(a), (b)] and temperature profiles [(c), (d)] with quartz plates, along z axis at $y = 40$ mm; (a), (c) dependency on microwave power; (b), (d) dependency on Ar gas pressure.

図 9 z 方向電子密度分布 (マイクロ波電力：1000 W)：(a) 石英板なし，(b) 石英板有り

Fig. 9. Electron density distribution along z axis at $y = 90$ mm. Dependency on Ar gas pressure (microwave power is 1000 W): (a) without quartz plates, and (b) with quartz plates.

表 1 電子密度平均値 (マイクロ波電力：1000 W)

Table 1. Average electron density (microwave power is 1000 W).

average electron density (cm^{-3})

	10 mTorr	50 mTorr	100 mTorr
without quartz	3.07×10^{11} (6.28×10^{11})	1.75×10^{11} (3.10×10^{11})	1.59×10^{11} (1.64×10^{11})
with quartz	4.45×10^{11} (6.80×10^{11})	2.51×10^{11} (3.18×10^{11})	1.58×10^{11} (1.78×10^{11})

る。これは、他の圧力でも同様である。その平均の電子密度はやや高くなっているが、これは、測定点がチャンバ上部に近づいたことによって、電子密度が全体的に高くなったためと考えられる。このときマイクロ波電力の吸収効率 は次の表 2 のようであり、石英を挿入したことにより、効率は 10% 弱悪くなっている。しかし、天板に近づいたことによる密度の上昇の影響の方が大きいので、平均密度は大きくなっている。ここで、マイクロ波電力吸収効率の測定では、整合器とチャンバ誘電体線路間に設置されたパワーメータにより導波管内入射電力、反射電力を検出しており、また誘電体線路等でのマイクロ波伝送領域での損失は 10% 以下であるという結果が既に得られている⁽¹⁵⁾。

4.2 実験 2、窓上部への格子状金属板設置によるマイクロ波電界分布 ここで提案した複数窓を有する装置では将来的には誘電体窓を格子状に設置する形状になること

表 2 マイクロ波電力吸収効率

Table 2. Microwave power absorption efficiency into plasmas.

	10 mTorr	50 mTorr	100 mTorr
without quartz	99.96 %	96.88 %	99.91 %
with quartz	91.38 %	88.98 %	88.14 %

図 10 誘電体窓上に設置された金属格子

Fig. 10. Conductors on the alumina window plates.

から (図 2), 開口部の大きさと均一性との関係性を調べるため, 導体 (Al) を誘電体窓上に格子状に設置し実験を行った。格子状の導体は 2 種類用意し, 図 10 のように, 1 つの誘電体窓を 1/4 に分割するように置かれているものを (A), 1/9 に分割しているものを (B) とし, 実験結果を比較する。ただし, 前項同様に梁と梁の間の窪みには石英板を挿入してチャンバ上面でのプラズマ表面の凹凸をなくしている。

電子密度測定の際の測定位置, 圧力等の条件は前節での実験と同様である。

圧力を変え電子密度の測定を行い, 得られた電子密度の均一性, 平均値を次の表に示す。

(A) の金属格子の場合, 均一性は向上しているが, 平均の電子密度は減少している。一方, (B) の金属格子では, 均一性は改善されておらず, 電子密度の平均値も減少している。この結果から, 開口部の大きさを変化させることによって, その間隔を適切に選択すれば均一性のさらなる改善が図られることが確認された。しかし, 間隔の選択を誤ると逆に不均一性を助長することも確認されたため注意を要する。

更に, 反応性の気体として, アルゴンに比べ不均一性が強まりやすい酸素を用いて同様の実験 (ガス圧: 100 mTorr, マイクロ波電力: 1000 W) を行った結果を図 11 に示す。

この結果を見ると, 均一性は大きく改善されており, (A) の枠の場合には約 5 % の均一性になっており, 酸素プラズマでも均一なプラズマの生成が可能であることが分かる。

