

(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.

F I

H O 1 L 21/3065 (2006.01)

H O 1 L 21/302

I O 1 B

H O 5 H 1/46 (2006.01)

H O 5 H 1/46

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
 z タワー 東京エレクトロン株式会社内

審査官 鈴木 聡一郎

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、

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、

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む、

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、

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

10

20

30

40

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、

10

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。

20

【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。

30

【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、

40

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、

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、

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、

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。

【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。

【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。

【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

10

20

30

40

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。

【 0 0 1 1 】

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。一態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

【 0 0 1 2 】

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

【 0 0 1 3 】

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

【 0 0 1 4 】

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、(i i) 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

30

【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。

40

【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。

【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。

10

【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ることとする。

【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。

20

【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 が電氣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。

30

【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 32 a 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 32 b 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。

40

【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

50

、高周波電源 36、即ち第 1 の高周波電源が、整合器 40、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 38、即ち第 2 の高周波電源が、整合器 42、即ち第 2 の整合器を介して接続されている。高周波電源 36 は、プラズマの生成用の高周波 RF 1、即ち第 1 の高周波を出力する。高周波電源 36 が出力する高周波 RF 1 の基本周波数 f_{B1} は、例えば、100MHz である。高周波電源 38 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 RF 2、即ち第 2 の高周波を出力する。高周波電源 38 が出力する高周波 RF 2 の基本周波数 f_{B2} は、例えば、13.56MHz である。

【0025】

整合器 40 及び導体 44 は、高周波電源 36 からの高周波 RF 1 をサセプタ 16 に伝送する給電ライン 43、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 42 及び導体 44 は、高周波電源 38 からの高周波 RF 2 をサセプタ 16 に伝送する給電ライン 45、即ち第 2 の給電ラインの一部を構成している。

【0026】

処理容器 10 の天部には、上部電極 46 が設けられている。この上部電極 46 とサセプタ 16 の間には、プラズマが生成される処理容器 10 内の処理空間 PS が介在している。上部電極 46 は、天板 48 及び支持体 50 を有している。天板 48 には、多数のガス噴出孔 48a が形成されている。天板 48 は、例えば、Si、SiC といったシリコン系の材料から形成されている。支持体 50 は、天板 48 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。

【0027】

支持体 50 の内部には、ガスバッファ室 52 が形成されている。また、支持体 50 には、多数のガス通気孔 50a が形成されている。ガス通気孔 50a は、ガスバッファ室 52 から延びて、ガス噴出孔 48a に連通している。ガスバッファ室 52 には、ガス供給管 54 を介してガス供給系 55 が接続されている。ガス供給系 55 は、ガスソース群 56、流量制御器群 58、及び、バルブ群 60 を含んでいる。ガスソース群 56 は、複数のガスソースを含んでいる。流量制御器群 58 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 60 は複数のバルブを含んでいる。ガスソース群 56 の複数のガスソースは、流量制御器群 58 の対応の流量制御器及びバルブ群 60 の対応のバルブを介して、ガス供給管 54 に接続されている。ガス供給系 55 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 52 に供給するように構成されている。ガスバッファ室 52 に導入されたガスは、ガス噴出孔 48a から処理空間 PS に噴出される。

【0028】

サセプタ 16 と処理容器 10 の側壁との間、及び、支持台 14 と処理容器 10 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 10 の排気口 62 に繋がっている。処理容器 10 の底部には、排気口 62 に連通する排気管 64 が接続されている。この排気管 64 は、排気装置 66 に接続されている。排気装置 66 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 66 は、処理容器 10 の内部空間を所望の圧力に減圧する。また、処理容器 10 の側壁には被加工物 W の搬入及び搬出のための開口 68 が形成されている。処理容器 10 の側壁には、開口 68 を開閉するためのゲートバルブ 70 が取り付けられている。

【0029】

また、プラズマ処理装置 1 は、主制御部 72 を備えている。主制御部 72 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 36、38、整合器 40、42、ガス供給系 55、即ち、流量制御器群 58 の複数の流量制御器及びバルブ群 60 の複数のバルブ、排気装置 66 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 72 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。

【 0 0 3 0 】

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 7 0 が開かれて、被加工物 W が開口 6 8 を経由して処理容器 1 0 内に搬入される。処理容器 1 0 内に搬入された被加工物 W は、静電チャック 1 8 上に載置される。次いで、ガス供給系 5 5 からガスが処理容器 1 0 内に導入され、排気装置 6 6 が作動されて、処理容器 1 0 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 3 6 からの高周波 R F 1 がサセプタ 1 6 に供給され、必要に応じて高周波電源 3 8 からの高周波 R F 2 がサセプタ 1 6 に供給される。また、直流電源 2 4 からの直流電圧が静電チャック 1 8 の電極 2 0 に印加され、被加工物 W が静電チャック 1 8 上に保持される。そして、処理容器 1 0 内に供給されたガスが、サセプタ 1 6 と上部電極 4 6 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。

10

【 0 0 3 1 】

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 M T」という）は、複数の第 1 段階 S 1、当該複数の第 1 段階 S 1 と交互に実行される複数の第 2 段階 S 2 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 M T におけるガス A、ガス B、ガス C、高周波 R F 1、及び、高周波 R F 2 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 1 0 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 R F 1 が高レベルであることは、高周波 R F 1 がサセプタ 1 6 に供給されていることを示しており、高周波 R F 1 が低レベルであることは、高周波 R F 1 がサセプタ 1 6 に供給されていないことを示している。高周波 R F 2 のタイミングチャートについても高周波 R F 1 のタイミングチャートと同様である。

