

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6396822号
(P6396822)

(45) 発行日 平成30年9月26日(2018.9.26)

(24) 登録日 平成30年9月7日(2018.9.7)

(51) Int.Cl.	F I
HO 1 L 21/3065 (2006.01)	HO 1 L 21/302 I O I G
HO 1 L 21/683 (2006.01)	HO 1 L 21/68 R
HO 5 H 1/46 (2006.01)	HO 5 H 1/46 A
	HO 5 H 1/46 R
	HO 5 H 1/46 M

請求項の数 10 (全 29 頁)

(21) 出願番号	特願2015-27433 (P2015-27433)
(22) 出願日	平成27年2月16日(2015.2.16)
(65) 公開番号	特開2016-152252 (P2016-152252A)
(43) 公開日	平成28年8月22日(2016.8.22)
審査請求日	平成29年10月30日(2017.10.30)

(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 宇多川 勉

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 プラズマ処理装置のサセプタの電位を制御する方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

プラズマ処理装置のサセプタの電位を制御する方法であって、
 該プラズマ処理装置は、
 処理容器と、
 導体から構成され、前記処理容器内に設けられたサセプタと、
 前記サセプタ上に設けられた静電チャックと、
 イオン引き込みのための第1の高周波を発生する第1の高周波電源と、
 プラズマ生成用の第2の高周波を発生する第2の高周波電源と、
 前記静電チャックの電極に正極性の直流電圧を印加するための直流電源と、
 前記サセプタに電圧を印加するための電圧印加部と、

を備え、

前記第1の高周波電源及び前記第2の高周波電源の少なくとも一方からパルス変調された変調高周波を前記サセプタに供給する工程と、

前記電圧印加部から、前記変調高周波に同期してパルス変調された変調直流電圧であり、前記静電チャック上に載置された基板の電位と前記サセプタの電位との差を減少させるように電圧値が設定された該変調直流電圧を前記サセプタに印加する工程と、
 を含む方法。

【請求項2】

前記電圧印加部は、前記変調高周波に同期したパルス信号であって、前記変調高周波が

10

20

第1のパワーを有する第1の期間において第1の信号レベルを有し、前記変調高周波が第1のパワーよりも小さい第2のパワーを有する第2の期間において第2の信号レベルを有する該パルス信号を、前記第1の高周波電源及び前記第2の高周波電源の前記少なくとも一方から受け、該パルス信号に同期して変調された前記変調直流電圧を前記サセプタに印加する、請求項1に記載の方法。

【請求項3】

前記変調高周波を前記サセプタに供給する前記工程では、前記第1の高周波がパルス変調されることにより、該変調高周波が前記サセプタに供給され、

前記変調直流電圧を前記サセプタに印加する前記工程において、前記電圧印加部は、前記第1の期間において前記サセプタに直流電圧を印加し、前記第2の期間において前記サセプタに直流電圧を印加しない、

請求項2に記載の方法。

【請求項4】

前記電圧印加部は、前記変調高周波が前記サセプタに供給される伝送路上での電圧振幅が大きいほど絶対値が大きくなる電圧値を有する直流電圧を、前記第1の期間において前記サセプタに印加する、請求項3に記載の方法。

【請求項5】

前記電圧印加部は、前記第1の高周波のパワー、前記第2の高周波のパワー、及び前記変調高周波の変調周波数にデータテーブル中で対応付けられている電圧値を有する直流電圧を前記第1の期間において前記サセプタに印加する、請求項3に記載の方法。

【請求項6】

前記電圧印加部は、前記基板の自己バイアス電位の測定値に応じた直流電圧を前記第1の期間において前記サセプタに印加する、請求項3に記載の方法。

【請求項7】

前記変調高周波を前記サセプタに供給する前記工程では、前記第2の高周波がパルス変調されることにより、該変調高周波が前記サセプタに供給され、

前記変調直流電圧を前記サセプタに印加する前記工程において、前記電圧印加部は、前記第1の期間において前記サセプタに第1の電圧値を有する第1の直流電圧を印加し、前記第2の期間において前記第1の電圧値の絶対値よりも大きい絶対値を有する第2の電圧値を有する第2の直流電圧を前記サセプタに印加する、

請求項2に記載の方法。

【請求項8】

前記電圧印加部は、前記第1の期間及び前記第2の期間の各々において、前記変調高周波が前記サセプタに供給される伝送路上での電圧振幅が大きいほど絶対値が大きくなる電圧値を有する直流電圧を、前記サセプタに印加する、請求項7に記載の方法。

【請求項9】

前記電圧印加部は、前記第1の期間及び前記第2の期間の各々において、前記第1の高周波のパワー、前記第2の高周波のパワー、及び前記変調高周波の変調周波数にデータテーブル中で対応付けられている電圧値を有する直流電圧を前記サセプタに印加する、請求項7に記載の方法。

【請求項10】

前記電圧印加部は、前記第1の期間及び前記第2の期間の各々において、前記基板の自己バイアス電位の測定値に応じた直流電圧を前記サセプタに印加する、請求項7に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の実施形態は、プラズマ処理装置のサセプタの電位を制御する方法に関するものである。

【背景技術】

10

20

30

40

50

【 0 0 0 2 】

半導体デバイスといった種々の電子デバイスの製造においては、基板に対するプラズマ処理によって、ドライエッチング、酸化、成膜といった種々のプラズマ処理が施される。このようなプラズマ処理では、処理ガスのプラズマを生成するプラズマ処理装置が用いられる。

【 0 0 0 3 】

プラズマ処理装置は、典型的に、処理容器、サセプタ、静電チャック、第1及び第2の高周波電源、及びガス供給部を備えている。処理容器は、真空排気可能な内部空間を提供している。ガス供給部は、処理容器内の空間に処理ガスを供給する。サセプタ及び静電チャックは、処理容器内に設けられている。

10

【 0 0 0 4 】

静電チャックは、サセプタ上に設けられている。静電チャックは、その上に載置された基板を吸着して保持するよう構成されている。具体的に、静電チャックは、誘電体膜中に電極を有している。この電極に正極性の直流電圧が印加されることによって発生する静電力によって、基板は静電チャックに保持される。

【 0 0 0 5 】

また、サセプタ及び静電チャックには、リフトピンを昇降移動させるための貫通孔が形成されている。リフトピンは、その先端が静電チャックの上方に突き出した状態で、当該リフトピンの先端に処理前の基板を支持する。しかる後に、リフトピンが下降することにより基板が静電チャック上に載置される。また、基板のプラズマ処理後には、リフトピンが

20

【 0 0 0 6 】

また、サセプタの内部には、プラズマ処理の実行中の基板の温度を制御するために、冷媒用の第1流路が設けられている。また、静電チャックには、基板を加熱するためのヒータ素子等が設けられている。さらに、サセプタの温度を基板に効率よく伝達するために、サセプタ及び静電チャックには、伝熱用のバックサイドガス（一般にHeガス）を基板の裏面と静電チャックの上面との間に供給するための第2流路が形成されている。

【 0 0 0 7 】

また、一般的に、サセプタは、高周波電極、即ち下部電極を兼ねている。プラズマ処理の実行中には、第1の高周波電源及び第2の高周波電源から整合器を介して高周波（High Frequency Wave）がサセプタに供給される。なお、第1の高周波電源は、プラズマ生成用の第1の高周波を発生し、第2の高周波電源は、イオン引き込み用の第2の高周波を発生する。プラズマ処理の実行中には、基板が静電チャックに吸着された状態で、ガス供給部からの処理ガスが処理容器内に供給され、第1及び第2の高周波電源からの高周波がサセプタに供給されることにより、処理ガスのプラズマが生成される。

30

【 0 0 0 8 】

ところで、上記のプラズマ処理装置では、静電チャック内の電極に正極性で高圧の直流電圧を印加すると、基板とサセプタとの間で異常放電が発生し、基板がダメージを受ける現象が発生することがある。ここで、図1を参照して、かかる現象を具体的に説明する。図1に示すように、一般的には、静電チャックESCは、サセプタLE上に接着剤AHを介して設けられている。基板Wは、静電チャックESC上に載置され、また、当該基板W及び静電チャックESCの周囲には、フォーカスリングFRが配置される。

40

【 0 0 0 9 】

基板Wは、静電チャックESCの電極CEに直流電源DCPから正極性の直流電圧が与えられることによって発生する静電力により、静電チャックESCに吸着される。図1に示す状態では、静電チャックESCは、図1において静電チャックESCに重畳して描かれた「+」で示すように、正極性の高い電位、例えば、1000V以上の電位を有する。また、サセプタLEは、接地された処理容器に対して電氣的にフローティング状態にあり、サセプタLEと処理容器との間には、容量（図中、参照符号CAで示す）が存在するものと見なすことができる。また、サセプタLEと静電チャックESCの電極CEとの間に

50

も容量（図中、参照符号CBで示す）が存在するものと見なすことができる。したがって、サセプタLEは、図1においてサセプタLEに重畳して描かれた「+」で示すように、静電チャックESCと同極性の電位、即ち正極性の電位を有する。そして、プラズマの生成のために、第1及び第2の高周波電源からの高周波がサセプタに与えられると、基板Wはプラズマに晒され、当該基板Wの電位は、図1において、基板Wに重畳して描かれた「-」で示すように、自己バイアスに等しい負極性の電位（例えば、-500V）以下に下がる。その結果、基板WとサセプタLEとの間には、大きな電位差が生じることになる。

【0010】

また、上述したように、サセプタLE及び静電チャックESCには、バックサイドガス用の第2流路、リフタピン用の貫通孔といった空間DSが形成されている。この空間DS内にはガスが存在し得るので、上述した電位差により基板WとサセプタLEとの間で異常放電（図中の矢印Aを参照）が発生し得る。

10

【0011】

このような異常放電を抑制するために、特許文献1には、基板と略同電位のフォーカスリングとサセプタとの間に電流制限素子を設けて、当該電流制限素子を介してサセプタとフォカスリングとの間で電荷を移動させ、サセプタの電位と基板の電位とを近づける技術が記載されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0012】

20

【特許文献1】特開2011-210958号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0013】

上記のようにサセプタとフォーカスリングとを電流制限素子によって電氣的に接続するプラズマ処理装置においては、フォーカスリングが消耗性の交換部品であるので、現実的には、電流制限素子をフォーカスリングに溶接やハンダ付け等で接合することはできず、パネ加圧等の接触式によって電氣的接続を得る構成を採らざるを得ない。しかし、接触式では、フォーカスリングと電流制限素子との間で良好な電気伝導を得るのが難しく、接触界面で大きな電位差が発生しやすい。このため、電流制限素子に本来の機能を発揮させるのが困難である。そこで、本願発明者は、サセプタに直接的に電圧を印加することにより、サセプタの電位と基板の電位との差を低減し、異常放電の発生を抑制する技術の開発を行っている。

30

【0014】

ところで、プラズマ処理では、パルス変調された高周波をサセプタに供給することがある。即ち、サセプタに供給すべき高周波を交互にON/OFFさせることがある。このようにパルス変調された高周波がサセプタに供給されると、基板の電位が変動する。したがって、パルス変調された高周波が用いられる場合であっても、サセプタに直接的に電圧を印加することにより、サセプタの電位と基板の電位との差を低減し、異常放電の発生を抑制することが必要である。

40

【課題を解決するための手段】

【0015】

一態様においては、プラズマ処理装置のサセプタの電位を制御する方法が提供される。この方法で使用されるプラズマ処理装置は、処理容器、サセプタ、静電チャック、第1の高周波電源、第2の高周波電源、及び電圧印加部を備えている。サセプタは、導体から構成され、処理容器内に設けられている。静電チャックは、サセプタ上に設けられている。第1の高周波電源は、イオン引き込みのための第1の高周波を発生する。第2の高周波電源は、プラズマ生成用の第2の高周波を発生する。直流電源は、静電チャックの電極に正極性の直流電圧を印加する。電圧印加部は、サセプタに電圧を印加する。本方法は、(a)第1の高周波電源及び第2の高周波電源の少なくとも一方からパルス変調された変調高

50

周波をサセプタに供給する工程（以下、「変調高周波供給工程」という）と、（b）電圧印加部から、変調高周波に同期してパルス変調された変調直流電圧であり、静電チャック上に載置された基板の電位とサセプタの電位との差を減少させるように電圧値が設定された該変調直流電圧をサセプタに印加する工程「以下、変調直流電圧印加工」とい）と、を含む。

【0016】

一態様に係る方法では、パルス変調された高周波、即ち変調高周波に同期して変調されており、且つ、基板の電位とサセプタの電位との差を減少させる電圧値を有する直流電圧、即ち、変調直流電圧がサセプタに印加される。したがって、第1の高周波及び第2の高周波のうち少なくとも一方に変調高周波が用いられる場合であっても、サセプタの電位と基板の電位との差を低減し、異常放電の発生を抑制することが可能となる。

10

【0017】

一実施形態では、電圧印加部は、変調高周波に同期したパルス信号を第1の高周波電源又は第2の高周波電源から受ける。このパルス信号は、変調高周波が第1のパワーを有する第1の期間において第1の信号レベルを有し、変調高周波が第1のパワーよりも小さい第2のパワーを有する第2の期間において第2の信号レベルを有する該パルス信号である。電圧印加部は、当該パルス信号に同期して変調された変調直流電圧をサセプタに印加する。

【0018】

一実施形態では、変調高周波供給工程において、第1の高周波がパルス変調されることにより、該変調高周波が前記サセプタに供給される。この実施形態の変調直流電圧印加工工程において、電圧印加部は、第1の期間においてサセプタに直流電圧を印加し、第2の期間において前記サセプタに直流電圧を印加しない。即ち、この実施形態では、第1の高周波のパルス変調に同期した直流電圧のON/OFF制御によって変調高周波電圧が生成され、当該変調高周波電圧がサセプタに印加される。

