

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6603586号  
(P6603586)

(45) 発行日 令和1年11月6日(2019.11.6)

(24) 登録日 令和1年10月18日(2019.10.18)

(51) Int.Cl.

H01L 21/3065 (2006.01)  
H05H 1/46 (2006.01)

F 1

H01L 21/302  
H05H 1/46101B  
M

請求項の数 10 (全 32 頁)

(21) 出願番号 特願2016-8143 (P2016-8143)  
 (22) 出願日 平成28年1月19日 (2016.1.19)  
 (65) 公開番号 特開2017-130528 (P2017-130528A)  
 (43) 公開日 平成29年7月27日 (2017.7.27)  
 審査請求日 平成30年7月10日 (2018.7.10)

(73) 特許権者 000219967  
 東京エレクトロン株式会社  
 東京都港区赤坂五丁目3番1号  
 (74) 代理人 100088155  
 弁理士 長谷川 芳樹  
 (74) 代理人 100113435  
 弁理士 黒木 義樹  
 (74) 代理人 100122507  
 弁理士 柏岡 潤二  
 (72) 発明者 永海 幸一  
 東京都港区赤坂五丁目3番1号 赤坂B i  
 ズタワー 東京エレクトロン株式会社内  
 審査官 鈴木 聰一郎

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 プラズマ処理方法及びプラズマ処理装置

(57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

プラズマ処理装置において実行されるプラズマ処理方法であって、  
 前記プラズマ処理装置は、  
 処理容器と、  
 前記処理容器内にガスを供給するガス供給系と、  
 前記処理容器内の空間がそれらの間に介在するように設けられた第1電極及び第2電極と、

プラズマ生成用の第1の高周波を出力する第1の高周波電源と、  
 イオン引き込み用の第2の高周波を出力する第2の高周波電源と、  
 前記第1電極又は前記第2電極と前記第1の高周波電源を接続する第1の給電ラインと、  
 前記第2電極と前記第2の高周波電源を接続する第2の給電ラインと、  
 前記第1の高周波電源の負荷インピーダンスを調整するための第1の整合器と、  
 前記第2の高周波電源の負荷インピーダンスを調整するための第2の整合器と、  
 前記ガス供給系を制御する第1手段と、  
 前記第1の高周波電源の負荷インピーダンス、負荷抵抗、及び、負荷リアクタンス、  
 並びに、前記第1の高周波の反射波係数のうち少なくとも一つを含むパラメータを求める  
 第2手段と、  
 を備え、

10

20

該プラズマ処理方法は、

前記処理容器内において、第1のガスのプラズマを生成する複数の第1段階と、

前記複数の第1段階と交互に実行される複数の第2段階であり、前記処理容器内において、前記第1のガスに含まれるガスとは異なるガスを含む第2のガスのプラズマを生成する、該複数の第2段階と、  
を含み、

前記複数の第1段階の各々において、前記ガス供給系から前記処理容器内に前記第1のガスが供給され、前記第1電極又は前記第2電極に前記第1の高周波電源から前記第1の高周波が供給され、  
10

前記複数の第2段階の各々において、前記複数の第1段階のうち直前の第1段階から連続して前記第1電極又は前記第2電極に前記第1の高周波電源から前記第1の高周波が供給され、

前記複数の第2段階の各々は、

前記処理容器内に供給されるガスを前記第1のガスから前記第2のガスに切り替えるために、前記第1手段から前記ガス供給系にガス切替信号を与える工程と、

前記ガス切替信号が前記ガス供給に与えられた後、前記パラメータが閾値を超えたときに、前記第2手段が前記第2の高周波電源に前記第2電極への前記第2の高周波の供給を開始させる工程と、  
を含む、

20  
プラズマ処理方法。

#### 【請求項2】

前記プラズマ処理装置は、前記複数の第2段階の各々の開始時点と該複数の第2段階の各々において前記第2の高周波の供給が開始された時点との間の時間差を求める第3手段を更に備え、

前記第3手段が前記時間差を求める工程と、

前記複数の第2段階のうち先行する第2段階より後に実行される第2段階の所定の実行時間長を前記時間差の分だけ増加させるように、該所定の実行時間長を調整する工程と、  
を更に含む、請求項1に記載のプラズマ処理方法。

#### 【請求項3】

前記第2手段が、パラメータの系列から求められる移動平均値を用いて、前記閾値を調整する工程を更に含み、  
30

前記パラメータの系列は、前記複数の第2段階のうち実行済の第2段階、又は、該実行済の第2段階と実行中の第2段階のそれぞれで前記第1の整合器によるインピーダンス整合が完了した状態における、前記第1の高周波電源の負荷インピーダンス、負荷抵抗、及び、負荷リアクタンス、並びに、前記第1の高周波の反射波係数のうち少なくとも一つを含むパラメータから構成される、

請求項1又は2に記載のプラズマ処理方法。

#### 【請求項4】

前記複数の第2段階の各々において、第1の移動平均値及び第2の移動平均値が所定の調整範囲内に含まれる場合に、前記第1の高周波電源の電源制御部が、前記第1の高周波を調整する工程であり、前記第1の移動平均値から推定される前記第1の高周波電源の負荷インピーダンスを該第1の高周波電源の出力インピーダンスに近づけるよう第1の副期間において出力される前記第1の高周波の周波数を調整し、前記第2の移動平均値から推定される前記第1の高周波電源の負荷インピーダンスを該第1の高周波電源の出力インピーダンスに近づけるよう第2の副期間において出力される前記第1の高周波の周波数を調整する、該工程と、  
40

前記複数の第2段階の各々において、第3の移動平均値及び第4の移動平均値が所定の調整範囲内に含まれる場合に、前記第2の高周波電源の電源制御部が、前記第2の高周波を調整する工程であり、前記第3の移動平均値から推定される前記第2の高周波電源の負荷インピーダンスを該第2の高周波電源の出力インピーダンスに近づけるよう前記第1の  
50

副期間において出力される前記第2の高周波の周波数を調整し、前記第4の移動平均値から推定される前記第2の高周波電源の負荷インピーダンスを該第2の高周波電源の出力インピーダンスに近づけるよう前記第2の副期間において出力される前記第2の高周波の周波数を調整する、該工程と、

を更に含み、

前記第1の副期間は、前記複数の第2段階の各々の実行期間内において前記第2の高周波の供給が開始された時点から該実行期間の途中までの間の期間であり、前記第2の副期間は、前記途中から前記実行期間の終了時点までの間の期間であり、

前記第1の移動平均値は、前記複数の第2段階のうち実行済の第2段階それぞれの実行期間内において前記第2の高周波の供給が開始された時点から該実行期間の途中までの間の第1の副期間における前記第1の高周波電源の負荷インピーダンスの移動平均値であり、

前記第2の移動平均値は、前記実行済の第2段階それぞれの実行期間内の前記途中から該実行期間の終了時点までの間の第2の副期間における前記第1の高周波電源の負荷インピーダンスの移動平均値であり、

前記第3の移動平均値は、前記実行済の第2段階それぞれの実行期間内の前記第1の副期間における前記第2の高周波電源の負荷インピーダンスの移動平均値であり、

前記第4の移動平均値は、前記実行済の第2段階それぞれの実行期間内の前記第2の副期間における前記第2の高周波電源の負荷インピーダンスの移動平均値である、

請求項1～3の何れか一項に記載のプラズマ処理方法。

#### 【請求項5】

前記第1の高周波を調整する前記工程において、前記第1の高周波電源の前記電源制御部が、前記第1の副期間における前記第1の高周波のパワーが前記第2の副期間における前記第1の高周波のパワーよりも大きくなるように前記第1の高周波のパワーを調整し、

前記第2の高周波を調整する前記工程において、前記第2の高周波電源の前記電源制御部が、前記第1の副期間における前記第2の高周波のパワーが前記第2の副期間における前記第2の高周波のパワーよりも大きくなるように前記第2の高周波のパワーを調整する、

請求項4に記載のプラズマ処理方法。

#### 【請求項6】

処理容器と、

前記処理容器内にガスを供給するガス供給系と、

前記処理容器内の空間がそれらの間に介在するように設けられた第1電極及び第2電極と、

プラズマ生成用の第1の高周波を出力する第1の高周波電源と、

イオン引き込み用の第2の高周波を出力する第2の高周波電源と、

前記第1電極又は前記第2電極と前記第1の高周波電源を接続する第1の給電ラインと、

前記第2電極と前記第2の高周波電源を接続する第2の給電ラインと、

前記第1の高周波電源の負荷インピーダンスを調整するための第1の整合器と、

前記第2の高周波電源の負荷インピーダンスを調整するための第2の整合器と、

前記ガス供給系を制御する第1手段と、

前記第1の高周波電源の負荷インピーダンス、負荷抵抗、及び、負荷リアクタンス、並びに、前記第1の高周波の反射波係数のうち少なくとも一つを含むパラメータを求める第2手段と、

を備え、

前記処理容器内において、第1のガスのプラズマを生成する複数の第1段階の各々において、前記第1手段は、前記処理容器内に前記第1のガスを供給するよう前記ガス供給系を制御し、前記第1電極又は前記第2電極に前記第1の高周波を供給するよう前記第1の高周波電源を制御し、

10

20

30

40

50

前記複数の第1段階と交互に実行される複数の第2段階であり、前記処理容器内において、前記第1のガスに含まれるガスとは異なるガスを含む第2のガスのプラズマを生成する、該複数の第2段階の各々において、

前記第1手段は、前記複数の第1段階のうち直前の第1段階から連続して前記第1電極又は前記第2電極に前記第1の高周波を供給するよう前記第1の高周波電源を制御し、

前記第1手段は、前記処理容器内に供給されるガスを前記第1のガスから前記第2のガスに切り替えるために、前記ガス供給系にガス切替信号を与え、

前記第2手段は、前記ガス切替信号が前記ガス供給に与えられた後、前記パラメータが閾値を超えたときに、前記第2の高周波電源に前記第2電極への前記第2の高周波の供給を開始させる、

10 プラズマ処理装置。

【請求項7】

前記複数の第2段階の各々の開始時点と該複数の第2段階の各々において前記第2の高周波の供給が開始された時点との間の時間差を求める第3手段を更に備え、

前記第1手段は、前記複数の第2段階のうち前先行する第2段階より後に実行される第2段階の所定の実行時間長を前記時間差の分だけ増加させるように、該所定の実行時間長を調整する、

請求項6に記載のプラズマ処理装置。

【請求項8】

前記第2手段は、パラメータの系列から求められる移動平均値を用いて、前記閾値を調整し、

前記パラメータの系列は、前記複数の第2段階のうち実行済の第2段階、又は、該実行済の第2段階と実行中の第2段階のそれぞれで前記第1の整合器によるインピーダンス整合が完了した状態における、前記第1の高周波電源の負荷インピーダンス、負荷抵抗、及び、負荷リアクタンス、並びに、前記第1の高周波の反射波係数のうち少なくとも一つを含むパラメータから構成される、

請求項6又は7に記載のプラズマ処理装置。

【請求項9】

前記第1の高周波電源は、前記複数の第2段階の各々において、第1の移動平均値及び第2の移動平均値が所定の調整範囲内に含まれる場合に、前記第1の移動平均値から推定される前記第1の高周波電源の負荷インピーダンスを該第1の高周波電源の出力インピーダンスに近づけるよう第1の副期間において出力される前記第1の高周波の周波数を調整し、前記第2の移動平均値から推定される前記第1の高周波電源の負荷インピーダンスを該第1の高周波電源の出力インピーダンスに近づけるよう第2の副期間において出力される前記第1の高周波の周波数を調整する電源制御部を有し、

前記第2の高周波電源は、前記複数の第2段階の各々において、第3の移動平均値及び第4の移動平均値が所定の調整範囲内に含まれる場合に、前記第3の移動平均値から推定される前記第2の高周波電源の負荷インピーダンスを該第2の高周波電源の出力インピーダンスに近づけるよう前記第1の副期間において出力される前記第2の高周波の周波数を調整し、前記第4の移動平均値から推定される前記第2の高周波電源の負荷インピーダンスを該第2の高周波電源の出力インピーダンスに近づけるよう前記第2の副期間において出力される前記第2の高周波の周波数を調整する電源制御部を有し、

前記第1の副期間は、前記複数の第2段階の各々の実行期間内において前記第2の高周波の供給が開始された時点から該実行期間の途中までの間の期間であり、前記第2の副期間は、前記途中から前記実行期間の終了時点までの間の期間であり、

前記第1の移動平均値は、前記複数の第2段階のうち実行済の第2段階それぞれの実行期間内において前記第2の高周波の供給が開始された時点から該実行期間の途中までの間の第1の副期間における前記第1の高周波電源の負荷インピーダンスの移動平均値であり、

前記第2の移動平均値は、前記実行済の第2段階それぞれの実行期間内の前記途中から

10

20

30

40

50

該実行期間の終了時点までの間の第2の副期間における前記第1の高周波電源の負荷インピーダンスの移動平均値であり、

前記第3の移動平均値は、前記実行済の第2段階それぞれの実行期間内の前記第1の副期間における前記第2の高周波電源の負荷インピーダンスの移動平均値であり、

前記第4の移動平均値は、前記実行済の第2段階それぞれの実行期間内の前記第2の副期間における前記第2の高周波電源の負荷インピーダンスの移動平均値である、

請求項6～8の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

【請求項10】

前記第1の高周波電源の前記電源制御部は、前記第1の副期間における前記第1の高周波のパワーが前記第2の副期間における前記第1の高周波のパワーよりも大きくなるように前記第1の高周波のパワーを調整し、

10

前記第2の高周波電源の前記電源制御部は、前記第1の副期間における前記第2の高周波のパワーが前記第2の副期間における前記第2の高周波のパワーよりも大きくなるように前記第2の高周波のパワーを調整する、

請求項9に記載のプラズマ処理装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の実施形態は、被加工物の加工に用いられるプラズマ処理装置において実行されるプラズマ処理方法に関するものである。

20

【背景技術】

【0002】

半導体デバイスといった電子デバイスの製造においては、プラズマ処理装置を用いて被加工物に対するプラズマ処理が行われる。プラズマ処理装置は、一般的に、処理容器、ガス供給系、第1電極、第2電極、第1の高周波電源、及び、第2の高周波電源を備えている。ガス供給系は、処理容器内にガスを供給するように構成されている。第1電極と第2電極は、それらの間に処理容器内の空間が介在するように設けられている。第1の高周波電源は、プラズマ生成用の第1の高周波を第1電極又は第2電極に供給し、第2の高周波電源は、イオン引き込み用の比較的低周波の第2の高周波を第2電極に供給するようになっている。このようなプラズマ処理装置において実行されるプラズマ処理では、一般的に、ガス供給系から処理容器内にガスが供給され、第1の高周波電源からの第1の高周波がプラズマの生成のために第1電極又は第2電極に供給される。第2の高周波電源からの第2の高周波は、必要に応じて、第2電極に供給される。

30

【0003】

プラズマ処理には、第1のガスのプラズマを生成する第1段階と第2のガスのプラズマを生成する第2段階とを交互に実行するものがある。即ち、このプラズマ処理では、第1のガスと第2のガスが交互に処理容器内に供給され、第1段階と第2段階にわたって、第1の高周波がプラズマの生成のために第1電極又は第2電極に供給される。さらに、第1段階では第2の高周波が第2電極に供給されず、第2段階において第2の高周波が第2電極に供給されることがある。