20

【 0 0 3 2 】

方法 M T の第 1 段階 S 1 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 1 0 内において生成される。第 1 段階 S 1 では、ガス供給系 5 5 及び高周波電源 3 6 が主制御部 7 2 によって制御される。具体的には、第 1 段階 S 1 において、ガス供給系 5 5 は、処理容器 1 0 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 S 1 の開始時に、主制御部 7 2 は、処理容器 1 0 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 5 5 に与える。第 1 段階 S 1 のガス供給系 5 5 に対する制御により、ガス供給系 5 5 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 6 0 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 5 8 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 S 1 において、高周波電源 3 6 は、高周波 R F 1 をサセプタ 1 6 に供給するよう、主制御部 7 2 によって制御される。これにより、第 1 段階 S 1 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、A r ガスといった希ガスである。なお、第 1 段階 S 1 では、高周波電源 3 8 からの高周波 R F 2 はサセプタ 1 6 に供給されない。

30

40

【 0 0 3 3 】

第 2 段階 S 2 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 1 0 内において生成される。第 2 段階 S 2 では、ガス供給系 5 5、高周波電源 3 6、及び、高周波電源 3 8 が主制御部 7 2 によって制御される。具体的に、第 2 段階 S 2 において、ガス供給系 5 5 は、処理容器 1 0 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 S 2 の開始時に、主制御部 7 2 は、処理容器 1 0 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 5 5 に与える。第 2 段階 S 2 のガス供給系 5 5 に対する制御により、ガス供給系 5 5 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 6 0 のバルブを

50

開き、当該ガスソースに接続された流量制御器群 5 8 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 S 2 において、高周波電源 3 6 は、直前の第 1 段階 S 1 に連続して、高周波 R F 1 をサセプタ 1 6 に供給するよう、主制御部 7 2 によって制御される。これにより、第 2 段階 S 2 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。

【 0 0 3 4 】

ガス切替信号がガス供給系 5 5 に与えられた時点から、第 2 のガスが処理容器 1 0 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 S 2 では、処理容器 1 0 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 4 0 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 1 0 内に第 2 のガスが到達しているものと判定され、整合器 4 0 の演算部は、サセプタ 1 6 に対する高周波 R F 2 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 3 8 に与える。

【 0 0 3 5 】

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

【 0 0 3 6 】

第 3 段階 S 3 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 1 0 内において生成される。第 3 段階 S 3 では、ガス供給系 5 5 及び高周波電源 3 6 が主制御部 7 2 によって制御される。具体的に、第 3 段階 S 3 において、ガス供給系 5 5 は、被加工物 W が収容されている処理容器 1 0 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 S 3 の開始時に、主制御部 7 2 は、処理容器 1 0 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 5 5 に与える。第 3 段階 S 3 のガス供給系 5 5 に対する制御により、ガス供給系 5 5 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 6 0 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 5 8 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 S 3 において、高周波電源 3 6 は、直前の第 2 段階 S 2 に連続して、高周波 R F 1 をサセプタ 1 6 に供給するよう、主制御部 7 2 によって制御される。これにより、第 3 段階 S 3 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 S 3 では、高周波電源 3 8 からの高周波 R F 2 はサセプタ 1 6 に供給されない。但し、図 2 に示すように、第 3 段階 S 3 の開始時点から第 3 のガスが処理容器 1 0 内に到達するまでの間、第 2 段階 S 2 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 3 段階 S 3 において高周波 R F 2 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。

【 0 0 3 7 】

第 4 段階 S 4 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 1 0 内において生成される。第 4 段階 S 4 では、ガス供給系 5 5 及び高周波電源 3 8 が主制御部 7 2 によって制御される。具体的に、第 4 段階 S 4 において、ガス供給系 5 5 は、被加工物 W が収容されている処理容器 1 0 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 S 4 の開始時に、主制御部 7 2 は、処理容器 1 0 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 5 5 に与える。第 4 段階 S 4 のガス供給系 5 5 に対する制御により、ガス供給系 5 5 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 6 0 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 5 8 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 S 4 において、高周波電源 3 8 は、高周波 R F 2 をサセプタ 1 6 に供給するよう、

主制御部 72 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 S4 では、高周波電源 36 から高周波 RF1 はサセプタ 16 に供給されない。

【0038】

図 2 に示すように、第 4 段階 S4 の後続の第 1 段階 S1 においては、その開始時点から第 1 のガスが処理容器 10 内に到達するまでの間、第 4 段階 S4 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 4 段階 S4 の後続の第 1 段階 S1 において高周波 RF2 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 S4 の後続の第 1 段階 S1 においては、この時間長の終了時点において、高周波 RF1 の供給が開始され得る。

10

【0039】

以下、図 3 ~ 図 6 を参照して、高周波電源 36 及び整合器 40、並びに、高周波電源 38 及び整合器 42 について詳細に説明する。図 3 は、高周波電源 36 及び整合器 40 の構成を例示する図であり、図 4 は、整合器 40 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 38 及び整合器 42 の構成を例示する図であり、図 6 は整合器 42 のセンサ及びコントローラの構成を例示する図である。

【0040】

図 3 に示すように、一実施形態において、高周波電源 36 は、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。電源制御部 36e 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、及び、パワーセンサ 36c から与えられる信号を利用して、発振器 36a 及びパワーアンプ 36b のそれぞれに制御信号を与えて、発振器 36a 及びパワーアンプ 36b を制御する。