20

【0019】

一実施形態では、電圧印加部は、変調高周波がサセプタに供給される伝送路上での電圧振幅が大きいほど絶対値が大きくなる電圧値を有する直流電圧を、第1の期間においてサセプタに印加し得る。上記伝送路上での電圧振幅は、自己バイアスによる基板の電位の絶対値が大きいほど大きくなる。この実施形態では、基板とサセプタとの電位差を抑制し得る変調直流電圧の電圧値が、かかる電圧振幅に基づいて決定される。

30

【0020】

一実施形態では、電圧印加部は、第1の高周波のパワー、第2の高周波のパワー、及び変調高周波の変調周波数にデータテーブル中で対応付けられている電圧値を有する直流電圧を第1の期間においてサセプタに印加してもよい。この実施形態では、サセプタに与える電圧の電圧値が、基板の電位に影響を与えるパラメータに対応付けてデータテーブルのレコードとして予め準備される。このデータテーブルを用いることにより、サセプタに印加される直流電圧の電圧値が決定される。

【0021】

一実施形態では、電圧印加部は、基板の自己バイアス電位の測定値に応じた直流電圧を第1の期間においてサセプタに印加してもよい。

40

【0022】

一実施形態では、変調高周波供給工程において、第2の高周波がパルス変調されることにより、該変調高周波がサセプタに供給される。この実施形態では、変調直流電圧印加工工程において、電圧印加部は、第1の期間においてサセプタに第1の電圧値を有する第1の直流電圧を印加し、第2の期間において前記第1の電圧値の絶対値よりも大きい絶対値を有する第2の電圧値を有する第2の直流電圧をサセプタに印加し得る。例えば第1の高周波がサセプタに供給された状態で、パルス変調された第2の高周波がサセプタに与えられる場合には、第2の高周波がサセプタに与えられている第1の期間には、基板の電位の絶対値は比較的小さくなる。一方、第2の高周波がサセプタに与えられていない第2の期間

50

には、基板の電位の絶対値は比較的大きくなる。したがって、第1の期間において第1の電圧値を有する第1の直流電圧をサセプタに印加し、第2の期間において第2の電圧値を有する第2の直流電圧をサセプタに印加することで、異常放電を抑制することが可能となる。

【0023】

一実施形態では、電圧印加部は、第1の期間及び第2の期間の各々において、変調高周波がサセプタに供給される伝送路上での電圧振幅が大きいほど絶対値が大きくなる電圧値を有する直流電圧を、サセプタに印加してもよい。

【0024】

一実施形態では、電圧印加部は、第1の期間及び第2の期間の各々において、第1の高周波のパワー、第2の高周波のパワー、及び変調高周波の変調周波数にデータテーブル中
10
で対応付けられている電圧値を有する直流電圧をサセプタに印加してもよい。

【0025】

一実施形態では、電圧印加部は、第1の期間及び第2の期間の各々において基板の自己バイアス電位の測定値に応じた直流電圧をサセプタに印加してもよい。

【発明の効果】

【0026】

以上説明したように、パルス変調された高周波が用いられる場合であっても、サセプタに直接的に電圧を印加することにより、サセプタの電位と基板の電位との差を低減し、異常放電の発生を抑制することが可能となる。
20

【図面の簡単な説明】

【0027】

【図1】サセプタと基板との間の異常放電の発生原理を説明するための図である。

【図2】一実施形態に係るプラズマ処理装置を概略的に示す図である。

【図3】基板の電位の時間変化の測定結果を例示する図である。

【図4】一実施形態に係るプラズマ処理装置のサセプタの電位を制御する方法を示す流れ図である。

【図5】マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第1例を示す図である。

【図6】変調高周波、パルス信号、基板の電位、及び電圧印加部の変調直流電圧のタイミングチャートを例示する図である。
30

【図7】マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第2例を示す図である。

【図8】マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第3例を示す図である。

【図9】変調高周波、パルス信号、基板の電位、及び電圧印加部の変調直流電圧のタイミングチャートを例示する図である。

【図10】データテーブルの一例を示す図である。

【図11】別の実施形態に係るプラズマ処理装置を示す図である。

【図12】マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第5例を示す図である。

【図13】マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第6例を示す図である。

【図14】マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第7例を示す図である。

【図15】マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第8例を示す図である。
40

【図16】マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第9例を示す図である。

【図17】マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第10例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0028】

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。

【0029】

まず、一実施形態のプラズマ処理装置について説明する。図2は、一実施形態に係るプラズマ処理装置を概略的に示す図である。図2に示すプラズマ処理装置1は、下部2周波印加方式の容量結合型プラズマ処理装置として構成されている。このプラズマ処理装置1
50

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、例えば、アルミニウム又はステンレス鋼といった金属から構成されている。この処理容器 10 は、接地されている。

【0030】

処理容器 10 内には、サセプタ 12 が設けられている。このサセプタ 12 は、高周波電極、即ち下部電極を構成している。サセプタ 12 は、例えばアルミニウム製である。サセプタ 12 は、支持部 14 によって支持されている。支持部 14 は、例えば円筒形状を有しており、処理容器 10 の底部から上方に延在している。支持部 14 は、セラミックといった絶縁体から構成されている。したがって、サセプタ 12 は、非接地状態にある。

【0031】

また、処理容器 10 の底部からは、支持部 16 が支持部 14 の外周に沿って上方に延在している。支持部 16 は導電性であり、略円筒形状を有し得る。この支持部 16 と処理容器 10 の内壁面との間には、排気路 18 が形成されている。排気路 18 には、排気管 22 によって提供される排気口 20 が接続している。排気管 22 には、排気装置 24 が接続されている。排気装置 24 は、ターボ分子ポンプといった真空ポンプを有しており、処理容器 10 内の空間を所望の真空度まで減圧することができる。また、処理容器 10 の側壁には、基板 W の搬入出口を開閉するゲートバルブ 26 が取り付けられている。

【0032】

サセプタ 12 には、第 1 の高周波電源 28 及び第 2 の高周波電源 30 が、マッチングユニット 32 及び給電棒 34 を介して電氣的に接続されている。第 1 の高周波電源 28 は、主としてサセプタ 12 上の基板 W に対するイオンの引き込みに寄与する周波数（例えば、13.56 MHz）の第 1 の高周波 LF を出力する。一方、第 2 の高周波電源 30 は、主としてプラズマの生成に寄与する周波数（例えば、100 MHz）の第 2 の高周波 HF を出力する。

【0033】

マッチングユニット 32 には、第 1 の高周波電源 28 及び第 2 の高周波電源 30 と負荷（主にプラズマ）との間でインピーダンスの整合をとるための整合器が主要されている。なお、整合器については、後述する。給電棒 34 は、円筒形又は円柱形の導体から構成されている。給電棒 34 の上端は、サセプタ 12 の下面中心部に接続されており、当該給電棒 34 の下端はマッチングユニット 32 内の整合器の高周波出力端子に接続されている。また、処理容器 10 の底部とマッチングユニット 32 との間には、給電棒 34 の周りを囲む円筒形の導体カバー 35 が設けられている。

【0034】

サセプタ 12 は基板 W よりも一回り大きな直径又は口径を有している。サセプタ 12 の上面は、略水平な面であり、中央領域と周辺領域を含んでいる。この中央領域上には、静電チャック 38 が設けられている。また、周辺領域上には、静電チャック 38 及び基板 W を囲むように、フォーカスリング 36 が設けられる。フォーカスリング 36 は、リング状の誘電体 135 を介して、周辺領域上に設けられている。このフォーカスリング 36 は、基板 W 表面の材料（例えば、被エッチング材）に応じて、例えば、Si, SiC, C, SiO₂ の中の何れかの材質で構成される。

【0035】

静電チャック 38 は、サセプタ 12 の上面の中央領域上に設けられている。静電チャック 38 は、サセプタ 12 に対して一体形成されていてもよく、或いは、当該中央領域に対して接着剤等を介して接合されていてもよい。静電チャック 38 は、誘電体層 40 及び内部電極 42 を有している。内部電極 42 は、誘電体層 40 内に設けられている。この内部電極 42 には、処理容器 10 の外に設けられた直流電源 44 が、スイッチ 46、抵抗器 48、及び高圧線 50 を介して電氣的に接続されている。直流電源 44 から正極性で高圧（例えば、2000 ~ 3000 V）の直流電圧 A_{DC} が静電チャック 38 の内部電極 42 に印加されることにより、基板 W が静電力で静電チャック 38 に吸着されるようになっている。なお、高圧線 50 は、被覆線であり、サセプタ 12 を下から貫通して静電チャック 3

10

20

30

40

50

8の内部電極42に接続されている。

【0036】

サセプタ12の内部には、冷媒流路52が形成されている。冷媒流路52は、例えば、サセプタ12の内部において、環状又は螺旋状に延在している。この冷媒流路52には、チラーユニットから冷媒供給管54を介して所定温度の冷媒、例えば冷却水CWが循環供給される。このように供給される冷媒の温度によってサセプタ12の温度を制御することができる。また、サセプタ12及び静電チャック38には、ガス流路56が形成されている。このガス流路56には、ガス供給管を介してバックサイドガス供給部から、Heガスといったバックサイドガスが供給される。バックサイドガスは、ガス流路56を介して基板Wと静電チャック38との間に供給される。これにより、基板Wと静電チャック38と

10

【0037】

サセプタ12及び静電チャック38には、当該サセプタ12及び静電チャック38を貫通する複数の貫通孔が形成されている。これら、複数の貫通孔には、複数本(例えば、3本)のリフトピン58が挿入されている。なお、図2においては、各々に一本のリフトピンが挿入された二つの貫通孔60及び貫通孔62が描かれている。リフトピン58は、例えば、樹脂又はセラミックス等の絶縁体から構成されている。これらリフトピン58は、リング状の水平昇降板64に支持されている。水平昇降板64は、エアシリンダ又はボールねじ機構等からなるアクチエータ66の昇降駆動軸68に結合されている。リフトピン58は、その先端が静電チャック38の上方に突き出した状態で、当該リフトピン58の先端に基板Wを支持する。しかる後に、リフトピン58が下降することにより基板Wが静電チャック38上に載置される。また、基板Wのプラズマ処理後には、リフトピン58が上昇することにより、基板Wが静電チャック38から引き離される。即ち、リフトピン58は、基板Wのローディング及びアンローディングのために用いられる。

20

【0038】

処理容器10の天井には、シャワーヘッド70が設けられている。シャワーヘッド70は、サセプタ12と空間を介して設けられている。このシャワーヘッド70は、上部電極を兼ねている。シャワーヘッド70は、電極板72、及び電極支持体74を有している。電極板72は、例えば、Si、SiC、又はCから構成されている。電極板72は、処理容器10内の空間Sに接している。電極板72とサセプタ12との間の空間Sはプラズマ生成空間又は処理空間となる。電極支持体は、電極板72をその背面側(上側)から着脱可能に支持している。電極支持体74は、例えば、アルマイト処理されたアルミニウムから構成されている。電極支持体74の内部には、ガス室76が形成されている。電極支持体74及び電極板72には、ガス室76からサセプタ12側に貫通する多数のガス吐出孔78が形成されている。ガス室76の上部には、ガス導入口76aが設けられている。このガス導入口76aには、ガス供給管82を介して処理ガス供給部80が接続されている。

30

【0039】

プラズマ処理装置1は、更に主制御部84を備えている。主制御部84は、マイクロコンピュータ及び各種インタフェースを含み、外部メモリ又は内部メモリに格納されるソフトウェア(プログラム)及びレシピ情報にしたがって、プラズマ処理装置1内の各部、例えば、排気装置24、第1の高周波電源28、第2の高周波電源30、マッチングユニット32、スイッチ46、リフト機構のアクチエータ66、チラーユニット、バックサイドガス供給部、及び、処理ガス供給部80等の個々の動作及び装置全体の動作(シーケンス)を制御する。

40

【0040】

なお、この実施形態では、主制御部84が一つの制御ユニットとして示されているが、複数の制御ユニットが主制御部84の機能を並列的又は階層的に分担する形態を採っていてもよい。

【0041】

50

プラズマ処理装置 1 では、第 1 の高周波電源 2 8 及び第 2 の高周波電源 3 0 の少なくとも一方が、パルス変調された高周波、即ち変調高周波を生成し、当該変調高周波をサセプタ 1 2 に供給するようになっている。

【 0 0 4 2 】

パルス変調は、第 1 の高周波 L F 及び第 2 の高周波 H F のうち少なくとも一方の高周波を、第 1 の高周波 L F の周波数及び第 2 の高周波 H F の周波数よりも低い周波数（以下、「変調周波数」という）で交互に O N / O F F させる変調である。なお、パルス変調は、当該少なくとも一方の高周波のパワーを交互に増減させる変調であってもよい。このパルス変調の変調周波数は、プラズマ処理の目的に応じて任意に設定される。変調周波数によって規定される 1 周期は、当該少なくとも一方の高周波が O N となる期間（以下、「第 1 の期間」という）、及び、当該少なくとも一方の高周波が O F F となる期間（以下、「第 2 の期間」という）を含む。パルス変調の 1 周期において第 1 の期間が占める割合（％）、即ち、デューティーも、プラズマ処理の目的に応じて任意に設定される。

