

明 細 書

発明の名称： プラズマ処理装置、電源システム、及び制御方法

技術分野

[0001] 本開示の例示的实施形態は、プラズマ処理装置、電源システム、及び制御方法に関するものである。

背景技術

[0002] プラズマ処理装置が、基板に対するプラズマ処理において用いられている。プラズマ処理装置では、チャンバ内で生成されたプラズマからイオンを基板に引き込むために、バイアス高周波電力が用いられる。下記の特許文献1は、バイアス高周波電力のパワーレベル及び周波数を変調するプラズマ処理装置を開示している。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開2009-246091号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 本開示は、高周波電力の反射を抑制する技術を提供する。

課題を解決するための手段

[0005] 一つの例示的实施形態において、プラズマ処理装置が提供される。プラズマ処理装置は、チャンバ、基板支持部、及び電源システムを含む。基板支持部は、チャンバ内に設けられている。電源システムは、高周波電源、バイアス電源、及び電源制御部を含む。高周波電源は、プラズマ処理装置のチャンバ内でプラズマを生成するために、高周波電力を供給するように構成されている。バイアス電源は、チャンバ内に設けられた基板支持部上の基板にプラズマからイオンを引き込むために、波形周期の時間間隔で繰り返して基板支持部に電気バイアスを供給するように構成されている。電源制御部は、変調周期の繰り返しにおいて高周波電力のパワーレベルを周期的に変調するよう

に構成されている。変調周期は複数の副期間を含む。複数の副期間は高周波電力のパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間を含む。少なくとも二つの副期間の各々はその開始時点から続くフィードバック期間を含む。電源制御部は、フィードバック期間に含まれる変調周期内の n 番目の位相期間のための高周波電力の周波数を、先行する変調周期の繰り返しにおける当該 n 番目の位相期間の高周波電力の周波数の変化と高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、高周波電力の反射の度合いを抑制するように、調整するよう構成されている。

発明の効果

[0006] 一つの例示的实施形態によれば、高周波電力の反射を抑制することが可能となる。

図面の簡単な説明

[0007] [図1]プラズマ処理システムの構成例を説明するための図である。

[図2]容量結合型のプラズマ処理装置の構成例を説明するための図である。

[図3]電気バイアスの波形の例を示す図である。

[図4]一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図5]一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図6]一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図7]一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図8]一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図9]一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図10]一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミン

グチャートである。

[図11]一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図12]一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図13]一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図14]一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図15]一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図16]一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図17]一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図18]図18の(a)は、一つの例示的实施形態に係る制御方法の流れ図であり、図18の(b)は、図18の(a)に示す工程STaの流れ図である。

[図19]図18の(b)に示す工程STdにおける処理の例を示す流れ図である。

[図20]図19に示す工程ST7における処理の例を示す流れ図である。

[図21]図18の(b)に示す工程STdにおける処理の別の例を示す流れ図である。

[図22]図21に示す工程ST7aにおける処理の例を示す流れ図である。

[図23]一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連するタイミングチャートである。

発明を実施するための形態

[0008] 以下、図面を参照して種々の例示的实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。

[0009] 図1は、プラズマ処理システムの構成例を説明するための図である。一実施形態において、プラズマ処理システムは、プラズマ処理装置1及び制御部2を含む。プラズマ処理システムは、基板処理システムの一例であり、プラズマ処理装置1は、基板処理装置の一例である。プラズマ処理装置1は、プラズマ処理チャンバ10、基板支持部11及びプラズマ生成部12を含む。プラズマ処理チャンバ10は、プラズマ処理空間を有する。また、プラズマ処理チャンバ10は、少なくとも1つの処理ガスをプラズマ処理空間に供給するための少なくとも1つのガス供給口と、プラズマ処理空間からガスを排出するための少なくとも1つのガス排出口とを有する。ガス供給口は、後述するガス供給部20に接続され、ガス排出口は、後述する排気システム40に接続される。基板支持部11は、プラズマ処理空間内に配置され、基板を支持するための基板支持面を有する。

[0010] プラズマ生成部12は、プラズマ処理空間内に供給された少なくとも1つの処理ガスからプラズマを生成するように構成される。プラズマ処理空間において形成されるプラズマは、容量結合プラズマ(CCP:Capacitively Coupled Plasma)、誘導結合プラズマ(ICP:Inductively Coupled Plasma)、ECRプラズマ(Electron-Cyclotron-Resonance Plasma)、ヘリコン波励起プラズマ(HWP:Helicon Wave Plasma)、又は、表面波プラズマ(SWP:Surface Wave Plasma)等であってもよい。

[0011] 制御部2は、本開示において述べられる種々の工程をプラズマ処理装置1に実行させるコンピュータ実行可能な命令を処理する。制御部2は、ここで述べられる種々の工程を実行するようにプラズマ処理装置1の各要素を制御するように構成され得る。一実施形態において、制御部2の一部又は全てがプラズマ処理装置1に含まれてもよい。制御部2は、処理部2a1、記憶部

2 a 2 及び通信インターフェース 2 a 3 を含んでもよい。制御部 2 は、例えばコンピュータ 2 a により実現される。処理部 2 a 1 は、記憶部 2 a 2 からプログラムを読み出し、読み出されたプログラムを実行することにより種々の制御動作を行うように構成され得る。このプログラムは、予め記憶部 2 a 2 に格納されていてもよく、必要なときに、媒体を介して取得されてもよい。取得されたプログラムは、記憶部 2 a 2 に格納され、処理部 2 a 1 によって記憶部 2 a 2 から読み出されて実行される。媒体は、コンピュータ 2 a に読み取り可能な種々の記憶媒体であってもよく、通信インターフェース 2 a 3 に接続されている通信回線であってもよい。処理部 2 a 1 は、CPU (Central Processing Unit) 又は FPGA (Field-Programmable Gate Array) のようなプログラム可能なロジックデバイスであってもよい。記憶部 2 a 2 は、RAM (Random Access Memory)、ROM (Read Only Memory)、HDD (Hard Disk Drive)、SSD (Solid State Drive)、又はこれらの組み合わせを含んでもよい。通信インターフェース 2 a 3 は、LAN (Local Area Network) 等の通信回線を介してプラズマ処理装置 1 との間で通信してもよい。

[0012] 以下に、プラズマ処理装置 1 の一例としての容量結合型のプラズマ処理装置の構成例について説明する。図 2 は、容量結合型のプラズマ処理装置の構成例を説明するための図である。

[0013] 容量結合型のプラズマ処理装置 1 は、プラズマ処理チャンバ 1 0、ガス供給部 2 0、電源システム 3 0 及び排気システム 4 0 を含む。また、プラズマ処理装置 1 は、基板支持部 1 1 及びガス導入部を含む。ガス導入部は、少なくとも 1 つの処理ガスをプラズマ処理チャンバ 1 0 内に導入するように構成される。ガス導入部は、シャワーヘッド 1 3 を含む。基板支持部 1 1 は、プラズマ処理チャンバ 1 0 内に配置される。シャワーヘッド 1 3 は、基板支持部 1 1 の上方に配置される。一実施形態において、シャワーヘッド 1 3 は、

プラズマ処理チャンバ10の天部（c e i l i n g）の少なくとも一部を構成する。プラズマ処理チャンバ10は、シャワーヘッド13、プラズマ処理チャンバ10の側壁10a及び基板支持部11により規定されたプラズマ処理空間10sを有する。プラズマ処理チャンバ10は接地される。基板支持部11は、プラズマ処理チャンバ10の筐体とは電氣的に絶縁される。

[0014] 基板支持部11は、本体部111及びリングアセンブリ112を含む。本体部111は、基板Wを支持するための中央領域111aと、リングアセンブリ112を支持するための環状領域111bとを有する。ウェハは基板Wの一例である。本体部111の環状領域111bは、平面視で本体部111の中央領域111aを囲んでいる。基板Wは、本体部111の中央領域111a上に配置され、リングアセンブリ112は、本体部111の中央領域111a上の基板Wを囲むように本体部111の環状領域111b上に配置される。従って、中央領域111aは、基板Wを支持するための基板支持面とも呼ばれ、環状領域111bは、リングアセンブリ112を支持するためのリング支持面とも呼ばれる。