20

【0041】

主制御部 72 から電源制御部 36e 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 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 S1 ~ S4 の各々における高周波 RF1 の供給又はその停止、並びに、高周波 RF1 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_{B1} である。なお、以下の説明では、高周波がサセプタ 16 に供給されていることを高周波が ON であるといい、高周波がサセプタ 16 に供給されていないことを高周波が OFF であるという。

30

【0042】

電源制御部 36e は、段階 S1 ~ S4 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 RF1 を ON 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 36a を制御する。この発振器 36a の出力はパワーアンプ 36b の入力に接続されている。発振器 36a から出力された高周波はパワーアンプ 36b に入力される。パワーアンプ 36b 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 RF1 をその出力から出力するために、入力された高周波を増幅する。これにより、高周波電源 36 から高周波 RF1 が出力される。

40

【0043】

パワーアンプ 36b の後段には、パワーセンサ 36c が設けられている。パワーセンサ 36c 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 RF1 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 36c には、高周波 RF1 の周波数を特定する信号が電源制御部 36e 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 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、進行波パワー測定値 PF1 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 36e に与えられる。

【0044】

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 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、反射波パワー測定値 P R 1 1、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 P R 1 2 を生成する。反射波パワー測定値 P R 1 1 は、モニタ表示用に主制御部 7 2 に与えられる。また、反射波パワー測定値 P R 1 2 は、パワーアンプ 3 6 b の保護用に、電源制御部 3 6 e に与えられる。

【 0 0 4 5 】

図 3 に示すように、整合器 4 0 は、整合回路 4 0 a、センサ 4 0 b、コントローラ 4 0 c、並びに、アクチュエータ 4 0 d 及び 4 0 e を有している。整合回路 4 0 a は、可変リアクタンス素子 4 0 g 及び 4 0 h を含んでいる。可変リアクタンス素子 4 0 g 及び 4 0 h は、例えば、可変コンデンサである。なお、整合回路 4 0 a は、インダクタ等を更に含んでいてもよい。

10

【 0 0 4 6 】

コントローラ 4 0 c は、例えば、プロセッサから構成され、主制御部 7 2 の制御の下で動作する。コントローラ 4 0 c は、センサ 4 0 b から与えられる測定値を利用して高周波電源 3 6 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 4 0 c は、求めた負荷インピーダンスを高周波電源 3 6 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 4 0 d 及び 4 0 e を制御して、可変リアクタンス素子 4 0 g 及び 4 0 h 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 4 0 d 及び 4 0 e は、例えば、モータである。

20

【 0 0 4 7 】

また、コントローラ 4 0 c は、センサ 4 0 b 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 S 2 における高周波 R F 2 の供給の開始タイミングを決定するようになっている。

【 0 0 4 8 】

図 4 に示すように、センサ 4 0 b は、電流検出器 1 0 2 A、電圧検出器 1 0 4 A、フィルタ 1 0 6 A、及び、フィルタ 1 0 8 A を有している。電圧検出器 1 0 4 A は、給電ライン 4 3 上で伝送される高周波 R F 1 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 1 0 6 A に入力される。フィルタ 1 0 6 A 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 1 0 6 A は、主制御部 7 2 からの信号によって特定される高周波 R F 1 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 1 0 6 A によって生成された濾過電圧波形信号は、コントローラ 4 0 c の演算部 1 5 0 A に与えられる。なお、フィルタ 1 0 6 A は、例えば、F P G A (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。

30

【 0 0 4 9 】

電流検出器 1 0 2 A は、給電ライン 4 3 上で伝送される高周波 R F 1 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 1 0 8 A に入力される。フィルタ 1 0 8 A 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 1 0 8 A は、主制御部 7 2 からの信号によって特定される高周波 R F 1 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 1 0 8 A によって生成された濾過電流波形信号は、コントローラ 4 0 c の演算部 1 5 0 A に与えられる。なお、フィルタ 1 0 8 A は、例えば、F P G A (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。

40

【 0 0 5 0 】

コントローラ 4 0 c の演算部 1 5 0 A は、フィルタ 1 0 6 A から与えられる濾過電圧波形信号、及び、フィルタ 1 0 8 A から与えられる濾過電流波形信号を用いて、整合器 4 0 におけるインピーダンス整合のために、高周波電源 3 6 の負荷インピーダンス Z L 1 を求

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 V_1 、濾過電流波形信号によって特定される交流電流 I_1 、及び、交流電圧 V_1 と交流電流 I_1 との位相差 θ_1 から、高周波電源 36 の負荷インピーダンス Z_{L1} を求める。また、演算部 150A は、交流電圧 V_1 、交流電流 I_1 、及び、位相差 θ_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 Z_{L1} 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もので、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 Z_{r1} 、及び、負荷リアクタンス Z_{i1} 、並びに、反射波係数 Γ_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 Z_{L1} 、負荷抵抗 Z_{r1} 、負荷リアクタンス Z_{i1} 、及び、反射波係数 Γ_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。

10

【0051】

負荷インピーダンス Z_{L1} は、 V_1 / I_1 により求められ、負荷抵抗 Z_{r1} は、負荷インピーダンス Z_{L1} の実部を求めることにより得られ、負荷リアクタンス Z_{i1} は、負荷インピーダンス Z_{L1} の虚部を求めることにより得られる。また、反射波係数 Γ_1 は、以下に式 (1) により、求められる。

【数 1】

$$\Gamma_1 = \frac{\sqrt{(Z_{r1} - 50)^2 + (Z_{i1})^2}}{(Z_{r1} - 50)^2 + (Z_{i1})^2} \quad \dots(1)$$