40

【0004】

ガスは質量を有しているので、ガス供給系が、処理容器内に供給するガスを第1のガスから第2のガスに切り替えるようにガス供給系が制御された時点から、実際に第2のガスが処理容器内に到達する時点までには、時間を要する。一方、第2の高周波は、第2の高周波電源が制御された時点から、無視し得る程度の時間で第2の電極に供給される。よって、第2のガスが処理容器内に到達していない時点で、第2の高周波が第2電極に供給される事態が生じる。

【0005】

そこで、処理容器内における発光スペクトルの検出結果から、第2のガスが処理容器内に到達していることが確認された後に、第2の高周波の供給を開始する技術が提案されて

50

いる。かかる技術については、下記の特許文献 1 に記載されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献 1】特開 2013 - 58749 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

第 1 のガスのプラズマの発光スペクトルと第 2 のガスのプラズマの発光スペクトルとの間には、検出可能な程度の差がないことがある。例えば、第 1 のガスに含まれるガスの種類と第 2 のガスに含まれるガスの種類によっては、第 1 のガスのプラズマの発光のスペクトルと第 2 のガスのプラズマの発光のスペクトルとの間に検出可能な程度の差がないことがある。このように第 1 のガスのプラズマの発光のスペクトルと第 2 のガスのプラズマの発光のスペクトルとの間に検出可能な程度の差がない場合には、第 2 のガスが処理容器内に到達したタイミングを高精度に検出することができない。結果的に、第 2 の高周波の供給を適切なタイミングで開始することができない。

10

【0008】

したがって、プラズマ処理装置の処理容器内において第 1 のガスのプラズマを生成する第 1 段階と当該処理容器内において第 2 のガスのプラズマを生成する第 2 段階とを交互に実行するプラズマ処理において、処理容器内に第 2 のガスが到達したタイミングを高精度に検出する技術が必要となっている。

20

【課題を解決するための手段】

【0009】

一態様においては、プラズマ処理装置において実行されるプラズマ処理方法が提供される。プラズマ処理装置は、処理容器、ガス供給系、第 1 電極、第 2 電極、第 1 の高周波電源、第 2 の高周波電源、第 1 の給電ライン、第 2 の給電ライン、第 1 の整合器、第 2 の整合器、第 1 手段、及び、第 2 手段を備えている。ガス供給系は、処理容器内にガスを供給するように構成されている。第 1 電極及び第 2 電極は、処理容器内の空間がそれらの間に介在するように設けられている。第 1 の高周波電源は、プラズマ生成用の第 1 の高周波を出力するように構成されている。第 2 の高周波電源は、イオン引き込み用の第 2 の高周波を出力するように構成されている。第 1 の給電ラインは、第 1 電極又は第 2 電極と第 1 の高周波電源を接続している。第 2 の給電ラインは、第 2 電極と第 2 の高周波電源を接続している。第 1 の整合器は、第 1 の高周波電源の負荷インピーダンスを調整するように構成されている。第 2 の整合器は、第 2 の高周波電源の負荷インピーダンスを調整するように構成されている。第 1 手段は、ガス供給系を制御するように構成されている。第 2 手段は、第 1 の高周波電源の負荷インピーダンス、負荷抵抗、及び、負荷リアクタンス、並びに、第 1 の高周波の反射波係数のうち少なくとも一つを含むパラメータを求めるように構成されている。

30

【0010】

一態様に係るプラズマ処理方法は、複数の第 1 段階と、当該複数の第 1 段階と交互に実行される複数の第 2 段階とを含む。複数の第 1 段階の各々では、処理容器内において第 1 のガスのプラズマが生成される。複数の第 2 段階の各々では、処理容器内において、第 1 のガスに含まれるガスとは異なるガスを含む第 2 のガスのプラズマが生成される。複数の第 1 段階の各々において、ガス供給系から処理容器内に第 1 のガスが供給され、第 1 電極又は第 2 電極に第 1 の高周波電源から第 1 の高周波が供給される。複数の第 2 段階の各々では、複数の第 1 段階のうち直前の第 1 段階から連続して第 1 電極又は第 2 電極に第 1 の高周波電源から第 1 の高周波が供給される。複数の第 2 段階の各々は、処理容器内に供給されるガスを第 1 のガスから第 2 のガスに切り替えるために、第 1 手段からガス供給系にガス切替信号を与える工程と、ガス切替信号がガス供給系に与えられた後、上記のパラメータが閾値を超えたときに、第 2 手段が第 2 の高周波電源に第 2 電極への第 2 の高周波の

40

50

供給を開始させる工程と、を含む。

【0011】

第1の高周波の供給が継続された状態で、処理容器内に存在しているガスが第1のガスから第2のガスに切り替わると、処理容器内において生成されるプラズマのインピーダンスが変化する。上述したパラメータは、プラズマのインピーダンスに応じて変化するパラメータであるので、処理容器内に存在しているガスの変化を良好に反映する。一様に係るプラズマ処理方法では、かかるパラメータに基づいて処理容器内に第2のガスが到達していることが検出される。したがって、処理容器内に第2のガスが到達したタイミングが高精度に検出される。そして、第2のガスが到達していることが検出されたときに第2の高周波の供給が開始されるので、第2の高周波の供給が適切なタイミングで開始される。

10

【0012】

一実施形態において、プラズマ処理方法は、プラズマ処理装置の第3手段が複数の第2段階の各々の開始時点と複数の第2段階の各々において第2の高周波の供給が開始された時点との間の時間差を求める工程と、先行する第2段階に関して求められた時間差の分だけ増加するよう、当該先行する第2段階より後に実行される第2段階の所定の実行時間長を調整する工程と、を更に含む。複数の第2段階の各々には、その実行時間長として初期的に所定の実行時間長が設定されている。したがって、複数の第2段階のうち一つの第2段階において、第2の高周波の供給が開始されるタイミングが遅れると、当該一つの第2段階において第2の高周波が第2電極に供給された状態で行われるプラズマ処理の時間が短くなる。この実施形態によれば、先行する第2段階に関して求められた上記の時間差の分だけ、後に実行される第2段階の実行時間長が所定の実行時間長から増加される。よって、この実施形態によれば、第2の高周波が第2電極に供給された状態で行われる第2のガスのプラズマによる処理の総実行時間長が、実質的に維持される。

20

【0013】

一実施形態では、プラズマ処理方法は、第2手段が、パラメータの系列から求められる移動平均値を用いて、前記閾値を調整する工程を更に含む。パラメータの系列は、複数の第2段階のうち実行済の第2段階、又は、該実行済の第2段階と実行中の第2段階のそれぞれで第1の整合器によるインピーダンス整合が完了した状態における、第1の高周波電源の負荷インピーダンス、負荷抵抗、及び、負荷リアクタンス、並びに、第1の高周波の反射波係数のうち少なくとも一つを含むパラメータから構成される。第2段階において第1の整合器によるインピーダンス整合が完了した状態では、処理容器内には第2のガスが十分に到達している。したがって、この状態でのパラメータの系列の移動平均値を用いて閾値を調整することにより、第2のガスが処理容器内に到達したタイミングがより高精度に検出される。

30

【0014】

一実施形態において、プラズマ処理方法は、(i)複数の第2段階の各々において、第1の移動平均値及び第2の移動平均値が所定の調整範囲内に含まれる場合に、第1の高周波電源の電源制御部が、第1の高周波を調整する工程であり、第1の移動平均値から推定される前記第1の高周波電源の負荷インピーダンスを該第1の高周波電源の出力インピーダンスに近づけるよう第1の副期間において出力される第1の高周波の周波数を調整し、第2の移動平均値から推定される第1の高周波電源の負荷インピーダンスを該第1の高周波電源の出力インピーダンスに近づけるよう第2の副期間において出力される第1の高周波の周波数を調整する、該工程と、(ii)複数の第2段階の各々において、第3の移動平均値及び第4の移動平均値が所定の調整範囲内に含まれる場合に、第2の高周波電源の電源制御部が、第2の高周波を調整する工程であり、第3の移動平均値から推定される第2の高周波電源の負荷インピーダンスを該第2の高周波電源の出力インピーダンスに近づけるよう第1の副期間において出力される第2の高周波の周波数を調整し、第4の移動平均値から推定される第2の高周波電源の負荷インピーダンスを該第2の高周波電源の出力インピーダンスに近づけるよう第2の副期間において出力される第2の高周波の周波数を調整する、該工程と、を更に含む。第1の副期間は、複数の第2段階の各々の実行期間内

40

50

において第2の高周波の供給が開始された時点から該実行期間の途中までの間の期間であり、第2の副期間は、当該途中から実行期間の終了時点までの間の期間である。第1の移動平均値は、複数の第2段階のうち実行済の第2段階それぞれの実行期間内において第2の高周波の供給が開始された時点から該実行期間の途中までの間の第1の副期間における第1の高周波電源の負荷インピーダンスの移動平均値である。第2の移動平均値は、実行済の第2段階それぞれの実行期間内の当該途中から該実行期間の終了時点までの間の第2の副期間における第1の高周波電源の負荷インピーダンスの移動平均値である。第3の移動平均値は、実行済の第2段階それぞれの実行期間内の第1の副期間における第2の高周波電源の負荷インピーダンスの移動平均値である。第4の移動平均値は、実行済の第2段階それぞれの実行期間内の第2の副期間における第2の高周波電源の負荷インピーダンスの移動平均値である。

10

#### 【0015】

第2段階における第2の高周波の供給の開始時点から第2段階の実行期間の途中までの間の期間、即ち第1の副期間では、第1の給電ラインにおける反射波が、当該第1の副期間の後の第2の副期間における反射波よりも大きくなる。これは、第1の高周波電源の負荷インピーダンスの変動によるものである。第2の高周波についても同様である。したがって、第1の高周波の反射波を減少させるためには、第1の副期間と第2の副期間それぞれの第1の高周波電源の負荷インピーダンスを個別に第1の高周波電源の出力インピーダンスに整合させる必要がある。また、第2の高周波の反射波を減少させるためには、第1の副期間と第2の副期間それぞれの第2の高周波電源の負荷インピーダンスを個別に第2の高周波電源の出力インピーダンスに整合させる必要がある。この実施形態では、実行済の第2段階の実行期間内の第1の副期間の第1の高周波電源の負荷インピーダンスの移動平均値、即ち第1の移動平均値によって推定される第1の高周波電源の負荷インピーダンスを第1の高周波電源の出力インピーダンスに近づけるよう、第1の高周波の周波数が調整される。また、第2の副期間における第1の高周波の周波数は、第2の移動平均値に基づき、同様に調整される。また、第1の副期間における第2の高周波の周波数は、第3の移動平均値に基づき、同様に調整される。また、第2の副期間における第2の高周波の周波数は、第4の移動平均値に基づき、同様に調整される。第1の高周波電源及び第2の高周波電源は、高速に高周波の周波数を変更することができるので、この実施形態によれば、負荷インピーダンスの変化に高速に追従してインピーダンス整合を行うことが可能である。

20

#### 【0016】

一実施形態では、第1の高周波を調整する工程において、第1の高周波電源の電源制御部が、第1の副期間における第1の高周波のパワーが第2の副期間における第1の高周波のパワーよりも大きくなるように第1の高周波のパワーを調整し、第2の高周波を調整する工程において、第2の高周波電源の電源制御部が、第1の副期間における第2の高周波のパワーが第2の副期間における第2の高周波のパワーよりも大きくなるように第2の高周波のパワーを調整してもよい。この実施形態によれば、第1の副期間においてプラズマに結合される高周波のパワーが不足する場合に、当該高周波のパワーを補うことが可能となる。

30

#### 【発明の効果】

#### 【0017】

以上説明したように、プラズマ処理装置の処理容器内において第1のガスのプラズマを生成する第1段階と当該処理容器内において第2のガスのプラズマを生成する第2段階とを交互に実行するプラズマ処理において、処理容器内に第2のガスが到達したタイミングを高精度に検出することが可能となる。

40

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0018】

【図1】一実施形態に係るプラズマ処理装置の構成を概略的に示す図である。

【図2】一実施形態に係るプラズマ処理方法に関するタイミングチャートである。

50

【図3】第1の高周波電源及び第1の整合器の構成を例示する図である。

【図4】第1の整合器のセンサ及びコントローラの構成を例示する図である。

【図5】第2の高周波電源及び第2の整合器の構成を例示する図である。

【図6】第2の整合器のセンサ及びコントローラの構成を例示する図である。

【図7】一実施形態に係るプラズマ処理方法を示す流れ図である。

【図8】第1の高周波電源及び第1の整合器の構成の別の例を示す図である。

【図9】図8に示す第1の高周波電源のインピーダンスセンサの構成を示す図である。

【図10】第2の高周波電源及び第2の整合器の構成の別の例を示す図である。

【図11】図10に示す第2の高周波電源のインピーダンスセンサの構成を示す図である。

。

【図12】別の実施形態にかかるプラズマ処理方法において実行されるインピーダンス整合の方法を示す流れ図である。

【発明を実施するための形態】

【0019】

以下、図面を参照して種々の実施形態について詳細に説明する。なお、各図面において同一又は相当の部分に対しては同一の符号を附すこととする。

【0020】

まず、プラズマ処理方法の実施形態が適用され得るプラズマ処理装置について説明する。図1は、一実施形態に係るプラズマ処理装置の構成を概略的に示す図である。図1に示すプラズマ処理装置1は、容量結合型のプラズマ処理装置である。プラズマ処理装置1は、処理容器10を備えている。処理容器10は、略円筒形状を有しており、アルミニウムといった材料から形成されている。この処理容器10の内壁面には、陽極酸化処理が施されている。また、処理容器10は、接地されている。

【0021】

処理容器10の底部上には、絶縁板12が設けられている。絶縁板12は、例えば、セラミックから形成されている。この絶縁板12上には、支持台14が設けられている。支持台14は、略円柱形状を有している。この支持台14上にはサセプタ16が設けられている。サセプタ16は、アルミニウムといった導電性の材料から形成されており、下部電極(第2電極)を構成している。

【0022】

サセプタ16上には、静電チャック18が設けられている。静電チャック18は、絶縁層又は絶縁シートの間に、導電膜から構成された電極20が挟まれた構造を有している。静電チャック18の電極20には、スイッチ22を介して直流電源24が電気的に接続されている。この静電チャック18は、直流電源24からの直流電圧により静電吸着力を発生し、当該静電チャック18上に載置された被加工物Wを静電吸着力により保持するようになっている。なお、被加工物Wは、例えば、ウエハのような円盤状の物体である。この静電チャック18の周囲、且つ、サセプタ16上には、フォーカスリング26が配置されている。また、サセプタ16及び支持台14の外周面には、円筒状の内壁部材28が取り付けられている。この内壁部材28は、例えば、石英から形成されている。

【0023】

支持台14の内部には、冷媒流路30が形成されている。冷媒流路30は、例えば、鉛直方向に延びる中心軸線に対して螺旋状に延在している。この冷媒流路30には、処理容器10の外部に設けられたチラーユニットから配管32aを介して冷媒c/w(例えば、冷却水)が供給される。冷媒流路30に供給された冷媒は、配管32bを介してチラーユニットに回収される。この冷媒の温度がチラーユニットによって調整されることにより、被加工物Wの温度が調整されるようになっている。さらに、プラズマ処理装置1では、ガス供給ライン34を介して供給される伝熱ガス(例えば、Heガス)が、静電チャック18の上面と被加工物Wの裏面との間に供給されるようになっている。