【 0 0 4 3 】

ここで、図 3 を参照して、第 1 の高周波 L F のパルス変調の有無、及び第 1 の高周波 L F のパルス変調の変調周波数が基板 W の電位に与える影響を説明する。図 3 の（ a ）には、第 1 の高周波 L F（1 0 0 0 W）及び第 2 の高周波 H F（1 5 0 0 W）が共にパルス変調されず連続的にサセプタ 1 2 に与えられたときの基板 W の電位の時間変化の測定結果が示されている。図 3 の（ b ）には、変調周波数 1 k H z 且つデューティー 5 0 % で変調された第 1 の高周波 L F（1 0 0 0 W）、即ち変調高周波がサセプタ 1 2 に与えられ、第 2 の高周波 H F（1 5 0 0 W）がパルス変調されず連続的にサセプタ 1 2 に与えられたときの基板 W の電位の時間変化の測定結果が示されている。図 3 の（ c ）には、変調周波数 0 . 5 k H z 且つデューティー 5 0 % で変調された第 1 の高周波 L F（1 0 0 0 W）、即ち変調高周波がサセプタ 1 2 に与えられ、第 2 の高周波 H F（1 5 0 0 W）がパルス変調されず連続的にサセプタ 1 2 に与えられたときの基板 W の電位の時間変化の測定結果が示されている。また、図 3 の（ d ）には、変調周波数 0 . 1 k H z 且つデューティー 5 0 % で変調された第 1 の高周波 L F（1 0 0 0 W）、即ち変調高周波がサセプタ 1 2 に与えられ、第 2 の高周波 H F（1 5 0 0 W）がパルス変調されず連続的にサセプタ 1 2 に与えられたときの基板 W の電位の時間変化の測定結果が示されている。図 3 に示す基板 W の電位の時間変化は何れも、第 1 の高周波の周波数以上の電位の時間変化を除去するためのフィルタを介して、基板 W の電位を測定して得たものである。なお、図 3 において、「G N D」は、グランド電位を示している。

【 0 0 4 4 】

図 3 の（ a ）に示すように、第 1 の高周波 L F 及び第 2 の高周波 H F の双方が連続的にサセプタ 1 2 に与えられる場合には、基板 W の電位は、略一定の負極性の電位となる。したがって、基板 W とサセプタ 1 2 との間の空間、例えば、ガス流路 5 6、貫通孔 6 0、及び貫通孔 6 2 といった空間を介した異常放電は、略一定の負極性の直流電圧をサセプタ 1 2 に与えることにより、抑制される。

【 0 0 4 5 】

一方、図 3 の（ b ）、（ c ）、及び（ d ）に示すように、パルス変調された第 1 の高周波 L F、即ち、変調高周波がサセプタ 1 2 に与えられると、基板 W の電位が周期的に変動する。特に、パルス変調の周波数が 1 k H z 未満である場合には、変調高周波に追従して基板 W の電位が大きく変動する。したがって、負極性且つ一定の直流電圧、例えば、基板 W の実効電位と同等且つ一定の直流電圧をサセプタ 1 2 に与えても、基板 W とサセプタ 1 2 との間の空間を介した異常放電が生じ得る。このような現象は、第 2 の高周波 H F がパルス変調される場合、及び、第 1 の高周波 L F 及び第 2 の高周波 H F の双方がパルス変調される場合にも、生じ得る。なお、上述したように、基板 W の電位が変調高周波に追従する現象は、パルス変調の周波数が所定の周波数の値未満である場合において顕著となる。本実施例ではパルス変調の周波数が 1 k H z 未満において当該現象が顕著となる検証結果を得た。当該現象が顕著となるパルス変調の周波数は、プラズマ処理装置の浮遊容量、即

10

20

30

40

50

ち、プラズマ処理装置において高周波が通る経路に存在する浮遊容量に依存するものであり、プラズマ処理装置によって変化し得る値である。

【 0 0 4 6 】

プラズマ処理装置 1 は、上記のように変調高周波がサセプタ 1 2 に与えられることにより基板 W の電位が変動しても、基板 W とサセプタ 1 2 との間の空間を介した異常放電を抑制するために、電圧印加部 D A を更に備えている。電圧印加部 D A は、変調高周波に同期してパルス変調された直流電圧、即ち変調直流電圧をサセプタ 1 2 に印加するよう構成されている。また、変調直流電圧の電圧値は、自己バイアスによる基板 W の電位（負極性の電位）とサセプタ 1 2 の電位（正極性の電位）との間の電位差を減少させるように設定される。プラズマ処理装置 1 では、この電圧印加部 D A も、主制御部 8 4 によって制御され得る。

10

【 0 0 4 7 】

以下、図 2 と共に図 4 を参照しつつ、プラズマ処理装置 1 におけるプラズマ処理の実行時の動作を説明し、これと共に、一実施形態に係るプラズマ処理装置のサセプタの電位を制御する方法について説明する。図 4 は、一実施形態に係るプラズマ処理装置のサセプタの電位を制御する方法を示す流れ図である。

【 0 0 4 8 】

プラズマ処理装置 1 における基板 W のプラズマ処理では、先ず、ゲートバルブ 2 6 が開かれて、隣室のロードロック・チャンバ又はトランスファ・チャンバから搬送アームによって基板 W が処理容器 1 0 内に搬入される。

20

【 0 0 4 9 】

次いで、ローディング動作が行われる。ローディング動作では、アクチエータ 6 6 が作動して、リフトピン 5 8 を上昇させる。そして、リフトピン 5 8 が、搬送アームから基板 W を受け取る。次いで、リフトピン 5 8 が降下して、基板 W が静電チャック 3 8 の上に載置される。

【 0 0 5 0 】

次いで、処理ガス供給部 8 0 から処理ガス（一般に混合ガス）が所定の流量で処理容器 1 0 内に導入される。また、排気装置 2 4 によって処理容器 1 0 内の圧力が調整される。さらに、第 1 の高周波電源 2 8 から第 1 の高周波 L F が出力され、第 2 の高周波電源 3 0 から第 2 の高周波 H F が出力され、第 1 の高周波 L F 及び第 2 の高周波 H F がマッチングユニット 3 2 及び給電棒 3 4 を介してサセプタ 1 2 に供給される。また、スイッチ 4 6 がオン状態に切り換えられることにより、基板 W が静電力で静電チャック 3 8 に保持される。そして、バックサイドガス供給部より基板 W との間に伝熱用のバックサイドガスが供給される。そして、シャワーヘッド 7 0 から空間 S に供給された処理ガスが、高周波放電により励起されることにより、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供給されるラジカルやイオンによって、基板 W に対するプラズマ処理、例えば、エッチングが行われる。

30

【 0 0 5 1 】

このプラズマ処理装置 1 においては、第 1 の高周波 L F 及び第 2 の高周波の少なくとも一方がパルス変調された高周波、即ち変調高周波としてサセプタ 1 2 に供給される（図 4 の工程 S T 1）。また、電圧印加部 D A により、変調高周波に同期してパルス変調された変調直流電圧がサセプタ 1 2 に印加される（図 4 の工程 S T 2）。この変調直流電圧は、自己バイアスによる基板 W の電位（負極性の電位）とサセプタ 1 2 の電位（正極性の電位）との間の電位差を減少させるように設定された電圧値を有する直流電圧である。したがって、基板 W とサセプタ 1 2 の間の電位差が減少し、基板 W とサセプタ 1 2 との間の空間、例えば、ガス流路 5 6、貫通孔 6 0、及び貫通孔 6 2 といった空間を介して異常放電が発生することが抑制される。故に、基板 W に異常放電によるダメージが発生することが抑制され、プラズマ処理の歩留まりが向上される。

40

【 0 0 5 2 】

以下、プラズマ処理装置 1 のマッチングユニット 3 2 及び電圧印加部 D A として用いる

50

ことができる種々のマッチングユニット及び電圧印加部について説明する。また、第1の高周波LF及び第2の高周波HFのパルス変調の種々の例、及び、変調高周波に同期した変調直流電圧の印加に関する種々の例についても説明する。

【0053】

[マッチングユニット及び電圧印加部の第1例]

【0054】

図5は、マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第1例を示す図である。図6は、変調高周波LF_{PM}のパワー、第1の高周波電源28によって出力されるパルス信号PS、基板の電位V_{DC}(0V以下)、及び電圧印加部の変調直流電圧B_{DC}のタイミングチャートを例示する図である。図5に示す第1例の回路構成は、第1の高周波LFの電圧振幅V_{PP-LF}(ピーク・ツー・ピーク)に応じて変調高周波電圧の電圧値を制御するものである。ここで、第1の高周波LFの電圧振幅V_{PP-LF}は、第1の高周波LFの電圧の最大ピーク値と最小ピーク値との差である。この第1例の回路構成は、サセプタ12における第2の高周波HFの電圧振幅が無視できるほど小さい場合に利用し得るものであり、当該回路構成では、第1の高周波LFのみがパルス変調されてもよく、第1の高周波LF及び第2の高周波HFの双方がパルス変調されてもよい。以下、第1の高周波LFのみがパルス変調される場合を例にとって、第1例の回路構成について説明する。

【0055】

第1例の回路構成は、マッチングユニット321及び電圧印加部DA1を含んでいる。マッチングユニット321は、図2のマッチングユニット32として用いられ、電圧印加部DA1は図2の電圧印加部DAとして用いられる。マッチングユニット321は、第1の整合器100、及び第2の整合器102を有している。第1の整合器100は、第1の高周波電源28から出力される第1の高周波LFを、無反射又は少ない反射で効率よく処理容器10内のプラズマ負荷に伝送するように動作する。第1の整合器100と第1の高周波電源28は、第1の高周波給電部108を形成している。第2の整合器102は、第2の高周波電源30から出力される第2の高周波HFを、無反射又は少ない反射で効率よく処理容器10内のプラズマ負荷に伝送するように動作する。第2の整合器102と第2の高周波電源30は、第2の高周波給電部110を形成している。

【0056】

第1の整合器100は、可変容量のコンデンサ112、可変容量のコンデンサ114、及び、インダクタ116を有している。コンデンサ114及びインダクタ116は、第1の高周波電源28の出力端子と負荷との間で直列に接続されている。コンデンサ112は、コンデンサ114の入力側端子と接地電位部材との間に接続されている。これらコンデンサ112、コンデンサ114、及びインダクタ116は、L型の整合回路を形成している。

【0057】

また、第1の整合器100は、オートマッチング機構を更に有している。このオートマッチング機構は、一例においては、ステップモータといったモータ212及びモータ214、並びに、マッチングコントローラ216を有している。また、第1の整合器100は、インピーダンスセンサ210を更に有している。インピーダンスセンサ210は、第1の高周波電源28が第1の高周波LFを出力しているときに、第1の高周波電源28側から見える負荷側のインピーダンス、即ち、負荷インピーダンスZ_{L-LH}を測定し、当該負荷インピーダンスZ_{L-LH}の測定値MZ_{L-LH}を出力する。負荷インピーダンスZ_{L-LH}は、処理容器10内の負荷(主にプラズマ)のインピーダンスと、第1の整合器100のL型の整合回路のインピーダンスとが合成されたインピーダンスである。

【0058】

マッチングコントローラ216は、マイクロコンピュータを有しており、インピーダンスセンサ210から出力される測定値MZ_{L-LH}が第1の高周波電源28の出力インピーダンスに相当する整合ポイント(通常50Ω)に一致するか又は近づくように、モータ212及びモータ214の回転制御を通じてコンデンサ112及びコンデンサ114のポ

10

20

30

40

50

ジション（バリコン・ステップ） PC_1 ， PC_2 を制御する。

【0059】

第2の整合器102は、一次側において、コイル118、及び可変容量のコンデンサ120を有しており、二次側において、コイル122、及び可変容量のコンデンサ124を有している。コイル118及びコンデンサ120は、第2の高周波電源30の出力端子と接地電位部材との間で直列に接続されている。コイル118は、コイル122とトランス結合されている。コンデンサ124は、コイル122と負荷との間に直列に接続されている。これらコイル118、コンデンサ120、コイル122、及びコンデンサ124は、誘導結合型の整合回路を構成している。

【0060】

また、第2の整合器102は、オートマッチング機構を更に有している。このオートマッチング機構は、一例においては、ステップモータといったモータ312及びモータ314、並びに、マッチングコントローラ316を有している。また、第2の整合器102は、インピーダンスセンサ310を更に有している。インピーダンスセンサ310は、第2の高周波電源30が第2の高周波HFを出力しているときに、第2の高周波電源30側から見える負荷側のインピーダンス、即ち、負荷インピーダンス Z_{L_HF} を測定し、当該負荷インピーダンス Z_{L_HF} の測定値 MZ_{L_HF} を出力する。負荷インピーダンス Z_{L_HF} は、処理容器10内の負荷（主にプラズマ）のインピーダンスと、第2の整合器102の誘導結合型の整合回路のインピーダンスとが合成されたインピーダンスである。

【0061】

マッチングコントローラ316は、マイクロコンピュータを有しており、インピーダンスセンサ310から出力される測定値 MZ_{L_HF} が第2の高周波電源30の出力インピーダンスに相当する整合ポイント（通常50 Ω ）に一致するか又は近づくように、モータ312及びモータ314の回転制御を通じてコンデンサ120及びコンデンサ124のポジション（バリコン・ステップ） PC_3 ， PC_4 を制御する。

【0062】

第1の高周波給電部108は、第1の整合器100と給電棒34との間に、ローパスフィルタ130を有している。ローパスフィルタ130は、L型のローパスフィルタであり、インダクタ126及びコンデンサ128を有している。インダクタ126は、第1の整合器100と給電棒34との間に接続されており、コンデンサ128は、インダクタ126の第1の整合器100側の端子と接地電位部材との間に接続されている。このローパスフィルタ130は、第1の整合器100からの第1の高周波LF及び電圧印加部DA1からの変調直流電圧 B_{DC} をサセプタ12側に通し、第2の高周波給電部110からの第2の高周波HFを遮断する。