20

なお、反射波係数 Γ_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 P_{F1} 及び反射波パワー測定値 P_{R11} から、 P_{R11} / P_{F1} 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 Z_{L1} 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 Z_{L1} 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 Z_{L1} 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、
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15
0A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。

10

【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S
1～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_{B2} 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3
8a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増幅する。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。

【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。

【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。

【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 θ 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。

【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

10

20

30

40

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。

【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。

【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。

【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、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 J2 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 J3 において、第 2 段階 S2 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 J3 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 ST3 が実行される。一方、判定 J3 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 MT は、工程 ST4 に移行する。この判定 J3 により、第 2 段階 S2 において誤動作により高周波 RF2 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 J2 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 MT は工程 ST4 に移行する。工程 ST4 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 S2 における高周波 RF2 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 MT では、第 1 段階 S1 と第 2 段階 S2 にわたって高周波 RF1 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 MT の第 2 段階 S2 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 RF2 の供給が開始されるので、高周波 RF2 の供給が適切なタイミングで開始される。

【0077】

方法 MT では、次いで、工程 ST5 が実行される。工程 ST5 は、工程 ST5a 及び工程 ST5b を含む。工程 ST5a では、上述した時間差が求められる。具体的に、第 2 段階 S2 の各々の工程 ST4 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 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が、演算部 150A から与えられている。また、第 2 段階 S2 の各々の工程 ST1 において、時間調整部 80 には、第 2 段階 S2 の各々の開始時点（工程 ST1 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 ST5a 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 ST5b では、先行する第 2 段階 S2 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 S2 の後に実行される第 2 段階 S2 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 S2 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 S2 のうち一つの第 2 段階において、高周波 RF2 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 RF2 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 MT では、先行する第 2 段階 S2 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 S2 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 RF2 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 MT では、次いで、工程 ST6 が実行される。工程 ST6 では、判定 J2 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 MT では、次いで、判定 J4 が行われる。判定 J4 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 ST1 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 MT 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 MT では、少なくとも第 2 段階 S2 において、高周波 RF1 及び高周波 RF2 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 RF1 及び高周波 RF2 それぞれの周波数に加えて、高周波 RF1 のパワー及び高周波 RF2 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 MT 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 Ts1 及び第 2 の副期間 Ts2 それぞれにおける高周波 RF1 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 Ts1 の高周波電源 36A の負荷インピーダンスの移動平均値 Imp11 及び過去の第 2 の副期間 Ts2 の高周波電源 36A の負荷インピーダンスの移動平均値 Imp12 を受ける。そして、電源制御部 36e は、移動平均値 Imp11 及び移動平均値 Imp12 が所定の調整範囲内に含まれる場合には、移動平均値 Imp11 から推定される第 1 の副期間 Ts1 の高周波電源 36A の負荷インピーダンス及び移動平均値 Imp12 から推定される第 2 の副期間 Ts2 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 Ts1 及び第 2 の副期間 Ts2 それぞれの高周波 RF1 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 Ts1 の高周波の周波数及び第 2 の副期間 Ts2 の高周波の周波数を設定する。一方、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 R F 1 の周波数の調整により、高周波電源 3 6 A の負荷インピーダンスを高周波電源 3 6 A 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。

【 0 0 8 4 】

パワーアンプ 3 6 b は、発振器 3 6 a から出力された高周波を増幅することにより高周波 R F 1 を生成し、当該高周波 R F 1 を出力する。このパワーアンプ 3 6 b は、電源制御部 3 6 e によって制御される。具体的には、電源制御部 3 6 e は、主制御部 7 2 によって指定されるパワーの高周波 R F 1 を出力するよう、パワーアンプ 3 6 b を制御する。

【 0 0 8 5 】

一実施形態において、電源制御部 3 6 e は、第 1 の副期間 T s 1 の高周波 R F 1 のパワーが第 2 の副期間 T s 2 の高周波 R F 1 のパワーよりも大きくなるように、パワーアンプ 3 6 b を制御してもよい。例えば、第 1 の副期間 T s 1 の高周波 R F 1 のパワーは、第 1 の副期間 T s 1 の反射波パワー測定値 P R 1 1 又は所定数の第 1 の副期間 T s 1 の反射波パワー測定値 P R 1 1 の移動平均値に応じて、プラズマに結合される高周波 R F 1 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 s 2 の高周波 R F 1 のパワーは、第 2 の副期間 T s 2 の反射波パワー測定値 P R 1 1 又は所定数の第 2 の副期間 T s 2 の反射波パワー測定値 P R 1 1 の移動平均値に応じて、プラズマに結合される高周波 R F 1 のパワーが所定のパワーとなるように、設定され得る。

【 0 0 8 6 】

インピーダンスセンサ 3 6 d は、実行済の第 2 段階 S 2 のそれぞれの実行期間内の第 1 の副期間 T s 1 における高周波電源 3 6 A の負荷インピーダンスの移動平均値 I m p 1 1 を求める。また、インピーダンスセンサ 3 6 d は、実行済の第 2 段階 S 2 のそれぞれの実行期間内の第 2 の副期間 T s 2 における高周波電源 3 6 A の負荷インピーダンスの移動平均値 I m p 1 2 を求める。図 2 に示すように、第 1 の副期間 T s 1 は、第 2 段階 S 2 のそれぞれの実行期間内において、高周波 R F 2 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 T s 2 は、第 2 段階 S 2 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 S 2 の各々の実行期間内の第 1 の副期間 T s 1 と第 2 の副期間 T s 2 を含む期間を、期間 T 1 とよぶ。

