

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340178

研究課題名(和文) シミュレータ実装制御システムを備えた次世代プロセス用プラズマ源の研究

研究課題名(英文) Investigation of Plasma Source Using a Control System Equipped with a Plasma Simulator for Next-Generation Processing

研究代表者

八坂 保能 (Yasaka, Yasuyoshi)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30109037

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,400,000円、(間接経費) 2,820,000円

研究成果の概要(和文)：半導体製造においてプラズマプロセッシングは基幹技術であり、プラズマ源として大口径、低電子温度、高均一性が求められている。本研究では、これらの要求を満たし得るマイクロ波励起プラズマについて、均一性制御に関する課題に着目している。そのために二つの新しい技術、すなわち、マイクロ波放射電界の径方向分布を調整可能なアンテナ、および目標とする径方向密度分布を得るために必要なマイクロ波電力吸収分布を計算するハイパーシミュレータ、を導入した。これらを含む制御システムを構築し、生成プラズマの分布制御に有効であることを実証した。

研究成果の概要(英文)：In the manufacturing process of semiconductors, plasma processing is an essential technology, and the plasma used in the process is required to be of large diameter, low temperature, and high uniformity. This research focuses on the microwave-excited plasma that meets these needs, and the research target is a spatial profile control. Two novel techniques are introduced to control the uniformity; one is a segmented slot antenna that can change distribution of the radiated field during operation, and the other is a hyper simulation that can predict microwave power distribution necessary for a desired radial density profile. The control system including these techniques is constructed and found to be effective for the profile control of produced plasmas.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ マイクロ波 シミュレーション 分布制御

1. 研究開始当初の背景

大面積マイクロ波プラズマ源は日本が主導している数少ないプロセス装置の一つである。実際のプロセスにおいてその均一性などの制御が重要であるが、経験則以上の制御法は得られておらず、ましてや近い将来の450 mm ウェハ対応装置も不透明である。このプラズマ源では、表面近傍における電子加熱機構が重要であり、著者等はその領域における空間共鳴とプラズマ共鳴の測定並びに制御法を実験的・理論的に明らかにすると同時に、それらの物理機構を組み入れたシミュレーション手法も開発してきた。一般にシミュレーションは専ら実験結果の解釈に用いられており、実験と計算の一致が見られるかどうかに関心の対象であって、他の用途に応用するような事例はなかった。

生産ラインのプラズマ制御は ON/OFF 制御が主流であり、そのアルゴリズムとしてはエキスパートシステム、ニューラルネットワークなどによる経験則が用いられている。つまり、プラズマ物理を基礎としたプロセス制御は行われていない。制御性を向上させるためには何らかの形で新しい制御法を創出することが望まれている。

2. 研究の目的

上で述べたように、LSI 生産ラインのプラズマプロセス装置では、プロセス情報等の装置出力量から、プラズマ源の装置入力量である電力やガス供給などの ON/OFF フィードバック制御をリアルタイムに行う。この場合、制御系にエキスパートシステムなどを使用して、経験則に基づき制御を精密化している。一方、学理モデルに基づくプラズマシミュレーションでは、装置入力量を与えたときに計算出力量を求め、その装置出力量との一致・不一致に、オフラインで着目しているのみである。

本研究では、このプラズマシミュレーションが持つ高い予測能力を、装置制御系に組み込み、シミュレータ実装制御システムを構成することによって、学理に基づくプロセス用プラズマ源の高機能先進的制御を実現しようとするものである。すなわち、学理的基礎方程式群を用いて、「結果としての装置出力量」から「それをもたらす装置入力量」を求めるために、逆シミュレーションであるハイパーシミュレータを確立して、装置制御に結び付けることを目指す。

3. 研究の方法

本研究で使用するマルチスロット平板(MSP)アンテナは、その動作モード設定だけで(プラズマの密度などに左右されずに)プラズマ中のマイクロ波電界の方位角・半径方向モード数が決定されるという大きな特徴を持っている。このアンテナ設定機能を拡張して、プラズマの電力吸収分布を制御する手法を確立する。