[0015] 一実施形態において、本体部111は、基台1110及び静電チャック1111を含む。基台1110は、導電性部材を含む。静電チャック1111は、基台1110の上に配置される。静電チャック1111は、セラミック部材1111aとセラミック部材1111a内に配置される静電電極1111bとを含む。セラミック部材1111aは、中央領域111aを有する。一実施形態において、セラミック部材1111aは、環状領域111bも有する。なお、環状静電チャックや環状絶縁部材のような、静電チャック1111を囲む他の部材が環状領域111bを有してもよい。この場合、リングアセンブリ112は、環状静電チャック又は環状絶縁部材の上に配置されてもよく、静電チャック1111と環状絶縁部材の両方の上に配置されてもよい。

[0016] リングアセンブリ112は、1又は複数の環状部材を含む。一実施形態において、1又は複数の環状部材は、1又は複数のエッジリングと少なくとも

1つのカバーリングとを含む。エッジリングは、導電性材料又は絶縁材料で形成され、カバーリングは、絶縁材料で形成される。

[0017] また、基板支持部11は、静電チャック1111、リングアセンブリ112及び基板のうち少なくとも1つをターゲット温度に調節するように構成される温調モジュールを含んでもよい。温調モジュールは、ヒータ、伝熱媒体、流路1110a、又はこれらの組み合わせを含んでもよい。流路1110aには、ブラインやガスのような伝熱流体が流れる。一実施形態において、流路1110aが基台1110内に形成され、1又は複数のヒータが静電チャック1111のセラミック部材1111a内に配置される。また、基板支持部11は、基板Wの裏面と中央領域111aとの間の間隙に伝熱ガスを供給するように構成された伝熱ガス供給部を含んでもよい。

[0018] シャワーヘッド13は、ガス供給部20からの少なくとも1つの処理ガスをプラズマ処理空間10s内に導入するように構成される。シャワーヘッド13は、少なくとも1つのガス供給口13a、少なくとも1つのガス拡散室13b、及び複数のガス導入口13cを有する。ガス供給口13aに供給された処理ガスは、ガス拡散室13bを通過して複数のガス導入口13cからプラズマ処理空間10s内に導入される。また、シャワーヘッド13は、少なくとも1つの上部電極を含む。なお、ガス導入部は、シャワーヘッド13に加えて、側壁10aに形成された1又は複数の開口部に取り付けられる1又は複数のサイドガス注入部（SGI: Side Gas Injector）を含んでもよい。

[0019] ガス供給部20は、少なくとも1つのガスソース21及び少なくとも1つの流量制御器22を含んでもよい。一実施形態において、ガス供給部20は、少なくとも1つの処理ガスを、それぞれに対応のガスソース21からそれぞれに対応の流量制御器22を介してシャワーヘッド13に供給するように構成される。各流量制御器22は、例えばマスフローコントローラ又は圧力制御式の流量制御器を含んでもよい。さらに、ガス供給部20は、少なくとも1つの処理ガスの流量を変調又はパルス化する少なくとも1つの流量変調

デバイスを含んでもよい。

[0020] 排気システム40は、例えばプラズマ処理チャンバ10の底部に設けられたガス排出口10eに接続され得る。排気システム40は、圧力調整弁及び真空ポンプを含んでもよい。圧力調整弁によって、プラズマ処理空間10s内の圧力が調整される。真空ポンプは、ターボ分子ポンプ、ドライポンプ又はこれらの組み合わせを含んでもよい。

[0021] 電源システム30は、高周波電源31及びバイアス電源32を含む。電源システム30は、直流電源38を更に含んでもよい。高周波電源31は、一実施形態のプラズマ生成部12を構成する。高周波電源31は、高周波電力を発生するように構成されている。以下の説明では、高周波電源31によって発生される高周波電力を、ソース高周波電力HFという。ソース高周波電力HFは、周波数を有する。以下の説明では、ソース高周波電力HFの周波数を、ソース周波数という。ソース高周波電力HFは、その周波数がソース周波数である正弦波状の波形を有する。ソース周波数は、10MHz～150MHzの範囲内の周波数であり得る。

[0022] 高周波電源31は、整合器33を介して高周波電極に電氣的に接続されており、ソース高周波電力HFを高周波電極に供給するように構成されている。高周波電極は、基板支持部11内に設けられていてもよい。高周波電極は、基台1110の導電性部材又はセラミック部材1111a内に設けられた少なくとも一つの電極であってもよい。或いは、高周波電極は、上部電極であってもよい。ソース高周波電力HFが高周波電極に供給されると、チャンバ10内のガスからプラズマが生成される。

[0023] 整合器33は、可変インピーダンスを有する。整合器33の可変インピーダンスは、ソース高周波電力HFの負荷からの反射を低減するよう、設定される。整合器33は、例えば制御部2によって制御され得る。

[0024] 一実施形態において、高周波電源31は、信号発生器31g、D/A変換器31c、及び増幅器31aを含んでもよい。信号発生器31gは、ソース周波数fを有する高周波信号を発生する。信号発生器31gは、プログ

ラム可能なプロセッサ又はFPGA (Field-Programmable Gate Array) のようなプログラム可能なロジックデバイスから構成されていてもよい。

[0025] 信号発生器31gの出力は、D/A変換器31cの入力に接続されている。D/A変換器31cは、信号発生器31gからの高周波信号をアナログ信号に変換する。D/A変換器31cの出力は、増幅器31aの入力に接続されている。増幅器31aは、D/A変換器31cからのアナログ信号を増幅して、ソース高周波電力HFを生成する。増幅器31aの増幅率は、制御部2から高周波電源31に指定される。なお、高周波電源31は、D/A変換器31cを含んでいなくてもよい。この場合には、信号発生器31gの出力は、増幅器31aの入力に接続され、増幅器31aは、信号発生器31gからの高周波信号を増幅して、ソース高周波電力HFを生成する。

[0026] バイアス電源32は、基板支持部11に電氣的に結合されている。バイアス電源32は、基板支持部11内のバイアス電極に電氣的に接続されており、電気バイアスEBをバイアス電極に供給するように構成されている。バイアス電極は、基台1110の導電性部材又はセラミック部材1111a内に設けられた少なくとも一つの電極であってもよい。バイアス電極は、高周波電極と共通であってもよい。電気バイアスEBがバイアス電極に供給されると、プラズマからのイオンが基板Wに引き付けられる。

[0027] 以下、図2と共に図3を参照する。図3は、電気バイアスの波形の例を示す図である。バイアス電源32は、波形周期 C_w を有する電気バイアスEBをバイアス電極に周期的に与えるように構成されている。即ち、電気バイアスEBは、波形周期 C_w の繰り返しである複数の波形周期 C_w の各々においてバイアス電極に与えられる。波形周期 C_w は、バイアス周波数 f_{EB} で規定される。バイアス周波数 f_{EB} は、例えば50kHz以上、27MHz以下の周波数である。波形周期 C_w の時間長は、バイアス周波数の逆数である。

[0028] 電気バイアスEBは、バイアス周波数を有するバイアス高周波電力LFであってもよい。即ち、電気バイアスEBは、その周波数がバイアス周波数で

ある正弦波状の波形を有していてもよい。この場合には、バイアス電源 3 2 は、整合器 3 4 を介して、バイアス電極に電氣的に接続される。整合器 3 4 の可変インピーダンスは、バイアス高周波電力 L F の負荷からの反射を低減するように、設定される。

[0029] 或いは、電気バイアス E B は、電圧パルス V P を含んでいてもよい。電圧パルス V P は、波形周期 C_w 内においてバイアス電極に印加される。電圧パルス V P は、波形周期 C_w の時間長と同じ長さの時間間隔で周期的にバイアス電極に印加される。電圧パルス V P の波形は、矩形波、三角波、又は任意の波形であり得る。電圧パルス V P の電圧の極性は、基板 W とプラズマとの間に電位差を生じさせてプラズマからのイオンを基板 W に引き込むことができるように設定される。電圧パルス V P は、基板 W の電位が負電位である期間を波形周期 C_w が含むようにバイアス電極に印加される。バイアス電極に印加される電圧パルス V P は、負電位を有してもよく、正電位を有してもよく、或いは、正の電位と負の電位との間で変化する電位を有していてもよい。電圧パルス V P は、負の電圧のパルス又は負の直流電圧のパルスであってもよい。なお、電気バイアス E B が電圧パルス V P である場合には、プラズマ処理装置 1 は整合器 3 4 を備えていなくてもよい。