【0024】

サセプタ16には、導体44(例えば、給電棒)が接続されている。この導体44には

10

20

30

40

50

、高周波電源 3 6 、即ち第 1 の高周波電源が、整合器 4 0 、即ち第 1 の整合器を介して接続されており、また、高周波電源 3 8 、即ち第 2 の高周波電源が、整合器 4 2 、即ち第 2 の整合器を介して接続されている。高周波電源 3 6 は、プラズマの生成用の高周波 R F 1 、即ち第 1 の高周波を出力する。高周波電源 3 6 が output する高周波 R F 1 の基本周波数  $f_{B_1}$  は、例えば、1 0 0 M H z である。高周波電源 3 8 は、プラズマから被加工物 W にイオンを引き込むための高周波 R F 2 、即ち第 2 の高周波を出力する。高周波電源 3 8 が output する高周波 R F 2 の基本周波数  $f_{B_2}$  は、例えば、1 3 . 5 6 M H z である。

#### 【 0 0 2 5 】

整合器 4 0 及び導体 4 4 は、高周波電源 3 6 からの高周波 R F 1 をサセプタ 1 6 に伝送する給電ライン 4 3 、即ち第 1 の給電ラインの一部を構成している。また、整合器 4 2 及び導体 4 4 は、高周波電源 3 8 からの高周波 R F 2 をサセプタ 1 6 に伝送する給電ライン 4 5 、即ち第 2 の給電ラインの一部を構成している。

#### 【 0 0 2 6 】

処理容器 1 0 の天部には、上部電極 4 6 が設けられている。この上部電極 4 6 とサセプタ 1 6 の間には、プラズマが生成される処理容器 1 0 内の処理空間 P S が介在している。上部電極 4 6 は、天板 4 8 及び支持体 5 0 を有している。天板 4 8 には、多数のガス噴出孔 4 8 a が形成されている。天板 4 8 は、例えば、S i 、S i C といったシリコン系の材料から形成されている。支持体 5 0 は、天板 4 8 を着脱可能に支持する部材であり、アルミニウムから形成されており、その表面には陽極酸化処理が施されている。

#### 【 0 0 2 7 】

支持体 5 0 の内部には、ガスバッファ室 5 2 が形成されている。また、支持体 5 0 には、多数のガス通気孔 5 0 a が形成されている。ガス通気孔 5 0 a は、ガスバッファ室 5 2 から延びて、ガス噴出孔 4 8 a に連通している。ガスバッファ室 5 2 には、ガス供給管 5 4 を介してガス供給系 5 5 が接続されている。ガス供給系 5 5 は、ガスソース群 5 6 、流量制御器群 5 8 、及び、バルブ群 6 0 を含んでいる。ガスソース群 5 6 は、複数のガスソースを含んでいる。流量制御器群 5 8 は、複数の流量制御器を含んでいる。複数の流量制御器は、例えば、マスフローコントローラであり得る。また、バルブ群 6 0 は複数のバルブを含んでいる。ガスソース群 5 6 の複数のガスソースは、流量制御器群 5 8 の対応の流量制御器及びバルブ群 6 0 の対応のバルブを介して、ガス供給管 5 4 に接続されている。ガス供給系 5 5 は、複数のガスソースのうち選択されたガスソースからのガスを、調整された流量でガスバッファ室 5 2 に供給するように構成されている。ガスバッファ室 5 2 に導入されたガスは、ガス噴出孔 4 8 a から処理空間 P S に噴出される。

#### 【 0 0 2 8 】

サセプタ 1 6 と処理容器 1 0 の側壁との間、及び、支持台 1 4 と処理容器 1 0 の側壁との間には、平面視において環状の空間が形成されており、当該空間の底部は処理容器 1 0 の排気口 6 2 に繋がっている。処理容器 1 0 の底部には、排気口 6 2 に連通する排気管 6 4 が接続されている。この排気管 6 4 は、排気装置 6 6 に接続されている。排気装置 6 6 は、ターボ分子ポンプといった真空ポンプを有している。排気装置 6 6 は、処理容器 1 0 の内部空間を所望の圧力に減圧する。また、処理容器 1 0 の側壁には被加工物 W の搬入及び搬出のための開口 6 8 が形成されている。処理容器 1 0 の側壁には、開口 6 8 を開閉するためのゲートバルブ 7 0 が取り付けられている。

#### 【 0 0 2 9 】

また、プラズマ処理装置 1 は、主制御部 7 2 を備えている。主制御部 7 2 は、一以上のマイクロコンピュータを含み、外部メモリ又は内部メモリに格納されているソフトウェア（プログラム）及びレシピ情報に従って、プラズマ処理装置 1 の各部、例えば、高周波電源 3 6 , 3 8 、整合器 4 0 , 4 2 、ガス供給系 5 5 、即ち、流量制御器群 5 8 の複数の流量制御器及びバルブ群 6 0 の複数のバルブ、排気装置 6 6 等の個々の動作及び当該プラズマ処理装置 1 の装置全体の動作を制御する。また、主制御部 7 2 は、キーボード等の入力装置や液晶ディスプレイ等の表示装置を含むマン・マシン・インターフェース用の操作パネル、並びに、各種プログラム、レシピ、及び設定値等の各種データを格納する外部記憶装

10

20

30

40

50

置等とも接続されている。

【0030】

プラズマ処理装置の基本動作は次のようにして行われる。まず、ゲートバルブ70が開かれて、被加工物Wが開口68を経由して処理容器10内に搬入される。処理容器10内に搬入された被加工物Wは、静電チャック18上に載置される。次いで、ガス供給系55からガスが処理容器10内に導入され、排気装置66が作動されて、処理容器10内の空間の圧力が所定の圧力に設定される。さらに、高周波電源36からの高周波RF1がサセプタ16に供給され、必要に応じて高周波電源38からの高周波RF2がサセプタ16に供給される。また、直流電源24からの直流電圧が静電チャック18の電極20に印加され、被加工物Wが静電チャック18上に保持される。そして、処理容器10内に供給されたガスが、サセプタ16と上部電極46との間に形成された高周波電界により励起される。これにより、プラズマが生成される。このように生成されたプラズマからのラジカル及び/又はイオンによって被加工物Wが処理される。

【0031】

このプラズマ処理装置1において実行されるプラズマ処理方法の実施形態（以下、「方法MT」という）は、複数の第1段階S1、当該複数の第1段階S1と交互に実行される複数の第2段階S2を含む。図2は、一実施形態に係るプラズマ処理方法に関するタイミングチャートである。図2において、横軸は時間を示している。また、図2には、方法MTにおけるガスA、ガスB、ガスC、高周波RF1、及び、高周波RF2のそれぞれのタイミングチャートが示されている。図2において、ガスAのタイミングチャートのレベルは、処理容器10内に到達しているガスAの量を示している。ガスB及びガスCのタイミングチャートに関してもガスAのタイミングチャートと同様である。また、高周波RF1が高レベルであることは、高周波RF1がサセプタ16に供給されていることを示しており、高周波RF1が低レベルであることは、高周波RF1がサセプタ16に供給されていないことを示している。高周波RF2のタイミングチャートについても高周波RF1のタイミングチャートと同様である。

【0032】

方法MTの第1段階S1では、第1のガスのプラズマが、被加工物Wを収容している処理容器10内において生成される。第1段階S1では、ガス供給系55及び高周波電源36が主制御部72によって制御される。具体的には、第1段階S1において、ガス供給系55は、処理容器10内に第1のガスを供給するよう、制御される。より具体的には、第1段階S1の開始時に、主制御部72は、処理容器10内に供給するガスを第1のガスに切り替えるためのガス切替信号をガス供給系55に与える。第1段階S1のガス供給系55に対する制御により、ガス供給系55は、第1のガスのためのガスソースに接続されたバルブ群60のバルブを開き、当該ガスソースに接続された流量制御器群58の流量制御器の出力流量を所定の出力流量に設定する。また、第1段階S1において、高周波電源36は、高周波RF1をサセプタ16に供給するよう、主制御部72によって制御される。これにより、第1段階S1では、第1のガスのプラズマが生成される。図2に示すように、一例においては、第1のガスは、ガスAのみを含む。ガスAは、例えば、Arガスといった希ガスである。なお、第1段階S1では、高周波電源38からの高周波RF2はサセプタ16に供給されない。

【0033】

第2段階S2においては、第1のガスとは異なるガスを含む第2のガスのプラズマが、被加工物Wを収容している処理容器10内において生成される。第2段階S2では、ガス供給系55、高周波電源36、及び、高周波電源38が主制御部72によって制御される。具体的に、第2段階S2において、ガス供給系55は、処理容器10内に第2のガスを供給するよう、制御される。より具体的には、第2段階S2の開始時に、主制御部72は、処理容器10内に供給するガスを第1のガスから第2のガスに切り替えるためのガス切替信号をガス供給系55に与える。第2段階S2のガス供給系55に対する制御により、ガス供給系55は、第2のガスのためのガスソースに接続されたバルブ群60のバルブを

開き、当該ガスソースに接続された流量制御器群58の流量制御器の出力流量を所定の出力流量に設定する。また、第2段階S2において、高周波電源36は、直前の第1段階S1に連続して、高周波RF1をサセプタ16に供給するよう、主制御部72によって制御される。これにより、第2段階S2では、第2のガスのプラズマが生成される。図2に示すように、一例においては、第2のガスは、ガスA、及び、当該ガスAに添加されたガスBを含む。ガスBは、例えば、フルオロカーボンガスであり得る。

【0034】

ガス切替信号がガス供給系55に与えられた時点から、第2のガスが処理容器10内に到達する時点までの間には、時間を要する。そこで、第2段階S2では、処理容器10内に第2のガスが到達したことを検出するために、整合器40の演算部によって、後述するパラメータが閾値を超えているか否かが判定される。パラメータが閾値を超えていると判定されると、処理容器10内に第2のガスが到達しているものと判定され、整合器40の演算部は、サセプタ16に対する高周波RF2の供給を開始させるための高周波供給開始信号を高周波電源38に与える。

【0035】

図2に示すように、一実施形態では、方法MTは、複数の第3段階S3及び複数の第4段階S4を更に含んでいてもよい。複数の第3段階S3はそれぞれ、複数の第2段階S2の実行後に実行され、複数の第4段階S4はそれぞれ、複数の第3段階S3の実行後に実行される。

【0036】

第3段階S3においては、第3のガスのプラズマが、被加工物Wを収容している処理容器10内において生成される。第3段階S3では、ガス供給系55及び高周波電源36が主制御部72によって制御される。具体的に、第3段階S3において、ガス供給系55は、被加工物Wが収容されている処理容器10内に第3のガスを供給するよう、制御される。より具体的には、第3段階S3の開始時に、主制御部72は、処理容器10内に供給するガスを第2のガスから第3のガスに切り替えるためのガス切替信号をガス供給系55に与える。第3段階S3のガス供給系55に対する制御により、ガス供給系55は、第3のガスのためのガスソースに接続されたバルブ群60のバルブを開き、当該ガスソースに接続された流量制御器群58の流量制御器の出力流量を所定の出力流量に設定する。また、第3段階S3において、高周波電源36は、直前の第2段階S2に連続して、高周波RF1をサセプタ16に供給するよう、主制御部72によって制御される。これにより、第3段階S3では、第3のガスのプラズマが生成される。図2に示すように、一例においては、第3のガスは、ガスA、並びに、当該ガスAに添加されたガスCを含む。ガスCは、例えば、酸素ガスであり得る。なお、第3段階S3では、高周波電源38からの高周波RF2はサセプタ16に供給されない。但し、図2に示すように、第3段階S3の開始時点から第3のガスが処理容器10内に到達するまでの間、第2段階S2から継続して高周波RF2がサセプタ16に供給されてもよい。第3段階S3において高周波RF2が供給される時間長は所定の時間長であってもよく、或いは、後述するパラメータが閾値を超えるまでの時間長であってもよい。

【0037】

第4段階S4においては、第4のガスのプラズマが、被加工物Wを収容している処理容器10内において生成される。第4段階S4では、ガス供給系55及び高周波電源38が主制御部72によって制御される。具体的に、第4段階S4において、ガス供給系55は、被加工物Wが収容されている処理容器10内に第4のガスを供給するよう、制御される。より具体的には、第4段階S4の開始時に、主制御部72は、処理容器10内に供給するガスを第3のガスから第4のガスに切り替えるためガス切替信号をガス供給系55に与える。第4段階S4のガス供給系55に対する制御により、ガス供給系55は、第4のガスのためのガスソースに接続されたバルブ群60のバルブを開き、当該ガスソースに接続された流量制御器群58の流量制御器の出力流量を所定の出力流量に設定する。また、第4段階S4において、高周波電源38は、高周波RF2をサセプタ16に供給するよう、

10

20

30

40

50

主制御部 7 2 によって制御される。図 2 に示すように、一例においては、第 4 のガスは、ガス A、並びに、当該ガス A に添加されたガス C を含む。ガス C は、例えば、酸素ガスであり得る。なお、図 2 に示す例の第 4 段階 S 4 では、高周波電源 3 6 からの高周波 R F 1 はサセプタ 1 6 に供給されない。

【 0 0 3 8 】

図 2 に示すように、第 4 段階 S 4 の後続の第 1 段階 S 1 においては、その開始時点から第 1 のガスが処理容器 1 0 内に到達するまでの間、第 4 段階 S 4 から継続して高周波 R F 2 がサセプタ 1 6 に供給されてもよい。第 4 段階 S 4 の後続の第 1 段階 S 1 において高周波 R F 2 が供給される時間長は所定時間であってもよい。第 4 段階 S 4 の後続の第 1 段階 S 1 においては、この時間長の終了時点において、高周波 R F 1 の供給が開始され得る。

10

【 0 0 3 9 】

以下、図 3 ~ 図 6 を参照して、高周波電源 3 6 及び整合器 4 0 、並びに、高周波電源 3 8 及び整合器 4 2 について詳細に説明する。図 3 は、高周波電源 3 6 及び整合器 4 0 の構成を例示する図であり、図 4 は、整合器 4 0 のセンサ及びコントローラの構成を例示する図である。また、図 5 は高周波電源 3 8 及び整合器 4 2 の構成を例示する図であり、図 6 は整合器 4 2 のセンサ及びコントローラの構成を例示する図である。

【 0 0 4 0 】

図 3 に示すように、一実施形態において、高周波電源 3 6 は、発振器 3 6 a 、パワーアンプ 3 6 b 、パワーセンサ 3 6 c 、及び、電源制御部 3 6 e を有している。電源制御部 3 6 e は、C P U といったプロセッサから構成されており、主制御部 7 2 から与えられる信号、及び、パワーセンサ 3 6 c から与えられる信号を利用して、発振器 3 6 a 及びパワーアンプ 3 6 b のそれぞれに制御信号を与えて、発振器 3 6 a 及びパワーアンプ 3 6 b を制御する。

20

【 0 0 4 1 】

主制御部 7 2 から電源制御部 3 6 e に与えられる信号は、上述した段階 S 1 ~ S 4 の各々の開始時に与えられる第 1 の高周波設定信号である。第 1 の高周波設定信号は、段階 S 1 ~ S 4 の各々における高周波 R F 1 の供給又はその停止、並びに、高周波 R F 1 のパワー及び設定周波数を指定する信号である。本実施形態では、この設定周波数は、基本周波数  $f_{B_1}$  である。なお、以下の説明では、高周波がサセプタ 1 6 に供給されていることを高周波が O N であるといい、高周波がサセプタ 1 6 に供給されていないことを高周波が O F F であるという。