プラズマ計測では密度、温度、ラジカル束分布等の装置出力量が得られるが、シミュレーションでは輸送係数や電力吸収係数等の計算入力量を入力し、装置出力量に対応する計算出力量を得るので、両者を比較することが従来の常識であった。本研究では、シミュレーションの入出力を逆にして、装置出力量(電子密度分布、温度分布)から装置入力量(電力、電界分布、ガス供給分布)を決定する方式、すなわちハイパーシミュレータ、を確立する。

この2つの新しい機能をループ結合して、装置出力量が所望の分布になるような計算機出力量を求め、それを装置入力量とする制御システムを試作し評価する。

4. 研究成果

(1) 本研究のために開発した二重同軸給電MSPアンテナを用いたマイクロ波励起プラズマ発生装置を図1に示す。この装置は、2.45 GHz マイクロ波電源、方向性結合器、パワーモニタ、および3スタブチューナーを2組持ち、その出力は二重同軸管を經由して、金属セパレータで2分割されたアンテナキャビティの内側セグメントと外側セグメントに独立して供給される。キャビティ下面にはマルチスロット板が設置され、内側および外側マイクロ波電界はここから誘電体窓を通して半径25 cmのプラズマに放射される。

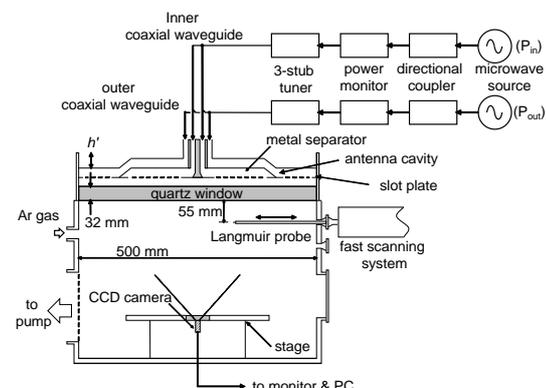


図1 実験装置の構造

内側マイクロ波電力 P_{in} と外側電力 P_{out} の配分を調整することにより、スロット板上のマイクロ波電界の半径方向分布を変化させることができ、プラズマ中の電力吸収分布を制御することが可能になる。特に、スロット板が多数のスロットを持つためキャビティ内の定在波分布に対応する狭い空間スペクトル幅の電界を放射するので、広いスペクトルで励振する小数スロットアンテナに発生しやすい表面波定在波を回避して、放射電界分布を反映した共鳴吸収による電力吸収分布を得られることに特徴がある。

(2) 図1の装置はマイクロ波導入系、真空容器系ともに軸対称であり、方位角方向には均一なプラズマが生成されると期待される。よって、分布制御の対象として半径 r 方向に着

目し、プラズマのイオン飽和電流密度分布 $J_{is}(r)$ を表現するパラメータとして、均一性 U と傾き G を、 $U = \sigma(J_{is})/2av(J_{is})$ 、 $G = (J_{is}(15) - J_{is}(0))/(J_{is}(15) + J_{is}(0))$ で定義する。ここで、 σ と av は $r = 0-15$ cm 内の分散と平均値である。

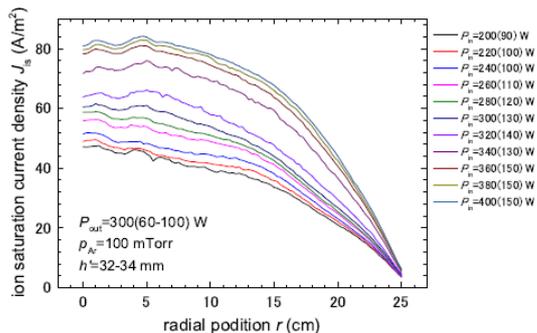


図2 J_{is} の半径方向分布の変化

図2は金属セパレータの半径が13 cmの場合に、Arガス圧力 $p_{Ar} = 100$ mTorrにおいて $P_{out} = 300$ Wに固定して P_{in} を200-400 Wの範囲で変化させたときの J_{is} の半径方向分布の変化を表している。分布形状は中心ピークであり、 P_{in} のみを変化させても全体的に増減するので、形状制御、すなわち U 、 G の制御はできていない。次に金属セパレータの半径を16 cmにした場合の結果を図3に示す。

