

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、ソース高周波電力のソース周波数の変動を抑制しつつ、ソース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、バイアス電源、高周波電源、及び電源制御部を備える。基板支持部は、チャンバ内に設けられている。バイアス電源は、基板支持部に電氣的に結合されており、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。高周波電源は、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ている。電源制御部は、電気バイアスの波形周期の系列における i 番目の波形周期の複数の位相期間のうち n 番目の位相期間において、事前に決定されたソース周波

数 $f[i, n]$ を有するソース高周波電力を高周波電源から供給する。電源制御部は、 i 番目の波形周期内の n 番目の位相期間におけるソース高周波電力の反射の度合いに応じて系列における後の波形周期内の n 番目の位相期間のためのソース高周波電力のソース周波数 $f[i+1, n]$ を決定する。電源制御部は、ソース周波数の決定において、 i 番目の波形周期内の n 番目の位相期間におけるソース高周波電力の反射の度合いが周波数変更条件を満たすほどに大きい場合には、事前に決定されたシフト値 $\Delta f[n]$ をソース周波数 $f[i, n]$ に加えた周波数をソース周波数 $f[i+1, n]$ として設定する。電源制御部は、反射の度合いが周波数変更条件を満たさない場合には、ソース周波数 $f[i, n]$ をソース周波数 $f[i+1, n]$ に設定する。電源制御部は、シフト値 $\Delta f[n]$ の決定において、系列における i 番目の波形周期までに n 番目の位相期間におけるソース高周波電力の反射の度合いが増加傾向でない場合には、シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を維持する。電源制御部は、系列における i 番目の波形周期までに n 番目の位相期間における反射の度合いが増加傾向である場合には、シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を変更する。電源制御部は、 i 番目の波形周期においてソース周波数 $f[i, n]$ と $(n-u)$ 番目の位相期間のソース周波数 $f[i, n-u]$ との差の絶対値及びソース周波数 $f[i, n]$ と $(n+u)$ 番目の位相期間のソース周波数 $f[i, n+u]$ 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、シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を変更する。

発明の効果

[0006] 一つの例示的实施形態によれば、ソース高周波電力のソース周波数の変動を抑制しつつ、ソース高周波電力の反射を抑制することが可能である。

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]電気バイアスエネルギーの波形の例を示す図である。

[図4]図4の(a)及び図4の(b)の各々は、一つの例示的实施形態に係るプラズマ処理装置におけるソース高周波電力及び電気バイアスの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制御方法の流れ図である。

[図6]図5に示す工程STbにおける処理の例を示す流れ図である。

[図7]図6に示す工程ST9における処理の例を示す流れ図である。

[図8]図5に示す工程STbにおける処理の別の例を示す流れ図である。

[図9]図8に示す工程ST9における処理の例を示す流れ図である。

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

ively 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2a2及び通信インターフェース2a3を含んでもよい。制御部2は、例えばコンピュータ2aにより実現される。処理部2a1は、記憶部2a2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2a2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2a2に格納され、処理部2a1によって記憶部2a2から読み出されて実行される。媒体は、コンピュータ2a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2a3に接続されている通信回線であってもよい。処理部2a1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2a2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2a3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 10、ガス供給部 20、電源システム 30 及び排気システム 40 を含む。また、プラズマ処理装置 1 は、基板支持部 11 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 10 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 13 を含む。基板支持部 11 は、プラズマ処理チャンバ 10 内に配置される。シャワーヘッド 13 は、基板支持部 11 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 13 は、プラズマ処理チャンバ 10 の天部 (ceiling) 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 1 1 1 0 の上に配置される。静電チャック 1 1 1 1 は、セラミック部材 1 1 1 1 a とセラミック部材 1 1 1 1 a 内に配置される静電電極 1 1 1 1 b とを含む。セラミック部材 1 1 1 1 a は、中央領域 1 1 1 a を有する。一実施形態において、セラミック部材 1 1 1 1 a は、環状領域 1 1 1 b 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 1 1 1 1 を囲む他の部材が環状領域 1 1 1 b を有してもよい。この場合、リングアセンブリ 1 1 2 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 1 1 1 1 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 1 1 2 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 1 1 は、静電チャック 1 1 1 1、リングアセンブリ 1 1 2 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 1 1 1 0 a、又はこれらの組み合わせを含んでもよい。流路 1 1 1 0 a 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 1 1 1 0 a が基台 1 1 1 0 内に形成され、1 又は複数のヒータが静電チャック 1 1 1 1 のセラミック部材 1 1 1 1 a 内に配置される。また、基板支持部 1 1 は、基板 W の裏面と中央領域 1 1 1 a 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 1 3 は、ガス供給部 2 0 からの少なくとも 1 つの処理ガスをプラズマ処理空間 1 0 s 内に導入するように構成される。シャワーヘッド 1 3 は、少なくとも 1 つのガス供給口 1 3 a、少なくとも 1 つのガス拡散室 1 3 b、及び複数のガス導入口 1 3 c を有する。ガス供給口 1 3 a に供給された処理ガスは、ガス拡散室 1 3 b を通過して複数のガス導入口 1 3 c からプラズマ処理空間 1 0 s 内に導入される。また、シャワーヘッド 1 3 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。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、ソース高周波電力HFを発生するように構成されている。ソース高周波電力HFは、ソース周波数を有する。即ち、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_s 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CY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CYの繰り返しである複数の波形周期CYの各々においてバイアス電極に与えられる。波形周期CYは、バイアス周波数で規定される。バイアス周波数は、例えば50kHz以上、27MHz以下の周波数である。波形周期CY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32は、整合器34を介して、バイアス電極に電氣的に接続される。整合器34の可変インピーダンスは、バイアス高周波電力LFの負荷からの反射を低減するよう、設定される。