30

【 0 0 4 2 】

電源制御部 3 6 e は、段階 S 1 ~ S 4 の各々の開始時に与えられる第 1 の高周波設定信号によって高周波 R F 1 を O N に設定することが指定されている場合には、第 1 の高周波設定信号によって指定される周波数を有する高周波を出力するよう、発振器 3 6 a を制御する。この発振器 3 6 a の出力はパワーアンプ 3 6 b の入力に接続されている。発振器 3 6 a から出力された高周波はパワーアンプ 3 6 b に入力される。パワーアンプ 3 6 b は、第 1 の高周波設定信号によって指定されるパワーを有する高周波 R F 1 をその出力から出力するために、入力された高周波を增幅する。これにより、高周波電源 3 6 から高周波 R F 1 が出力される。

40

【 0 0 4 3 】

パワーアンプ 3 6 b の後段には、パワーセンサ 3 6 c が設けられている。パワーセンサ 3 6 c は、方向性結合器、進行波パワー検出部、及び、反射波パワー検出部を有している。方向性結合器は、高周波 R F 1 の進行波の一部を進行波パワー検出部に与え、反射波を反射波パワー検出部に与える。このパワーセンサ 3 6 c には、高周波 R F 1 の周波数を特定する信号が電源制御部 3 6 e から与えられる。進行波パワー検出部は、進行波の全周波数成分のうち高周波 R F 1 の周波数と同一の周波数を有する成分のパワーの測定値、即ち、進行波パワー測定値 P F 1 を生成する。この進行波パワー測定値は、パワーフィードバック用に電源制御部 3 6 e に与えられる。

【 0 0 4 4 】

50

反射波パワー検出部は、反射波の全周波数成分のうち高周波RF1の周波数と同一の周波数を有する成分のパワーの測定値、即ち、反射波パワー測定値PR11、及び、反射波の全周波数成分のトータルパワーの測定値、即ち反射波パワー測定値PR12を生成する。反射波パワー測定値PR11は、モニタ表示用に主制御部72に与えられる。また、反射波パワー測定値PR12は、パワーアンプ36bの保護用に、電源制御部36eに与えられる。

【0045】

図3に示すように、整合器40は、整合回路40a、センサ40b、コントローラ40c、並びに、アクチュエータ40d及び40eを有している。整合回路40aは、可変リアクタンス素子40g及び40hを含んでいる。可変リアクタンス素子40g及び40hは、例えば、可変コンデンサである。なお、整合回路40aは、インダクタ等を更に含んでいてもよい。

【0046】

コントローラ40cは、例えば、プロセッサから構成され、主制御部72の制御の下で動作する。コントローラ40cは、センサ40bから与えられる測定値を利用して高周波電源36の負荷インピーダンスを求めるようになっている。また、コントローラ40cは、求めた負荷インピーダンスを高周波電源36の出力インピーダンス又は整合ポイントに近づけるように、アクチュエータ40d及び40eを制御して、可変リアクタンス素子40g及び40hそれぞれのリアクタンスを調整するようになっている。アクチュエータ40d及び40eは、例えば、モータである。

【0047】

また、コントローラ40cは、センサ40bから与えられる測定値を利用して、後述するパラメータを算出し、第2段階S2における高周波RF2の供給の開始タイミングを決定するようになっている。

【0048】

図4に示すように、センサ40bは、電流検出器102A、電圧検出器104A、フィルタ106A、及び、フィルタ108Aを有している。電圧検出器104Aは、給電ライン43上で伝送される高周波RF1の電圧波形を検出し、当該電圧波形を表す電圧波形アナログ信号を出力する。この電圧波形アナログ信号は、フィルタ106Aに入力される。フィルタ106Aは、入力された電圧波形アナログ信号をデジタル化することにより、電圧波形デジタル信号を生成する。そして、フィルタ106Aは、主制御部72からの信号によって特定される高周波RF1の設定周波数の成分のみを電圧波形デジタル信号から抽出することにより、濾過電圧波形信号を生成する。フィルタ106Aによって生成された濾過電圧波形信号は、コントローラ40cの演算部150Aに与えられる。なお、フィルタ106Aは、例えば、FPGA(フィールドプログラマブル・ゲートアレイ)から構成される。

【0049】

電流検出器102Aは、給電ライン43上で伝送される高周波RF1の電流波形を検出し、当該電流波形を表す電流波形アナログ信号を出力する。この電流波形アナログ信号は、フィルタ108Aに入力される。フィルタ108Aは、入力された電流波形アナログ信号をデジタル化することにより、電流波形デジタル信号を生成する。そして、フィルタ108Aは、主制御部72からの信号によって特定される高周波RF1の設定周波数の成分のみを電流波形デジタル信号から抽出することにより、濾過電流波形信号を生成する。フィルタ108Aによって生成された濾過電流波形信号は、コントローラ40cの演算部150Aに与えられる。なお、フィルタ108Aは、例えば、FPGA(フィールドプログラマブル・ゲートアレイ)から構成される。

【0050】

コントローラ40cの演算部150Aは、フィルタ106Aから与えられる濾過電圧波形信号、及び、フィルタ108Aから与えられる濾過電流波形信号を用いて、整合器40におけるインピーダンス整合のために、高周波電源36の負荷インピーダンスZL1を求

10

20

30

40

50

める。具体的に、演算部 150A は、濾過電圧波形信号によって特定される交流電圧 V1、濾過電流波形信号によって特定される交流電流 I1、及び、交流電圧 V1 と交流電流 I1 との位相差 1 から、高周波電源 36 の負荷インピーダンス ZL1 を求める。また、演算部 150A は、交流電圧 V1、交流電流 I1、及び、位相差 1 から、後述するパラメータを求めるようになっている。パラメータは、上記の負荷インピーダンス ZL1 であってもよい。この場合には、整合器 40 のインピーダンス整合のために求められた負荷インピーダンスをパラメータと利用できるので、別途にパラメータを求める必要はない。或いは、パラメータは、負荷抵抗 Zr1、及び、負荷リアクタンス Zi1、並びに、反射波係数 1 のうち何れかであってもよい。なお、演算部 150A によって求められるパラメータとして、負荷インピーダンス ZL1、負荷抵抗 Zr1、負荷リアクタンス Zi1、及び反射波係数 1 から選択される一以上のパラメータが用いられてもよい。

#### 【0051】

負荷インピーダンス ZL1 は、V1 / I1 により求められ、負荷抵抗 Zr1 は、負荷インピーダンス ZL1 の実部を求ることにより得られ、負荷リアクタンス Zi1 は、負荷インピーダンス ZL1 の虚部を求ることにより得られる。また、反射波係数 1 は、以下に式(1)により、求められる。

#### 【数1】

$$\Gamma_1 = \frac{\sqrt{(Zr1-50)^2 + (Zi1)^2}}{(Zr1-50)^2 + (Zi1)^2} \quad \dots(1)$$

10

20

なお、反射波係数 1 は、パワーセンサ 36c によって求められる進行波パワー測定値 PF1 及び反射波パワー測定値 PR11 から、PR11 / PF1 により、求められてもよい。

#### 【0052】

演算部 150A は、求めた負荷インピーダンス ZL1 をマッチング制御部 152A に出力する。マッチング制御部 152A は、負荷インピーダンス ZL1 を高周波電源 36 の出力インピーダンス(又は整合ポイント)に近づけるよう、アクチュエータ 40d 及び 40e を制御して、可変リアクタンス素子 40g 及び 40h のリアクタンスを調整する。これにより、整合器 40 によるインピーダンス整合が実行される。なお、マッチング制御部 152A は、演算部 150A によって出力される負荷インピーダンス ZL1 の系列の移動平均値を、高周波電源 36 の出力インピーダンス(又は整合ポイント)に近づけるよう、アクチュエータ 40d 及び 40e を制御してもよい。

30

#### 【0053】

また、演算部 150A は、第 2 段階 S2 の各々において、求めたパラメータが対応の閾値を超えているか否かを判定する。この閾値は、初期的には、処理容器 10 内に第 2 のガスが到達したものと判断できる所定値として設定されている。演算部 150A は、第 2 段階 S2 の各々においてパラメータが閾値を超えたときに、サセプタ 16 に対する高周波 RF2 の供給を高周波電源 38 に開始させる高周波供給開始信号を、当該高周波電源 38 に与える。

40

#### 【0054】

また、演算部 150A は、第 2 段階 S2 の各々において、高周波供給開始信号を高周波電源 38 に与えた時点、即ち、高周波電源 38 による高周波 RF2 の供給が開始された時点を特定する第 1 の開始時点特定情報を、時間調整部 80 に与える。この時間調整部 80 は、例えば、CPU といったプロセッサであり得る。時間調整部 80 は、また、第 2 段階 S2 の各々の開始時点を特定する第 2 の開始時点特定情報を、主制御部 72 から受ける。時間調整部 80 は、第 2 の開始時点特定情報によって特定される時点と第 1 の開始時点特定情報によって特定される時点との間の時間差を求める。時間調整部 80 は、この時間差を特定する時間差特定情報を主制御部 72 に与える。主制御部 72 は、先行する第 2 段階 S2 に関して時間調整部 80 から与えられた時間差特定情報を受けて、当該時間差特定情

50

報によって特定される時間差の分だけ増加させるよう、当該先行する第2段階S2の後に実行される第2段階S2の実行時間長を調整する。

【0055】

また、演算部150Aは、パラメータの系列から移動平均値を求めて、当該移動平均値を用いて上述の閾値を調整する。パラメータの系列は、実行済の第2段階S2、又は、実行済の第2段階S2と実行中の第2段階S2のそれぞれで整合器40によるインピーダンス整合が完了した状態におけるパラメータを含む。当該系列に含まれるパラメータの各々は、上述した閾値と比較されるパラメータと同一の種類のパラメータであり得る。

【0056】

以下、図5を参照する。図5に示すように、一実施形態において、高周波電源38は、  
10 発振器38a、パワーアンプ38b、パワーセンサ38c、及び、電源制御部38eを有している。電源制御部38eは、CPUといったプロセッサから構成されており、主制御部72から与えられる信号、パワーセンサ38cから与えられる信号、及び、演算部150Aから与えられる信号を利用して、発振器38a及びパワーアンプ38bのそれぞれに制御信号を与えて、発振器38a及びパワーアンプ38bを制御する。

【0057】

主制御部72から電源制御部38eに与えられる信号は、上述した段階S1～S4の各々の開始時に与えられる第2の高周波設定信号である。第2の高周波設定信号は、段階S1～S4の各々における高周波RF2の供給又はその停止、並びに、高周波RF2のパワー及び設定周波数を指定する信号である。本実施形態では、この設定周波数は、基本周波数f<sub>B2</sub>である。  
20

【0058】

電源制御部38eは、段階S1～S4の各々の開始時に与えられる第2の高周波設定信号によって高周波RF2をONに設定することが指定されている場合には、第2の高周波設定信号によって指定される周波数を有する高周波を出力するよう、発振器38aを制御する。この発振器38aの出力はパワーアンプ38bの入力に接続されている。発振器38aから出力された高周波はパワーアンプ38bに入力される。パワーアンプ38bは、第2の高周波設定信号によって指定されるパワーを有する高周波RF2をその出力から出力するために、入力された高周波を增幅する。図2に示した例では、高周波電源38は、第4段階S4の各々の開始時点において、高周波RF2を出力するようになっている。また、高周波電源38は、第2段階S2の各々においては、演算部150Aから与えられる高周波供給開始信号を受けたときに、高周波RF2のサセプタ16への供給を開始する。  
30

【0059】

パワーアンプ38bの後段には、パワーセンサ38cが設けられている。パワーセンサ38cは、方向性結合器、進行波パワー検出部、及び、反射波パワー検出部を有している。方向性結合器は、高周波RF2の進行波の一部を進行波パワー検出部に与え、反射波を反射波パワー検出部に与える。このパワーセンサ38cには、高周波RF2の周波数を特定する信号が電源制御部38eから与えられる。進行波パワー検出部は、進行波の全周波数成分のうち高周波RF2の周波数と同一の周波数を有する成分のパワーの測定値、即ち、進行波パワー測定値PF2を生成する。この進行波パワー測定値は、パワーフィードバック用に電源制御部38eに与えられる。  
40

【0060】

反射波パワー検出部は、反射波の全周波数成分のうち高周波RF2の周波数と同一の周波数を有する成分のパワーの測定値、即ち、反射波パワー測定値PR21、及び、反射波の全周波数成分のトータルパワーの測定値、即ち反射波パワー測定値PR22を生成する。反射波パワー測定値PR21は、モニタ表示用に主制御部72に与えられる。また、反射波パワー測定値PR22は、パワーアンプ38bの保護用に、電源制御部38eに与えられる。

【0061】

図5に示すように、整合器42は、整合回路42a、センサ42b、コントローラ42  
50

c、並びに、アクチュエータ42d及び42eを有している。整合回路42aは、可変リアクタンス素子42g及び42hを含んでいる。可変リアクタンス素子42g及び42hは、例えば、可変コンデンサである。なお、整合回路42aは、インダクタ等を更に含んでいてもよい。

【0062】

コントローラ42cは、例えば、プロセッサから構成され、主制御部72の制御の下で動作する。コントローラ42cは、センサ42bから与えられる測定値を利用して高周波電源36の負荷インピーダンスを求めるようになっている。また、コントローラ42cは、求めた負荷インピーダンスを高周波電源38の出力インピーダンス又は整合ポイントに近づけるように、アクチュエータ42d及び42eを制御して、可変リアクタンス素子42g及び42hそれぞれのリアクタンスを調整するようになっている。アクチュエータ42d及び42eは、例えば、モータである。

10

【0063】

図6に示すように、センサ42bは、電流検出器102B、電圧検出器104B、フィルタ106B、及び、フィルタ108Bを有している。電圧検出器104Bは、給電ライン45上で伝送される高周波RF2の電圧波形を検出し、当該電圧波形を表す電圧波形アナログ信号を出力する。この電圧波形アナログ信号は、フィルタ106Bに入力される。フィルタ106Bは、入力された電圧波形アナログ信号をデジタル化することにより、電圧波形デジタル信号を生成する。そして、フィルタ106Bは、主制御部72からの信号によって特定される高周波RF2の設定周波数の成分のみを電圧波形デジタル信号から抽出することにより、濾過電圧波形信号を生成する。フィルタ106Bによって生成された濾過電圧波形信号は、コントローラ42cの演算部150Bに与えられる。

20

【0064】

電流検出器102Bは、給電ライン45上で伝送される高周波RF2の電流波形を検出し、当該電流波形を表す電流波形アナログ信号を出力する。この電流波形アナログ信号は、フィルタ108Bに入力される。フィルタ108Bは、入力された電流波形アナログ信号をデジタル化することにより、電流波形デジタル信号を生成する。そして、フィルタ108Bは、主制御部72からの信号によって特定される高周波RF2の設定周波数の成分のみを電流波形デジタル信号から抽出することにより、濾過電流波形信号を生成する。フィルタ108Bによって生成された濾過電流波形信号は、コントローラ42cの演算部150Bに与えられる。

30

【0065】

コントローラ42cの演算部150Bは、フィルタ106Bから与えられる濾過電圧波形信号、及び、フィルタ108Bから与えられる濾過電流波形信号を用いて、高周波電源38の負荷インピーダンスZL2を求める。具体的に、演算部150Bは、濾過電圧波形信号によって特定される交流電圧V2、濾過電流波形信号によって特定される交流電流I2、及び、交流電圧V2と交流電流I2との位相差θ2から、負荷インピーダンスZL2を求める。