【0063】

なお、第2の高周波給電部110内では、第2の整合器102内でトランス結合されているコイル118及びコイル122が、第1の高周波給電部108からの第1の高周波LFを遮断するようになっている。

【0064】

一実施形態では、マッチングユニット32には、一次的には保安接地用のリレースイッチ132が設けられている。このリレースイッチ132の一方の端子は、抵抗器134を介して接地電位部材に接続されており、当該リレースイッチ132の他方の端子は、高周波遮断フィルタ140を介して、第1の整合器100内の高周波伝送路（図示の例ではコンデンサ114とインダクタ116との間の接続点NA）に接続されている。高周波遮断フィルタ140は、インダクタ136及びコンデンサ138を有している。インダクタ136は、リレースイッチ132と接続点NAとの間に接続されている。コンデンサ138は、インダクタ136のリレースイッチ132側の端子と接地電位部材との間に接続されている。この高周波遮断フィルタ140は、変調直流電圧 B_{DC} を通過させ、第1の高周波LFといった他の高周波を遮断するフィルタ特性を有している。

【0065】

10

20

30

40

50

リレースイッチ 132 がオフしているときには、第 1 の整合器 100 内の接続点 NA が電氣的（特に直流的）にフローティング状態にある。したがって、サセプタ 12 もフローティング状態に置かれる。リレースイッチ 132 がオンすると、過渡的にはそれまでサセプタ 12 に蓄積されていた電荷が接続点 NA、高周波遮断フィルタ 140、リレースイッチ 132 及び抵抗器 134 を介して接地電位部材に流れるようになっていく。なお、リレースイッチ 132 がオフするタイミングは、基板がサセプタ 12 上に載置され、処理ガス供給部 80 からの処理ガスが処理容器 10 内に供給されてから、第 2 の高周波 HF が出力されるまでの間にタイミングである。また、リレースイッチ 132 がオンするタイミングは、基板を処理容器 10 から搬出するために、リフトピン 58 が上昇される前のタイミングである。このようなリレースイッチ 132 のオンとオフは、マッチングコントローラ 216 からリレースイッチ 132 に与えられる制御信号によって制御される。

10

【0066】

第 1 例では、第 1 の高周波電源 28 は、パルス変調された第 1 の高周波、即ち、変調高周波 $L F_{PM}$ を出力する（図 6 参照）。パルス変調の 1 周期は、図 6 に示すように、第 1 の期間 T1 と当該第 1 の期間に続く第 2 の期間 T2 とに分割される。図 6 の変調高周波 $L F_{PM}$ のタイミングチャートに示すように、第 1 の期間 T1 では、第 1 の高周波 LF がサセプタ 12 に供給され（図 6 では「ON」）、第 2 の期間 T2 では第 1 の高周波 LF のサセプタ 12 への供給が停止される（図 6 では「OFF」）。なお、第 1 の期間 T1 では、第 1 のパワーの第 1 の高周波 LF がサセプタ 12 に供給され、第 2 の期間 T2 では、第 1 のパワーよりも低い第 2 のパワーの第 1 の高周波 LF がサセプタ 12 に供給されてもよい。

20

【0067】

変調高周波 $L F_{PM}$ がサセプタ 12 に与えられると、図 6 に示すように、基板 W の電位 V_{DC} は、変調高周波 $L F_{PM}$ に同期して時間変動する。即ち、基板 W の電位 V_{DC} は、第 1 の期間 T1 では負極性の電位となり、第 2 の期間では略 0 (V) の電位となる。このような基板 W の電位とサセプタ 12 の電位との差を低減させるために、図 5 に示すように、電圧印加部 DA1 がリレースイッチ 132 と並列に設けられている。この電圧印加部 DA1 は、変調直流電圧 B_{DC} を出力する。

30

【0068】

具体的に、電圧印加部 DA1 は、リレースイッチ 132 と並列に、抵抗器 142 を介して高周波遮断フィルタ 140 に接続されており、当該高周波遮断フィルタ 140 を介して、接続点 NA に接続されている。抵抗器 142 は、前段の高周波遮断フィルタ 140 から漏れて来ることもある第 1 の高周波 LF といったその他の高周波を確実に遮断する次段の高周波遮断フィルタを構成している。

【0069】

電圧印加部 DA1 は、直流電源 104、スイッチング素子 SW1、及び、時定数調整回路 TC1 を含んでいる。直流電源 104 は、負極性の直流電圧を発生する可変直流電源であり、出力する直流電圧の電圧値を調整可能である。この直流電源 104 は、抵抗器 142 に接続されている。スイッチング素子 SW1 は、第 1 の端子、第 2 の端子、及び制御端子を有している。スイッチング素子 SW1 は、その制御端子に入力される電気信号により第 1 の端子と第 2 の端子の間の導通状態を切り換える素子である。スイッチング素子 SW1 には、例えば、電界効果トランジスタを用いることができる。電界効果トランジスタによれば、メカニカルなスイッチよりも、スイッチング素子 SW の寿命を長くすることが可能となる。このスイッチング素子 SW1 の第 1 の端子は、抵抗器 142 と直流電源 104 との間のノード NA1 に、時定数調整回路 TC1 を介して接続されている。スイッチング素子 SW1 の第 2 の端子は、接地電位部材に接続されている。スイッチング素子 SW1 の制御端子には、第 1 の高周波電源 28 から、パルス信号 PS が与えられるようになっている。

40

50

【 0 0 7 0 】

第1の期間T1において第1の信号レベルLV1のパルス信号PSがスイッチング素子SW1の制御端子に与えられると、スイッチング素子SW1の第1の端子と第2の端子との間の導通が切断される。したがって、直流電源104の直流電圧がサセプタ12に印加される。即ち、図6に示すように、第1の期間T1における変調直流電圧 B_{DC} の電圧値は、負極性の $B_{DC}(T1)$ となる。一方、第2の期間T2において第2の信号レベルLV2のパルス信号PSがスイッチング素子SW1の制御端子に与えられると、スイッチング素子SW1の第1の端子と第2の端子が導通する。これにより、直流電源104の直流電圧のサセプタ12に対する印加が停止される。即ち、図6に示すように、第2の期間T2における変調直流電圧 B_{DC} の電圧値は、例えば略0(V)の $B_{DC}(T2)$ となる。

10

【 0 0 7 1 】

図6に示したように、基板Wの電位 V_{DC} は、変調高周波 LF_{PM} に同期しているものの、その立ち下がり及び立ち上がりには遅れが生じる。この遅れに対応するために、変調直流電圧 B_{DC} の立ち下がり及び立ち上がりは、時定数調整回路TC1によって調整される。なお、時定数調整回路TC1は、例えば、ノードNA1とスイッチング素子SW1との間に接続された抵抗素子であり得る。

【 0 0 7 2 】

この第1例の回路構成では、基板Wの電位 V_{DC} が第1の高周波LFの電圧振幅 V_{PP} と比例関係にあることを利用して、変調直流電圧 B_{DC} の電圧値が第1の高周波LF(本例では、変調高周波 LF_{PM})の電圧振幅 V_{PP_LF} に応じて制御される。このため、第1の高周波給電部108の高周波伝送路上には、第1の高周波LFの電圧振幅 V_{PP_LF} を測定するための振幅測定部146が設けられている。一実施形態において、当該高周波伝送路上には、第1の高周波LFの進行波パワー P_{f_LF} 及び反射波パワー P_{r_LF} を測定するためのRFパワーモニタ148が更に設けられていてもよい。なお、RFパワーモニタ148は、例えば、方向性結合器を含み得る。

20

【 0 0 7 3 】

振幅測定部146は、上記高周波伝送路上での電圧振幅 V_{PP_LF} の測定値 MV_{PP_LF} を電圧制御部144に出力する。電圧制御部144は、主制御部84の一部を構成し得る。電圧制御部144は、パルス信号PSを受け、パルス信号PSが第1の信号レベルLV1を有するときに、第1の期間T1における測定値 MV_{PP_LF} 、即ち、測定値 $MV_{PP_LF}(T1)$ から、変調直流電圧 B_{DC} の電圧値 $B_{DC}(T1)$ を求める。例えば、電圧制御部144は、下式(1)により、負値の電圧値 $B_{DC}(T1)$ を求める。ここで、K1は正の係数である。

30

$$B_{DC}(T1) = -K1 \times MV_{PP_LF}(T1) \quad \dots (1)$$

【 0 0 7 4 】

電圧制御部144は、第1の期間T1において直流電源104が出力する直流電圧の電圧値が、 $B_{DC}(T1)$ になるよう、直流電源104を制御する。したがって、第1の期間T1では、電圧振幅 V_{PP_LF} が大きいほど、変調直流電圧 B_{DC} の電圧値の絶対値は大きくなる。

【 0 0 7 5 】

ところで、プラズマ処理の開始時やプラズマ処理の最中にプラズマの負荷が変動すると、基板Wの電位 V_{DC} と電圧振幅 V_{PP_LF} との間で比例関係が崩れ、電位 V_{DC} の絶対値が $K \times V_{PP_LF}$ よりも小さくなることがある。この場合には、プラズマ負荷にRFパワーが十分に吸収されず、反射波パワー P_{r_LF} が増大する。

40

【 0 0 7 6 】

このようなプラズマ負荷の変動に対処するために、電圧制御部144は、測定値 $MV_{PP_LF}(T1)$ 、及び、第1の期間T1におけるRFパワーモニタ148の反射波パワーの測定値 MP_{r_LF} 、即ち $MP_{r_LF}(T1)$ を利用して、電圧値 $B_{DC}(T1)$ を求めることができる。具体的に、電圧制御部144は、下式(2)又は下式(3)により、電圧値 $B_{DC}(T1)$ を求めてもよい。なお、J1及びD1は正の係数である。

50

$$B_{DC}(T1) = - (K1 \times MV_{PP_LF}(T1) - J1 \times MP_{r_LF}(T1)) \dots (2)$$

$$B_{DC}(T1) = - (K1 - D1 \times MP_{r_LF}(T1)) \times MV_{PP_LF}(T1) \dots (3)$$

【0077】

さらに、電圧制御部144は、プラズマ負荷変動に対する変調直流電圧 B_{DC} の電圧値の可変制御の安定性及び精度を一層高めるために、測定値 $MV_{PP_LF}(T1)$ 及び測定値 $MP_{r_LF}(T1)$ に加えて、第1の期間 $T1$ におけるRFパワーモニタ148の進行波パワー P_{f_LF} の測定値 $MP_{f_LF}(T1)$ を用いて、電圧値 $B_{DC}(T1)$ を求めてもよい。例えば、電圧制御部144は下式(4)により、電圧値 $B_{DC}(T1)$ を求めてもよい。なお、 $E1$ は正の係数である。

$$B_{DC}(T1) = -K1 * MV_{PP_LF}(T1) * E1 * (MP_{f_LF}(T1) - MP_{r_LF}(T1)) / MP_{f_LF}(T1) \dots (4)$$

【0078】

[マッチングユニット及び電圧印加部の第2例]

【0079】

図7は、マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第2例を示す図である。第2例の回路構成は、サセプタ12における第2の高周波HFの電圧振幅が無視できない場合に利用される第1例の変形例に係る回路構成である。以下、第2例の回路構成について、第1例の回路構成と異なる点について、説明する。

【0080】

図7に示すように、第2例の回路構成のマッチングユニット322は、振幅測定部146に代えて、振幅測定部202が設けられている点で、マッチングユニット321とは異なっている。振幅測定部202は、ローパスフィルタ130と給電棒34との間において高周波伝送路上に設けられている。振幅測定部202は、例えば、スーパーヘテロダイン方式のフィルタ回路を用いて第1の高周波LFの電圧振幅 V_{PP_LF} 及び第2の高周波HFの電圧振幅 V_{PP_HF} を弁別して測定する。振幅測定部202は、電圧振幅 V_{PP_LF} の測定値 MV_{PP_LF} 及び電圧振幅 V_{PP_HF} の測定値 MV_{PP_HF} を電圧制御部144に与える。

【0081】

電圧制御部144は、パルス信号PSが第1の信号レベルLV1を有するときに、測定値 $MV_{PP_LF}(T1)$ 、及び、第1の期間 $T1$ における測定値 MV_{PP_HF} 、即ち、 $MV_{PP_HF}(T1)$ から、第1の期間 $T1$ における変調直流電圧 B_{DC} の電圧値 $B_{DC}(T1)$ を、下式(5)により求める。なお、 $K2$ は正の係数である。

$$B_{DC}(T1) = -K1 \times MV_{PP_LF}(T1) - K2 \times MV_{PP_HF}(T1) \dots (5)$$

【0082】

一実施形態では、第2例の回路構成には、RFパワーモニタ348が更に設けられ得る。RFパワーモニタ348は、第2の高周波HFの進行波パワー P_{f_HF} 及び反射波パワー P_{r_HF} を測定する。このRFパワーモニタ348は、進行波パワー P_{f_HF} の測定値 MP_{f_HF} 及び反射波パワー P_{r_HF} の測定値 MP_{r_HF} を電圧制御部144に与える。この実施形態では、電圧制御部144は、パルス信号PSが第1の信号レベルLV1を有するときに、第1の期間 $T1$ における変調直流電圧 B_{DC} の電圧値 $B_{DC}(T1)$ を、下式(6)~(8)の何れかにより求める。なお、 $J2$ 、 $D2$ 、 $E2$ は、正の係数である。また、 $MP_{f_HF}(T1)$ は、第1の期間 $T1$ における測定値 MP_{f_HF} であり、 $MP_{r_HF}(T1)$ は、第1の期間 $T1$ における測定値 MP_{r_HF} である。

$$B_{DC}(T1) = - (K1 \times MV_{PP_LF}(T1) - J1 \times MP_{r_LF}(T1)) - (K2 \times MV_{PP_HF}(T1) - J2 \times MP_{r_HF}(T1)) \dots (6)$$

$$B_{DC}(T1) = - (K1 - D1 \times MP_{r_LF}(T1)) \times MV_{PP_LF}(T1) -$$

10

20

30

40

50

$$\begin{aligned}
 & (K 2 - D 2 \times M P _ r _ H F (T 1)) \times M V _ P P _ H F (T 1) \quad \dots (7) \\
 B _ D C (T 1) = & - K 1 * M V _ P P _ L F (T 1) * E 1 * (M P _ f _ L F (T 1) - M \\
 P _ r _ L F (T 1)) / & M P _ f _ L F (T 1) - K 2 * M V _ P P _ H F (T 1) * E 2 * \\
 (M P _ f _ H F (T 1) - & M P _ r _ H F (T 1)) / M P _ f _ H F (T 1) \quad \dots (8)
 \end{aligned}$$