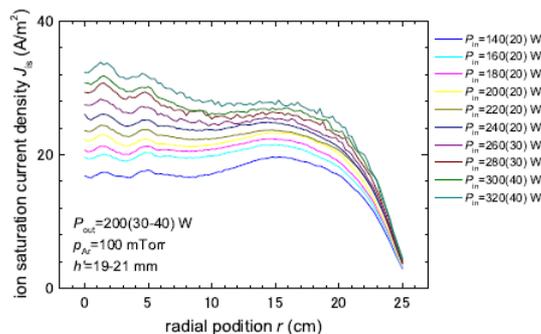


図3 J_{is} の半径方向分布の変化

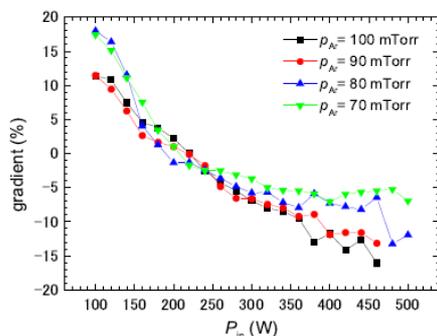


図4 P_{in} を変化させたときの G の値

外側電力を固定し内側電力のみを変化させることにより、 $r = 15$ cm 以降の分布をあまり変化させずに、内側の J_{is} 分布のみを大きく変化させることができていることが分かる。図4は図3の場合も含めた70-100 mTorrの圧力において、 P_{in} を変化させたときの G の値

をプロットしたものである。内側電力を変化させることで傾き G の値を正から負へ連続的に、また大きく変化させることができていることが分かる。

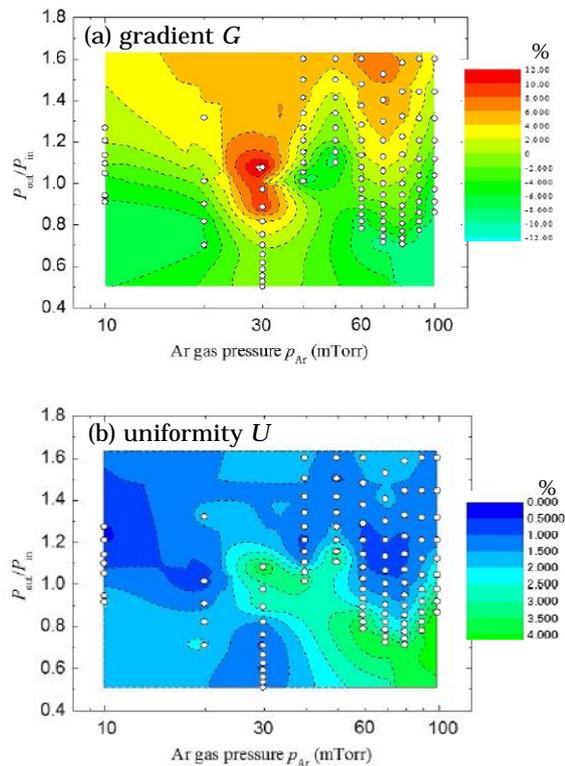


図5 (a) G と (b) U の $p_{Ar}-P_{out}/P_{in}$ 依存性

Arガス圧力 p_{Ar} と内外電力比 P_{out}/P_{in} を変化させたときの G を図5(a)に、 U を(b)に示す。(a)では、暖色になるほど傾き G が正の値、すなわちプラズマ分布の内側が外側よりも小さくなっている状態、寒色なるほど傾き G が負の値、すなわちプラズマ分布の内側が外側よりも大きくなっている状態を表す。10~100 mTorr 全ての圧力帯において、傾き G が0をまたいで変化させられていることが分かる。よって、幅広い圧力帯においてプラズマ分布の勾配の制御が行えると考えられる。(b)は均一性 U をプロットしたものであり、値が小さいほど高い均一性を持つ。図から、広い圧力範囲で2%以下の均一性が実現されていることが分かる。