【0066】

演算部150Bは、求めた負荷インピーダンスZL2をマッチング制御部152Bに出力する。マッチング制御部152Bは、負荷インピーダンスZL2を高周波電源38の出力インピーダンス（又は整合ポイント）に近づけるよう、アクチュエータ42d及び42eを制御して、可変リアクタンス素子42g及び42hのリアクタンスを調整する。これにより、整合器42によるインピーダンス整合が実行される。なお、マッチング制御部152Bは、演算部150Bによって出力される負荷インピーダンスZL2の系列の移動平均値を、高周波電源38の出力インピーダンス（又は整合ポイント）に近づけるよう、アクチュエータ42d及び42eを制御してもよい。

40

【0067】

以下、図2と共に、図7を参照して、方法MTについて詳細に説明する。図7は、一実施形態に係るプラズマ処理方法を示す流れ図である。方法MTでは、工程ST1において

50

、第 n 段階が開始される。「n」は、図 2 に示す例では、1 ~ 4 の整数である。

【0068】

工程 S T 1 では、主制御部 7 2 がレシピに従って実行する段階を切り替える。図 2 に示す例の場合、主制御部 7 2 は、第 1 段階 S 1 の実行、第 2 段階 S 2 の実行、第 3 段階の実行、及び、第 4 段階 S 4 の実行の順に切り替り、段階 S 1 ~ S 4 を各々が含むシーケンスを所定回数だけ繰り返す。

【0069】

段階 S 1 ~ S 4 の各々の工程 S T 1 では、レシピに従って、主制御部 7 2 からガス切替信号がガス供給系 5 5 に与えられる。図 2 に示す例の場合、第 1 段階 S 1 の工程 S T 1 ではガス供給系 5 5 に第 1 のガスを供給させるために、第 2 段階 S 2 の工程 S T 1 ではガス供給系 5 5 に第 2 のガスを供給させるために、第 3 段階 S 3 の工程 S T 1 ではガス供給系 5 5 に第 3 のガスを供給させるために、第 4 段階 S 4 の工程 S T 1 ではガス供給系 5 5 に第 4 のガスを供給させるために、ガス切替信号が、主制御部 7 2 からガス供給系 5 5 に与えられる。なお、方法 M T の開始時には、第 1 段階 S 1 の開始時点よりも前に第 1 のガスの供給を開始するよう、ガス供給系 5 5 が主制御部 7 2 によって制御される。

10

【0070】

また、工程 S T 1 では、レシピに従い、実行中の段階に応じて設定された上述の第 1 の高周波設定信号が高周波電源 3 6 に与えられる。また、工程 S T 1 では、レシピに従い、実行中の段階に応じて設定された上述の第 2 の高周波設定信号が高周波電源 3 8 に与えられる。図 2 に示す例の場合、第 1 段階 S 1 、第 2 段階 S 2 、及び、第 3 段階 S 3 では、第 1 の高周波設定信号は、高周波 R F 1 をサセプタ 1 6 に供給することを指定するよう、設定される。また、第 4 段階 S 4 にでは、第 1 の高周波設定信号は、サセプタ 1 6 に対する高周波 R F 1 の供給を停止することを指定するよう、設定される。かかる第 1 の高周波設定信号に応じて、高周波電源 3 6 は、高周波 R F 1 をサセプタ 1 6 に供給するか、又は、サセプタ 1 6 に対する高周波 R F 1 の供給を停止する。また、第 1 段階 S 1 及び第 3 段階 S 3 では、第 2 の高周波設定信号は、サセプタ 1 6 に対する高周波 R F 2 の供給を停止することを指定するよう、設定される。また、第 2 段階 S 2 及び第 4 段階 S 4 では、第 2 の高周波設定信号は、高周波 R F 2 をサセプタ 1 6 に供給することを指定するよう、設定される。かかる第 2 の高周波設定信号に応じて、高周波電源 3 8 は、高周波 R F 2 をサセプタ 1 6 に供給するか、又は、サセプタ 1 6 に対する高周波 R F 2 の供給を停止する。なお、第 2 段階 S 2 においては、後述する工程 S T 4 の実行により、サセプタ 1 6 に対する高周波 R F 2 の供給が開始される。

20

【0071】

また、工程 S T 1 では、実行中の段階に応じて、処理容器 1 0 内の圧力をレシピによって指定された圧力に維持するよう、主制御部 7 2 によって排気装置 6 6 が制御される。さらに、高周波 R F 1 を供給する段階の工程 S T 1 では、高周波 R F 1 の周波数を特定する信号が整合器 4 0 に与えられるこれにより、整合器 4 0 は、高周波 R F 1 の設定周波数に対応する周波数の高周波電源 3 6 の負荷インピーダンスを求めて、当該負荷インピーダンスに基づき、インピーダンス整合を実行する。また、高周波 R F 2 を供給する段階の工程 S T 1 では、高周波 R F 2 の周波数を特定する信号が整合器 4 2 に与えられる。整合器 4 2 は、高周波 R F 2 の設定周波数に対応する周波数の高周波電源 3 6 の負荷インピーダンスを求めて、当該負荷インピーダンスに基づき、インピーダンス整合を実行する。

30

【0072】

続く工程 S T 2 では、ガス供給系 5 5 が、主制御部 7 2 からのガス切替信号によって指定されたガスを処理容器 1 0 に供給するよう、切り替わる。

【0073】

方法 M T では、第 1 段階 S 1 、第 3 段階 S 3 、及び、第 4 段階 S 4 の何れかを実行中には、その段階のプラズマ処理がレシピに応じた時間長、実行され、方法 M T は後述の判定 J 4 に至る（判定 J 1 の「NO」の経路を参照）。一方、第 2 段階 S 2 を実行中には、方法 M T は工程 S T 3 に移行し（判定 J 1 の「YES」の経路を参照）、工程 S T 3 において

40

50

て、上述したパラメータが演算部 150A によって求められる。

【0074】

そして、判定 J 2 において、求めたパラメータが閾値を超えたか否かを演算部 150A が判定する。パラメータが閾値を超えていないと判定される場合には、演算部 150A は、判定 J 3 において、第 2 段階 S 2 の開始後、所定時間が経過しているか否かを判定する。判定 J 3 において、所定時間が経過してと判定された場合には、再び工程 S T 3 が実行される。一方、判定 J 3 において、所定時間が経過していると判定された場合には、方法 M T は、工程 S T 4 に移行する。この判定 J 3 により、第 2 段階 S 2 において誤動作により高周波 R F 2 の供給が開始されない事態を回避することができる。

【0075】

また、判定 J 2 において、パラメータが閾値を超えていると判定された場合には、方法 M T は工程 S T 4 に移行する。工程 S T 4 では、高周波供給開始信号が演算部 150A から高周波電源 38 に与えられる。これにより、第 2 段階 S 2 における高周波 R F 2 の供給が開始される。なお、閾値は、初期的には、第 2 のガスが処理容器 10 内に到達していると判断できる所定値として設定されている。

【0076】

方法 M T では、第 1 段階 S 1 と第 2 段階 S 2 にわたって高周波 R F 1 がサセプタ 16 に供給されている。この状態では、処理容器 10 内に存在しているガスが第 1 のガスから第 2 のガスに切り替わると、処理容器内において生成されるプラズマのインピーダンスが変化する。上述したパラメータは、プラズマのインピーダンスに応じて変化するパラメータであるので、処理容器 10 内に存在しているガスの変化を良好に反映する。方法 M T の第 2 段階 S 2 では、かかるパラメータに基づいて処理容器 10 内に第 2 のガスが到達していることが検出される。したがって、処理容器 10 内に第 2 のガスが到達したタイミングが高精度に検出される。そして、第 2 のガスが到達していることが検出されたときに高周波 R F 2 の供給が開始されるので、高周波 R F 2 の供給が適切なタイミングで開始される。

【0077】

方法 M T では、次いで、工程 S T 5 が実行される。工程 S T 5 は、工程 S T 5 a 及び工程 S T 5 b を含む。工程 S T 5 a では、上述した時間差が求められる。具体的に、第 2 段階 S 2 の各々の工程 S T 4 において、時間調整部 80 には、高周波供給開始信号が高周波電源 38 に与えられた時点、即ち、高周波電源 38 による高周波 R F 2 の供給が開始された時点を特定する第 1 の開始時点特定情報が、演算部 150A から与えられている。また、第 2 段階 S 2 の各々の工程 S T 1 において、時間調整部 80 には、第 2 段階 S 2 の各々の開始時点（工程 S T 1 の実行時）を特定する第 2 の開始時点特定情報が与えられている。工程 S T 5 a では、第 2 の開始時点特定情報によって特定される時点と第 1 の開始時点特定情報によって特定される時点との間の時間差が、時間調整部 80 によって求められる。そして、この時間差を特定する時間差特定情報が時間調整部 80 から主制御部 72 に与えられる。続く工程 S T 5 b では、先行する第 2 段階 S 2 に関する時間差特定情報によって特定される時間差の分だけ増加させるよう、当該先行する第 2 段階 S 2 の後に実行される第 2 段階 S 2 の実行時間長が主制御部 72 によって調整される。

【0078】

ここで、第 2 段階 S 2 の各々には、その実行時間長として初期的に所定の実行時間長が設定されている。したがって、第 2 段階 S 2 のうち一つの第 2 段階において、高周波 R F 2 の供給が開始されるタイミングが遅れると、当該一つの第 2 段階において高周波 R F 2 がサセプタ 16 に供給された状態で行われるプラズマ処理の時間が短くなる。しかしながら、方法 M T では、先行する第 2 段階 S 2 に関して求められた上記の時間差の分だけ、後に実行される第 2 段階 S 2 の実行時間長が所定の実行時間長から増加される。よって、高周波 R F 2 がサセプタ 16 に供給された状態で行われる第 2 のガスのプラズマによる処理の総実行時間長が、実質的に維持される。

【0079】

方法 M T では、次いで、工程 S T 6 が実行される。工程 S T 6 では、判定 J 2 において

10

20

30

40

50

利用される閾値が調整される。具体的には、演算部 150Aにおいて、パラメータの系列から移動平均値が求められ、当該移動平均値を用いて閾値が調整される。パラメータの系列は、実行済の第2段階 S2、又は、実行済の第2段階 S2 と実行中の第2段階 S2 のそれぞれで整合器 40 によるインピーダンス整合が完了した状態におけるパラメータを含む。当該系列に含まれるパラメータの各々は、上述した閾値と比較されるパラメータと同一の種類のパラメータであり得る。第2段階 S2 において整合器 40 によるインピーダンス整合が完了した状態では、処理容器 10 内には第2のガスが十分に到達している。したがって、この状態でのパラメータの系列の移動平均値を用いて閾値を調整することにより、第2のガスが処理容器内に到達したタイミングがより高精度に検出される。

## 【0080】

10

方法 M T では、次いで、判定 J 4 が行われる。判定 J 4 では、主制御部 72 によって、段階 S1 ~ S4 を含むシーケンスの所定回数の繰り返しが実行されたか否かが判定される。シーケンスの所定回数の繰り返しが完了していないと判定された場合には、工程 S T 1 に戻り、段階 S1 ~ S4 のうち次の段階が実行される。一方、シーケンスの所定回数の繰り返しが完了していると判定された場合には、方法 M T が終了する。

## 【0081】

以下、別の実施形態について説明する。別の実施形態の方法 M T では、少なくとも第2段階 S2 において、高周波 R F 1 及び高周波 R F 2 それぞれの周波数が調整される。また、更なる実施形態では、少なくとも第2段階 S2 において、高周波 R F 1 及び高周波 R F 2 それぞれの周波数に加えて、高周波 R F 1 のパワー及び高周波 R F 2 のパワーが調整される。以下では、図 8 ~ 図 10 を参照して、この実施形態の方法 M T の実行のために、高周波電源 36、整合器 40、高周波電源 38、整合器 42 に代えてプラズマ処理装置 1 に採用される高周波電源 36A、整合器 40A、高周波電源 38A、整合器 42A について説明する。図 8 は、高周波電源 36A 及び整合器 40A の構成を示す図である。図 9 は、高周波電源 36A のインピーダンスセンサの構成を示す図である。図 10 は、高周波電源 38A 及び整合器 42A の構成を示す図である。図 11 は、高周波電源 38A のインピーダンスセンサの構成を示す図である。

20

## 【0082】

図 8 に示すように、高周波電源 36A は、高周波電源 36 と同様に、発振器 36a、パワーアンプ 36b、パワーセンサ 36c、及び、電源制御部 36e を有している。高周波電源 36A は、インピーダンスセンサ 36d を更に有している。以下、高周波電源 36A の各要素に関して、高周波電源 36 の対応の要素と異なる点を説明する。また、インピーダンスセンサ 36d についても説明する。

30

## 【0083】

高周波電源 36A の電源制御部 36e は、第2段階 S2 の実行期間内の第1の副期間 T<sub>s1</sub> 及び第2の副期間 T<sub>s2</sub> それぞれにおける高周波 R F 1 の周波数を設定する周波数制御信号を発振器 36a に与えるようになっている。具体的に、電源制御部 36e は、インピーダンスセンサ 36d から、過去の第1の副期間 T<sub>s1</sub> の高周波電源 36A の負荷インピーダンスの移動平均値 I<sub>mp11</sub> 及び過去の第2の副期間 T<sub>s2</sub> の高周波電源 36A の負荷インピーダンスの移動平均値 I<sub>mp12</sub> を受ける。そして、電源制御部 36e は、移動平均値 I<sub>mp11</sub> 及び移動平均値 I<sub>mp12</sub> が所定の調整範囲内に含まれる場合には、移動平均値 I<sub>mp11</sub> から推定される第1の副期間 T<sub>s1</sub> の高周波電源 36A の負荷インピーダンス及び移動平均値 I<sub>mp12</sub> から推定される第2の副期間 T<sub>s2</sub> の高周波電源 36A の負荷インピーダンスを整合ポイントに近づけるために、第1の副期間 T<sub>s1</sub> 及び第2の副期間 T<sub>s2</sub> それぞれの高周波 R F 1 の周波数を設定する周波数制御信号を発振器 36a に与える。発振器 36a は、当該周波数制御信号に応じて、第1の副期間 T<sub>s1</sub> の高周波の周波数及び第2の副期間 T<sub>s2</sub> の高周波の周波数を設定する。一方、移動平均値 I<sub>mp11</sub> 又は移動平均値 I<sub>mp12</sub> が所定の調整範囲内に含まれない場合には、電源制御部 36e は、高周波電源 36A に関するインピーダンス整合を、整合器 40A に行わせるために、整合器 40A に制御信号を送出する。なお、負荷インピーダンスを整合ポイント

40

50

に近づけるとは、負荷インピーダンスを理想的には整合ポイントに一致させることを意味する。また、「所定の調整範囲」は、高周波RF1の周波数の調整により、高周波電源36Aの負荷インピーダンスを高周波電源36Aの出力インピーダンス又は整合ポイントに整合させることが可能な範囲である。

【0084】

パワーアンプ36bは、発振器36aから出力された高周波を增幅することにより高周波RF1を生成し、当該高周波RF1を出力する。このパワーアンプ36bは、電源制御部36eによって制御される。具体的には、電源制御部36eは、主制御部72によって指定されるパワーの高周波RF1を出力するよう、パワーアンプ36bを制御する。