【 0 0 8 7 】

第 1 の副期間 T s 1 の時間長及び第 2 の副期間 T s 2 の時間長は、電源制御部 3 6 e によって指定される。例えば、第 1 の副期間 T s 1 の時間長は電源制御部 3 6 e が記憶してる所定の時間長であってもよく、第 2 の副期間 T s 2 の時間長は電源制御部 3 6 e が記憶してる別の所定の時間長であってもよい。或いは、電源制御部 3 6 e は、上述の反射波パワー測定値 P R 1 1 の時系列から、期間 T 1 において反射波パワー測定値 P R 1 1 が所定値以下に安定する期間を第 2 の副期間 T s 2 に設定し、期間 T 1 において当該第 2 の副期間 T s 2 よりも前の期間を第 1 の副期間 T s 1 に設定してもよい。

【 0 0 8 8 】

図 9 に示すように、インピーダンスセンサ 3 6 d は、電流検出器 1 0 2 C、電圧検出器 1 0 4 C、フィルタ 1 0 6 C、フィルタ 1 0 8 C、平均値演算器 1 1 0 C、平均値演算器 1 1 2 C、移動平均値演算器 1 1 4 C、移動平均値演算器 1 1 6 C、及び、インピーダンス演算器 1 1 8 C を有している。

【 0 0 8 9 】

電圧検出器 1 0 4 C は、給電ライン 4 3 上で伝送される高周波 R F 1 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 1 0 6 C に入力される。フィルタ 1 0 6 C 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 1 0 6 C は、電源制御部 3 6 e から第 1 の副期間 T s 1 及び第 2 の副期間 T s 2 それぞれの高周波 R F 1 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Ts2について求められた所定個の平均値IA12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。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Ts1及び第2の副期間Ts2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 Imp_{21} 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 Imp_{22} を受ける。そして、電源制御部38eは、移動平均値 Imp_{21} 及び移動平均値 Imp_{22} が所定の調整範囲内に含まれる場合には、移動平均値 Imp_{21} 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 Imp_{22} 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 Imp_{21} 又は移動平均値 Imp_{22} 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可能な範囲である。

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 PR_{21} 又は所定数の第1の副期間 T_{s1} の反射波パワー測定値 PR_{21} 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 PR_{21} 又は所定数の第2の副期間 T_{s2} の反射波パワー測定値 PR_{21} 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の第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 Imp_{21} 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の第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 Imp_{22} 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いてもよい。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 PR_{21} の時系列から、期間 T_1 において反射波パワー測定値 PR_{21} 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

50

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 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 10 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 T_{s1} 及び第 2 の副期間 T_{s2} 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 T_1 内の第 1 の副期間 T_{s1} における電圧の平均値 V_{A21} 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 T_1 内の第 2 の副期間 T_{s2} における電圧の平均値 V_{A22} 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 V_{A21} 及び平均値 V_{A22} は、移動平均値演算器 114D 20 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 V_{A21} 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 T_{s1} について求められた所定個の平均値 V_{A21} の移動平均値 (移動平均値 V_{MA21}) 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 V_{A22} 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 T_{s2} について求められた所定個の平均値 V_{A22} の移動平均値 (移動平均値 V_{MA22}) 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 V_{MA21} 及び V_{MA22} は、インピーダンス演算器 118D によって出力される。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 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 40 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 T_1 内の第 1 の副期間 T_{s1} における電流の平均値 I_{A21} 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 T_1 内の第 2 の副期間 T_{s2} における電流の平均値 I_{A22} 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 I_{A21} 及び平均値 I_{A22} 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 I A 2 1 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 T s 1 について求められた所定個の平均値 I A 2 1 の移動平均値 (移動平均値 I M A 2 1) 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 I A 2 2 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 T s 2 について求められた所定個の平均値 I A 2 2 の移動平均値 (移動平均値 I M A 2 2) 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 I M A 2 1 及び I M A 2 2 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 I M A 2 1 及び移動平均値 V M A 2 1 から、高周波電源 38A の負荷インピーダンスの移動平均値 I m p 2 1 を求める。この移動平均値 I m p 2 1 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 I M A 2 2 及び移動平均値 V M A 2 2 から、高周波電源 38A の負荷インピーダンスの移動平均値 I m p 2 2 を求める。この移動平均値 I m p 2 2 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 I m p 2 1 及び I m p 2 2 は、電源制御部 38e に出力される。移動平均値 I m p 2 1 及び I m p 2 2 は、上述したように電源制御部 38e において、高周波 RF 2 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 T s 1 及び第 2 の副期間 T s 2 それぞれの高周波 RF 2 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 T s 1 及び第 2 の副期間 T s 2 それぞれの高周波 RF 2 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 I m p 2 1 又は移動平均値 I m p 2 2 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 I m p 2 1 と移動平均値 I m p 2 2 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 I m p 2 1 又は移動平均値 I m p 2 2 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 I m p 2 2 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

【 0 1 1 6 】

図 1 2 に示すインピーダンス整合の方法 M T I は、方法 M T における第 2 段階 S 2 において用いられる。第 2 段階 S 2 以外の他の段階においては、整合器 4 0 及び整合器 4 2 に関して上述したインピーダンス整合が行われ得る。

【 0 1 1 7 】

方法 M T の実施の初期においては、第 2 段階 S 2 が上述した移動平均値 I m p 1 1、移動平均値 I m p 1 2、移動平均値 I m p 2 1、及び、移動平均値 I m p 2 2 を求めるに足る回数、実行されていない。したがって、方法 M T の実施の初期においては、上述した平均値 V A 1 1、平均値 I A 1 1、平均値 V A 1 2、平均値 I A 1 2、平均値 V A 2 1、平均値 I A 2 1、平均値 V A 2 2、及び、平均値 I A 2 2 の算出、並びに、これらの蓄積のみが行われる。