金属セパレータの半径が19 cmの場合についても実験を行ったが、図3,4に示した16 cmの場合よりも性能は低下した。以上のことから、金属セパレータ半径を16 cmとしたときに、二重同軸給電 MSP アンテナが最も効果的にプラズマ密度分布を変化させることができること、すなわち、アンテナへの電力分配を調整することによってマイクロ波電界放射分布を制御可能なことが明らかになった。

(3) 上記の二重同軸給電 MSP アンテナを用いた12インチウェハ用装置の新しい制御方式として、プラズマシミュレーションを制御

ループに組み込んだシミュレータ実装制御システムを図6のように提案する。システム構成要素としてのシミュレータは従来のシミュレーションとは入力と出力が反転している。このハイパーシミュレーションは入力にプラズマ密度分布や温度分布等であり、出力が電力結合係数、ガス密度分布、入力電力等である。ハイパーシミュレーションを用いることで、目標の出力結果を得るために必要な入力条件が計算され、それらを装置設定の指標にフィードバックさせる。

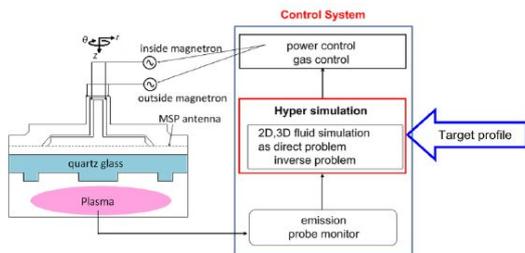


図6 シミュレータ実装制御システム

以下ではまずハイパーシミュレーションの要素である二次元(2D)・三次元(3D)流体シミュレーションについて議論する。流体シミュレーションは二重同軸給電方式を用いたマイクロ波励起プラズマ発生装置を対象としており、入力電力やアンテナの石英ガラスからの高さを変化させることによってプラズマ分布への影響を調べた。次に、目標分布を与えたときのハイパーシミュレーションについて議論する。ハイパーシミュレーションでは、電力吸収分布関数調節型と装置電力設定値調整型の二つの方法を用い、目標分布とシミュレーションによって得られる電子密度分布を比較する。

図7に流体シミュレーションの計算手順を示す。マイクロ波励起プラズマの流体シミュレーションでは、装置形状、初期条件、反応のデータセットなどを読み込んだ後、Maxwell方程式による波動伝搬、電力吸収、連続の式およびエネルギー保存則を用いたプラズマ輸送、レート方程式による気相化学反応をパラメータを渡しながら繰り返し計算し定常解を得る。

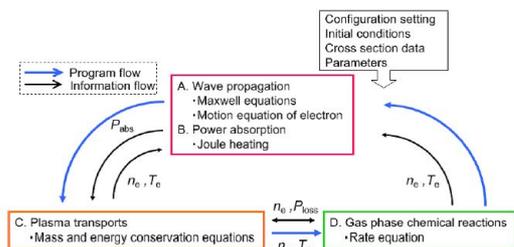


図7 流体シミュレーションの計算手順

(4) 開発した2D流体シミュレーションコードを用いて、図1の装置を軸対称円筒座標で表現し、スロットを複数の同心円環と近似した構造として、 $p_{Ar} = 50 \text{ mTorr}$ 、 $P_{in} + P_{out} = 300$

W、計算時間3ms、 $z = 5 \text{ cm}$ でのプラズマ密度分布を図8に示す。

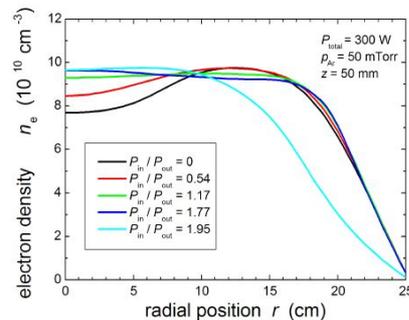


図8 2D計算によるプラズマ密度分布

P_{in} と P_{out} の比により、電力吸収分布が変化し、結果として密度分布形状が変化していることが分かる。

3D流体シミュレーションコードでは、直角座標系を使用して解くため、円形境界では物理量に少し凹凸誤差が生じる。図9はプラズマ密度と電子温度の計算結果の一例を示している。