[0030] 図 2 に示すように、プラズマ処理装置 1 は、センサ 3 5 及び／又はセンサ 3 6 を更に備えていてもよい。センサ 3 5 は、ソース高周波電力 H F の負荷からの反射波のパワーレベル P r を測定するように構成されている。センサ 3 5 は、例えば方向性結合器を含む。方向性結合器は、高周波電源 3 1 と整合器 3 3 との間に設けられていてもよい。センサ 3 5 は、ソース高周波電力 H F の進行波のパワーレベル P f を更に測定するように構成されていてもよい。センサ 3 5 によって測定された反射波のパワーレベル P r は、高周波電源 3 1 に通知される。加えて、進行波のパワーレベル P f が、センサ 3 5 から高周波電源 3 1 に通知されてもよい。センサ 3 5 は、反射率、即ち、 P_r / P_f を高周波電源 3 1 に通知してもよい。反射率は、高周波電源 3 1 においてパワーレベル P f 及びパワーレベル P r から特定されてもよい。なお、

センサ35と高周波電源31との間に検波回路35bが接続されていてもよく、パワーレベル P_f 及びパワーレベル P_r は検波回路35bの出力から特定されてもよい。

[0031] センサ36は、電圧センサ及び電流センサを含む。センサ36は、高周波電源31と高周波電極とを互いに接続する給電路における電圧 V_s 及び電流 I_s を測定するように構成されている。ソース高周波電力 H_F は、この給電路を経由して高周波電極に供給される。センサ36は、高周波電源31と整合器33との間に設けられていてもよい。電圧 V_s 及び電流 I_s は、高周波電源31に通知される。センサ36は、電圧 V_s 及び電流 I_s から特定した高周波電源31の負荷のインピーダンス Z_L を高周波電源31に通知してもよい。インピーダンス Z_L は、高周波電源31において電圧 V_s 及び電流 I_s から特定されてもよい。センサ36は、電圧 V_s と電流 I_s の間の位相差 θ を高周波電源31に通知してもよい。位相差 θ は、高周波電源31において電圧 V_s 及び電流 I_s から特定されてもよい。センサ36は、電圧 V_s 及び電流 I_s から特定した反射係数 Γ を高周波電源31に通知してもよい。反射係数 Γ は、高周波電源31において電圧 V_s 及び電流 I_s から特定されてもよい。

[0032] 直流電源38は、上部電極に直流電圧 $D_C S$ を印加するように構成されている。直流電源38は、負の直流電圧を上部電極に印加してもよい。直流電源38は、可変直流電源であってもよい。

[0033] 以下、図2及び図3と共に、図4～図17を参照する。図4～図17の各々は、一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。図4～図17の各々には、ソース高周波電力 H_F のパワーレベル及び電気バイアス E_B のレベルが示されている。図4～図17の各々において、電気バイアス E_B の「ON」は、電気バイアス E_B が供給されていることを示しており、電気バイアス E_B の「OFF」は、電気バイアス E_B の供給が停止されていることを示している。図4～図17の各々において、電気バイアス E_B の「HIGH」は、「LOW」で示されるレベルよりも高いレベルを有する電気バイアス E_B が供給されていることを示している。

。なお、電気バイアス E_B がバイアス高周波電力 L_F である場合には、電気バイアス E_B のレベルは、バイアス高周波電力 L_F のパワーレベルである。電気バイアス E_B が電圧パルス V_P を含む場合には、電気バイアス E_B は、基板 W に引き付けられるイオンのエネルギーが高くなるほど、高いレベルを有する。電気バイアス E_B が電圧パルス V_P を含む場合には、電気バイアス E_B のレベルは、基準電圧（例えば 0 V ）に対する電圧パルス V_P の負方向への電圧レベルの絶対値であってもよい。また、図 14 においては、デューティ比 D_{VP} が更に示されている。デューティ比 D_{VP} は、波形周期 C_W において電圧パルス V_P が供給されている時間長が占める時間長の割合である。また、図 15 においては、バイアス周波数 f_{EB} が更に示されている。また、図 16 及び図 17 においては、直流電圧 DCS が更に示されている。図 16 及び図 17 の各々において、直流電圧 DCS の「ON」は、直流電圧 DCS が供給されていることを示しており、直流電圧 DCS の「OFF」は、直流電圧 DCS の供給が停止されていることを示している。図 16 及び図 17 の各々において、直流電圧 DCS の「HIGH」は、「LOW」で示されるレベルよりも高いレベルを有する直流電圧 DCS が供給されていることを示している。なお、直流電圧 DCS のレベルは、その基準電圧レベル（例えば 0 V ）に対する直流電圧 DCS の負方向への電圧レベルの絶対値であってもよい。

[0034] 図 4～図 17 に示すように、高周波電源 31 からのソース高周波電力 H_F のパワーレベルは、変調される。高周波電源 31 からのソース高周波電力 H_F のパワーレベルは、電源制御部によって指定される。電源制御部は、図 4～図 17 に示すように、変調周期 C_M の繰り返しにおいてソース高周波電力 H_F のパワーレベルを周期的に変調するように構成されている。電源制御部は、高周波電源 31 内に設けられていてもよく、高周波電源 31 の外部に設けられていてもよい。信号発生器 31g が電源制御部として機能してもよく、高周波電源 31 内の別のデバイスが電源制御部として機能してもよい。或いは、制御部 2 が、電源制御部として機能してもよい。

[0035] また、図 4～図 17 に示すように、電源制御部は、変調周期 C_M の繰り返し

において電気バイアス E_B の条件を周期的に変調するように構成されていてもよい。電源制御部は、変調周期 C_M の繰返しにおいて電気バイアス E_B のレベルを周期的に変調してもよい。図 14 に示すように、電源制御部は、変調周期 C_M の繰返しにおいてデューティ比 D_{VP} を周期的に変調してもよい。図 15 に示すように、電源制御部は、変調周期 C_M の繰返しにおいてバイアス周波数 f_{EB} を周期的に変調してもよい。さらに、電源制御部は、図 16 及び図 17 に示すように、変調周期 C_M の繰返しにおいて直流電圧 DCS の電圧レベルを周期的に変調してもよい。

[0036] 図 4～図 17 に示すように、変調周期 C_M は複数の副期間 P_S を含む。これらの図において、 P_S に続く括弧内の数値は、変調周期 C_M 内の副期間 P_S の順番を表している。図 4～図 17 に示すように、変調周期 C_M は、ソース高周波電力 HF のパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間 P_S を含む。図 4～図 15 に示す例では、複数の副期間 P_S の各々は、ソース高周波電力 HF のパワーレベル及び電気バイアス E_B の条件の各々が同一の設定のまま継続する期間である。図 16 及び図 17 の各々に示す例では、複数の副期間 P_S の各々は、ソース高周波電力 HF のパワーレベル、電気バイアス E_B の条件、及び直流電源 38 の出力電圧レベル（即ち、直流電圧 DCS の電圧レベル）の各々が同一の設定のまま継続する期間である。

[0037] 複数の副期間 P_S の各々は、その中でソース高周波電力 HF が 0 ワットよりも大きいパワーレベルを有する場合に、その開始時点から続くフィードバック期間 P_F [1]（第 1 のフィードバック期間）を含む。図 4～図 12 に示すように、複数の副期間 P_S の各々は、フィードバック期間 P_F [1] に続く残りの期間としてフィードバック期間 P_F [2]（第 2 のフィードバック期間）を更に含んでもよい。或いは、複数の副期間 P_S のうち少なくとも一つの副期間は、フィードバック期間 P_F [1] だけを含んでもよい。即ち、複数の副期間 P_S のうち少なくとも一つの副期間は、フィードバック期間 P_F [1] と一致していてもよい。図 13 に示す例では、副期間 P_S [1] はフィー

ドバック期間 $P_F [1]$ だけを含んでいる。或いは、複数の副期間 P_S の各々は、フィードバック期間 $P_F [1]$ だけを含んでいてもよい。即ち、複数の副期間 P_S の各々は、フィードバック期間 $P_F [1]$ と一致していてもよい。

[0038] 高周波電源 31 は、ソース高周波電力 H_F の負荷からの反射を抑制するために、変調周期 C_M 内の各位相期間 P_H のためのソース周波数 f を調整する。ソース周波数 f は、電源制御部から高周波電源 31 に指定される。以下、図 2～図 17 と共に、図 18 の (a) 及び図 18 の (b) を参照しつつ、ソース周波数 f の調整について説明する。図 18 の (a) は、一つの例示的实施形態に係る制御方法の流れ図であり、図 18 の (b) は、図 18 の (a) に示す工程 STa の流れ図である。図 18 の (a) に示す制御方法（以下、「方法 MT 」という）において、電源システム 30 の各部は、電源制御部によって制御される。