10

【 0 1 1 8 】

第 2 段階 S 2 が移動平均値 I m p 1 1、移動平均値 I m p 1 2、移動平均値 I m p 2 1、及び、移動平均値 I m p 2 2 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 3 6 d において移動平均値 I m p 1 1 及び移動平均値 I m p 1 2 が求められ、インピーダンスセンサ 3 8 d において移動平均値 I m p 2 1 及び移動平均値 I m p 2 2 が求められる。

【 0 1 1 9 】

移動平均値 I m p 1 1、移動平均値 I m p 1 2、移動平均値 I m p 2 1、及び、移動平均値 I m p 2 2 が求められた後には、複数の段階 S 2 の各々において、図 1 2 に示すように、判定 J 1 0 が行われる。判定 J 1 0 では、移動平均値 I m p 1 1 及び移動平均値 I m p 1 2 が上述した調整可能範囲内にあるか否かが電源制御部 3 6 e によって判定される。また、移動平均値 I m p 2 1 及び移動平均値 I m p 2 2 が上述した調整可能範囲内にあるか否かが電源制御部 3 8 e によって判定される。

20

【 0 1 2 0 】

移動平均値 I m p 1 1 及び移動平均値 I m p 1 2 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 S T 1 1 において、電源制御部 3 6 e は、上述したように、第 1 の副期間 T s 1 における高周波 R F 1 の周波数を設定し、第 2 の副期間 T s 2 における高周波 R F 1 の周波数を設定する。続く工程 S T 1 2 において、電源制御部 3 6 e は、上述したように、第 1 の副期間 T s 1 における高周波 R F 1 のパワーを設定し、第 2 の副期間 T s 2 における高周波 R F 2 のパワーを設定する。また、移動平均値 I m p 2 1 及び移動平均値 I m p 2 2 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 S T 1 1 において、電源制御部 3 8 e は、上述したように、第 1 の副期間 T s 1 における高周波 R F 2 の周波数を設定し、第 2 の副期間 T s 2 における高周波 R F 2 の周波数を設定する。続く工程 S T 1 2 において、電源制御部 3 8 e は、上述したように、第 1 の副期間 T s 1 における高周波 R F 2 のパワーを設定し、第 2 の副期間 T s 2 における高周波 R F 2 のパワーを設定する。

30

【 0 1 2 1 】

一方、移動平均値 I m p 1 1 又は移動平均値 I m p 1 2 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 S T 1 3 において、高周波電源 3 6 A に関するインピーダンス整合を整合器 4 0 A に行わせるために、電源制御部 3 6 e から整合器 4 0 A に制御信号が送出される。この制御信号を受けた整合器 4 0 A のコントローラ 4 0 c は、上述したように、高周波電源 3 6 A 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 4 0 d 及び 4 0 e を制御する。また、移動平均値 I m p 2 1 又は移動平均値 I m p 2 2 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 S T 1 3 において、高周波電源 3 8 A に関するインピーダンス整合を整合器 4 2 A に行わせるために、電源制御部 3 8 e から整合器 4 2 A に制御信号が送出される。この制御信号を受けた整合器 4 2 A のコントローラ 4 2 c は、上述したように、高周波電源 3 8 A 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 4 2 d 及び 4 2 e を制御する。

40

【 0 1 2 2 】

50

第２段階Ｓ２における第１の副期間Ｔｓ１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Ｔｓ２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Ｔｓ１と第２の副期間Ｔｓ２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Ｔｓ１と第２の副期間Ｔｓ２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Ｔｓ１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Ｉｍｐ１１）、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Ｔｓ２における高周波ＲＦ１の周波数は、移動平均値Ｉｍｐ１２、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Ｔｓ１における高周波ＲＦ２の周波数は、移動平均値Ｉｍｐ２１、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Ｔｓ２における高周波ＲＦ２の周波数は、移動平均値Ｉｍｐ２２、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Ｔｓ１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Ｔｓ１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る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