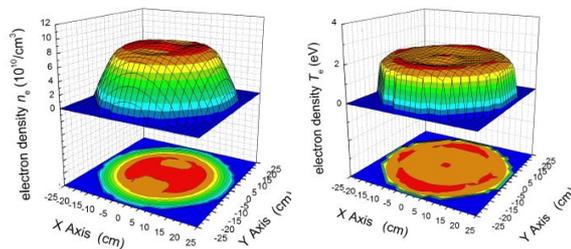


図9 3D計算によるプラズマ密度、電子温度分布

計算条件は、 $p_{Ar} = 30 \text{ mTorr}$ 、 $P_{in} = 50 \text{ W}$ 、 $P_{out} = 300 \text{ W}$ 、計算時間1msである。

(5) ハイパーシミュレーションは、電力供給設定部、流体シミュレーション部、および伝達関数部からなる図10の構造を持ち、流体シミュレーション部については図7で説明した通りである。電力供給設定部ではプラズマの半径方向パワー吸収分布を、標準値に $a_p(r)$ の係数をかけることにより修正する。流体シミュレーションでは、修正係数を取り入れた計算を行い、プラズマ分布を計算し、注目する z 方向位置におけるプラズマ密度の半径方向分布 $a_N(r)$ を得て、これを伝達関数部に送る。伝達関数部内では、 a_p や a_N は、

$$a_S(r) = \sum_n A_S(n) P_n(r) \quad S = P \text{ or } N$$

のようにルジャンドル関数 P_n により関数展開され、その係数 $A_S(n)$ ($n = 0, 2, 4$)により評価される($A_S(0) = 1$ と規格化)。これにより、少ない情報量で分布形状を表現できる。内部動作としては、与えられた A_N を持つプラズマを生成するのに必要な A_P を探すことであ

り、その手法として二分探索法や関数近似法

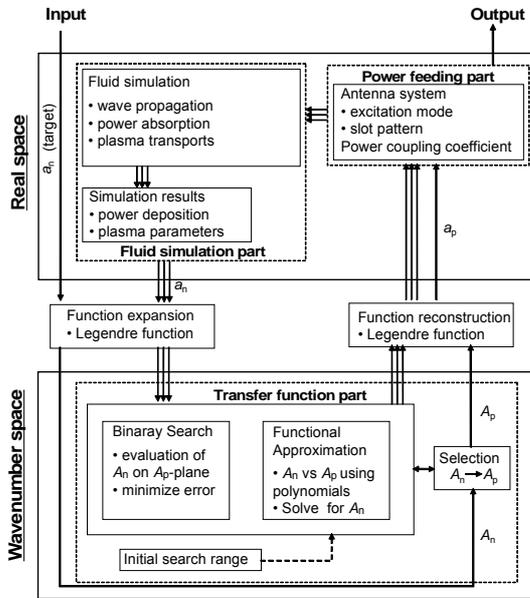


図 10 ハイパーシミュレーションの構成

が用いられている。図 10 に示されるハイパーシミュレーションにおいては、まずプラズマ装置で実現させたいプラズマ密度分布を A_{NT} で表現し、これを入力に与える。シミュレータの各部が連携して、 A_{NT} を実現するために必要な、探索範囲内で最適の A_p を求め、これを出力とする。この出力は図 6 の電力コントロール部に送られ、 A_p から決まる $a_p(r)$ を作り出すのに適した P_{in} と P_{out} を選択して図 1 のプラズマ装置に与える。これが、電力吸収分布関数調節型（分布型）ハイパーシミュレーションを用いた制御システムである。