[0039] 図 18 の (a) に示すように、方法 MT は、工程 STa 及び工程 STb を含んでいる。工程 STa では、プラズマ処理装置 1 のチャンバ 10 内でプラズマを生成するために高周波電源 31 からソース高周波電力 H_F が高周波電極に供給される。また、工程 STb において、基板支持部 11 上の基板 W にプラズマからイオンを引き込むために、波形周期 C_w の時間間隔で繰り返して基板支持部 11（即ち、バイアス電極）に電気バイアス E_B が供給される。

[0040] 図 18 の (b) に示すように、工程 STa は、工程 STc 及び工程 STd を含む。工程 STc では、図 4～図 17 の例のように、変調周期 C_M の繰り返しにおいてソース高周波電力 H_F のパワーレベルが周期的に変調される。なお、工程 STb では、変調周期 C_M の繰り返しにおいて電気バイアス E_B のレベルが周期的に変調されてもよい。また、図 16 及び図 17 に示すように、変調周期 C_M の繰り返しにおいて直流電圧 DCS のレベルが周期的に変調されてもよい。

[0041] 工程 STd では、各変調周期 C_M 内の各位相期間 P_H のためのソース周波数 f が、ソース高周波電力 H_F の反射の度合いを抑制するように調整される。以下、工程 STd における処理についてより詳細に説明する。以下の説明に

において、変調周期 $C_M [y]$ は、変調周期 C_M の繰返しにおける y 番目の変調周期 C_M を表す。位相期間 $P_H [k]$ は、変調周期 C_M 内の k 番目の位相期間を表す。また、位相期間 $P_H [j]$ は、波形周期 C_W 内の j 番目の位相期間を表す。また、波形周期 $C_W [m]$ は、フィードバック期間 $P_F [1]$ 及びフィードバック期間 $P_F [2]$ の各々における m 番目の波形周期 C_W を表す。

[0042] <1 番目の変調周期～ Y_1 番目の変調周期におけるソース周波数の設定>

[0043] 変調周期 $C_M [1]$ ～変調周期 $C_M [Y_1]$ の各々における各フィードバック期間 $P_F [1]$ 中の位相期間 $P_H [k]$ では、その位相期間のために予め準備された周波数が、ソース周波数 f として用いられる。或いは、変調周期 $C_M [1]$ ～変調周期 $C_M [Y_1]$ の各々におけるフィードバック期間 $P_F [1]$ 中の波形周期 $C_W [m]$ 内の複数の位相期間 P_H では、その波形周期のために予め準備された周波数セットに含まれる複数の周波数がそれぞれ、ソース周波数 f として用いられる。なお、「 Y_1 」は、1 以上の整数であり、例えば5である。

[0044] 変調周期 $C_M [1]$ ～変調周期 $C_M [Y_1]$ の各々におけるフィードバック期間 $P_F [2]$ 中の波形周期 $C_W [m]$ 内の複数の位相期間 P_H の各々では、後述する第2のフィードバックによって決定される周波数が、ソース周波数 f として用いられてもよい。或いは、変調周期 $C_M [1]$ ～変調周期 $C_M [Y_1]$ の各々におけるフィードバック期間 $P_F [2]$ 内の複数の波形周期 C_W の各々の中の複数の位相期間 P_H では、直前のフィードバック期間 $P_F [1]$ 内の最終の波形周期 C_W 中の複数の位相期間 P_H において用いられた複数のソース周波数 f がそれぞれ用いられてもよい。

[0045] < Y_2 番目の変調周期以降の変調周期におけるソース周波数の設定>

[0046] Y_2 番目の変調周期 $C_M [Y_2]$ 以降の各変調周期 C_M におけるフィードバック期間 $P_F [1]$ 中の位相期間 $P_H [k]$ では、後述する第1のフィードバックによって決定される周波数が、ソース周波数 f として用いられる。或いは、変調周期 $C_M [Y_2]$ 以降の各変調周期 C_M におけるフィードバック期間 $P_F [1]$ 中の波形周期 $C_W [m]$ 内の複数の位相期間 P_H の各々では、後述す

る第1のフィードバックによって決定される周波数が、ソース周波数 f として用いられる。

[0047] 変調周期 $C_M [Y_2]$ 以降の各変調周期 C_M におけるフィードバック期間 $P_F [2]$ 中の波形周期 $C_W [m]$ 内の複数の位相期間 P_H の各々では、後述する第2のフィードバックによって決定される周波数が、ソース周波数 f として用いられてもよい。或いは、変調周期 $C_M [Y_2]$ 以降の各変調周期 C_M におけるフィードバック期間 $P_F [2]$ 内の複数の波形周期 C_W の各々の中の複数の位相期間 P_H では、直前のフィードバック期間 $P_F [1]$ 内の最終の波形周期 C_W 中の複数の位相期間 P_H において用いられた複数のソース周波数 f がそれぞれ用いられてもよい。

[0048] なお、「 Y_2 」は、 $Y_1 + 1$ であり得る。或いは、変調周期 $C_M [Y_1]$ から変調周期 $C_M [Y_2]$ までの間に、遅延時間が設けられてもよい。遅延時間は、数秒程度であってもよい。遅延時間が設けられる場合には、変調周期 $C_M [Y_1]$ の直後、変調周期 $C_M [Y_2]$ の直前までの各変調周期 C_M における複数の位相期間 P_H のソース周波数としては、変調周期 $C_M [Y_1]$ における複数の位相期間 P_H で用いられた複数のソース周波数 f がそれぞれ用いられてもよい。

[0049] 以下、第1のフィードバック及び第2のフィードバックについて、図19及び図20を参照しつつ説明する。図19は、図18の(b)に示す工程S T dにおける処理の例を示す流れ図である。図20は、図19に示す工程S T 7における処理の例を示す流れ図である。

[0050] 第1のフィードバックでは、変調周期 C_M の繰り返し、即ち複数の変調周期 C_M が周期系列 C_S を形成する。第2のフィードバックでは、変調周期 $C_M [y]$ 内のフィードバック期間 $P_F [2]$ 内の複数の波形周期 C_W とそのフィードバック期間 $P_F [2]$ の直前の I_{ref} 個の波形周期 C_W が周期系列 C_S を形成する。第1のフィードバックでは、変調周期 C_M の位相期間 $P_H [k]$ のソース周波数 f が、先行する変調周期 C_M の系列における位相期間 $P_H [k]$ のソース周波数 f の変化とソース高周波電力 $H F$ の反射の度合いの変化に基づき、

反射の度合いを抑制するように、決定される。第2のフィードバックでは、変調周期 C_M [y] 内のフィードバック期間 P_F [2] 内の波形周期 C_W [m] における位相期間 P_H [j] のソース周波数 f が、同一のフィードバック期間 P_F [2] 内において先行する複数の波形周期 C_W の系列における位相期間 P_H [j] のソース周波数 f の変化とソース高周波電力 $H F$ の反射の度合いの変化に基づき、反射の度合いを抑制するように、決定される。第1のフィードバック及び第2のフィードバックの各々においてソース周波数 f は、電源制御部によって決定される。

[0051] 以下、第1のフィードバックにおける変調周期 C_M の系列における位相期間 P_H [k] 及び第2のフィードバックにおける波形周期 C_W の系列における位相期間 P_H [j] の各々を、周期系列 C_S の位相期間 P_H [n] として参照する。また、第1のフィードバックにおける変調周期 C_M 及び第2のフィードバックにおける波形周期 C_W の各々を周期 C_R として参照する。

[0052] 図19に示すように、工程STdは、工程ST1～工程ST7を含んでいてもよい。工程ST1～工程ST7は、周期系列 C_S における各周期 C_R 内の各位相期間 P_H に対して行われる。