【 0 0 8 3 】

[マッチングユニット及び電圧印加部の第 3 例]

【 0 0 8 4 】

図 8 は、マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第 3 例を示す図である。図 9 は、変調高周波、パルス信号、基板の電位、及び電圧印加部の変調直流電圧のタイミングチャートを例示する図である。第 3 例の回路構成は、第 2 例の回路構成のマッチングユニットと同じマッチングユニット 3 2 2 を含んでいる。

10

【 0 0 8 5 】

この第 3 の回路構成では、第 1 の高周波 L F は、パルス変調されず連続的にサセプタ 1 2 に与えられ、第 2 の高周波 H F のみがパルス変調される。即ち、第 2 の高周波電源 3 0 は、パルス変調された第 2 の高周波 H F、即ち、変調高周波 L H P M を出力する (図 9 参照)。第 1 の期間 T 1 では、第 2 の高周波 H F がサセプタ 1 2 に供給され (図 9 では「 O N 」)、第 2 の期間 T 2 では第 2 の高周波 H F のサセプタ 1 2 への供給が停止される (図 9 では「 O F F 」)。なお、第 1 の期間 T 1 では、第 1 のパワーの第 2 の高周波 H F がサセプタ 1 2 に供給され、第 2 の期間 T 2 では、第 1 のパワーよりも低い第 2 のパワーの第 2 の高周波 H F がサセプタ 1 2 に供給されてもよい。この第 2 の高周波電源 3 0 は、変調高周波 H F P M に同期したパルス信号 P S を出力する。

20

【 0 0 8 6 】

変調高周波 H F P M がサセプタ 1 2 に与えられると、図 9 に示すように、基板 W の電位 V D C は、変調高周波 H F P M に同期して時間変動する。具体的に、基板 W の電位 V D C は、第 1 の期間 T 1 では負極性の電位 V 1 D C となり、第 2 の期間では負極性の電位 V 2 D C となる。電位 V 2 D C の絶対値は、電位 V 1 D C の絶対値より大きくなる。このような基板 W の電位とサセプタ 1 2 の電位との差を低減させるために、図 8 に示すように、第 3 の回路構成では、電圧印加部 D A 3 がリレースイッチ 1 3 2 と並列に設けられている。この電圧印加部 D A 3 は、図 2 のプラズマ処理装置 1 の電圧印加部 D A として用いられるものであり、変調直流電圧 B D C を出力する。

30

【 0 0 8 7 】

電圧印加部 D A 3 は、直流電源 1 0 4、直流電源 1 0 5、スイッチング素子 S W 1、スイッチング素子 S W 2、時定数調整回路 T C 1、及び、時定数調整回路 T C 2 を含んでいる。直流電源 1 0 4 は、負極性の直流電圧を発生する可変直流電源であり、出力する直流電圧の電圧値を調整可能である。直流電源 1 0 4 は、第 1 の期間 T 1 にサセプタ 1 2 に与える直流電圧 (電圧値 B D C (T 1)) を出力する。直流電源 1 0 5 は、負極性の直流電圧を発生する可変直流電源であり、出力する直流電圧の電圧値を調整可能である。直流電源 1 0 5 は、第 2 の期間 T 2 にサセプタ 1 2 に与える直流電圧 (電圧値 B D C (T 2)) を出力する。直流電源 1 0 4 及び直流電源 1 0 5 は、抵抗器 1 4 2 に対して並列に接続されている。

40

【 0 0 8 8 】

スイッチング素子 S W 2 は、スイッチング素子 S W 1 と同様に、第 1 の端子、第 2 の端子、及び制御端子を有している。スイッチング素子 S W 2 は、その制御端子に入力される電気信号により第 1 の端子と第 2 の端子の間の導通状態を切り換える素子である。スイッチング素子 S W 2 には、例えば、電界効果トランジスタを用いることができる。スイッチング素子 S W 2 の第 1 の端子は、抵抗器 1 4 2 と直流電源 1 0 5 との間のノード N A 2 に、時定数調整回路 T C 2 を介して接続されている。スイッチング素子 S W 2 の第 2 の端子は、接地電位部材に接続されている。スイッチング素子 S W 2 の制御端子には、第 2 の高周波電源 3 0 から、パルス信号 P S が与えられるようになっている。

50

【 0 0 8 9 】

第1の期間T1において第1の信号レベルLV1のパルス信号PSがスイッチング素子SW1の制御端子に与えられると、スイッチング素子SW1の第1の端子と第2の端子との間の導通が切断される。一方、第1の期間T1において第1の信号レベルLV1のパルス信号PSがスイッチング素子SW2の制御端子に与えられると、スイッチング素子SW2の第1の端子と第2の端子とが導通する。したがって、第1の期間T1においては、直流電源104の直流電圧のみがサセプタ12に印加される。これにより、図9に示すように、第1の期間T1における変調直流電圧 B_{DC} の電圧値は、負値の $B_{DC}(T1)$ となる。

【 0 0 9 0 】

第2の期間T2において第2の信号レベルLV2のパルス信号PSがスイッチング素子SW1の制御端子に与えられると、スイッチング素子SW1の第1の端子と第2の端子が導通する。一方、第2の期間T2において第2の信号レベルLV2のパルス信号PSがスイッチング素子SW2の制御端子に与えられると、スイッチング素子SW2の第1の端子と第2の端子との間の導通が切断される。したがって、第2の期間T2においては、直流電源105の直流電圧のみがサセプタ12に印加される。これにより、図9に示すように、第2の期間T2における変調直流電圧 B_{DC} の電圧値は、負値の $B_{DC}(T2)$ となる。なお、 $B_{DC}(T2)$ の絶対値は、 $B_{DC}(T1)$ の絶対値よりも大きい。

【 0 0 9 1 】

図9に示したように、基板Wの電位 V_{DC} は、変調高周波 HF_{PM} に同期しているものの、その立ち下がり及び立ち上がりには遅れが生じる。この遅れに対応するために、変調直流電圧 B_{DC} の立ち下がり及び立ち上がりは、時定数調整回路TC1及び時定数調整回路TC2によって調整される。なお、時定数調整回路TC2は、例えば、ノードNA2とスイッチング素子SW2との間に接続された抵抗素子であってもよい。

【 0 0 9 2 】

この第3例の回路構成では、変調直流電圧 B_{DC} の電圧値が、第1の高周波LFの電圧振幅 V_{PP_LF} 及び第2の高周波HF(本例では変調高周波 HF_{PM})の電圧振幅 V_{PP_HF} に応じて制御される。このため、第3例の回路構成では、振幅測定部202から、電圧振幅 V_{PP_LF} の測定値 MV_{PP_LF} 及び電圧振幅 V_{PP_HF} の測定値 MV_{PP_HF} が電圧制御部144に与えられる。

【 0 0 9 3 】

電圧制御部144は、パルス信号PSを受け、パルス信号PSが第1の信号レベルLV1を有するときに、即ち、第1の期間T1において、(5)式に従い、 $B_{DC}(T1)$ を求める。電圧制御部144は、第1の期間T1において直流電源104が出力する直流電圧の電圧値が $B_{DC}(T1)$ になるよう、直流電源104を制御する。

【 0 0 9 4 】

また、電圧制御部144は、パルス信号PSを受け、パルス信号PSが第2の信号レベルLV2を有するときに、第2の期間T2における測定値 MV_{PP_LF} 及び測定値 MV_{PP_HF} 、即ち、測定値 $MV_{PP_LF}(T2)$ 及び測定値 $MV_{PP_HF}(T2)$ から、下式(9)により、変調直流電圧 B_{DC} の電圧値 $B_{DC}(T2)$ を求める。電圧制御部144は、第2の期間T2において直流電源105が出力する直流電圧の電圧値が $B_{DC}(T2)$ になるよう、直流電源105を制御する。

$$B_{DC}(T2) = -K1 \times MV_{PP_LF}(T2) - K2 \times MV_{PP_HF}(T2) \quad \dots (9)$$

【 0 0 9 5 】

なお、電圧制御部144は、電圧値 $B_{DC}(T1)$ を、式(6)~(8)の何れかにより、求めてもよい。また、電圧制御部144は、電圧値 $B_{DC}(T2)$ を、下式(10)~(12)の何れかにより求めてもよい。なお、 $MP_{f_HF}(T2)$ は第2の期間T2における測定値 MP_{f_HF} であり、 $MP_{r_LF}(T2)$ は第2の期間T2における測定値 MP_{r_LF} である。

10

20

30

40

50

$$\begin{aligned}
B_{DC}(T2) &= - (K1 \times MV_{PP_LF}(T2) - J1 \times MP_{r_LF}(T2)) - \\
& (K2 \times MV_{PP_HF}(T2) - J2 \times MP_{r_HF}(T2)) \quad \dots (10) \\
B_{DC}(T2) &= - (K1 - D1 \times MP_{r_LF}(T2)) \times MV_{PP_LF}(T2) - \\
& (K2 - D2 \times MP_{r_HF}(T2)) \times MV_{PP_HF}(T2) \quad \dots (11) \\
B_{DC}(T2) &= - K1 * MV_{PP_LF}(T2) * E1 * (MP_{f_LF}(T2) - MP_{r_LF}(T2)) / MP_{f_LF}(T2) - \\
& K2 * MV_{PP_HF}(T2) * E2 * (MP_{f_HF}(T2) - MP_{r_HF}(T2)) / MP_{f_HF}(T2) \quad \dots (12)
\end{aligned}$$

【0096】

[マッチングユニット及び電圧印加部の第4例]

10

【0097】

上述した第1例～第3例では、電圧振幅に基づき変調直流電圧 B_{DC} の電圧値が求められていたが、変調直流電圧 B_{DC} の電圧値としては、データテーブルに予め登録されている電圧値を用いることができる。データテーブルにおける電圧値は、放電を抑制し得る変調直流電圧の電圧値として予備実験等により求められる。このようなデータテーブルは、電圧制御部144が参照し得る任意の記憶装置に記憶され得る。

【0098】

図10は、データテーブルの一例を示す図である。図10に示すデータテーブルDTには、パルス変調の変調周波数、第1の高周波LFのパワー、第2の高周波HFのパワーに対応付けたレコードとして変調直流電圧 B_{DC} の電圧値を記録されている。図10において、 $P_{LF}(p)$ は第1の高周波LFのパワーであり、 $P_{HF}(q)$ は第2の高周波HFのパワーである。p、qはインデックスである。また、図10において、 $B_{DC}(r, p, q)$ は、変調直流電圧 B_{DC} の電圧値である。rは、インデックスであり、変調周波数に対応したインデックスである。

20

【0099】

図10に示すデータテーブルDTに登録されている電圧値 $B_{DC}(r, p, q)$ は、電圧値 $B_{DC}(T1)$ として用いることができる。電圧制御部144は、実際に利用されているパルス変調の変調周波数、第1の高周波LFのパワー、及び第2の高周波HFのパワーによって、データテーブルDTにおけるレコードを特定し、特定されたレコードを、電圧値 $B_{DC}(T1)$ として用いることができる。なお、電圧値 $B_{DC}(T2)$ が必要とされる場合には、データテーブルDTに加えて、予備実験等により作成された電圧値 $B_{DC}(T2)$ 用の別個のデータテーブルを利用することができる。

30

【0100】

[マッチングユニット及び電圧印加部の第5例]

【0101】

第5例は、基板Wの電位の測定値から変調直流電圧の電圧値を求めるものである。この第5例では、プラズマ処理装置1は、図11に示すように変形される。図11は、別の実施形態に係るプラズマ処理装置を示す図である。以下、プラズマ処理装置1と図11に示すプラズマ処理装置1Aとの相違点を説明する。なお、以下の説明では、図11と共に図12も参照する。図12は、マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第5例を示す図である。

40

【0102】

プラズマ処理装置1Aでは、誘電体135とサセプタ12の周辺領域との間に電極板170が設けられている。電極板170は、例えば、セラミックから構成された絶縁体172によってサセプタ12から電氣的に絶縁されている。この電極板170には、棒状の導体174及びコンデンサ176を介して、接地電位部材に接続されている。導体174は、サセプタ12に形成された貫通孔に通されており、当該サセプタ12からは絶縁されている。