一方、装置電力設定値調整型（設定値型）では、伝達関数部内の $A_p(2)$ と $A_p(4)$ の代わりに P_{in} と P_{out} を用いて直接に装置設定値を出力するようにしたハイパーシミュレーションであり、特定の電力吸収分布調整機構を持つプラズマ装置専用となる。

(6) 目標分布を $(A_N(0), A_N(2), A_N(4)) = 1.00, -0.08, -0.10$ とした時の分布型ハイパーシミュレーションの途中経過を図 11 に示す。シミュレーション条件は、 $p_{Ar} = 50$ mTorr、計算時間は 3 ms、入力電力 $P_{in} + P_{out} = 300$ W、初期探索範囲は $-0.20 \leq A_p(2) \leq 0.20$ 、 $-0.20 \leq A_p(4) \leq 0.20$ としている。図中の青線が $(A_{NT}(0), A_{NT}(2), A_{NT}(4)) = (1.00, -0.08, -0.10)$ の時の目標分布 $a_{NT}(r)$ を示しており、黒線はシミュレーション結果の $a_N(r)$ を示している。この段階では、 $(A_p(2), A_p(4)) = (0.20, -0.15)$ の場合で最小誤差 0.1638 の分布が得られた。算出された $(A_p(2), A_p(4)) = (0.20, -0.15)$ における $a_N(r)$ と目標分布 $a_{NT}(r)$ の比較から、 $0 \leq r \leq 15$ cm の範囲において両者が一致に近付いていることが分かる。シミュレーションによって得られた最終の $A_p(2), A_p(4)$ を用いて特定のマイクロ波励起プラズマ発生装置を制御するために

は、この $A_p(n)$ を入力電力に変換する過程が必要となる。

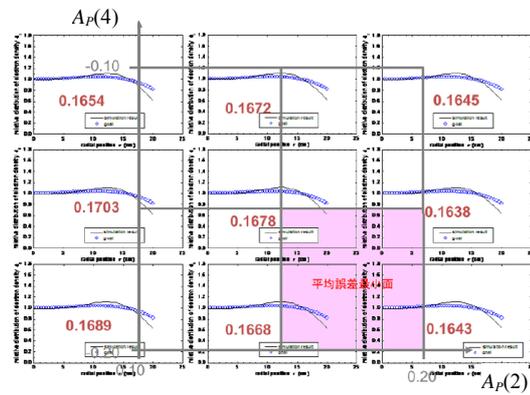


図 11 ハイパーシミュレーションの結果

ハイパーシミュレーションの出力 $A_p(n)$ を、あらかじめ求めた変換表を用いて P_{in} と P_{out} に変換し、それを実際のプラズマ装置に与えるハードウェアインターフェースを製作し、シミュレータ実装制御システムを備えたプラズマ源を構成した。 $p_{Ar} = 30$ mTorr とし、 $z = 55$ mm におけるプラズマ分布に対する目標分布を設定し、それをハイパーシミュレーションを含む制御システムで装置設定を行ったときの生成プラズマのイオン飽和電流分布を測定した。