[0053] 工程ST1では、電源制御部は、 i を $i_{ini} - i_{ref}$ に設定する。「 i 」は、周期系列 C_S に含まれる周期 C_R の順番を表している。第1のフィードバックにおいて、「 i_{ini} 」は、初期的には、上述の「 Y_2 」である。第1のフィードバックでは、「 $i_{ini} - i_{ref}$ 」は、周期系列 C_S に含まれる i_{ini} 番目の周期 C_R の一つ前の周期 C_R の順番を表しており、「 i_{ref} 」は1である。また、第2のフィードバックにおいて、「 i_{ini} 」は、初期的には、「1」である。第2のフィードバックでは、「 $i_{ini} - i_{ref}$ 」は、周期系列 C_S に含まれる i_{ini} 番目の周期 C_R の i_{ref} 個前の周期 C_R の順番を表しており、「 i_{ref} 」は1以上の整数である。第2のフィードバックにおいて、「 i_{ref} 」は、1であってもよく、2であってもよく、2より大きい整数であってもよい。なお、第2のフィードバックにおいて、 i_{ref} が2以上の場合には、第2のフィードバックにおける各位相期間 P_H のためのソース周波数の決定のための処理

時間として比較的長い処理時間が確保される。

[0054] 続く工程ST2では、電源制御部は、反射の度合い $P_d[i, n]$ が周波数変更条件を満たすほどに大きいか否かを判定する。なお、 $P_d[i, n]$ は、周期系列 C_s に含まれる i 番目の周期 $C_R[i]$ 内の位相期間 $P_H[n]$ の反射の度合いを表している。工程ST2において、周波数変更条件は、反射の度合い $P_d[i, n]$ が閾値よりも大きい場合に満たされる。工程ST2において、周波数変更条件は、 $P_d[i, n]$ が第1の閾値 $P_{th1}[n]$ よりも大きい場合に満たされてもよい。なお、複数の位相期間 P_H それぞれのための第1の閾値 P_{th1} は、互いに同一であってもよく、異なってもよい。

[0055] 工程ST2において周波数変更条件が満たされていると判定された場合には、電源制御部は、工程ST3において、ソース周波数 $f[i + l_{ref}, n]$ を、式(1)により設定する。

$$f[i + l_{ref}, n] = f[i, n] + \Delta f[i, n] \quad \cdots (1)$$

なお、 $f[i, n]$ は、周期系列 C_s に含まれる i 番目の周期 $C_R[i]$ 内の位相期間 $P_H[n]$ のソース周波数 f を表している、また、 $\Delta f[i, n]$ は、シフト値であり、その初期値は事前に設定されている。

[0056] 一方、工程ST2において周波数変更条件が満たされていないと判定された場合には、電源制御部は、工程ST4において、ソース周波数 $f[i + l_{ref}, n]$ を、式(2)により設定する。

$$f[i + l_{ref}, n] = f[i, n] \quad \cdots (2)$$

[0057] 次いで、工程ST5～工程ST7が行われる。工程ST5～工程ST7は、終了の指示があるまで繰り返される。工程ST5は、工程ST5a、工程ST5b、及び工程ST5cを含む。工程ST5aでは、 l_{ref} が1より大きいか否かが判定される。 l_{ref} が1である場合には、処理は工程ST5cに進む。 l_{ref} が1より大きい場合には、工程ST5bにおいて、電源制御部は、 $f[i + h, n]$ を $f[i, n]$ に設定する。工程ST5bの処理は、 h を1から $l_{ref} - 1$ まで1ずつ増分しつつ行われる。そして、処理は工程ST5cに進む。

- [0058] 工程ST5cでは、電源制御部は、 i を $1 + l_{ref}$ だけ増分する。続く工程ST6では、電源制御部は、周期系列 C_s における周期 $C_R[i]$ 内の位相期間 $P_H[n]$ において、ソース周波数 $f[i, n]$ を有するソース高周波電力HFを、高周波電源31から供給する。
- [0059] 続く工程ST7では、電源制御部は、反射の度合い $P_d[i, n]$ に応じて周期系列 C_s における後の周期 $C_R[i + l_{ref}]$ 内の位相期間 $P_H[n]$ のためのソース周波数 $f[i + l_{ref}, n]$ を決定する。
- [0060] 図20に示すように、工程ST7は、工程ST701で開始する。工程ST701では、電源制御部は、反射の度合い $P_d[i, n]$ が増加傾向であるか否かを判定する。工程ST701において、反射の度合い $P_d[i, n]$ は、 $P_d[i, n] > P_d[i - l_{ref}, n]$ が満たされる場合に、増加傾向であると判定されてもよい。或いは、周期系列 C_s における i 番目の周期 $C_R[i]$ までの X 個の周期 C_R にわたって位相期間 $P_H[n]$ における反射の度合いが増加傾向である場合に、反射の度合い $P_d[i, n]$ が増加傾向であると判定されてもよい。ここで、「 X 」は、2以上の整数である。周期系列 C_s における i 番目の周期 $C_R[i]$ までの X 個の周期 C_R は、 $C_R[i - x \times l_{ref}]$ で表され、「 x 」は、0から $(X - 1)$ までの整数である。
- [0061] 工程ST701において反射の度合い $P_d[i, n]$ が増加傾向でないと判定された場合には、電源制御部は、工程ST702において、シフト値 $\Delta f[i, n]$ の符号を維持する。即ち、電源制御部は、工程ST702において、シフト値 $\Delta f[i, n]$ を式(3)により設定する。
- $$\Delta f[i, n] = \Delta f[i - l_{ref}, n] \quad \cdots (3)$$
- [0062] 一方、工程ST701において反射の度合い $P_d[i, n]$ が増加傾向であると判定された場合には、電源制御部は、工程ST703において、シフト値 $\Delta f[i, n]$ の符号を変更する。即ち、電源制御部は、工程ST703において、シフト値 $\Delta f[i, n]$ を式(4)により設定する。
- $$\Delta f[i, n] = -\Delta f[i - l_{ref}, n] \quad \cdots (4)$$
- [0063] 続く工程ST704では、電源制御部は、シフト方向変更条件を満たすか

否かを判定する。シフト方向変更条件は、ソース周波数 $f[i, n]$ と周期 $C_R[i]$ 内の $(n-u)$ 番目の位相期間 $P_H[n-u]$ のソース周波数 $f[i, n-u]$ との差の絶対値及びソース周波数 $f[i, n]$ と周期 $C_R[i]$ 内の $(n+u)$ 番目の位相期間 $P_H[n+u]$ のソース周波数 $f[i, n+u]$ との差の絶対値の各々と所定値との比較の結果、ソース周波数の変化が大きいと判断され、且つ、ソース周波数 $f[i, n-u]$ 及びソース周波数 $f[i, n+u]$ の双方がソース周波数 $f[i, n]$ よりも大きい、小さい場合に、満たされる。例えば、シフト方向変更条件は、ソース周波数 $f[i, n]$ とソース周波数 $f[i, n-u]$ との差の絶対値及びソース周波数 $f[i, n]$ とソース周波数 $f[i, n+u]$ との差の絶対値の各々が所定値よりも大きく、且つ、ソース周波数 $f[i, n-u]$ 及びソース周波数 $f[i, n+u]$ の双方がソース周波数 $f[i, n]$ よりも大きい、小さい場合に、満たされる。

[0064] 工程ST704において、 u は、1であってもよく、1よりも大きい数値であってもよい。或いは、工程ST704において、シフト方向変更条件は、 u が1から1よりも大きい数値の範囲内のいずれかの数値であるときに満たされてもよい。

[0065] 工程ST704においてシフト方向変更条件が満たされていると判定された場合には、電源制御部は、工程ST705において、シフト値 $\Delta f[i, n]$ の符号を変更する。即ち、電源制御部は、工程ST705において、シフト値 $\Delta f[i, n]$ を、式(5)により設定する。

$$\Delta f[i, n] = |\Delta f[i - l_{ref}, n]| * \text{sign}(f[i, n] - f[i, n-u]) \quad \dots (5)$$

ここで、 $\text{sign}()$ は、括弧内の数値の符号を返す関数である。また、 u は、シフト方向変更条件を満たすときの u の値である。

[0066] 一方、工程ST704においてシフト方向変更条件が満たされないと判定された場合には、電源制御部は、工程ST706において、シフト値 $\Delta f[i, n]$ の符号を維持する。即ち、電源制御部は、工程ST706において

、シフト値 $\Delta f [i, n]$ を、式 (6) により設定する。

$$\Delta f [i, n] = \Delta f [i, n] \quad \cdots (6)$$

[0067] 続く工程 S T 7 0 7 では、電源制御部は、周期系列 C_s における周期 $C_R [i]$ 内の位相期間 $P_H [n]$ におけるソース高周波電力 H F の反射の度合い $P_d [i, n]$ が周波数変更条件を満たすほどに大きいかな否かを判定する。工程 S T 7 0 7 において、周波数変更条件は、周期系列 C_s における周期 $C_R [i]$ 内の位相期間 $P_H [n]$ におけるソース高周波電力 H F の反射の度合い $P_d [i, n]$ が閾値よりも大きい場合に満たされる。