【0103】

基板W及びフォーカスリング36の表面に自己バイアスが発生しているとき、即ち、処

50

理容器 10 内でプラズマが生成されているときには、基板 W 及びフォーカスリング 36 の表面が自己バイアスに等しい負の電位 V_{DC} になる。一般にフォーカスリング 36 は、Si のように単一物質からなる物体であるので、フォーカスリング 36 全体が電極板を構成する。即ち、誘電体 135 がそれらの間に介在するフォーカスリング 36 と電極板 170 は、コンデンサ 180 を形成する。これにより、フォーカスリング 36 の表面の電位が直列接続されているコンデンサ 180 及びコンデンサ 176 によって分圧され、コンデンサ 180 とコンデンサ 176 の間のノード NB にフォーカスリングの電位に比例した分圧電圧 V_{NB} (負値) が得られる。ここで、コンデンサ 180 及びコンデンサ 176 の静電容量をそれぞれ、 C_{180} 、 C_{176} とすると、ノード NB に得られる分圧電圧 V_{NB} は、次の式 (13) で表わされる。

$$V_{NB} = V_{DC} \times C_{180} / (C_{180} + C_{176}) \quad \dots (13)$$

【0104】

第 5 例における回路構成では、電圧測定回路 182 がノード NB に接続されている。なお、この第 5 例におけるマッチングユニット 325 の構成は、第 1 例のマッチングユニット 320 から振幅測定部 146 及び RF パワーモニタ 148 が省略された構成である。

【0105】

電圧測定回路 182 は、ノード NB の分圧電圧 V_{NB} を測定し、式 (13) の関係から分圧電圧 V_{NB} に基づき、電位 V_{DC} の測定値 MV_{DC} 、即ち、自己バイアス電位の測定値 MV_{DC} を算出する。電圧制御部 144 は、測定値 MV_{DC} に等しい電圧値 B_{DC} ($T1$) の直流電圧が第 1 の期間 $T1$ においてサセプタ 12 に印加されるよう、電圧印加部 DA1 の直流電源 104 を制御する。なお、この第 5 例では、パルス変調された第 1 の高周波 LF、即ち変調高周波 LF_{PM} がサセプタ 12 に供給される。第 2 の高周波 HF は連続的にサセプタ 12 に与えられてもよく、或いは、第 1 の高周波 LF のパルス変調に同期してパルス変調されて、サセプタ 12 に供給されてもよい。したがって、この第 5 例では、電圧印加部 DA1 が第 2 の期間 $T2$ において出力する直流電圧の電圧値 B_{DC} ($T2$) は、略 0 V に等しい値に設定され得る。

【0106】

[マッチングユニット及び電圧印加部の第 6 例]

【0107】

図 13 は、マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第 6 例を示す図である。第 6 例は、第 5 例と同様に、基板 W の電位の測定値から変調直流電圧の電圧値を求めるものである。第 6 例では、パルス変調された第 2 の高周波 HF、即ち、変調高周波 HF_{PM} がサセプタ 12 に供給される。第 6 例の回路構成におけるマッチングユニット 326 の構成は、図 8 に示したマッチングユニット 322 から振幅測定部 202、RF パワーモニタ 148、及び RF パワーモニタ 348 を省略した構成である。

【0108】

第 6 例では、電圧制御部 144 は、第 1 の期間 $T1$ における電位 V_{DC} の測定値 MV_{DC} ($T1$) に等しい電圧値 B_{DC} ($T1$) の直流電圧が、第 1 の期間 $T1$ においてサセプタ 12 に印加されるよう、電圧印加部 DA3 の直流電源 104 を制御する。また、電圧制御部 144 は、第 2 の期間 $T2$ における電位 V_{DC} の測定値 MV_{DC} ($T2$) に等しい電圧値 B_{DC} ($T2$) の直流電圧が、第 2 の期間 $T2$ においてサセプタ 12 に印加されるよう、電圧印加部 DA3 の直流電源 105 を制御する。

【0109】

[マッチングユニット及び電圧印加部の第 7 例]

【0110】

図 14 は、マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第 7 例を示す図である。第 7 例では、コンデンサ 112 のポジション (バリコン・ステップ) PC_1 及びコンデンサ 114 のポジション (バリコン・ステップ) PC_2 から特定される第 1 の高周波 LF に対するプラズマインピーダンス Z_{PL} に基づいて、第 1 の高周波 LF の電圧振幅 V_{PP_LF} の計算値 CV_{PP_LF} が求められ、当該 CV_{PP_LF} から変調直流電圧 B_{DC} の電

10

20

30

40

50

圧値 $B_{DC}(T1)$ が求められる。この第7例では、パルス変調された第1の高周波 LF 、即ち変調高周波 LF_{PM} がサセプタ12に供給される。第2の高周波 HF は連続的にサセプタ12に与えられてもよく、或いは、第1の高周波 LF のパルス変調に同期してパルス変調されて、サセプタ12に供給されてもよい。

【0111】

第7例の回路構成に採用されているマッチングユニット327の構成は、図5に示したマッチングユニット321から振幅測定部146が省略された構成である。但し、マッチングコントローラ216には、データテーブルを記憶した記憶装置218が接続されている。

【0112】

記憶装置218に記憶されているデータテーブルには、コンデンサ112のポジション PC_1 及びコンデンサ114のポジション PC_2 に対応付けて、プラズマインピーダンス Z_{PL} が登録されている。

【0113】

マッチングコントローラ216は、第1の期間 $T1$ におけるコンデンサ112のポジション PC_1 及びコンデンサ114のポジション PC_2 に対応付けられているプラズマインピーダンスをプラズマインピーダンス $Z_{PL}(T1)$ として取得して、当該プラズマインピーダンス $Z_{PL}(T1)$ を電位演算部220に出力する。

【0114】

電位演算部220は、プラズマインピーダンス $Z_{PL}(T1)$ を用いて、下式(14)により、第1の期間 $T1$ における電圧振幅 V_{PP_LF} の計算値 $CV_{PP_LF}(T1)$ を算出する。ここで、 $R_L(T1)$ は、プラズマインピーダンス $Z_{PL}(T1)$ の実部であり、 $X_L(T1)$ は、プラズマインピーダンス $Z_{PL}(T1)$ の虚部である。

$$CV_{PP_LF}(T1) = \{ 8 \times (MP_{f_LF}(T1) - MP_{r_LF}(T1)) \times (R_L(T1) + X_L(T1)^2 / R_L(T1)) \}^{1/2} \dots (14)$$

【0115】

電圧制御部144は、計算値 $CV_{PP_LF}(T1)$ を用いて、電圧値 $B_{DC}(T1)$ を求める。電圧制御部144は、変調直流電圧 B_{DC} が第1の期間 $T1$ において電圧値 $B_{DC}(T1)$ を有するよう、電圧印加部DA1の直流電源104を制御する。なお、電圧制御部144は、式(1)~(4)の何れかにおいて、測定値 $MV_{PP_LF}(T1)$ に代えて計算値 $CV_{PP_LF}(T1)$ を用いることにより、電圧値 $B_{DC}(T1)$ を求めることができる。また、第2の期間 $T2$ における変調直流電圧 B_{DC} の電圧値 $B_{DC}(T2)$ は、略0Vの電圧値に設定され得る。

【0116】

なお、本例では、データテーブルを参照してプラズマインピーダンス Z_{PL} が求められているが、マッチングコントローラ216は、コンデンサ112の現時の静電容量及びコンデンサ114の現時の静電容量を用いて、スミスチャート上で軌跡を辿ることにより、プラズマインピーダンス Z_{PL} を割り出してもよい。

【0117】

また、マッチングコントローラ216は、第1の期間 $T1$ におけるコンデンサ112の静電容量及びコンデンサ114の静電容量から、第1の整合器100のインピーダンス $Z_{100}(T1)$ を求め、当該インピーダンス $Z_{100}(T1)$ 及び第1の期間 $T1$ における負荷インピーダンス Z_{L_LH} の測定値 $MZ_{L_LH}(T1)$ を用いて、下式(15)により、プラズマインピーダンス $Z_{PL}(T1)$ を求めてもよい。

$$Z_{PL}(T1) = MZ_{L_LH}(T1) - Z_{100}(T1) \dots (15)$$

【0118】

[マッチングユニット及び電圧印加部の第8例]

【0119】

図15は、マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第8例を示す図である。第8例では、第7例と同様に、プラズマインピーダンスから高周波の電圧振幅の計算値が求

10

20

30

40

50

められ、当該計算値から変調直流電圧 B_{DC} の電圧値が求められる。但し、第 8 例では、第 1 の高周波 LF はパルス変調されず連続的にサセプタ 1 2 に供給され、パルス変調された第 2 の高周波 HF 、即ち、変調高周波 HF_{PM} がサセプタ 1 2 に供給される。

【 0 1 2 0 】

第 8 例の回路構成に採用されているマッチングユニット 3 2 8 の構成は、図 8 に示したマッチングユニット 3 2 2 から振幅測定部 2 0 2 が省略された構成である。但し、第 7 例と同様に、マッチングコントローラ 2 1 6 には、データテーブルを記憶した記憶装置 2 1 8 が接続されている。また、マッチングコントローラ 3 1 6 には、データテーブルを記憶した記憶装置 2 1 9 が接続されている。

【 0 1 2 1 】

記憶装置 2 1 9 に記憶されているデータテーブルには、コンデンサ 1 2 0 のポジション PC_3 及びコンデンサ 1 2 4 のポジション PC_4 に対応付けて、プラズマインピーダンス Z_{PH} が登録されている。

【 0 1 2 2 】

マッチングコントローラ 2 1 6 は、第 1 の期間 T_1 におけるコンデンサ 1 1 2 のポジション PC_1 及びコンデンサ 1 1 4 のポジション PC_2 に対応付けられているプラズマインピーダンス $Z_{PL}(T_1)$ を取得して、当該プラズマインピーダンス $Z_{PL}(T_1)$ を、電位演算部 2 2 0 に出力する。また、マッチングコントローラ 2 1 6 は、第 2 の期間 T_2 におけるコンデンサ 1 1 2 のポジション PC_1 及びコンデンサ 1 1 4 のポジション PC_2 に対応付けられているプラズマインピーダンス $Z_{PL}(T_2)$ を取得して、当該プラズマインピーダンス $Z_{PL}(T_2)$ を、電位演算部 2 2 0 に出力する。

【 0 1 2 3 】

同様に、マッチングコントローラ 3 1 6 は、第 1 の期間 T_1 におけるコンデンサ 1 2 0 のポジション PC_3 及びコンデンサ 1 2 4 のポジション PC_4 に対応付けられている第 2 の高周波 HF に対するプラズマインピーダンス $Z_{PH}(T_1)$ を取得して、当該プラズマインピーダンス $Z_{PH}(T_1)$ を、電位演算部 2 2 0 に出力する。また、マッチングコントローラ 3 1 6 は、第 2 の期間 T_2 におけるコンデンサ 1 2 0 のポジション PC_3 及びコンデンサ 1 2 4 のポジション PC_4 に対応付けられているプラズマインピーダンス $Z_{PH}(T_2)$ を取得して、当該プラズマインピーダンス $Z_{PH}(T_2)$ を、電位演算部 2 2 0 に出力する。

【 0 1 2 4 】

電位演算部 2 2 0 は、プラズマインピーダンス $Z_{PL}(T_1)$ を用いて、式 (1 4) により、第 1 の期間 T_1 における電圧振幅 V_{PP_LF} の計算値 $CV_{PP_LF}(T_1)$ を算出する。また、電位演算部 2 2 0 は、プラズマインピーダンス $Z_{PH}(T_1)$ を用いて、下式 (1 6) により、第 1 の期間 T_1 における電圧振幅 V_{PP_HF} の計算値 $CV_{PP_HF}(T_1)$ を算出する。ここで、 $R_H(T_1)$ は、プラズマインピーダンス $Z_{PH}(T_1)$ の実部であり、 $X_H(T_1)$ は、プラズマインピーダンス $Z_{PH}(T_1)$ の虚部である。

$$CV_{PP_HF}(T_1) = \{ 8 \times (MP_{f_HF}(T_1) - MP_{r_HF}(T_1)) \times (R_H(T_1) + X_H(T_1)^2 / R_H(T_1)) \}^{1/2} \dots (16)$$

【 0 1 2 5 】

電圧制御部 1 4 4 は、計算値 $CV_{PP_LF}(T_1)$ 及び計算値 $CV_{PP_HF}(T_1)$ を用いて、電圧値 $B_{DC}(T_1)$ を求める。電圧制御部 1 4 4 は、変調直流電圧 B_{DC} が第 1 の期間 T_1 において電圧値 $B_{DC}(T_1)$ を有するよう、電圧印加部 DA_3 の直流電源 1 0 4 を制御する。なお、電圧制御部 1 4 4 は、式 (5) ~ (8) の何れかにおいて、測定値 $MV_{PP_LF}(T_1)$ に代えて計算値 $CV_{PP_LF}(T_1)$ を用い、測定値 $MV_{PP_HF}(T_1)$ に代えて計算値 $CV_{PP_HF}(T_1)$ を用いることにより、電圧値 $B_{DC}(T_1)$ を求めることができる。

