

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K13907

研究課題名（和文）高周波プロセスプラズマにおいて真空容器壁面の状態がプラズマに与える影響の評価

研究課題名（英文）Evaluation of the effect of the state of the vacuum vessel wall on the plasma in high-frequency process plasmas

研究代表者

鈴木 陽香（Suzuki, Haruka）

名古屋大学・工学研究科・講師

研究者番号：80779356

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：代表的なプロセスプラズマ装置のひとつである高周波プラズマ装置においては、装置構造の影響によりプラズマ空間不均一性が発生することがある。本研究ではプロセスプラズマ中の壁面や電極などの装置構造がプラズマ-電極の電位差や空間構造に与える影響の評価を非接触で行うことを試みた。電極及びライナー壁電位を高電圧プローブにより計測し、高周波プラズマにおける一次元的な電位構造を明らかにするとともに、接地面積が変化した際のプラズマ電位変動を評価した。また、プラズマの3次元空間構造を明らかにするため、カメラ計測によりプラズマ発光分布の推定が行われた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の半導体製造プロセス容器の内部壁は絶縁酸化物で被覆されており、被膜はプラズマの曝露により劣化していく。これによりプラズマに不均一性が生じたり、プラズマ電位の変動によりイオンエネルギー、つまりプロセスの精度に影響を与えたりする可能性がある。そのため、装置の異常検知やメンテナンス箇所の見極めは非常に重要である。

本研究では、電極及び壁面の電位計測により、簡易的な等価回路モデルを用いながらも、浮遊壁に囲まれたプラズマの電位の推定が可能となった。また、画像の再構成からプラズマ発光の2.5次元空間情報の取得を確認した。これらの手法は、新しいプロセスプラズマの非接触評価方法として有望であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In high-frequency plasma sources, one of the typical process plasma systems, spatial plasma non-uniformity may occur due to the structure of the system. Plasma diagnostics is indispensable for the evaluation, but it is difficult to adopt a plasma measurement method that causes disturbances. In this study, the effects of device structures such as walls and electrodes on the plasma in process plasmas were investigated using non-contact measurement techniques. Electrode and liner wall potentials were measured using a high-voltage probe to clarify the one-dimensional potential structure in high-frequency plasmas, and the plasma potential fluctuations were evaluated when the ground area was changed. In order to clarify the three-dimensional spatial structure of the plasma, the plasma emission distribution was estimated by camera measurements.

研究分野：プラズマ応用科学

キーワード：プロセスプラズマ 容量結合型プラズマ 誘導結合型プラズマ プラズマ電位

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

半導体製造において、微細化・高アスペクト比化に伴い、プラズマによる異方性エッチングはますます重要になっている。このようなプロセスには高周波 RF 容量結合型プラズマ (Capacitively Coupled Plasma: CCP) や誘導結合型プラズマ (Inductively Coupled Plasma: ICP) に低周波 RF バイアスを組み合わせたり、これらの印加電圧をパルス駆動させたりした、RF プラズマ装置が使用される。基板へ入射するイオンのエネルギーを規定する要因は、高周波で振動するプラズマ電位  $V_p$  と基板表面上(もしくはエッチングホール底部)での電位  $V_w$  の差であるが、これらは印加する電圧及びプラズマの状態、装置の形状によらず変化する。

また、プロセス中の金属汚染(コンタミネーション)を抑制するため、プロセス容器には内部をアルミナ ( $Al_2O_3$ ) やイットリア ( $Y_2O_3$ ) などの酸化物で被覆された交換可能な壁(チャンバライナー)が挿入される。このような状況において、プラズマの周囲には電氣的に絶縁されたライナー壁が存在するが、プラズマの曝露により容器内壁の酸化物被膜は劣化により、インピーダンスが変化したり、グランドが見える状態になったりする。これによりプラズマに不均一性が生じたり、プラズマ電位の変動によるイオンエネルギー、つまりプロセスの精度に影響を与えたりする可能性がある。

### 2. 研究の目的

高度な制御が求められる現在のプロセスプラズマでは、プラズマの空間分布や電位の制御・安定化は大きな課題であり、経時劣化に伴う装置の異常検知やメンテナンス箇所の見極めは非常に重要である。

本研究では、高周波プラズマが生成される容器内壁面の状態がプラズマに与える影響の評価を目的とする。プロセス容器は一般的にアクセスポートが非常に少ないため、装置外部からの電位測定及び光学計測により、非接触でプラズマの状態をモニターする手法の開発を目指した。

(1) 電極及び、電氣的に浮遊するライナー壁電位を高電圧プローブにより計測し、高周波プラズマにおける 1 次元電位構造を明らかにするとともに、接地面積が変化した際のプラズマ電位変動の評価を目的とした。

(2) 上記ではプラズマの空間構造を無視した 1 次元電位構造となっていた。非接触でプラズマの 3 次元空間構造を明らかにするため、カメラにより撮影された画像から 3 次元空間構造に再構築する手法の開発を目的とした。