【0085】

一実施形態において、電源制御部36eは、第1の副期間Ts1の高周波RF1のパワーが第2の副期間Ts2の高周波RF1のパワーよりも大きくなるように、パワーアンプ36bを制御してもよい。例えば、第1の副期間Ts1の高周波RF1のパワーは、第1の副期間Ts1の反射波パワー測定値PR11又は所定数の第1の副期間Ts1の反射波パワー測定値PR11の移動平均値に応じて、プラズマに結合される高周波RF1のパワーが所定のパワーとなるように、設定され得る。また、第2の副期間Ts2の高周波RF1のパワーは、第2の副期間Ts2の反射波パワー測定値PR11又は所定数の第2の副期間Ts2の反射波パワー測定値PR11の移動平均値に応じて、プラズマに結合される高周波RF1のパワーが所定のパワーとなるように、設定され得る。

【0086】

インピーダンスセンサ36dは、実行済の第2段階S2のそれぞれの実行期間内に第1の副期間Ts1における高周波電源36Aの負荷インピーダンスの移動平均値Imp11を求める。また、インピーダンスセンサ36dは、実行済の第2段階S2のそれぞれの実行期間内に第2の副期間Ts2における高周波電源36Aの負荷インピーダンスの移動平均値Imp12を求める。図2に示すように、第1の副期間Ts1は、第2段階S2のそれぞれの実行期間内において、高周波RF2の供給の開始時点から当該実行期間の途中までの間の期間である。第2の副期間Ts2は、第2段階S2のそれぞれの実行期間内において、当該途中から当該実行期間の終了時点までの間の期間である。なお、第2段階S2の各々の実行期間内に第1の副期間Ts1と第2の副期間Ts2を含む期間を、期間T1とよぶ。

【0087】

第1の副期間Ts1の時間長及び第2の副期間Ts2の時間長は、電源制御部36eによって指定される。例えば、第1の副期間Ts1の時間長は電源制御部36eが記憶する所定の時間長であってもよく、第2の副期間Ts2の時間長は電源制御部36eが記憶する別の所定の時間長であってもよい。或いは、電源制御部36eは、上述の反射波パワー測定値PR11の時系列から、期間T1において反射波パワー測定値PR11が所定値以下に安定する期間を第2の副期間Ts2に設定し、期間T1において当該第2の副期間Ts2よりも前の期間を第1の副期間Ts1に設定してもよい。

【0088】

図9に示すように、インピーダンスセンサ36dは、電流検出器102C、電圧検出器104C、フィルタ106C、フィルタ108C、平均値演算器110C、平均値演算器112C、移動平均値演算器114C、移動平均値演算器116C、及び、インピーダンス演算器118Cを有している。

【0089】

電圧検出器104Cは、給電ライン43上で伝送される高周波RF1の電圧波形を検出し、当該電圧波形を表す電圧波形アナログ信号を出力する。この電圧波形アナログ信号は、フィルタ106Cに入力される。フィルタ106Cは、入力された電圧波形アナログ信号をデジタル化することにより、電圧波形デジタル信号を生成する。そして、フィルタ106Cは、電源制御部36eから第1の副期間Ts1及び第2の副期間Ts2それぞれの高周波RF1の周波数を特定する信号を受け、当該信号によって特定される周波数に対応

10

20

30

40

50

した成分のみを電圧波形デジタル信号から抽出することにより、濾過電圧波形信号を生成する。なお、フィルタ106Cは、例えば、FPGA（フィールドプログラマブル・ゲートアレイ）から構成され得る。

【0090】

フィルタ106Cによって生成された濾過電圧波形信号は、平均値演算器110Cに出力される。平均値演算器110Cには、電源制御部36eから第1の副期間Ts1及び第2の副期間Ts2を特定する副期間特定信号が与えられる。平均値演算器110Cは、濾過電圧波形信号から、副期間特定信号を用いて特定した各期間T1内の第1の副期間Ts1における電圧の平均値VA11を求める。また、平均値演算器110Cは、濾過電圧波形信号から、副期間特定信号を用いて特定した各期間T1内の第2の副期間Ts2における電圧の平均値VA12を求める。なお、平均値演算器110Cは、例えば、FPGA（フィールドプログラマブル・ゲートアレイ）から構成され得る。

10

【0091】

平均値演算器110Cによって求められた平均値VA11及び平均値VA12は、移動平均値演算器114Cに出力される。移動平均値演算器114Cは、実行済の第2段階S2に関して既に得られている複数の平均値VA11のうち、直近に実行された所定数の第2段階S2における第1の副期間Ts1について求められた所定個の平均値VA11の移動平均値（移動平均値VMA11）を求める。また、移動平均値演算器114Cは、実行済の第2段階S2に関して既に得られている複数の平均値VA12のうち、直近に実行された所定数の第2段階S2における第2の副期間Ts2について求められた所定個の平均値VA12の移動平均値（移動平均値VMA12）を求める。移動平均値演算器114Cによって求められた移動平均値VMA11及びVMA12は、インピーダンス演算器118Cに出力される。なお、移動平均値演算器114Cは、例えば、CPU、又は、FPGA（フィールドプログラマブル・ゲートアレイ）から構成され得る。

20

【0092】

電流検出器102Cは、給電ライン43上で伝送される高周波RF1の電流波形を検出し、当該電流波形を表す電流波形アナログ信号を出力する。この電流波形アナログ信号は、フィルタ108Cに入力される。フィルタ108Cは、入力された電流波形アナログ信号をデジタル化することにより、電流波形デジタル信号を生成する。そして、フィルタ108Cは、電源制御部36eから第1の副期間Ts1及び第2の副期間Ts2それぞれの高周波RF1の周波数を特定する信号を受け、当該信号によって特定される周波数に対応した成分のみを電流波形デジタル信号から抽出することにより、濾過電流波形信号を生成する。なお、フィルタ108Cは、例えば、FPGA（フィールドプログラマブル・ゲートアレイ）から構成され得る。

30

【0093】

フィルタ108Cによって生成された濾過電流波形信号は、平均値演算器112Cに出力される。また、平均値演算器112Cには、電源制御部36eから上述の副期間特定信号が与えられる。平均値演算器112Cは、濾過電流波形信号から、副期間特定信号を用いて特定した各期間T1内の第1の副期間Ts1における電流の平均値IA11を求める。また、平均値演算器112Cは、濾過電流波形信号から、副期間特定信号を用いて特定した各期間T1内の第2の副期間Ts2における電流の平均値IA12を求める。なお、平均値演算器112Cは、例えば、FPGA（フィールドプログラマブル・ゲートアレイ）から構成され得る。

40

【0094】

平均値演算器112Cによって求められた平均値IA11及び平均値IA12は、移動平均値演算器116Cに出力される。移動平均値演算器116Cは、実行済の第2段階S2に関して既に得られている複数の平均値IA11のうち、直近に実行された所定数の第2段階S2における第1の副期間Ts1について求められた所定個の平均値IA11の移動平均値（移動平均値IMA11）を求める。また、移動平均値演算器116Cは、実行済の第2段階S2に関して既に得られている複数の平均値IA12のうち、直近に実行さ

50

れた所定数の第2段階S2における第2の副期間T<sub>s2</sub>について求められた所定個の平均値IMA12の移動平均値(移動平均値IMA12)を求める。移動平均値演算器116Cによって求められた移動平均値IMA11及びIMA12は、インピーダンス演算器118Cに出力される。なお、移動平均値演算器116Cは、例えば、CPU、又は、FPGA(フィールドプログラマブル・ゲートアレイ)から構成され得る。

【0095】

インピーダンス演算器118Cは、移動平均値IMA11及び移動平均値VMA11から、高周波電源36Aの負荷インピーダンスの移動平均値Imp11を求める。この移動平均値Imp11は、絶対値と位相成分を含む。また、インピーダンス演算器118Cは、移動平均値IMA12及び移動平均値VMA12から、高周波電源36Aの負荷インピーダンスの移動平均値Imp12を求める。この移動平均値Imp12は、絶対値と位相成分を含む。インピーダンス演算器118Cによって求められた移動平均値Imp11及びImp12は、電源制御部36eに出力される。移動平均値Imp11及びImp12は、上述したように電源制御部36eにおいて、高周波RF1の周波数の設定のために用いられる。

【0096】

図8に戻り、整合器40Aは、整合器40と同様に、整合回路40a、センサ40b、コントローラ40c、並びに、アクチュエータ40d及び40eを有している。以下、整合器40Aの各要素に関して、整合器40の対応の要素と異なる点を説明する。

【0097】

整合器40Aのセンサ40bは、インピーダンスセンサ36dと同様に、電源制御部36eから第1の副期間T<sub>s1</sub>及び第2の副期間T<sub>s2</sub>それぞれの高周波RF1の周波数を特定する信号を受け、当該信号によって特定される周波数に対応した成分のみを電圧波形デジタル信号から抽出することにより、濾過電圧波形信号を生成する。そして、センサ40bは、濾過電圧波形信号をコントローラ40cに出力する。また、整合器40Aのセンサ40bは、インピーダンスセンサ36dと同様に、電源制御部36eから第1の副期間T<sub>s1</sub>及び第2の副期間T<sub>s2</sub>それぞれの高周波RF1の周波数を特定する信号を受け、当該信号によって特定される周波数に対応した成分のみを電流波形デジタル信号から抽出することにより、濾過電流波形信号を生成する。センサ40bは、濾過電流波形信号をコントローラ40cに出力する。

【0098】

整合器40Aのコントローラ40cは、移動平均値Imp11又は移動平均値Imp12が所定の調整範囲内に含まれない場合に電源制御部36eから送出される上記の制御信号を受けると、移動平均値Imp21と移動平均値Imp22の平均値によって特定される高周波電源36Aの負荷インピーダンスを整合ポイントに近づけるよう、アクチュエータ40d及び40eを制御する。或いは、整合器40Aのコントローラ40cは、移動平均値Imp11又は移動平均値Imp12が所定の調整範囲内に含まれない場合に電源制御部36eから送出される上記の制御信号を受けると、移動平均値Imp22によって特定される高周波電源36Aの負荷インピーダンスを整合ポイントに近づけるよう、アクチュエータ40d及び40eを制御する。

【0099】

以下、図10を参照する。図10に示すように、高周波電源38Aは、高周波電源38と同様に、発振器38a、パワーアンプ38b、パワーセンサ38c、及び、電源制御部38eを有している。高周波電源38Aは、インピーダンスセンサ38dを更に有している。以下、高周波電源38Aの各要素に関して、高周波電源38の対応の要素と異なる点を説明する。また、インピーダンスセンサ38dについても説明する。

【0100】

高周波電源38Aの電源制御部38eは、第1の副期間T<sub>s1</sub>及び第2の副期間T<sub>s2</sub>それぞれにおける高周波RF2の周波数を設定する周波数制御信号を発振器38aに与えるようになっている。具体的に、電源制御部38eは、インピーダンスセンサ38dから

10

20

30

40

50

、過去の第1の副期間 $T_{s1}$ の負荷インピーダンスの移動平均値 $I_{mp21}$ 及び過去の第2の副期間 $T_{s2}$ の負荷インピーダンスの移動平均値 $I_{mp22}$ を受ける。そして、電源制御部38eは、移動平均値 $I_{mp21}$ 及び移動平均値 $I_{mp22}$ が所定の調整範囲内に含まれる場合には、移動平均値 $I_{mp21}$ から推定される第1の副期間 $T_{s1}$ の高周波電源38Aの負荷インピーダンス及び移動平均値 $I_{mp22}$ から推定される第2の副期間 $T_{s2}$ の高周波電源38Aの負荷インピーダンスを整合ポイントに近づけるために、第1の副期間 $T_{s1}$ 及び第2の副期間 $T_{s2}$ それぞれの高周波RF2の周波数を設定する周波数制御信号を発振器38aに与える。発振器38aは、当該周波数制御信号に応じて、第1の副期間 $T_{s1}$ の高周波の周波数及び第2の副期間 $T_{s2}$ の高周波の周波数を設定する。一方、電源制御部38eは、移動平均値 $I_{mp21}$ 又は移動平均値 $I_{mp22}$ が所定の調整範囲内に含まれない場合には、高周波電源38Aに関するインピーダンス整合を、整合器42Aに行わせるために、整合器42Aに制御信号を送出する。なお、「所定の調整範囲」は、高周波RF2の周波数の調整により、高周波電源38Aの負荷インピーダンスを高周波電源38Aの出力インピーダンス又は整合ポイントに整合させることができ範囲である。  
10

## 【0101】

パワーアンプ38bは、発振器38aから出力された高周波を増幅することにより高周波RF2を生成し、当該高周波RF2を出力する。このパワーアンプ38bは、電源制御部38eによって制御される。具体的には、電源制御部38eは、主制御部72によって指定されるパワーの高周波RF2を出力するよう、パワーアンプ38bを制御する。  
20

## 【0102】

一実施形態において、電源制御部38eは、第1の副期間 $T_{s1}$ の高周波RF2のパワーが第2の副期間 $T_{s2}$ の高周波RF2のパワーよりも大きくなるように、パワーアンプ38bを制御してもよい。例えば、第1の副期間 $T_{s1}$ の高周波RF2のパワーは、第1の副期間 $T_{s1}$ の反射波パワー測定値 $P_{R21}$ 又は所定数の第1の副期間 $T_{s1}$ の反射波パワー測定値 $P_{R21}$ の移動平均値に応じて、プラズマに結合される高周波RF2のパワーが所定のパワーとなるように、設定され得る。また、第2の副期間 $T_{s2}$ の高周波RF2のパワーは、第2の副期間 $T_{s2}$ の反射波パワー測定値 $P_{R21}$ 又は所定数の第2の副期間 $T_{s2}$ の反射波パワー測定値 $P_{R21}$ の移動平均値に応じて、プラズマに結合される高周波RF2のパワーが所定のパワーとなるように、設定され得る。なお、第2段階S2の各々において、第2の副期間 $T_{s2}$ 用にその周波数及びパワーが設定された高周波RF2は、当該高周波RF2の供給が停止されるまで継続され得る。  
30

## 【0103】

インピーダンスセンサ38dは、実行済の第2段階S2のそれぞれの実行期間内に第1の副期間 $T_{s1}$ における高周波電源38Aの負荷インピーダンスの移動平均値 $I_{mp21}$ を求める。また、インピーダンスセンサ38dは、実行済の第2段階S2のそれぞれの実行期間内に第2の副期間 $T_{s2}$ における高周波電源38Aの負荷インピーダンスの移動平均値 $I_{mp22}$ を求める。なお、電源制御部38eは、電源制御部36eと同様に、第1の副期間 $T_{s1}$ の時間長の所定の時間長及び第2の副期間 $T_{s2}$ の別の所定の時間長を記憶してもよい。或いは、電源制御部38eは、電源制御部36eと同様に、上述の反射波パワー測定値 $P_{R21}$ の時系列から、期間 $T_1$ において反射波パワー測定値 $P_{R21}$ が所定値以下に安定する期間を第2の副期間 $T_{s2}$ に設定し、期間 $T_1$ において当該第2の副期間 $T_{s2}$ よりも前の期間を第1の副期間 $T_{s1}$ に設定してもよい。  
40

## 【0104】

図11に示すように、インピーダンスセンサ38dは、電流検出器102D、電圧検出器104D、フィルタ106D、フィルタ108D、平均値演算器110D、平均値演算器112D、移動平均値演算器114D、移動平均値演算器116D、及び、インピーダンス演算器118Dを有している。