【 0 1 2 6 】

また、電位演算部 2 2 0 は、プラズマインピーダンス $Z_{PL}(T_2)$ を用いて、下式 (

10

20

30

40

50

17)により、第2の期間T2における電圧振幅 V_{PP_LF} の計算値 $CV_{PP_LF}(T2)$ を算出する。また、電位演算部220は、プラズマインピーダンス $Z_{PH}(T2)$ を用いて、下式(18)により、第2の期間T2における電圧振幅 V_{PP_HF} の計算値 $CV_{PP_HF}(T2)$ を算出する。ここで、 $R_L(T2)$ は、プラズマインピーダンス $Z_{PL}(T2)$ の実部であり、 $X_L(T2)$ は、プラズマインピーダンス $Z_{PL}(T2)$ の虚部である。また、 $R_H(T2)$ は、プラズマインピーダンス $Z_{PH}(T2)$ の実部であり、 $X_H(T2)$ は、プラズマインピーダンス $Z_{PH}(T2)$ の虚部である。

$$CV_{PP_LF}(T2) = \{ 8 \times (MP_{f_LF}(T2) - MP_{r_LF}(T2)) \times (R_L(T2) + X_L(T2)^2 / R_L(T2)) \}^{1/2} \dots (17)$$

$$CV_{PP_HF}(T2) = \{ 8 \times (MP_{f_HF}(T2) - MP_{r_HF}(T2)) \times (R_H(T2) + X_H(T2)^2 / R_H(T2)) \}^{1/2} \dots (18)$$

10

【0127】

電圧制御部144は、計算値 $CV_{PP_LF}(T2)$ 及び計算値 $CV_{PP_HF}(T2)$ を用いて、電圧値 $B_{DC}(T2)$ を求める。電圧制御部144は、変調直流電圧 B_{DC} が第2の期間T2において電圧値 $B_{DC}(T2)$ を有するよう、電圧印加部DA3の直流電源104を制御する。なお、電圧制御部144は、式(9)~(12)の何れかにおいて、測定値 $MV_{PP_LF}(T2)$ に代えて計算値 $CV_{PP_LF}(T2)$ を用い、測定値 $MV_{PP_HF}(T2)$ に代えて計算値 $CV_{PP_HF}(T2)$ を用いることにより、電圧値 $B_{DC}(T2)$ を求めることができる。

【0128】

20

なお、本例では、データテーブルを参照してプラズマインピーダンス Z_{PL} 及びプラズマインピーダンス Z_{PH} が求められているが、マッチングコントローラ216は、コンデンサ112の現時の静電容量及びコンデンサ114の現時の静電容量を用いて、スミスチャート上で軌跡を辿ることにより、プラズマインピーダンス Z_{PL} を割り出してもよく、マッチングコントローラ316は、コンデンサ120の現時の静電容量及びコンデンサ124の現時の静電容量を用いて、スミスチャート上で軌跡を辿ることにより、プラズマインピーダンス Z_{PH} を割り出してもよい。

【0129】

また、マッチングコントローラ216は、第1の期間T1におけるコンデンサ112の静電容量及びコンデンサ114の静電容量から、第1の整合器100のインピーダンス $Z_{100}(T1)$ を求め、当該インピーダンス $Z_{100}(T1)$ 及び第1の期間T1における負荷インピーダンス Z_{L_LH} の測定値 $MZ_{L_LH}(T1)$ を用いて、プラズマインピーダンス $Z_{PL}(T1)$ を求めてもよい。また、マッチングコントローラ216は、第2の期間T2におけるコンデンサ112の静電容量及びコンデンサ114の静電容量から、第1の整合器100のインピーダンス $Z_{100}(T2)$ を求め、当該インピーダンス $Z_{100}(T2)$ 及び第2の期間T2における負荷インピーダンス Z_{L_LH} の測定値 $MZ_{L_LH}(T2)$ を用いて、プラズマインピーダンス $Z_{PL}(T2)$ を求めてもよい。また、マッチングコントローラ316は、第1の期間T1におけるコンデンサ120の静電容量及びコンデンサ124の静電容量から、第2の整合器102のインピーダンス $Z_{102}(T1)$ を求め、当該インピーダンス $Z_{102}(T1)$ 及び第1の期間T1における負荷インピーダンス Z_{L_HF} の測定値 $MZ_{L_HF}(T1)$ を用いて、プラズマインピーダンス $Z_{PH}(T1)$ を求めてもよい。さらに、マッチングコントローラ316は、第2の期間T2におけるコンデンサ120の静電容量及びコンデンサ124の静電容量から、第2の整合器102のインピーダンス $Z_{102}(T2)$ を求め、当該インピーダンス $Z_{102}(T2)$ 及び第2の期間T2における負荷インピーダンス Z_{L_HF} の測定値 $MZ_{L_HF}(T2)$ を用いて、プラズマインピーダンス $Z_{PH}(T2)$ を求めてもよい。

30

40

【0130】

[マッチングユニット及び電圧印加部の第9例]

【0131】

図16は、マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第9例を示す図である。第

50

9例は、第7例の変形例である。第9例においては、電位演算部220は、測定されたプラズマインピーダンス Z_{PL} から電圧値 $B_{DC}(T1)$ を求める。

【0132】

具体的に、第9例の回路構成におけるマッチングユニット329では、高周波伝送路上で第1の整合器100の後段にインピーダンスセンサ222が設けられている。インピーダンスセンサ222は、測定したプラズマインピーダンス Z_{PL} を電位演算部220に出力する。電位演算部220は、第1の期間 $T1$ におけるプラズマインピーダンス $Z_{PL}(T1)$ を用いて、第7例と同様に計算値 $CV_{PP_LF}(T1)$ を求めることができる。

【0133】

[マッチングユニット及び電圧印加部の第10例]

10

【0134】

図17は、マッチングユニット及び電圧印加部の回路構成の第10例を示す図である。第10例は、第8例の変形例である。第10例においては、電位演算部220は、測定されたプラズマインピーダンス Z_{PL} 、及び測定されたプラズマインピーダンス Z_{PH} から、電圧値 $B_{DC}(T1)$ 及び電圧値 $B_{DC}(T2)$ を求める。

【0135】

具体的に、第10例の回路構成におけるマッチングユニット3210では、第9例と同様に高周波伝送路上で第1の整合器100の後段にインピーダンスセンサ222が設けられている。さらに、高周波伝送路上で第2の整合器102の後段にインピーダンスセンサ223が設けられている。インピーダンスセンサ223は、測定したプラズマインピーダンス Z_{PH} を電位演算部220に出力する。

20

【0136】

電位演算部220は、第1の期間 $T1$ において測定されたプラズマインピーダンス $Z_{PL}(T1)$ 及び第1の期間 $T1$ において測定されたプラズマインピーダンス $Z_{PH}(T1)$ を用いて、第8例と同様に計算値 $CV_{PP_LF}(T1)$ 及び計算値 $CV_{PP_HF}(T1)$ を求めることができる。また、第2の期間 $T2$ において測定されたプラズマインピーダンス $Z_{PL}(T2)$ 及び第2の期間 $T2$ において測定されたプラズマインピーダンス $Z_{PH}(T2)$ を用いて、第8例と同様に計算値 $CV_{PP_LF}(T2)$ 及び計算値 $CV_{PP_HF}(T2)$ を求めることができる。

【0137】

30

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。

【0138】

例えば、上述した電圧印加部DA1及び電圧印加部DA3は、パルス変調された直流電圧を出力できない直流電源を有しているが、パルス変調された直流電圧を出力可能な直流電源であれば、電圧印加部DA1及び電圧印加部DA3のスイッチング素子は不要となる。また、第1の整合器100及び第2の整合器102の整合回路も、上述した整合回路に限定されるものではない。例えば、第1の整合器100は、インダクタス可変の二つのインダクタと固定容量のコンデンサとからなるT型の整合回路を、当該第1の整合器100の整合回路として採用することができる。

40

【符号の説明】

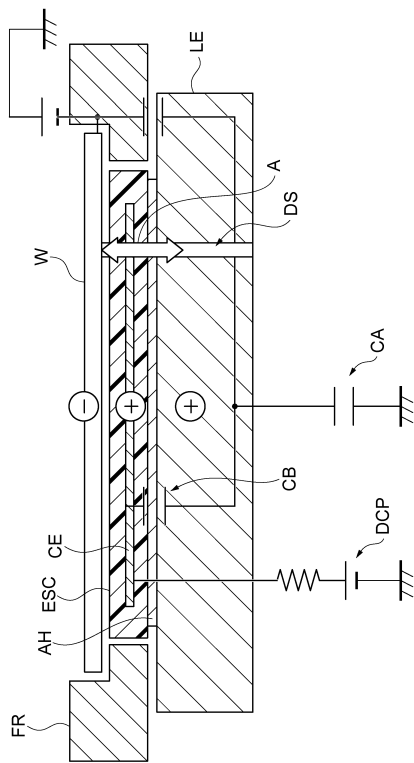
【0139】

1...プラズマ処理装置、10...処理容器、12...サセプタ、24...排気装置、28...第1の高周波電源、30...第2の高周波電源、32...マッチングユニット、34...給電棒、36...フォーカスリング、38...静電チャック、44...直流電源、70...シャワーヘッド、80...処理ガス供給部、84...主制御部、100...第1の整合器、102...第2の整合器、104...直流電源、105...直流電源、108...第1の高周波給電部、110...第2の高周波給電部、144...電圧制御部、146...振幅測定部、148...RFパワーモニタ、182...電圧測定回路、202...振幅測定部、210...インピーダンスセンサ、216...マッチングコントローラ、220...電位演算部、220...電位演算部、222...インピ

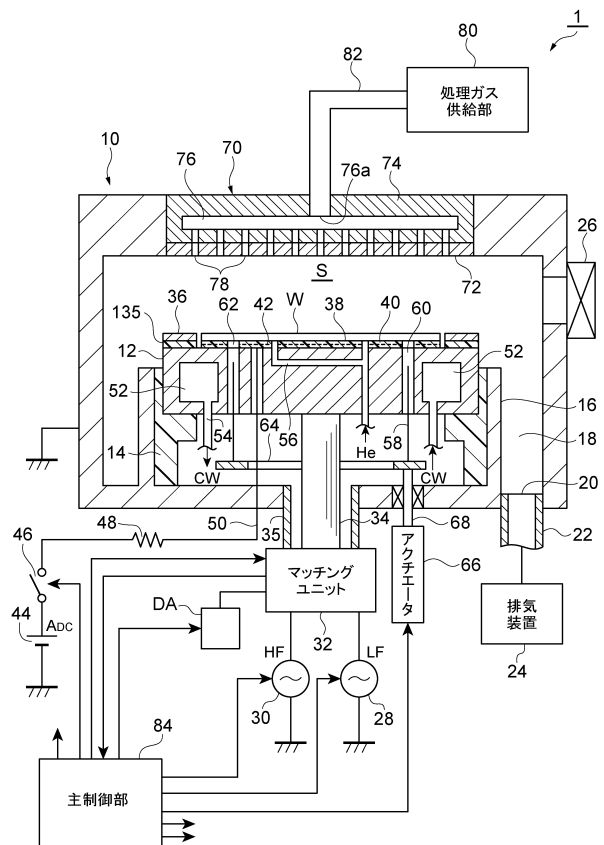
50

ーダンスセンサ、223...インピーダンスセンサ、310...インピーダンスセンサ、316...マッチングコントローラ、320, 321, 322, 325, 326, 327, 328, 329, 3210...マッチングユニット、348...RFパワーモニタ、DA...電圧印加部、SW1...スイッチング素子、SW2...スイッチング素子。