### 3. 研究の方法

(1) Fig.1(a)のように直径 30cm、高さ 20 cmの真空容器上部の石英板には、直径 12cm のワンターンコイルを設置し、13.56MHz の RF 電力を印加することにより誘導結合型プラズマ (ICP) を発生させた。容器内にはステンレス製のライナー(直径 20.5cm、高さ 12.5cm)が設置され、ライナーの上部フランジと容器の間、ライナーの下部と基板ステージ周囲のアース電極の間にリング状の誘電板を挿入して電氣的に絶縁した。これは絶縁酸化物被膜された壁を模擬している。ステージ(直径 11cm)には 1.85MHz の低周波 (LF) バイアス電力を印加した。被覆劣化による接地面の露出を模擬するため、ライナー内に微小接地電極を挿入した。高電圧プローブを用いて、ステージとライナーにおける peak-to-peak 電圧と DC 電圧を、様々なプラズマ密度と接地電極面積の条件に対して、ステージの peak-to-peak 電圧の関数として測定した。

(2) Fig1.(b)のように直径 30cm、高さ 20 cmの真空容器に高周波電極(直径 11cm)を配置した。電極に 40 MHz VHF 電力を印加し容量結合型プラズマ (CCP) を生成した。真空容器上部と側面にある観察窓からカメラ(Nikon D5600)を用いたプラズマの撮影が可能である。また、チャンパー内部は光反射の影響を抑えるために黒塗装を施した。

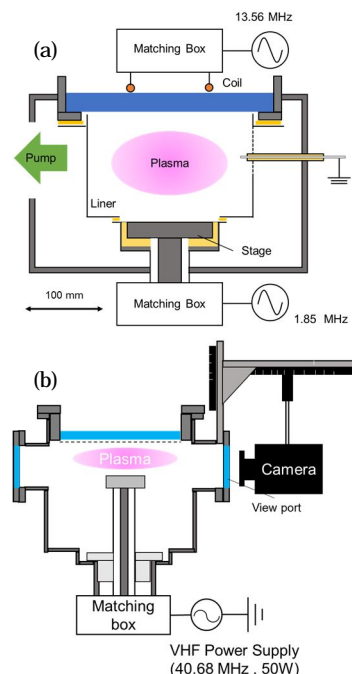


Fig.1 装置図

### 4. 研究成果

(1) ICP プラズマ中に挿入した小型アース電極の面積を変化させながら、LF バイアスステージとライナーの peak-to-peak 電圧と DC 電圧を測定した。LF 電圧増加とともに、自己バイアスの発生が見られた。一方、ライナー電圧は LF 電圧およびプラズマ密度の増加に伴い正に増加することが確認された。

先ほどの実験結果を等価回路で検討を行いました。まず、この装置における LF バイアスに対する等価回路モデルを Fig.2 に示す。LF バイアス電圧は整合回路 (M.B.) ステージ前面のシース、プラズマ、ライナーのシースとライナーのキャパシタンスを通る回路で書くことができる。

$V_{Stg}$ ,  $V_{Plas}$ ,  $V_{Lin}$  はそれぞれ接地電位に対するステージ電位、プラズマ電位、ライナー電位である。また、 $\Delta V_{Stg\_sh}$ ,  $\Delta V_{Lin\_sh}$  はそれぞれステージシース間の電位差およびライナーシース間の電位差である。プラズマ密度が増加すると、シース厚さは小さくなり、シースキャパシタンスは増加し、シースにかかる電圧は小さくなり、相対的にライナーにかかる電圧が増加したと考えられる。

また、プラズマ電位を、peak-to-peak 電圧と DC 電圧の関係から単純なモデルで推定した。評価された DC 電位を Fig.3 に示す。LF 電圧増加とともに推定プラズマ電位も増加している。また、プラズマに対するステージの電位差から、基板へのイオン衝撃エネルギーを評価することが可能である。

接地電極の挿入が電位変動に与える影響を調べたところ、接地電極長 ( $L_{GND}$ ) の増加に伴い、ライナーに発生する電位が減少した (Fig.4)。これは、挿入電極面積の増加によりシースにかかる電圧が低下し、等価回路上で並列の位置にあるライナー電位も低下したためと考えられる。

以上の測定結果とプラズマ電位の推定結果に基づいて、シースキャパシタンスやライナーのキャパシタンスにかかる  $V_{PP}$  の分圧比を求めた。接地金属面が増加するとイオン衝撃エネルギーを決定するステージ前面のシースにかかる分圧比が増加した。また、この傾向は ICP 電力が大きく、LF 電圧が小さい、つまり高プラズマ密度かつ低バイアス条件下で最も顕著となった。原子層エッチングプロセスのような低バイアス電圧、高密度プラズマの条件下では、小さな接地面の露出がチャンパー内の電位構造、つまり、ステージ上の基板に入射するイオンエネルギーに影響を与えることが示唆された。