[0068] 工程 S T 7 0 7 において周波数変更条件が満たされていると判定された場合には、電源制御部は、工程 S T 7 0 8 において、周期系列 C_s における後の周期 $C_R [i + l_{ref}]$ 内の位相期間 $P_H [n]$ のためのソース周波数 $f [i + l_{ref}, n]$ を、式 (7) により設定する。

$$f [i + l_{ref}, n] = f [i, n] + \Delta f [i, n] \quad \cdots (7)$$

[0069] 一方、工程 S T 7 0 7 において周波数変更条件が満たされていない場合には、電源制御部は、工程 S T 7 0 9 において、ソース周波数 $f [i + l_{ref}, n]$ を、式 (8) により設定する。

$$f [i + l_{ref}, n] = f [i, n] \quad \cdots (8)$$

[0070] 一実施形態では、周期系列 C_s 内の何れかの周期 C_R における位相期間 $P_H [n]$ での反射の度合いと第 1 の閾値 $P_{th1} [n]$ との間の工程 S T 7 0 7 における比較の結果、当該反射の度合いが小さいと判断された場合には、以後の工程 S T 7 0 7 において周期 C_R における位相期間 $P_H [n]$ での反射の度合いと第 2 の閾値 $P_{th2} [n]$ との比較の結果、当該反射の度合いが大きいと判定されるまで、工程 S T 7 0 7 において周波数変更条件が満たされなくてもよい。第 2 の閾値 $P_{th2} [n]$ は、第 1 の閾値 $P_{th1} [n]$ 以上である。第 2 の閾値 $P_{th2} [n]$ は、第 1 の閾値 $P_{th1} [n]$ よりも大きくてもよい。なお、複数の位相期間 $P_H [n]$ それぞれのための第 2 の閾値 $P_{th2} [n]$ は、互いに同一であってもよく、異なってもよい。

[0071] 具体的には、周期系列 C_s 内の何れかの周期 C_R における位相期間 $P_H [n]$

での反射の度合いが工程ST707において第1の閾値 $P_{th1}[n]$ 以下であると判断された場合には、以後に工程ST707において位相期間 $P_H[n]$ での反射の度合いと比較される閾値として、第2の閾値 $P_{th2}[n]$ が用いられてもよい。そして、周期系列 C_S 内の何れかの波形周期における位相期間 $P_H[n]$ での反射の度合いが工程ST707において第2の閾値 $P_{th2}[n]$ よりも大きいと判断された場合には、以後に工程ST707において位相期間 $P_H[n]$ での反射の度合いと比較される閾値として、第1の閾値 $P_{th1}[n]$ が用いられてもよい。

[0072] 方法MTでは、反射の度合い $P_d[i, n]$ に応じてソース周波数 $f[i + l_{ref}, n]$ を調整することにより、ソース高周波電力HFの反射が抑制される。また、シフト方向変更条件が満たされる場合、即ち、各周期 C_R 内で大きなソース周波数の増加又は減少に続いて大きなソース周波数の減少又は増加をもたらすソース周波数の大きな変動が生じ得る場合には、シフト値の符号が変更される。したがって、方法MTによれば、周期 C_R 内でのソース周波数の大きな変動が抑制される。また、上述したように、周波数変更条件の判定において第1の閾値 P_{th1} 及び第2の閾値 P_{th2} を用いることにより、ソース周波数が過度に変更されることが抑制される。さらに、方法MTを繰り返す場合には、ソース周波数の時間変化の高い再現性が達成され得る。なお、図20に示す工程ST7は、工程ST704～工程ST706を含んでいなくてもよい。

[0073] 以下、図21及び図22を参照して、工程STdにおける処理の別の例を説明する。図21は、図18の(b)に示す工程STdにおける処理の別の例を示す流れ図である。図22は、図21に示す工程ST7aにおける処理の例を示す流れ図である。以下、図21及び図22に示す工程STdにおける処理について、図19及び図20に示す処理に対する相違点の観点から説明する。図21及び図22に示す処理では、電源制御部は、シフト値 $\Delta f[i, n]$ を反射の度合い $P_d[i, n]$ の大きさに応じた値に設定する。

[0074] 具体的には、図21に示すように、電源制御部は、工程ST1と工程ST

3 との間の工程において、ソース周波数 $f[i, n]$ 及び係数 $\alpha[i, n]$ を設定する。工程 ST 1 と工程 ST 3 との間の工程では、ソース周波数 $f[i, n]$ 及び係数 $\alpha[i, n]$ 、即ち、ソース周波数 $f[1, n]$ 及び係数 $\alpha[1, n]$ は、初期的には事前に設定されたそれぞれの数値に設定される。

[0075] 工程 ST 2 において周波数変更条件が満たされていると判定された場合には、電源制御部は、工程 ST 2 と工程 ST 3 の間の工程 ST 3 a において、シフト値 $\Delta f[i, n]$ を式 (9) により設定する。

$$\Delta f[i, n] = \alpha[i, n] * (P_d[i, n] - P_{th1}[n]) \quad \dots (9)$$

ここで、係数 $\alpha[1, n]$ は、事前に設定された数値である。

[0076] そして、工程 ST 6 に続く工程 ST 7 a において、電源制御部は、反射の度合い $P_d[i, n]$ に応じて周期系列 C_s における後の周期 $C_R[i + l_{ref}]$ 内の位相期間 $P_H[n]$ のためのソース周波数 $f[i + l_{ref}, n]$ を決定する。

[0077] 図 2 2 に示すように、工程 ST 7 a は、工程 ST 7 0 1 で開始する。工程 ST 7 0 1 において反射の度合い $P_d[i, n]$ が増加傾向でないと判定された場合には、電源制御部は、工程 ST 7 0 2 a において、係数 $\alpha[i, n]$ の符号を維持する。即ち、電源制御部は、工程 ST 7 0 2 a において、係数 $\alpha[i, n]$ を式 (10) により設定する。

$$\alpha[i, n] = \alpha[i - l_{ref}, n] \quad \dots (10)$$

[0078] 一方、工程 ST 7 0 1 において反射の度合い $P_d[i, n]$ が増加傾向であると判定された場合には、電源制御部は、工程 ST 7 0 3 a において、係数 $\alpha[i, n]$ の符号を変更する。即ち、電源制御部は、工程 ST 7 0 3 a において、係数 $\alpha[i, n]$ を式 (11) により設定する。

$$\alpha[i, n] = -\alpha[i - l_{ref}, n] \quad \dots (11)$$

[0079] 図 2 2 に示すように、工程 ST 7 0 4 においてシフト方向変更条件が満たされていると判定された場合には、電源制御部は、工程 ST 7 0 5 a におい

て、係数 $\alpha[i, n]$ の符号を変更する。即ち、電源制御部は、工程ST705aにおいて、係数 $\alpha[i, n]$ を、式(12)により設定する。

$$\alpha[i, n] = |\alpha[i - l_{ref}, n]| * \text{sign}(f[i, n] - f[i, n - u]) \quad \dots (12)$$

ここで、 u は、シフト方向変更条件を満たすときの u の値である。

[0080] 一方、工程ST704においてシフト方向変更条件が満たされないと判定された場合には、電源制御部は、工程ST706aにおいて、係数 $\alpha[i, n]$ の符号を維持する。即ち、電源制御部は、工程ST706aにおいて、係数 $\alpha[i, n]$ を、式(13)により設定する。

$$\alpha[i, n] = \alpha[i, n] \quad \dots (13)$$

[0081] 図22に示すように、工程ST707において周波数変更条件が満たされていると判定された場合には、工程ST707と工程ST708との間の工程ST708aにおいて、電源制御部は、シフト値 $\Delta f[i, n]$ を式(14)により設定する。

$$\Delta f[i, n] = \alpha[i, n] * (P_d[i, n] - P_{th1}[n]) \quad \dots (14)$$

[0082] 図22の例においても、周期系列 C_s 内の何れかの周期 C_R における位相期間 $P_H[n]$ での反射の度合いと第1の閾値 $P_{th1}[n]$ との間の工程ST707における比較の結果、当該反射の度合いが小さいと判断された場合には、以後の工程ST707において周期 C_R における位相期間 $P_H[n]$ での反射の度合いと第2の閾値 $P_{th2}[n]$ との比較の結果、当該反射の度合いが大きいと判定されるまで、工程ST707において周波数変更条件が満たされなくてもよい。第2の閾値 $P_{th2}[n]$ は、第1の閾値 $P_{th1}[n]$ 以上である。第2の閾値 $P_{th2}[n]$ は、第1の閾値 $P_{th1}[n]$ よりも大きくてもよい。なお、複数の位相期間 $P_H[n]$ それぞれのための第2の閾値 $P_{th2}[n]$ は、互いに同一であってもよく、異なってもよい。