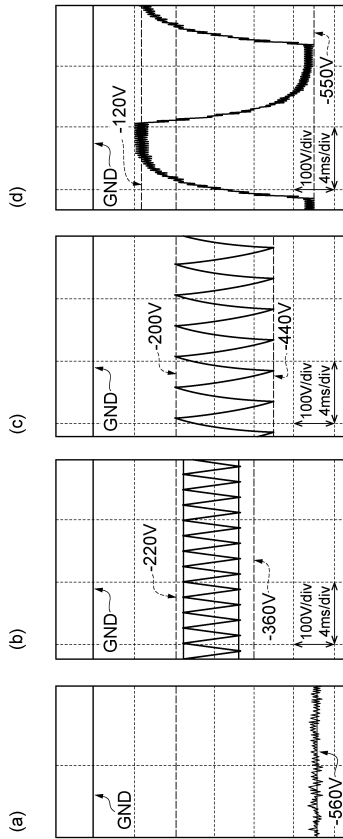
【図1】



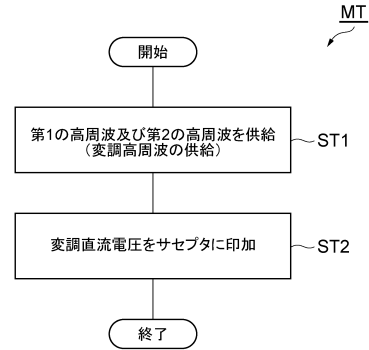
【図2】



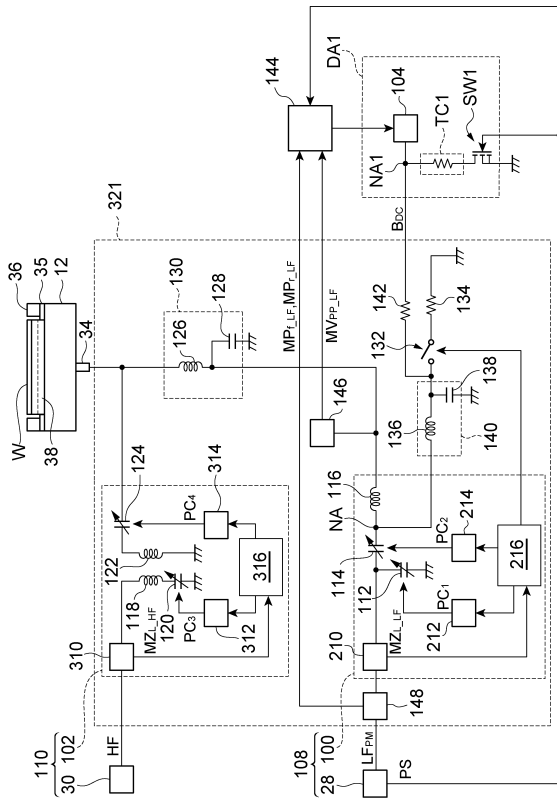
【 図 3 】



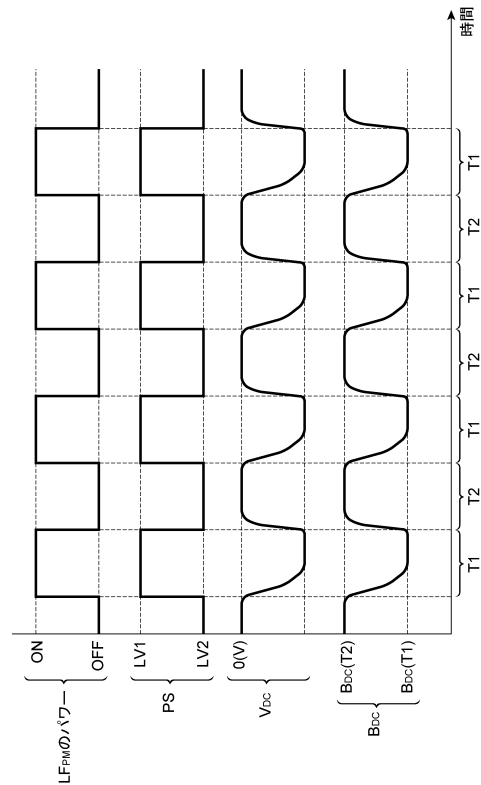
【 図 4 】



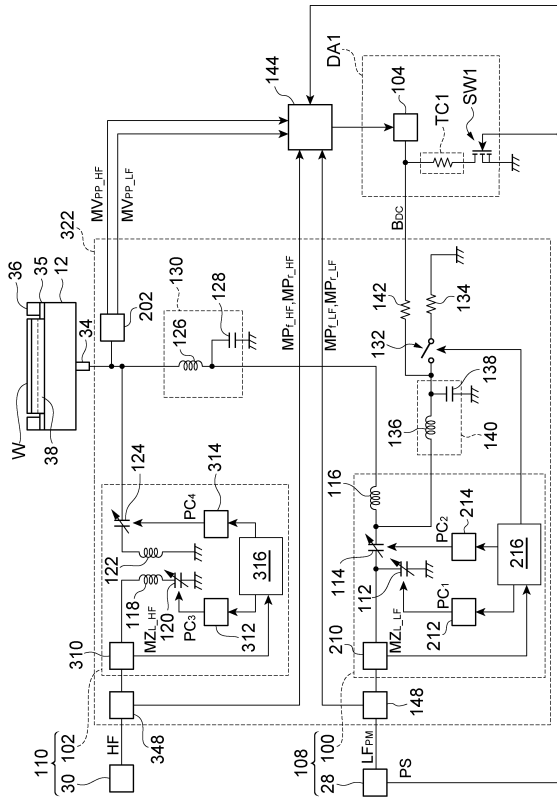
【 図 5 】



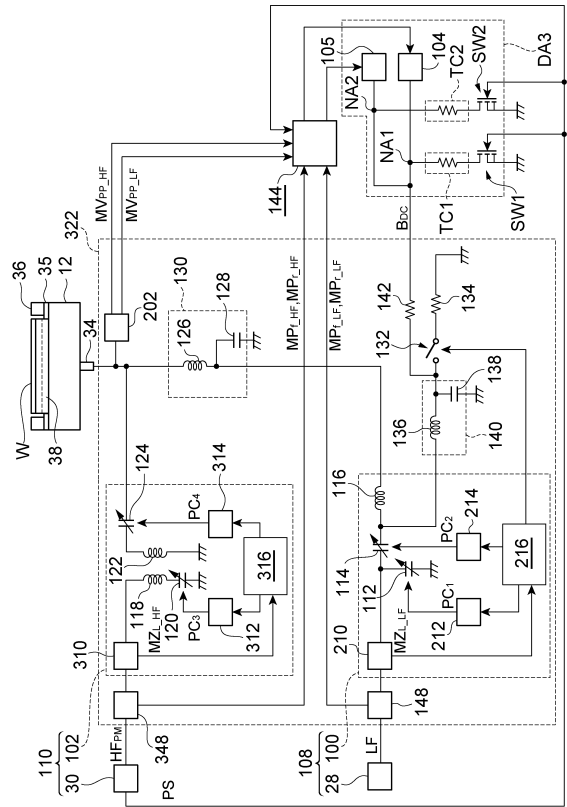
【 図 6 】



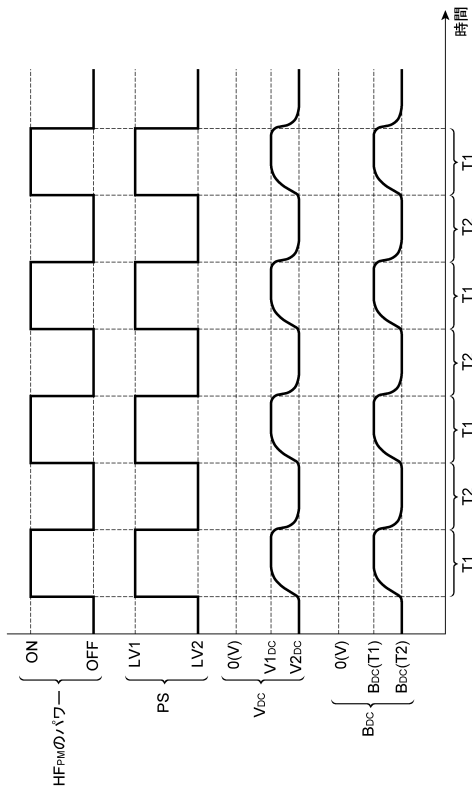
【図7】



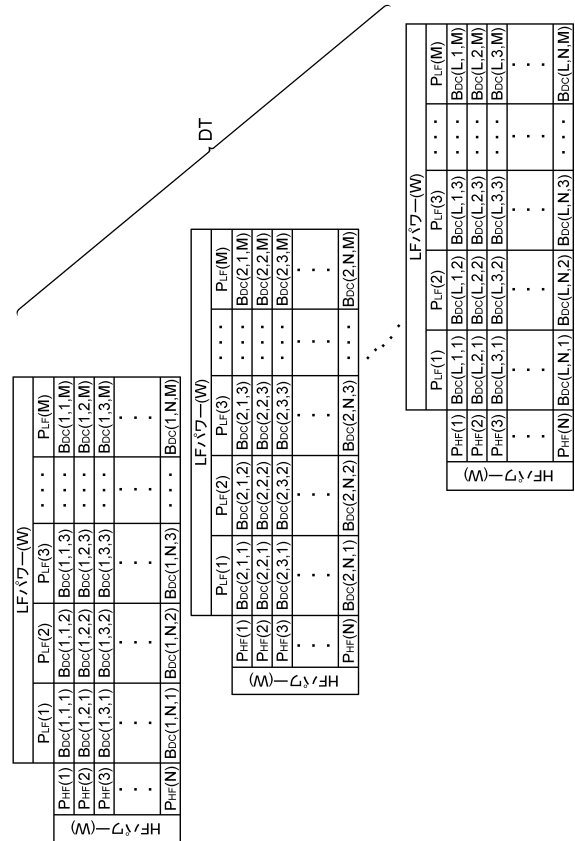
【図8】



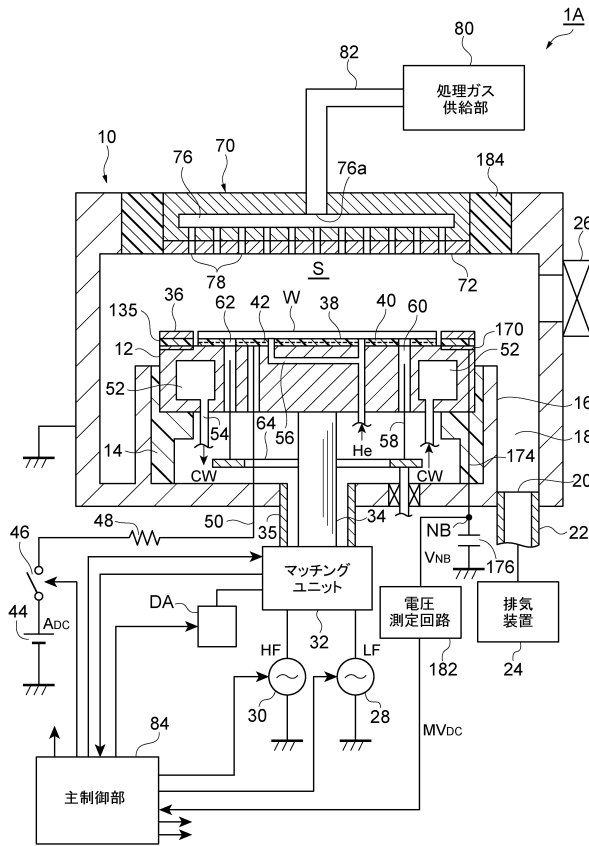
【図9】



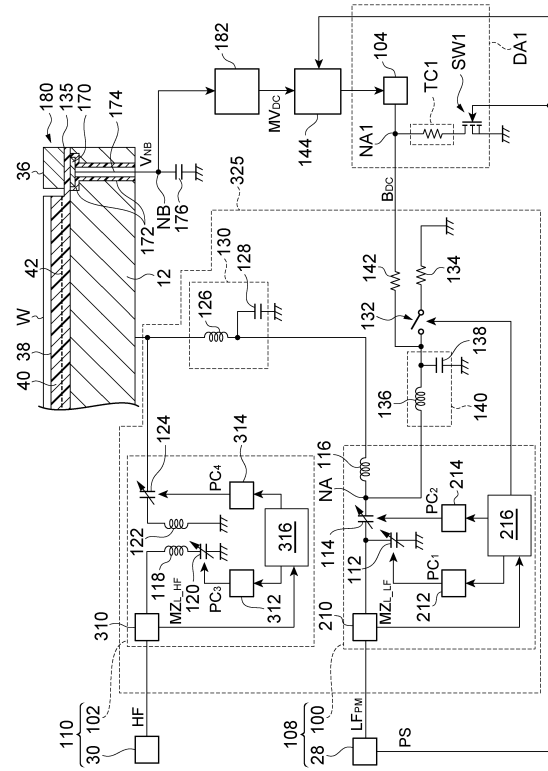
【図10】



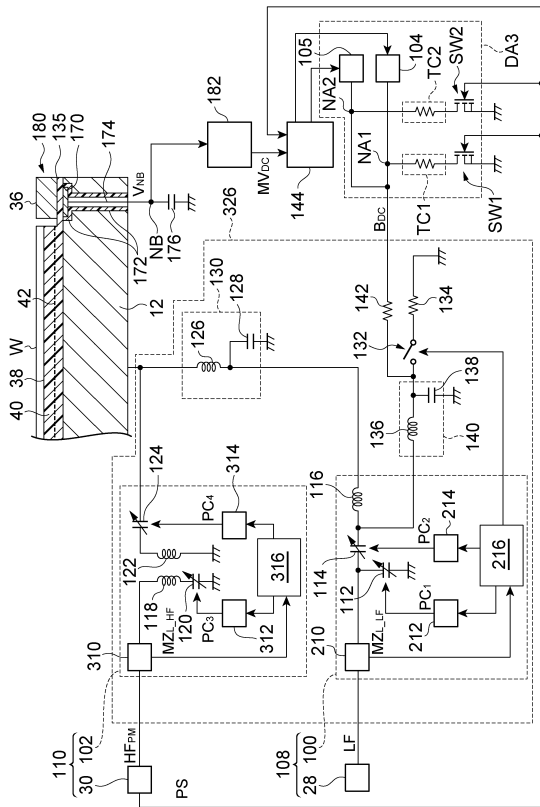
【図11】



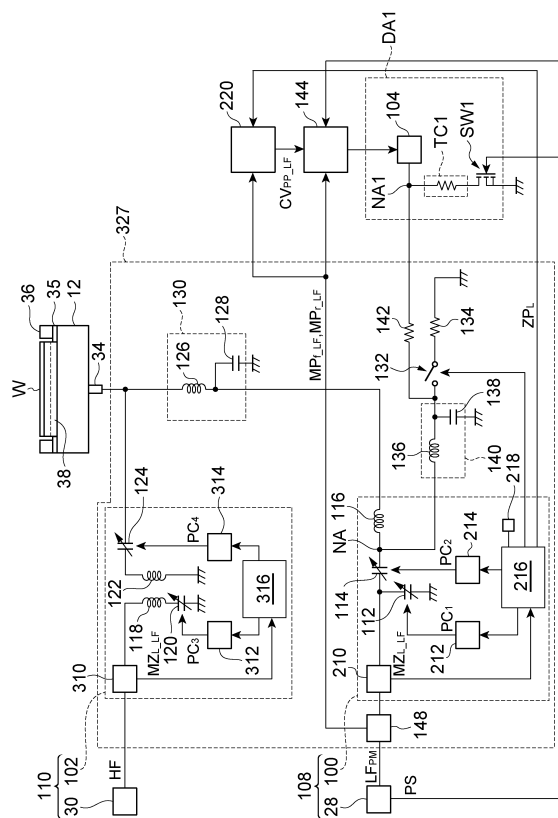
【図12】



【図13】



【図14】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2014-186994(JP,A)
特開2006-210726(JP,A)
特開2011-060984(JP,A)
特開2010-219491(JP,A)
特開2012-054534(JP,A)
特開2013-122966(JP,A)
特開2010-238960(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 21/3065
H01L 21/683
H05H 1/46