[0029] 或いは、電気バイアスEBは、電圧パルスVPを含んでいてもよい。電圧パルスVPは、波形周期CY内においてバイアス電極に印加される。電圧パルスVPは、波形周期CY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VP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VP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VPは、基板Wの電位が負電位である期間を波形周期CY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VP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VP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EBが電圧パルスVPである場合には、プラズマ処理装置1は整合器34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35及び／又はセンサ36を更に備えていてもよい。センサ35は、ソース高周波電力HFの負荷からの反射波のパワーレベルPrを測定するように構成されている。センサ

35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31と整合器33との間に設けられていてもよい。センサ35は、ソース高周波電力HF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35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31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35から高周波電源31に通知されてもよい。センサ35は、反射率、即ち、 P_r / P_f を高周波電源31に通知してもよい。反射率は、高周波電源31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HF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] 以下、図2及び図3と共に、図4(a)及び図4(b)を参照する。図4の(a)及び図4の(b)の各々は、一つの例示的实施形態に係るプラズマ処理装置におけるソース高周波電力及び電気バイアスの一例のタイミングチャートである。これらの図において、ソース高周波電力HFの「ON」は、

ソース高周波電力HFが供給されていることを示しており、ソース高周波電力HFの「OFF」は、ソース高周波電力HFの供給が停止されていることを示している。また、図4の(b)において、ソース高周波電力HFの「HIGH」は、「LOW」で示されるパワーレベルよりも高いパワーレベルを有するソース高周波電力HFが供給されていることを示している。また、図4の(b)において、ソース高周波電力HFの「LOW」は、「HIGH」で示されるパワーレベルよりも低いパワーレベルを有するソース高周波電力HFが供給されていることを示している。また、これらの図において、電気バイアスEBの「ON」は、電気バイアスEBが供給されていることを示しており、電気バイアスEBの「OFF」は、電気バイアスEBの供給が停止されていることを示している。図4の(b)において、電気バイアスEB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EBが供給されていることを示している。また、図4の(b)において、電気バイアスEBの「LOW」は、「HIGH」で示されるレベルよりも低いレベルを有する電気バイアスEBが供給されていることを示している。なお、電気バイアスEBがバイアス高周波電力LFである場合には、電気バイアスEBのレベルは、バイアス高周波電力LFのパワーレベルである。電気バイアスEBが電圧パルスVPを含む場合には、電気バイアスEB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EBが電圧パルスVPを含む場合には、電気バイアスEBのレベルは、基準電圧（例えば0V）に対する電圧パルスVPの負方向への電圧レベルの絶対値であってもよい。

[0033] 高周波電源31は、バイアス電源32からの電気バイアスEBの周期的な供給と並行して、ソース高周波電力HFを供給するように構成されている。即ち、図4の(a)に示すように、電気バイアスEB及びソース高周波電力HFは、プロセスの開始から終了までの間、同時且つ連続的に供給されてもよい。

[0034] 或いは、図4の(b)に示すように、電気バイアスEBのパルス及びソー

ス高周波電力HFのパルスが、互いに同期して供給されてもよい。即ち、パルス期間 PP_1 , PP_2 , PP_3 , $\dots$ (即ち、複数のパルス期間PP)の各々において、電気バイアスEBのパルス及びソース高周波電力HFのパルスが同時に供給されてもよい。複数のパルス期間PPの各々は、複数の波形周期CYを含んでいる。即ち、複数のパルス期間PPの各々において、電気バイアスEBが周期的に供給される。なお、電気バイアスEBのパルスは、交互に供給状態(図4の(b)のONの状態)と停止状態(図4の(b)のONのOFFの状態)をとるON/OFFパルスであってもよい。或いは、電気バイアスEBのパルスは、交互に高レベル状態(図4の(b)のHIGHの状態)とLOWレベル状態(図4の(b)のLOWの状態)をとるHIGH/LOWパルスであってもよい。また、ソース高周波電力HFのパルスは、交互に供給状態(図4の(b)のONの状態)と停止状態(図4の(b)のONのOFFの状態)をとるON/OFFパルスであってもよい。或いは、ソース高周波電力HFのパルスは、交互に高レベル状態(図4の(b)のHIGHの状態)とLOWレベル状態(図4の(b)のLOWの状態)をとるHIGH/LOWパルスであってもよい。また、ソース高周波電力HFのパワーレベルは、ソース高周波電力HFがONである期間において、変調されてもよい。また、ソース高周波電力HFのパワーレベルは、ソース高周波電力HFのパワーレベルがHIGHである期間において、変調されてもよい。また、ソース高周波電力HFのパワーレベルは、ソース高周波電力HFのパワーレベルがLOWである期間において、変調されてもよい。