[0083] 具体的には、周期系列 C_s 内の何れかの周期 C_R における位相期間 $P_H[n]$ での反射の度合いが工程ST707において第1の閾値 $P_{th1}[n]$ 以下であ

ると判断された場合には、以後に工程 S T 7 0 7 において位相期間 $P_H [n]$ での反射の度合いと比較される閾値として、第 2 の閾値 $P_{th2} [n]$ が用いられてもよい。そして、周期系列 C_s 内の何れかの波形周期における位相期間 $P_H [n]$ での反射の度合いが工程 S T 7 0 7 において第 2 の閾値 $P_{th2} [n]$ よりも大きいと判断された場合には、以後に工程 S T 7 0 7 において位相期間 $P_H [n]$ での反射の度合いと比較される閾値として、第 1 の閾値 $P_{th1} [n]$ が用いられてもよい。なお、図 2 2 に示す工程 S T 7 a は、工程 S T 7 0 4、工程 S T 7 0 5 a、及び工程 S T 7 0 6 a を含んでいなくてもよい。

[0084] 以下、反射の度合い $P_d [i, n]$ について説明する。反射の度合い $P_d [i, n]$ は、周期系列 C_s 内の周期 $CR [i]$ 内の位相期間 $P_H [n]$ における複数のサンプル時点のそれぞれでの複数の評価値を取得することにより得られる。複数の評価値は、複数のサンプル時点のそれぞれにおけるソース高周波電力 H F の反射の大きさを反映する。複数の位相期間 P_H それぞれにおけるサンプル時点の個数は、同一であり得る。

[0085] 反射の度合い $P_d [i, n]$ は、周期系列 C_s 内の周期 $CR [i]$ 内の位相期間 $P_H [n]$ における複数のサンプル時点それぞれでの評価値の代表値である。代表値は、複数の評価値の平均値、複数の評価値の加重平均値、又は複数の評価値の最大値等である。複数の評価値の各々は、センサ 3 5、3 6 によって取得される測定値のように、反射波のパワーレベル P_r 、反射率（即ち、 P_r / P_f ）、インピーダンス Z_L と特性インピーダンスとの間の差の大きさ、又は反射係数 Γ であってもよい。複数の評価値の各々は、整合器 3 3 の入口（即ち、高周波電源 3 1 側の整合器 3 3 の入力）又は高周波電源 3 1 から見たソース高周波電力 H F の伝送系の抵抗値と所定の抵抗値（5 0 Ω 等）との間の差であってもよい。或いは、複数の評価値の各々は、ソース高周波電力 H F の伝送系又は整合器の入口における電圧 V_s 及び電流 I_s との間の位相差と所定の値（9 0 度等）との間の差であってもよい。

[0086] 一実施形態では、反射の度合い $P_d [i, n]$ は、周期系列 C_s 内の周期 $CR [i]$ 内の位相期間 $P_H [n]$ における複数のサンプル時点それぞれでの評

価値の加重平均値である。加重平均値を求めるために、電源制御部は、複数の評価値に窓関数を掛けることにより得られる複数の値の平均値を求める。窓関数は、位相期間 $P_H[n]$ の中央からの時間差に応じて減少する重みを有する。窓関数としては、三角窓、ガウス窓、ハニング窓、又はハミング窓等が用いられる。かかる窓関数を用いた加重平均値によれば、各位相期間 P_H におけるソース高周波電力 H_F の位相に起因して生じ得る反射の度合い $P_d[i, n]$ の計算値のばらつきを抑制することが可能である。

[0087] ここで、図 23 を参照する。図 23 は、一つの例示的实施形態に係る電源システムに関連するタイミングチャートである。高周波電源 31 は、波形周期 C_w の全期間にわたって連続的にソース高周波電力 H_F を供給してもよい。或いは、高周波電源 31 は、波形周期 C_w 内でソース高周波電力 H_F をパルス化してもよい。即ち、高周波電源 31 は、波形周期 C_w 内でソース高周波電力 H_F のパルスを供給してもよい。

[0088] 以上、種々の例示的实施形態について説明してきたが、上述した例示的实施形態に限定されることなく、様々な追加、省略、置換、及び変更がなされてもよい。また、異なる実施形態における要素を組み合わせて他の実施形態を形成することが可能である。

[0089] ここで、本開示に含まれる種々の例示的实施形態を、以下の [E 1] ~ [E 10] に記載する。

[0090] [E 1]

チャンバと、
前記チャンバ内に配置された基板支持部と、
電源システムと、
を備え、
前記電源システムは、
前記チャンバ内でプラズマを生成するために、ソース高周波電力を供給するように構成された高周波電源と、
前記基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために、

波形周期の時間間隔で繰り返して前記基板支持部に電気バイアスを供給するように構成されたバイアス電源と、

電源制御部と、

を含み、

前記電源制御部は、変調周期の繰り返しにおいて前記ソース高周波電力のパワーレベルを周期的に変調するように構成されており、

前記変調周期は複数の副期間を含み、該複数の副期間は前記ソース高周波電力のパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間を含み、該少なくとも二つの副期間の各々はその開始時点から続くフィードバック期間を含み、

前記電源制御部は、前記フィードバック期間に含まれる前記変調周期内の k 番目の位相期間のための前記ソース高周波電力のソース周波数を、先行する前記変調周期の繰り返しにおける前記 k 番目の位相期間の前記ソース周波数の変化と前記ソース高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該ソース高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整するよう構成されている、

プラズマ処理装置。

[0091] [E 2]

前記電源システムは、前記複数の副期間の各々において前記ソース高周波電力のパワーレベル及び前記電気バイアスの条件の各々を同一の設定のまま継続するように構成されている、E 1 に記載のプラズマ処理装置。

[0092] [E 3]

前記電源システムは、前記基板支持部の上方に配置された上部電極に電氣的に接続された直流電源を更に含み、

前記電源システムは、前記複数の副期間の各々において前記ソース高周波電力のパワーレベル、前記電気バイアスの条件、及び前記直流電源の出力電圧レベルの各々を同一の設定のまま継続するように構成されている、

E 1 に記載のプラズマ処理装置。

[0093] [E 4]

前記電気バイアスは、前記波形周期の時間間隔で周期的に発生される電圧パルスを含み、

前記電気バイアスの前記条件は、前記電圧パルスの電圧レベル、前記電圧パルスのデューティ比、及び前記波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数からなる群から選択される少なくとも一つを含む、

E 2 又は E 3 に記載のプラズマ処理装置。

[0094] [E 5]

前記電気バイアスは、前記波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数を有するバイアス高周波電力であり、

前記電気バイアスの前記条件は、前記バイアス高周波電力の電力レベル及び前記バイアス周波数からなる群から選択される少なくとも一つを含む、

E 2 又は E 3 に記載のプラズマ処理装置。

[0095] [E 6]

前記フィードバック期間は、第 1 のフィードバック期間であり、

前記少なくとも二つの副期間の各々は、前記第 1 のフィードバック期間に続く第 2 のフィードバック期間を含み、

前記電源制御部は、前記第 2 のフィードバック期間の直前の前記波形周期において用いられた前記ソース周波数の系列を該第 2 のフィードバック期間において繰り返して用いるように前記高周波電源を制御するよう構成されている、

E 1 ～ E 5 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0096] [E 7]

前記フィードバック期間は、第 1 のフィードバック期間であり、

前記少なくとも二つの副期間の各々は、前記第 1 のフィードバック期間に続く第 2 のフィードバック期間を含み、

前記電源制御部は、前記少なくとも二つの副期間の各々の前記第 2 のフィードバック期間における各波形周期内の j 番目の位相期間のための前記ソー

ス周波数を、前記少なくとも二つの副期間の各々において先行する前記波形周期の繰り返しにおける前記 j 番目の位相期間の前記ソース周波数の変化と前記ソース高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該ソース高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整するよう構成されている、
E 1 ～ E 5 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0097] [E 8]