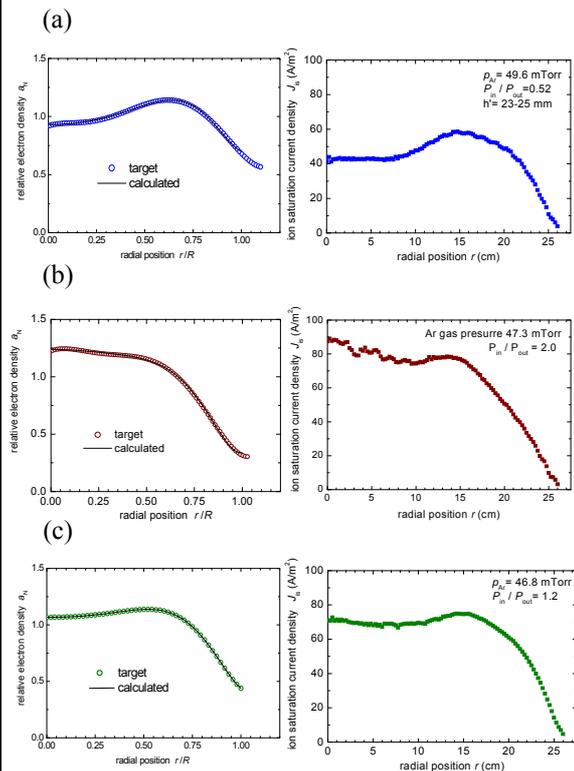


図 12 目標分布と計算結果（左側）および制御システムを用いた実験結果（右側）

図 12 において、(a) から (c) の左側のグラフは丸印が目標分布、実線がそれを満たすハイパーシミュレーションの計算結果であり、

右側のグラフはハイパーシミュレーションの出力により装置制御を行って得られた実験結果である。目標分布として、(a)は傾き G が正(半径方向外側に向かって増加)、(b)は負、(c)はほぼ 0 の場合を設定したものであり、それぞれに対する実験結果のグラフはその目標をほぼ満たしていると言える。なお、設定値型についても同様の実験を行い、目標分布とシミュレーション結果が良く対応していることが確認された。

(7) 本研究において、シミュレータ実装制御システムを備えたプラズマ源を試作し、その動作を評価した結果、新規な制御システムの基本的動作が機能していることが実証された。現時点では、計算機の性能、計算コードの組み方などの制約からハイパーシミュレーションの実行時間が長く、リアルタイム制御にはなっていないが、これを解決すれば実用性がより明確になると期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3件)

Y. Yasaka, N. Tobita, A. Tsuji, Control of Plasma Profile in Microwave Discharges via Inverse-Problem Approach, 査読有, AIP Advances, Vol. 3, 122102 (16pp), 2013, doi: 10.1063/1.4840735.

Y. Yasaka et al. (計 6名, 1番目), Control of Plasma Profile in Microwave Discharges by Using a Segmented Slot Antenna driven by Two Magnetrons, 査読有, Proc. 31st Int'l. Conf. Phenomena in Ionized Gases, 2013, www.icpig2013.net/papers/294_2.pdf.

A. Tsuji, Y. Yasaka, New Simulation Approach to Controlling Plasma Uniformities, 査読有, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 50, 08JC03(5pp), 2011, doi: 10.1143/JJAP.50.08JC03.

[学会発表](計 5件)

K. Kobayashi, Y. Yasaka, Research on Spatial Distribution Control of Electric Fields Radiated from a Slot Antenna in Microwave-Excited Plasma, 8th Int'l. Conf. Reactive Plasmas and 31st Symp. Plasma Processing, Feb. 6, 2014, Fukuoka.

R. Naruiwa, Y. Yasaka, Research on Producing Large-Diameter Microwave Plasmas and Controlling Distributions Using the Antenna Emission Electric Field, 8th Int'l. Conf. Reactive Plasmas and 31st Symp. Plasma Processing, Feb. 6, 2014, Fukuoka.

R. Taniguchi, Y. Yasaka, H. Takeno, Studies on Hyper Simulation for a New

Control of Microwave-Excited Plasma, 8th Int'l. Conf. Reactive Plasmas and 31st Symp. Plasma Processing, Feb. 6, 2014, Fukuoka.

Y. Yasaka, R. Taniguchi, K. Kobayashi, H. Takeno, Plasma Simulator for Control of Spatial Plasma Distribution in Microwave Discharges, 23rd Int'l. Conf. Numerical Simulation of Plasmas, Sept. 15, 2013, Beijing, China.

T. Shiraishi, Y. Yasaka, H. Takeno, Simulation and Experimental Research toward Distribution Control of Radicals in Microwave Discharges, 11th Asia-Pacific Conf. Plasma Sci. Technol. And SPSM., Oct. 3, 2012, Kyoto.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

八坂 保能 (YASAKA YASUYOSHI)

神戸大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30109037

(2) 研究分担者

竹野 裕正 (TAKENO HIROMASA)

神戸大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 90216929

(3) 連携研究者

中本 聡 (NAKAMOTO SATOSHI)

神戸大学・大学院工学研究科・助手

研究者番号: 10198260