最適な金属帯の配置やその間隔, および窓寸法とその間隔についての考察には放電プラズマ流体モデルに対する

表 3 電子密度平均値, 均一性

Table 3. Average electron density and uniformity of electron density distribution, with quartz plates & conductors (A), (B).

uniformity

	10 mTorr	50 mTorr	100 mTorr
with quartz	6.6%	12.5%	11.5%
with quartz & plate (A)	5.7%	7.3%	7.4%
with quartz & plate (B)	13.1%	9.1%	19.9%

average electron density (cm^{-3})

	10 mTorr	50 mTorr	100 mTorr
with quartz	4.45×10^{11} (6.80×10^{11})	2.51×10^{11} (3.18×10^{11})	1.58×10^{11} (1.78×10^{11})
with quartz & plate (A)	3.90×10^{11} (5.76×10^{12})	1.81×10^{11} (3.17×10^{11})	0.76×10^{11} (1.27×10^{11})
with quartz & plate (B)	4.11×10^{11} (6.49×10^{11})	1.70×10^{11} (3.15×10^{11})	0.67×10^{11} (1.44×10^{11})

図 11 z 方向電子密度分布: (酸素ガス圧: 100 mTorr, マイクロ波電力: 1000 W)Fig. 11. Electron density distribution along z axis with plate A, plate B (O_2 gas pressure is 100 mTorr, microwave power is 1000 W).

FDTD 法による数値計算が有効であると考えられる。

5. まとめ

複数誘電体窓を備えた縦長表面波プラズマ装置における平板型表面波プラズマの一様性向上に関する実験を行った。平板型表面波プラズマ装置を大面積化する際の 1 モジュールとして, チャンバ長約 50 cm, 幅約 10 cm の縦長モジュールを対象として実験を行い, 従来の正方形型の装置の特徴と比較した。この装置は複数の小さい誘電体窓によって真空を封じており, 一枚一枚の窓が小さいため窓の破損の危険性が低い構造になっている。反面, 4 枚の誘電体窓を支える梁がプラズマ中に突起する形状になっており, また伝播路が長くなっているため, 当初の構造のままでは導波路に設置されたテフロン板の効果が十分でなくなり, 均一なプラズマを生成することが困難であることがわかった。そこで, この解決法として, 窪み部分に, 梁の高さと同じ寸法の厚みを有する石英板をはめ込み, チャンバ内側上面の凹凸を失くし, プラズマ生成実験を行った。その結果, 入射

側から反射側まで広範囲に渡ってほぼ様なプラズマを生成することに成功した。さらに、誘電体板上に導体を格子状に置き、その間隔の最適化を図ることによって、 z 方向電子密度分布の均一性がより改善されることを確認した。金属格子を適切な間隔で置くことにより、均一性を約 $\pm 5\%$ にまで改善でき、更なる均一性の改善が図られることが分かった。また、この手法によって、アルゴンプラズマに比して不均一性が強まりやすい酸素プラズマにおいても、約 5% の均一性のプラズマを生成することに成功した。格子の寸法や間隔によっては均一性悪化の可能性もあるため、さらなる最適化には数値解析が必要であると考えられる。
(平成 16 年 3 月 18 日受付, 平成 17 年 6 月 29 日再受付)