前記少なくとも二つの副期間の各々の長さは、前記フィードバック期間の長さとも一致する、E 1 ～ E 5 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0098] [E 9]

プラズマ処理装置のチャンバ内でプラズマを生成するために、ソース高周波電力を供給するように構成された高周波電源と、

前記チャンバ内に設けられた基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために、波形周期の時間間隔で繰り返して前記基板支持部に電気バイアスを供給するように構成されたバイアス電源と、

電源制御部と、
を備え、

前記電源制御部は、変調周期の繰り返しにおいて前記ソース高周波電力のパワーレベルを周期的に変調するように構成されており、

前記変調周期は複数の副期間を含み、該複数の副期間は前記ソース高周波電力のパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間を含み、該少なくとも二つの副期間の各々はその開始時点から続くフィードバック期間を含み、

前記電源制御部は、前記フィードバック期間に含まれる前記変調周期内の k 番目の位相期間のための前記ソース高周波電力のソース周波数を、先行する前記変調周期の繰り返しにおける前記 k 番目の位相期間の前記ソース周波数の変化と前記ソース高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該ソース高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整するよう構成されている、

電源システム。

[0099] [E 1 0]

(a) プラズマ処理装置のチャンバ内でプラズマを生成するために高周波電源からソース高周波電力を供給する工程と、

(b) 前記チャンバ内に配置された基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために、波形周期の時間間隔で繰り返して前記基板支持部に電気バイアスを供給する工程と、

を含み、

前記 (a) は、

(c) 変調周期の繰り返しにおいて前記ソース高周波電力のパワーレベルを周期的に変調する工程であり、前記変調周期は複数の副期間を含み、該複数の副期間は前記ソース高周波電力のパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間を含み、該少なくとも二つの副期間の各々はその開始時点から続くフィードバック期間を含む、該工程と、

(d) 前記フィードバック期間に含まれる前記変調周期内の k 番目の位相期間のための前記ソース高周波電力のソース周波数を調整する工程であり、該変調周期内の該 k 番目の位相期間のための該ソース周波数は、先行する前記変調周期の繰り返しにおける前記 k 番目の位相期間の前記ソース周波数の変化と前記ソース高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該ソース高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整される、該工程と、

を含む、制御方法。

[0100] 以上の説明から、本開示の種々の実施形態は、説明の目的で本明細書で説明されており、本開示の範囲及び主旨から逸脱することなく種々の変更をなし得ることが、理解されるであろう。したがって、本明細書に開示した種々の実施形態は限定することを意図しておらず、真の範囲と主旨は、添付の特許請求の範囲によって示される。

符号の説明

[0101] 1…プラズマ処理装置、10…チャンバ、11…基板支持部、30…電源システム、31…高周波電源、32…バイアス電源。

請求の範囲

[請求項1]

チャンバと、
前記チャンバ内に配置された基板支持部と、
電源システムと、
を備え、
前記電源システムは、
前記チャンバ内でプラズマを生成するために、高周波電力を供給するように構成された高周波電源と、
前記基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために、波形周期の時間間隔で繰り返して前記基板支持部に電気バイアスを供給するように構成されたバイアス電源と、
電源制御部と、
を含み、
前記電源制御部は、変調周期の繰り返しにおいて前記高周波電力のパワーレベルを周期的に変調するように構成されており、
前記変調周期は複数の副期間を含み、該複数の副期間は前記高周波電力のパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間を含み、該少なくとも二つの副期間の各々はその開始時点から続くフィードバック期間を含み、
前記電源制御部は、前記フィードバック期間に含まれる前記変調周期内の k 番目の位相期間のための前記高周波電力の周波数を、先行する前記変調周期の繰り返しにおける前記 k 番目の位相期間の前記高周波電力の周波数の変化と前記高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整するように構成されている、
プラズマ処理装置。

[請求項2]

前記電源システムは、前記複数の副期間の各々において前記高周波電力のパワーレベル及び前記電気バイアスの条件の各々を同一の設定

のまま継続するように構成されている、請求項 1 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項3] 前記電源システムは、前記基板支持部の上方に配置された上部電極に電氣的に接続された直流電源を更に含み、

前記電源システムは、前記複数の副期間の各々において前記高周波電力のパワーレベル、前記電気バイアスの条件、及び前記直流電源の出力電圧レベルの各々を同一の設定のまま継続するように構成されている、

請求項 1 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項4] 前記電気バイアスは、前記波形周期の時間間隔で周期的に発生される電圧パルスを含み、

前記電気バイアスの前記条件は、前記電圧パルスの電圧レベル、前記電圧パルスのデューティ比、及び前記波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数からなる群から選択される少なくとも一つを含む、請求項 2 又は 3 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項5] 前記電気バイアスは、前記波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数を有するバイアス高周波電力であり、

前記電気バイアスの前記条件は、前記バイアス高周波電力の電力レベル及び前記バイアス周波数からなる群から選択される少なくとも一つを含む、

請求項 2 又は 3 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項6] 前記フィードバック期間は、第 1 のフィードバック期間であり、前記少なくとも二つの副期間の各々は、前記第 1 のフィードバック期間に続く第 2 のフィードバック期間を含み、

前記電源制御部は、前記第 2 のフィードバック期間の直前の前記波形周期において用いられた前記高周波電力の前記周波数の系列を該第 2 のフィードバック期間において繰り返して用いるように前記高周波電源を制御するよう構成されている、

請求項 1 ～ 3 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項7]

前記フィードバック期間は、第 1 のフィードバック期間であり、
前記少なくとも二つの副期間の各々は、前記第 1 のフィードバック期間に続く第 2 のフィードバック期間を含み、

前記電源制御部は、前記少なくとも二つの副期間の各々の前記第 2 のフィードバック期間における各波形周期内の j 番目の位相期間のための前記高周波電力の前記周波数を、前記少なくとも二つの副期間の各々において先行する前記波形周期の繰り返しにおける前記 j 番目の位相期間の前記高周波電力の前記周波数の変化と前記高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整するよう構成されている、

請求項 1 ～ 3 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項8]

前記少なくとも二つの副期間の各々の長さは、前記フィードバック期間の長さとも一致する、請求項 1 ～ 3 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項9]

プラズマ処理装置のチャンバ内でプラズマを生成するために、高周波電力を供給するように構成された高周波電源と、

前記チャンバ内に設けられた基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために、波形周期の時間間隔で繰り返して前記基板支持部に電気バイアスを供給するように構成されたバイアス電源と、

電源制御部と、

を備え、

前記電源制御部は、変調周期の繰り返しにおいて前記高周波電力のパワーレベルを周期的に変調するように構成されており、

前記変調周期は複数の副期間を含み、該複数の副期間は前記高周波電力のパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間を含み、該少なくとも二つの副期間

の各々はその開始時点から続くフィードバック期間を含み、

前記電源制御部は、前記フィードバック期間に含まれる前記変調周期内の k 番目の位相期間のための前記高周波電力の周波数を、先行する前記変調周期の繰り返しにおける前記 k 番目の位相期間の前記高周波電力の前記周波数の変化と前記高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整するように構成されている、
電源システム。

[請求項10]

(a) プラズマ処理装置のチャンバ内でプラズマを生成するために高周波電源から高周波電力を供給する工程と、

(b) 前記チャンバ内に配置された基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために、波形周期の時間間隔で繰り返して前記基板支持部に電気バイアスを供給する工程と、
を含み、

前記(a)は、

(c) 変調周期の繰り返しにおいて前記高周波電力のパワーレベルを周期的に変調する工程であり、前記変調周期は複数の副期間を含み、該複数の副期間は前記高周波電力のパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間を含み、該少なくとも二つの副期間の各々はその開始時点から続くフィードバック期間を含む、該工程と、

(d) 前記フィードバック期間に含まれる前記変調周期内の k 番目の位相期間のための前記高周波電力の周波数を調整する工程であり、該変調周期内の該 k 番目の位相期間のための前記高周波電力の前記周波数は、先行する前記変調周期の繰り返しにおける前記 k 番目の位相期間の前記高周波電力の前記周波数の変化と前記高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整される、該工程と、

を含む、制御方法。