## 【0105】

電圧検出器104Dは、給電ライン45上で伝送される高周波RF2の電圧波形を検出

し、当該電圧波形を表す電圧波形アナログ信号を出力する。この電圧波形アナログ信号は、フィルタ106Dに入力される。フィルタ106Dは、入力された電圧波形アナログ信号をデジタル化することにより、電圧波形デジタル信号を生成する。そして、フィルタ106Dは、電源制御部38eから第1の副期間Ts1及び第2の副期間Ts2それぞれの高周波RF2の周波数を特定する信号を受け、当該信号によって特定される周波数に対応した成分のみを電圧波形デジタル信号から抽出することにより、濾過電圧波形信号を生成する。なお、フィルタ106Dは、例えば、FPGA(フィールドプログラマブル・ゲートアレイ)から構成され得る。

#### 【0106】

フィルタ106Dによって生成された濾過電圧波形信号は、平均値演算器110Dに出力される。平均値演算器110Dには、電源制御部38eから第1の副期間Ts1及び第2の副期間Ts2を特定する副期間特定信号が与えられる。平均値演算器110Dは、濾過電圧波形信号から、副期間特定信号を用いて特定した各期間Ts1内の第1の副期間Ts1における電圧の平均値VA21を求める。また、平均値演算器110Dは、濾過電圧波形信号から、副期間特定信号を用いて特定した各期間Ts1内の第2の副期間Ts2における電圧の平均値VA22を求める。なお、平均値演算器110Dは、例えば、FPGA(フィールドプログラマブル・ゲートアレイ)から構成され得る。

#### 【0107】

平均値演算器110Dによって求められた平均値VA21及び平均値VA22は、移動平均値演算器114Dに出力される。移動平均値演算器114Dは、実行済の第2段階S2に関して既に得られている複数の平均値VA21のうち、直近に実行された所定数の第2段階S2における第1の副期間Ts1について求められた所定個の平均値VA21の移動平均値(移動平均値VMA21)を求める。また、移動平均値演算器114Dは、実行済の第2段階S2に関して既に得られている複数の平均値VA22のうち、直近に実行された所定数の第2段階S2における第2の副期間Ts2について求められた所定個の平均値VA22の移動平均値(移動平均値VMA22)を求める。移動平均値演算器114Dによって求められた移動平均値VMA21及びVMA22は、インピーダンス演算器118Dに出力される。なお、移動平均値演算器114Dは、例えば、CPU、又は、FPGA(フィールドプログラマブル・ゲートアレイ)から構成され得る。

#### 【0108】

電流検出器102Dは、給電ライン45上で伝送される高周波RF2の電流波形を検出し、当該電流波形を表す電流波形アナログ信号を出力する。この電流波形アナログ信号は、フィルタ108Dに入力される。フィルタ108Dは、入力された電流波形アナログ信号をデジタル化することにより、電流波形デジタル信号を生成する。そして、フィルタ108Dは、電源制御部38eから第1の副期間Ts1及び第2の副期間Ts2それぞれの高周波RF2の周波数を特定する信号を受け、当該信号によって特定される周波数に対応した成分のみを電流波形デジタル信号から抽出することにより、濾過電流波形信号を生成する。なお、フィルタ108Dは、例えば、FPGA(フィールドプログラマブル・ゲートアレイ)から構成され得る。

#### 【0109】

フィルタ108Dによって生成された濾過電流波形信号は、平均値演算器112Dに出力される。また、平均値演算器112Dには、電源制御部38eから上述の副期間特定信号が与えられる。平均値演算器112Dは、濾過電流波形信号から、副期間特定信号を用いて特定した各期間Ts1内の第1の副期間Ts1における電流の平均値IA21を求める。また、平均値演算器112Dは、濾過電流波形信号から、副期間特定信号を用いて特定した各期間Ts1内の第2の副期間Ts2における電流の平均値IA22を求める。なお、平均値演算器112Dは、例えば、FPGA(フィールドプログラマブル・ゲートアレイ)から構成され得る。

#### 【0110】

平均値演算器112Dによって求められた平均値IA21及び平均値IA22は、移動

10

20

30

40

50

平均値演算器 116D に出力される。移動平均値演算器 116D は、実行済の第 2 段階 S2 に関して既に得られている複数の平均値 IA21 のうち、直近に実行された所定数の第 2 段階 S2 における第 1 の副期間 Ts1 について求められた所定個の平均値 IA21 の移動平均値（移動平均値 IMMA21）を求める。また、移動平均値演算器 116D は、実行済の第 2 段階 S2 に関して既に得られている複数の平均値 IA22 のうち、直近に実行された所定数の第 2 段階 S2 における第 2 の副期間 Ts2 について求められた所定個の平均値 IA22 の移動平均値（移動平均値 IMMA22）を求める。移動平均値演算器 116D によって求められた移動平均値 IMMA21 及び IMMA22 は、インピーダンス演算器 118D に出力される。なお、移動平均値演算器 116D は、例えば、CPU、又は、FPGA（フィールドプログラマブル・ゲートアレイ）から構成され得る。

10

#### 【0111】

インピーダンス演算器 118D は、移動平均値 IMMA21 及び移動平均値 VMA21 から、高周波電源 38A の負荷インピーダンスの移動平均値 ImP21 を求める。この移動平均値 ImP21 は、絶対値と位相成分を含む。また、インピーダンス演算器 118D は、移動平均値 IMMA22 及び移動平均値 VMA22 から、高周波電源 38A の負荷インピーダンスの移動平均値 ImP22 を求める。この移動平均値 ImP22 は、絶対値と位相成分を含む。インピーダンス演算器 118D によって求められた移動平均値 ImP21 及び ImP22 は、電源制御部 38e に出力される。移動平均値 ImP21 及び ImP22 は、上述したように電源制御部 38e において、高周波 RF2 の周波数の設定のために用いられる。

20

#### 【0112】

図 10 に戻り、整合器 42A は、整合器 42 と同様に、整合回路 42a、センサ 42b、コントローラ 42c、並びに、アクチュエータ 42d 及び 42e を有している。以下、整合器 42A の各要素に関して、整合器 42 の対応の要素と異なる点を説明する。

#### 【0113】

整合器 42A のセンサ 42b は、インピーダンスセンサ 38d と同様に、電源制御部 38e から第 1 の副期間 Ts1 及び第 2 の副期間 Ts2 それぞれの高周波 RF2 の周波数を特定する信号を受け、当該信号によって特定される周波数に対応した成分のみを電圧波形デジタル信号から抽出することにより、濾過電圧波形信号を生成する。そして、センサ 42b は、濾過電圧波形信号をコントローラ 42c に出力する。また、整合器 42A のセンサ 42b は、インピーダンスセンサ 38d と同様に、電源制御部 38e から第 1 の副期間 Ts1 及び第 2 の副期間 Ts2 それぞれの高周波 RF2 の周波数を特定する信号を受け、当該信号によって特定される周波数に対応した成分のみを電流波形デジタル信号から抽出することにより、濾過電流波形信号を生成する。センサ 42b は、濾過電流波形信号をコントローラ 42c に出力する。

30

#### 【0114】

整合器 42A のコントローラ 42c は、移動平均値 ImP21 又は移動平均値 ImP22 が所定の調整範囲内に含まれない場合に電源制御部 38e から送出される上記の制御信号を受けると、移動平均値 ImP21 と移動平均値 ImP22 の平均値によって特定される高周波電源 38A の負荷インピーダンスを整合ポイントに近づけるよう、アクチュエータ 42d 及び 42e を制御する。或いは、整合器 42A のコントローラ 42c は、移動平均値 ImP21 又は移動平均値 ImP22 が所定の調整範囲内に含まれない場合に電源制御部 38e から送出される上記の制御信号を受けると、移動平均値 ImP22 によって特定される高周波電源 36A の負荷インピーダンスを整合ポイントに近づけるよう、アクチュエータ 42d 及び 42e を制御する。

40

#### 【0115】

以下、図 8 ~ 図 11 を参照して説明した高周波電源 36A、整合器 40A、高周波電源 38A、及び、整合器 42A を有するプラズマ処理装置 1 において行われるインピーダンス整合の方法について説明する。図 12 は、別の実施形態にかかるプラズマ処理方法において実行されるインピーダンス整合の方法を示す流れ図である。

50

## 【0116】

図12に示すインピーダンス整合の方法MTIは、方法MTにおける第2段階S2において用いられる。第2段階S2以外の他の段階においては、整合器40及び整合器42に関して上述したインピーダンス整合が行われ得る。

## 【0117】

方法MTの実施の初期においては、第2段階S2が上述した移動平均値Imp11、移動平均値Imp12、移動平均値Imp21、及び、移動平均値Imp22を求めるに足る回数、実行されていない。したがって、方法MTの実施の初期においては、上述した平均値VA11、平均値IA11、平均値VA12、平均値IA12、平均値VA21、平均値IA21、平均値VA22、及び、平均値IA22の算出、並びに、これらの蓄積のみが行われる。

10

## 【0118】

第2段階S2が移動平均値Imp11、移動平均値Imp12、移動平均値Imp21、及び、移動平均値Imp22を求めるに足る回数だけ実行された後には、インピーダンスセンサ36dにおいて移動平均値Imp11及び移動平均値Imp12が求められ、インピーダンスセンサ38dにおいて移動平均値Imp21及び移動平均値Imp22が求められる。

## 【0119】

移動平均値Imp11、移動平均値Imp12、移動平均値Imp21、及び、移動平均値Imp22が求められた後には、複数の段階S2の各々において、図12に示すように、判定J10が行われる。判定J10では、移動平均値Imp11及び移動平均値Imp12が上述した調整可能範囲内にあるか否かが電源制御部36eによって判定される。また、移動平均値Imp21及び移動平均値Imp22が上述した調整可能範囲内にあるか否かが電源制御部38eによって判定される。

20

## 【0120】

移動平均値Imp11及び移動平均値Imp12が上述した調整可能範囲内にあると判定された場合には、工程ST11において、電源制御部36eは、上述したように、第1の副期間Ts1における高周波RF1の周波数を設定し、第2の副期間Ts2における高周波RF1の周波数を設定する。続く工程ST12において、電源制御部36eは、上述したように、第1の副期間Ts1における高周波RF1のパワーを設定し、第2の副期間Ts2における高周波RF2のパワーを設定する。また、移動平均値Imp21及び移動平均値Imp22が上述した調整可能範囲内にあると判定された場合には、工程ST11において、電源制御部38eは、上述したように、第1の副期間Ts1における高周波RF2の周波数を設定し、第2の副期間Ts2における高周波RF2の周波数を設定する。続く工程ST12において、電源制御部38eは、上述したように、第1の副期間Ts1における高周波RF2のパワーを設定し、第2の副期間Ts2における高周波RF2のパワーを設定する。

30

## 【0121】

一方、移動平均値Imp11又は移動平均値Imp12が上述した調整可能範囲内にないと判定された場合には、工程ST13において、高周波電源36Aに関するインピーダンス整合を整合器40Aに行わせるために、電源制御部36eから整合器40Aに制御信号が送出される。この制御信号を受けた整合器40Aのコントローラ40cは、上述したように、高周波電源36Aの負荷インピーダンスを整合ポイントに近づけるよう、アクチュエータ40d及び40eを制御する。また、移動平均値Imp21又は移動平均値Imp22が上述した調整可能範囲内にないと判定された場合には、工程ST13において、高周波電源38Aに関するインピーダンス整合を整合器42Aに行わせるために、電源制御部38eから整合器42Aに制御信号が送出される。この制御信号を受けた整合器42Aのコントローラ42cは、上述したように、高周波電源38Aの負荷インピーダンスを整合ポイントに近づけるよう、アクチュエータ42d及び42eを制御する。

40

## 【0122】

50

第2段階S2における第1の副期間T<sub>s1</sub>は、高周波RF2の供給の開始時点を含む期間であるので、給電ライン43における反射波が、第2の副期間T<sub>s2</sub>における反射波よりも大きくなり得る。高周波電源36Aの負荷インピーダンスの変動によるものである。高周波RF2についても同様である。したがって、高周波RF1の反射波を減少させるためには、第1の副期間T<sub>s1</sub>と第2の副期間T<sub>s2</sub>それぞれの高周波電源36Aの負荷インピーダンスを個別に高周波電源36Aの出力インピーダンスに整合させる必要がある。また、高周波RF2の反射波を減少させるためには、第1の副期間T<sub>s1</sub>と第2の副期間T<sub>s2</sub>それぞれの高周波電源38Aの負荷インピーダンスを個別に高周波電源38Aの出力インピーダンスに整合させる必要がある。図12に示したインピーダンス整合の方法MTIによれば、実行済の第2段階S2の第1の副期間T<sub>s1</sub>の高周波電源36Aの負荷インピーダンスの移動平均値(移動平均値Im<sub>p11</sub>)、即ち第1の移動平均値によって推定される高周波電源36Aの負荷インピーダンスを高周波電源36Aの出力インピーダンスに近づけるよう、高周波RF1の周波数が調整される。また、第2の副期間T<sub>s2</sub>における高周波RF1の周波数は、移動平均値Im<sub>p12</sub>、即ち第2の移動平均値に基づき、同様に調整される。また、第1の副期間T<sub>s1</sub>における高周波RF2の周波数は、移動平均値Im<sub>p21</sub>、即ち第3の移動平均値に基づき、同様に調整される。また、第2の副期間T<sub>s2</sub>における高周波RF2の周波数は、移動平均値Im<sub>p22</sub>、即ち第4の移動平均値に基づき、同様に調整される。高周波電源36A及び高周波電源38Aは、高速に高周波の周波数を変更することができるので、方法MTIによれば、負荷インピーダンスの変化に高速に追従してインピーダンス整合を行うことが可能となる。

10

20

#### 【0123】

また、工程ST12によれば、第1の副期間T<sub>s1</sub>においてプラズマに結合される高周波RF1のパワーが不足する場合には、高周波RF1のパワーを補うことができる。また、工程ST12によれば、第1の副期間T<sub>s1</sub>においてプラズマに結合される高周波RF2のパワーが不足する場合には、高周波RF2のパワーを補うことができる。

#### 【0124】

以上、種々の実施形態について説明してきたが、上述した実施形態に限定されことなく種々の変形態様を構成可能である。例えば、高周波電源36及び高周波電源36Aは、上部電極46に高周波RF1を供給するように構成されていてもよい。また、方法MTが適用されるプラズマ処理装置は、容量結合型のプラズマ処理装置に限定されるものではない。方法MTは、第1電極及び第2電極を有する任意のプラズマ処理装置、例えば、誘導結合型のプラズマ処理装置にも適用され得る。

30

#### 【0125】

また、上述した一実施形態では、第2段階S2の第1の副期間及び第2の副期間それぞれにおいて、高周波RF1の調整(高周波RF1の周波数及びパワーの調整)が行われ、高周波RF2の調整(高周波RF2の周波数及びパワーの調整)が行われていたが、第1段階S1及び第3段階S3それぞれにおいても、同様に、二つの副期間が設定され、当該二つの副期間それぞれにおいて高周波RF1の調整(高周波RF1の周波数及びパワーの調整)が行われてもよい。また、第4段階S4においても、同様に、二つの副期間が設定され、当該二つの副期間それぞれにおいて高周波RF2の調整(高周波RF2の周波数及びパワーの調整)が行われてもよい。