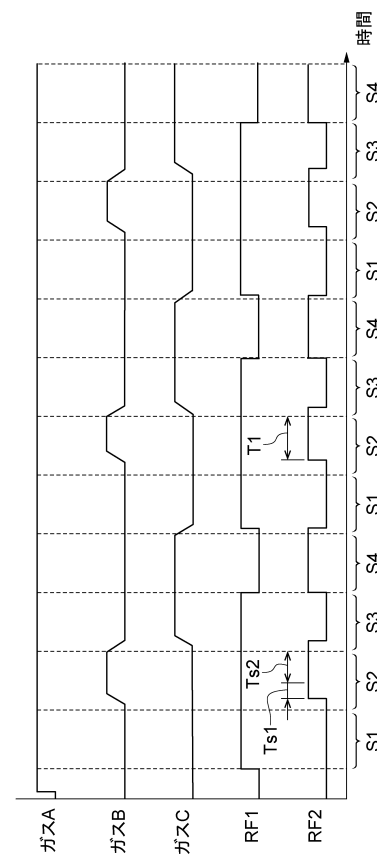
【符号の説明】

【０１２６】

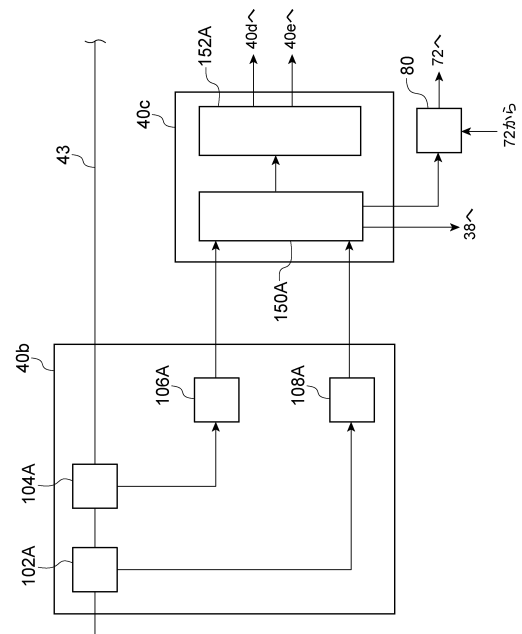
１…プラズマ処理装置、１０…処理容器、１６…サセプタ、１８…静電チャック、３６、３６Ａ…高周波電源、３６ｄ…インピーダンスセンサ、３６ｅ…電源制御部、３８、３８Ａ…高周波電源、３８ｄ…インピーダンスセンサ、３８ｅ…電源制御部、４０、４０Ａ…整合器、１５０Ａ…演算部、４０ａ…整合回路、４０ｂ…センサ、４０ｃ…コントローラ、４２、４２Ａ…整合器、４２ａ…整合回路、４２ｂ…センサ、４２ｃ…コントローラ、４３…給電ライン、４５…給電ライン、４６…上部電極、５５…ガス供給系、６６…排気装置、７２…主制御部、８０…時間調整部。