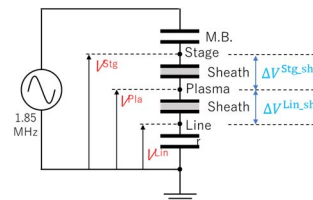


Fig.2 LF バイアス等価回路

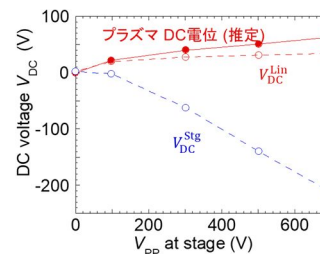


Fig.3 DC 電位

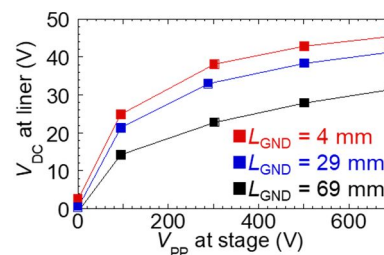


Fig.4 ライナー DC 電位

(2) 電極間のプラズマ発光の空間構造を再構築するため、再構築空間を縦 140 mm、横 140 mm、高さ 40 mm の直方体空間とし、空間を 10 mm 立方体で 784 個のボクセルに分割した。分割した各立方体の輝度情報ベクトルを  $f$ 、撮影画像輝度情報ベクトルを  $g$  とし、 $f$  と  $g$  を結び付ける固有のカメラパラメータ行列を  $H$  とするとき関係式は以下のよう表される。

$$Hf=g$$

今回は容器側面 1 方向からの撮影画像を用いることから、求めた行列  $H$  を輝度情報  $f$  が周方向均一である条件のもと求めた行列  $H$  を作り直し、Thikhonov-Philips 正則化法を用い Python にて計算を行った。プラズマ発光分布の再構築をおこなうにあたり、カメラパラメータ行列  $H$  の実験的評価が必要となる。そこで、光学台にディスプレイおよびカメラを設置し、測定対象となる空間構造のボクセルに対応するディスプレイ上の位置のみを一定光量で発光させて撮影をおこない、これをすべてのボクセル位置において撮影した映像をもとに、カメラの特性評価をおこなった。

$H$  の妥当性評価として、Fig.5 のような 3 次元輝度情報  $f$  を持つ仮想プラズマを作成し、 $Hf=g$  に代入することによって画像情報  $g$  を取得した。その結果を Fig.6 に示す。3 次元構造が  $H$  によって二次元分布へと変換されている。

実際に発生させたプラズマの電極表面近傍に着目して、この  $H$  を元に、2.5 次元の発光分布の再構築を行った。電極面内において発光強度が強く、また電極直上から上部に向かって発光強度が減少している結果が得られており、本手法を用いた発光分布の再構築が妥当に行われていることがわかる。

今後の計画として、複数台のカメラにより多方向からの撮影を行い、3 次元構造の再構築を試みる。

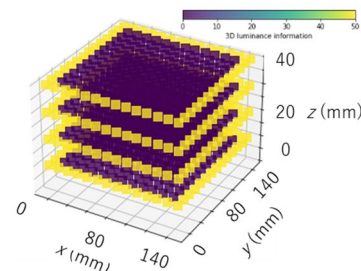


Fig.5 仮想プラズマ

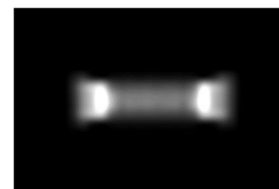


Fig.6 出力画像

< 引用文献 >

[1] M.Kyuzo et al: Jpn. J. Appl. Phys. **62**(2023)SA1008.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kyuzo Manabu, Chiba Yukinori, Suzuki Haruka, Toyoda Hiroataka	4. 巻 62
2. 論文標題 Influence of small ground surface on plasma property in an inductively-coupled plasma with floating liner	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SA1008 ~ SA1008
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac7e19	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yukinori Chiba, Manabu Kyuzo, Haruka Suzuki, Hiroataka Toyoda
2. 発表標題 RF Voltage Division of in RF-biased High-density Plasma with Floating Liner
3. 学会等名 ISPlasma2022/IC-PLANTS2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yukinori Chiba, Manabu Kyuzo, Haruka Suzuki and Hiroataka Toyoda
2. 発表標題 Influence of metal exposure on the plasma potential in RF-biased high-density plasma with floating liner
3. 学会等名 The 12th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology(APSPT-12)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Manabu Kyuzo, Yukinori Chiba, Haruka Suzuki, and Hiroataka Toyoda
2. 発表標題 Influence of small grounded surface on plasma property in an inductively-coupled plasma with floating liner
3. 学会等名 42nd International Symposium on DryProcess（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------