文 献

- (1) S. Morita, M. Natagso, I. Ghanashev, N. Toyoda, and H. Sugai: "Production of Low-Pressure Planar Non-Magnetized Plasmas Sustained under a Dielectric-Free Metal-Plasma Interface", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.37, pp.L468-L470 (1998)
- (2) M. Nagatsu, G. Xu, I. Ghanashev, M. Kanoh, and H. Sugai: *Plasma Sources Sci. Technol.*, Vol.6, p.427 (1997)
- (3) Y. Yasaka, D. Nozaki, K. Koga, M. Ando, T. Yamamoto, N. Goto, N. Ishii, and T. Morimoto: "Production of Large-Diameter Uniform Plasma in mtorr Range Using Microwave Discharge", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.38, pp.4309-4312 (1999)
- (4) M. Furukawa, N. Saito, K. Kawamura, T. Koromogawa, and H. Shindo: "Production of Large-Diameter Microwave Plasma with a High-Permittivity Material Window", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.37, pp.L1005-L1007 (1998)
- (5) K. Kusaba, K. Shinagawa, M. Furukawa, K. Kawamura, and H. Shindo: "Surface Wave Plasma Production Employing High-Permittivity Material for Microwave Window", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.40, pp.L1179-L1182 (2001)
- (6) K. Senda and Y. Sakamoto: "The magnetic-fieldless wide area plasma by the microwave", The 49th Spring Meeting of the Japan Society of Applied Physics, 27a-B-2, (2002)
- (7) K. Senda, K. Umehara, and Y. Sakamoto: "A Uniform and Dense Microwave Plasma", *IEICE Trans. Flect.*, E86-C, Vol.12, pp.2479-2481 (2003)
- (8) Y. Okamoto: "Hig-sensitivity microwave-induced plasma mass spectrometry for trace element analysis", *J. Analytical Atomic Spectroscopy*, Vol.9, pp.745-749 (1994)
- (9) T. Kimura, Y. Yoshida, and S. Mizuguchi: "Generation of a Surface-Wave-Enhanced Plasma Using Coaxial-Type Open-Ended Dielectric Cavity", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.34, pp.L1076-L1078 (1995)
- (10) D. Korzec, F. Werner, A. Brochkhaus, J. Engemann, T. P. Schneider, and R. J. Nemanich: "Characterization of a slot antenna microwave plasma source for hydrogen plasma cleaning", *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol.A13, pp.2074-2085 (1995)
- (11) I. Odobina, J. Kudela, and M. Kando: "Characteristics of the planar plasma source sustained by microwave power", *Plasma Source Sci. Technol.*, Vol.7, pp.238-243 (1998)
- (12) H. Murohasi, T. Okamoto, and Y. Okamoto: "Time-Resolved Electron Energy Distribution Function in Pulsed Surface Wave Plasma Generated by Ring-Slot Antenna", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.42, pp.L1188-L1190 (2003)
- (13) K. Komachi: "Affectiong factors on surface wave produced plasma", *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol.11, No.1, pp.164-167 (1993)
- (14) K. Komachi: "Electric field in surface-wave-produced plasma", *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol.12, No.3, pp.769-771 (1994)
- (15) N. Yanagita, T. Itagaki, and M. Katsurai: "Experimental Investigation on Discharge Characteristics of Plane Type Surface Wave Microwave Plasma", *T. IEE Japan*, Vol.121-A, No.1, pp.44-51 (2001-1) (in Japanese)
柳田恵史・板垣敏文・桂井 誠:「平板型表面波マイクロ波プラズマの放電特性に関する実験研究」, 電学論 A, 121, 1, pp.44-51 (2001-1)
- (16) T. Morino and M. Katsurai: "Numerical Investigation on Uniformity Improvement of the Microwave Power Absorption in a Planar Type Surface Wave Plasma Processing Device", *T. IEE Japan*, Vol.120-A, No.5, pp.583-588 (2000-3) (in Japanese)
森野達郎・桂井 誠:「平板型表面波プロセスプラズマ装置でのマイクロ波電力吸収一様性向上に関する数値解析」, 電学論 A, 120, 5, pp.583-588 (2000-3)
- (17) 小町恭一: 私信

鳥羽 孝 幸 (非会員) 2001 年 3 月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。現在, 同大学大学院博士課程在籍。表面波プラズマのシミュレーション研究に従事。

板垣 敏 文 (正員) 1948 年 11 月 28 日生。1980 年東京大学工学部電気工学科科技官, 1992 年同助手。日本エアロゾル学会会員。

桂井 誠 (正員) 1941 年 11 月 13 日生。1965 年 3 月東京大学工学部電子科卒業。1970 年同大学大学院博士課程修了。同年同大学講師, 1971 年同助教授, 1987 年教授, 2004 年定年退職。現在, 東京大学名誉教授, 武威工業大学客員教授, 他。工学博士。プラズマ・核融合学会, IEEE 会員。