50

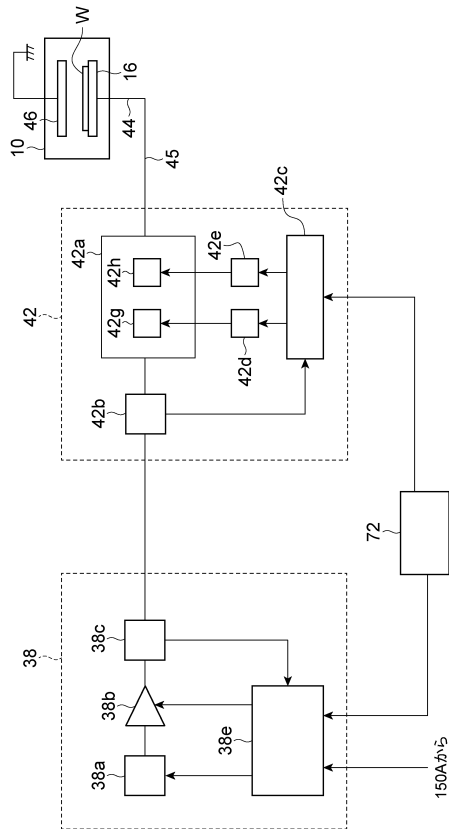
【 図 2 】



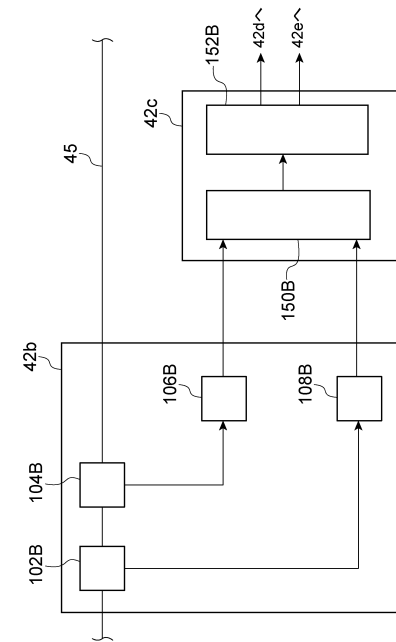
【圖 4】



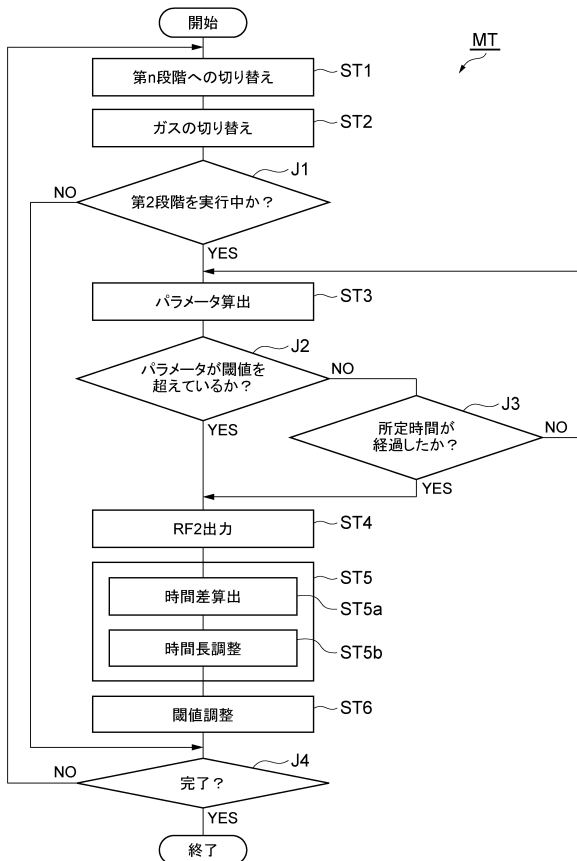
【図5】



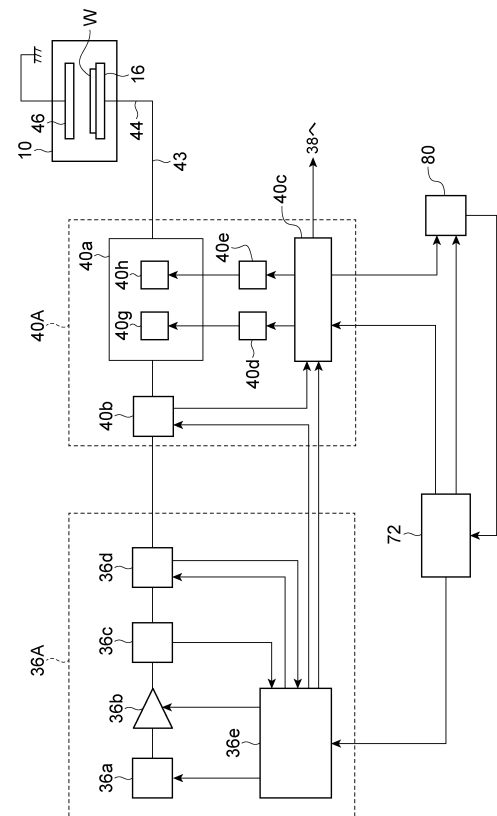
【図6】



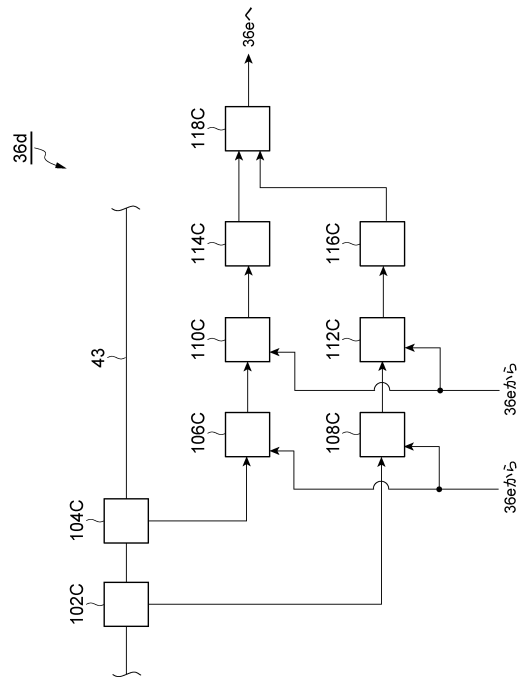
【図7】



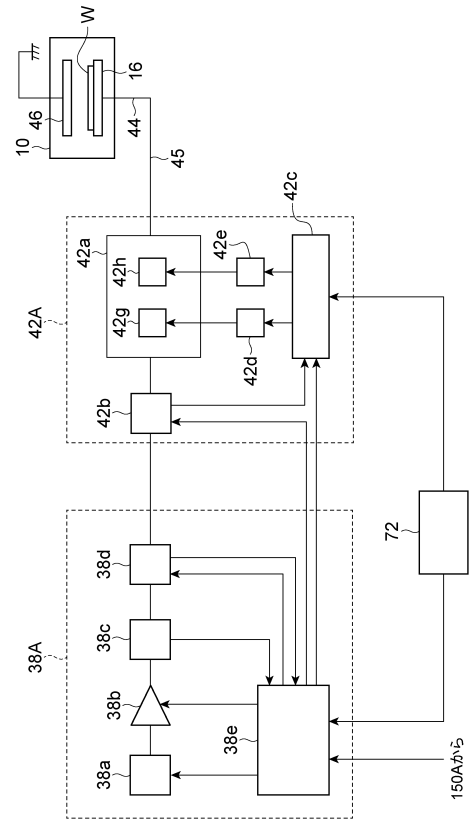
【図8】



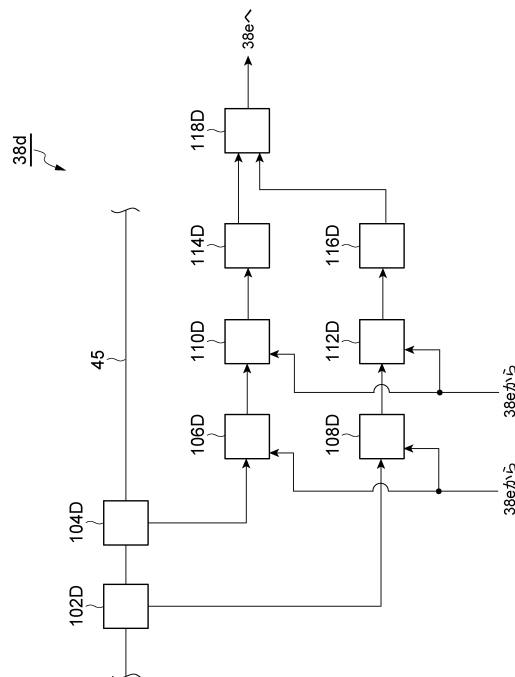
【図 9】



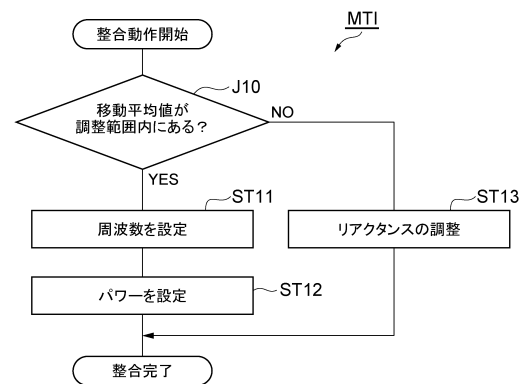
【図 10】



【図 11】



【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