40

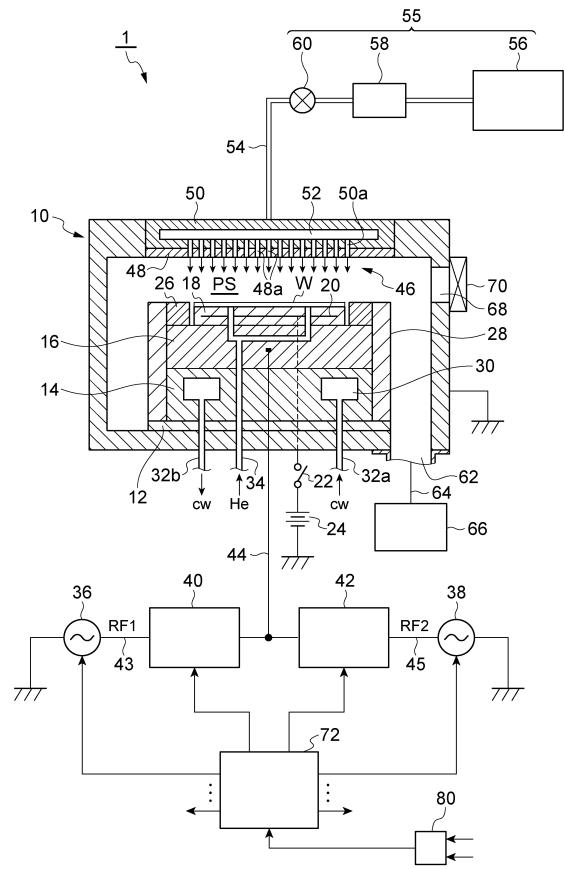
#### 【符号の説明】

#### 【0126】

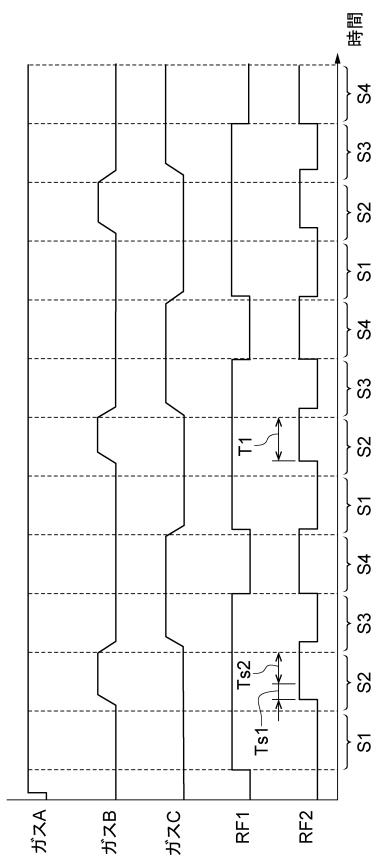
1...プラズマ処理装置、10...処理容器、16...サセプタ、18...静電チャック、36,36A...高周波電源、36d...インピーダンスセンサ、36e...電源制御部、38,38A...高周波電源、38d...インピーダンスセンサ、38e...電源制御部、40,40A...整合器、150A...演算部、40a...整合回路、40b...センサ、40c...コントローラ、42,42A...整合器、42a...整合回路、42b...センサ、42c...コントローラ、43...給電ライン、45...給電ライン、46...上部電極、55...ガス供給系、66...排気装置、72...主制御部、80...時間調整部。

50

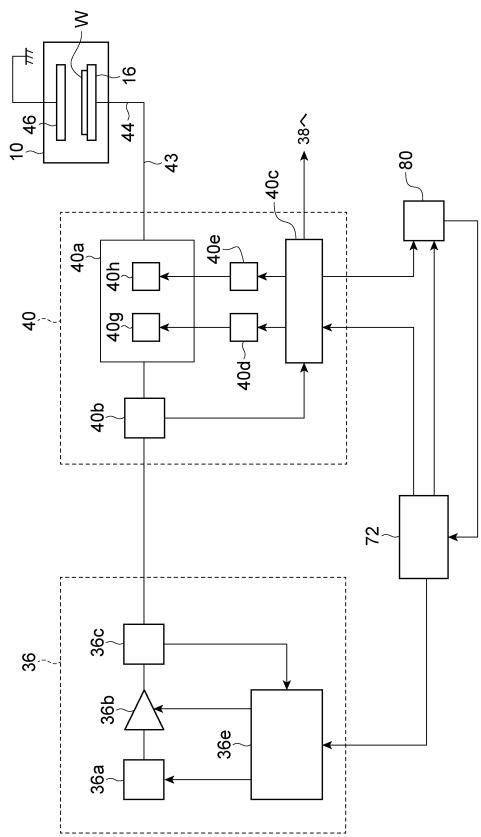
【 义 1 】



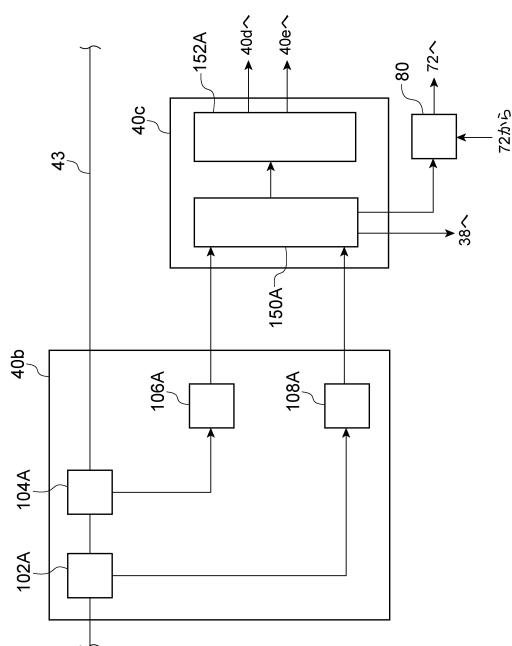
【 図 2 】



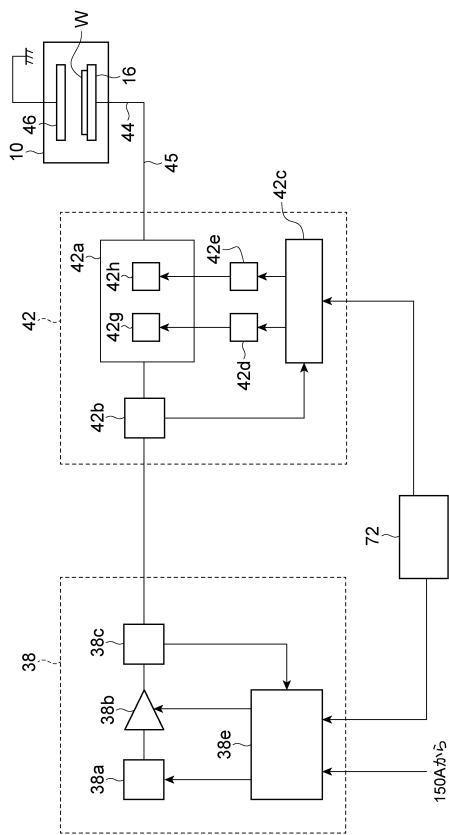
【 3 】



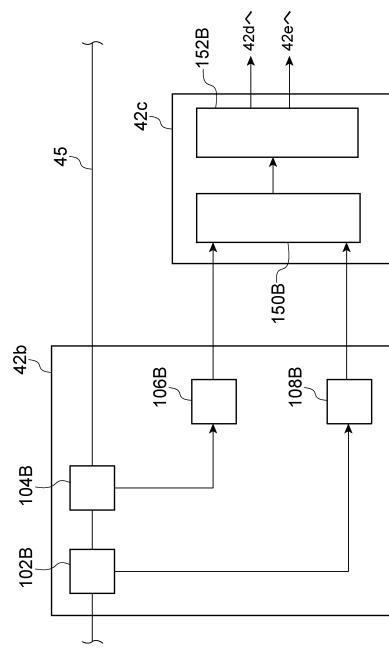
【 四 4 】



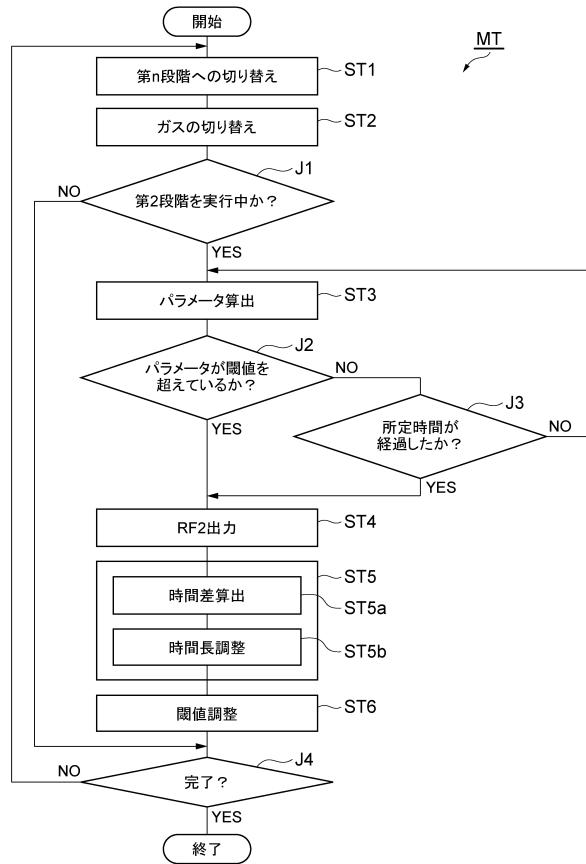
【 図 5 】



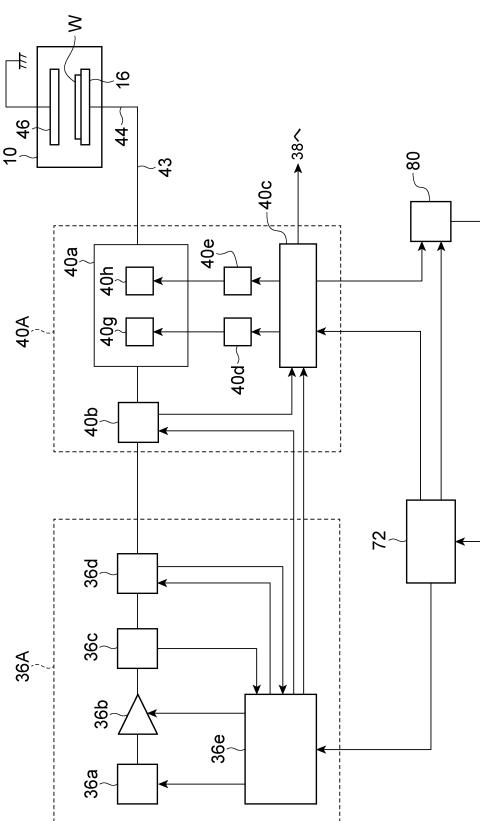
【 四 6 】



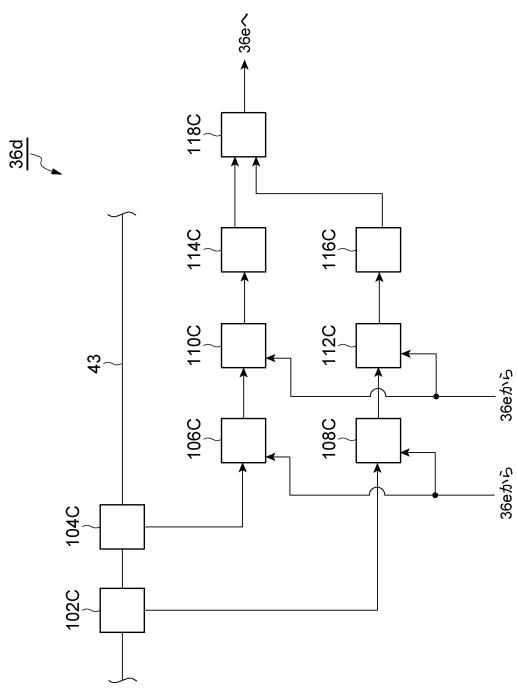
## 【 四 7 】



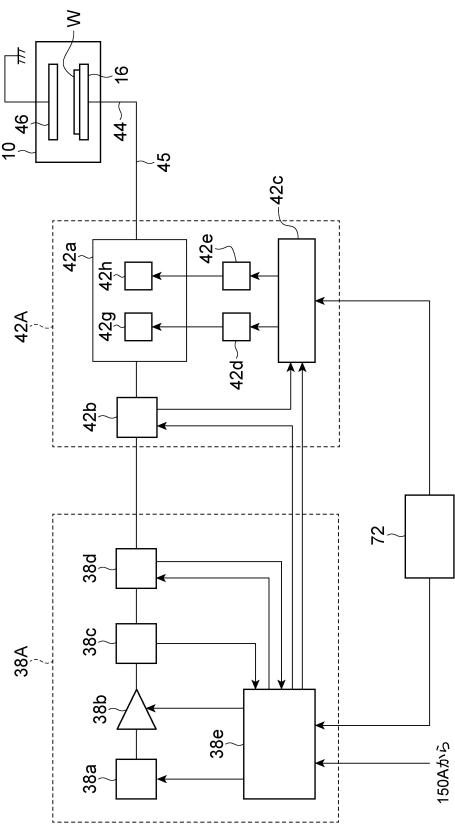
【 図 8 】



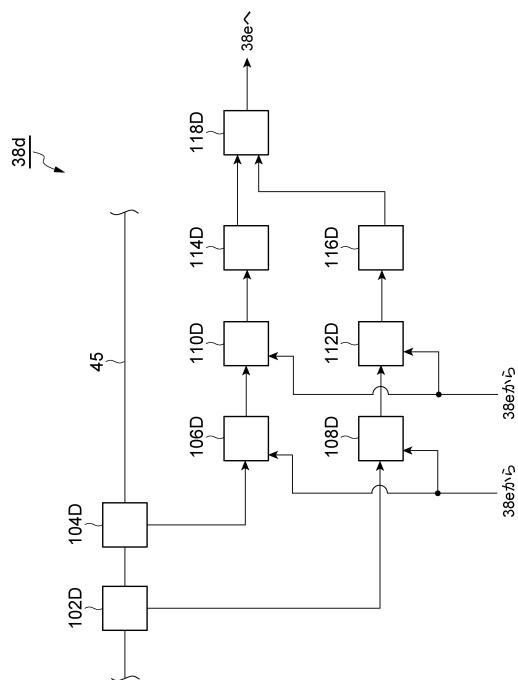
【図9】



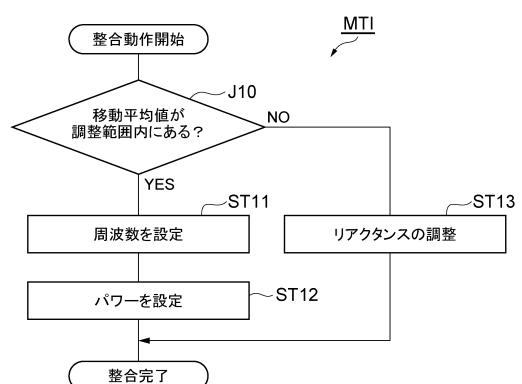
【図10】



### 【 図 1 1 】



【図12】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開2008-205436 (JP, A)  
特開2003-234340 (JP, A)  
特開2008-053496 (JP, A)  
特開2013-171847 (JP, A)  
特開2013-058749 (JP, A)  
特開2013-125892 (JP, A)  
国際公開第2013/088677 (WO, A1)  
特開2014-082205 (JP, A)  
特開2016-092342 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 21/302  
H01L 21/3065  
H01L 21/461  
H05H 1/00 - 1/54