[0035] 高周波電源31は、ソース高周波電力HFの負荷からの反射を抑制するために、各波形周期CY内の複数の位相期間SPの各々のためのソース高周波電力HFのソース周波数を調整するように構成されている。複数の位相期間SPは、波形周期CYを分割する複数の期間である。図3に示すように、各波形周期CYは、複数の位相期間SPとして、位相期間 $SP_1 \sim SP_N$ に分割される。「N」は、各波形周期CYにおける位相期間の個数である。

[0036] 高周波電源31におけるソース周波数の調整は、信号発生器31gによる

高周波信号の周波数の調整により、行われてもよい。ソース周波数は、電源制御部において決定される。電源制御部は、高周波電源 3 1 内に設けられていてもよく、高周波電源 3 1 の外部に設けられていてもよい。信号発生器 3 1 g が電源制御部として機能してもよく、高周波電源 3 1 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。

[0037] 以下、図 5～図 7 を参照しつつ、ソース周波数の制御方法について説明する。また、電源制御部によるソース周波数の決定に関連する処理について説明する。図 5 は、一つの例示的实施形態に係る制御方法の流れ図である。図 6 は、図 5 に示す工程 S T b における処理の例を示す流れ図である。図 7 は、図 6 に示す工程 S T 9 における処理の例を示す流れ図である。

[0038] 図 5 に示す制御方法（以下、「方法 M T」という）は、工程 S T a 及び工程 S T b を含む。工程 S T a では、電気バイアス E B がバイアス電源 3 2 からバイアス電極に供給される。工程 S T b では、チャンバ 1 0 内でガスからプラズマを生成するために高周波電源 3 1 からソース高周波電力 H F が高周波電極に供給される。図 4 の（a）に示すように、ソース高周波電力 H F 及び電気バイアス E B は、同時且つ連続的に供給されてもよい。或いは、図 4 の（b）に示すように、互いに同期したソース高周波電力 H F のパルス及び電気バイアス E B のパルスが、供給されてもよい。

[0039] 工程 S T b において、電源制御部は、波形周期 C Y の系列 C Y S における i 番目の波形周期 C Y_i 内の n 番目の位相期間 S P_n において、事前に決定されたソース周波数 $f[i, n]$ を有するソース高周波電力 H F を、高周波電源 3 1 から供給する。そして、電源制御部は、波形周期 C Y_i 内の位相期間 S P_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] に応じて、系列 C Y S における後の波形周期 C Y_{i+1 f b} 内の位相期間 S P_n のためのソース周波数 $f[i+1 f b, n]$ を決定する。即ち、電源制御部は、反射の度合い P_d[i, n] に応じてソース周波数 $f[i+1 f b, n]$ を調整するフィードバック処理を行う。ここで、「1 f b」は、1 以上の整数である。

- [0040] フィードバック処理は、第1のフィードバック処理及び／又は第2のフィードバック処理を含む。第1のフィードバック処理は、図4の(a)に示すようにソース高周波電力HF及び電気バイアスEBが同時且つ連続的に供給される場合に適用される。第1のフィードバック処理において、系列CYSは、連続的に繰り返す複数の波形周期CYから構成される。
- [0041] 第2のフィードバック処理は、図4の(b)に示すように互いに同期したソース高周波電力HFのパルス及び電気バイアスEBのパルスが供給される場合に適用される。第2のフィードバック処理において、系列CYSは、複数のパルス期間PPのそれぞれにおける同一順番の波形周期CY、即ち複数のパルス期間PPのそれぞれにおけるk番目の波形周期CY_kから構成される。なお、図4の(b)に示す例の場合には、複数のパルス期間PPの各々の全ての波形周期CYに対して第2のフィードバック処理が適用されてもよい。或いは、複数のパルス期間PPの各々の1番目からK₁番目までの波形周期CYの各々については、第2のフィードバック処理が適用されてもよく、複数のパルス期間PPの各々の(K₁+1)番目から最後の波形周期CYについては、第1のフィードバック処理が適用されてもよい。なお、K₁は、1以上の整数である。或いは、複数のパルス期間PPの各々の1番目からK₁番目までの波形周期CYの各々については、第2のフィードバック処理が適用されてもよく、複数のパルス期間PPの各々の(K₁+1)番目から最後の波形周期CYの各々においては、K₁番目の波形周期CYの各位相期間のソース周波数が同一の位相期間において用いられてもよい。
- [0042] 以下、工程STbにおけるフィードバック処理の例について説明する。以下に説明するフィードバック処理の例は、上述の「lfb」が1である場合の例である。しかしながら、上述したように、「lfb」は、1よりも大きい整数であってもよい。
- [0043] 図6に示すように、工程STbは、工程ST1～工程ST9を含んでいてもよい。工程ST1～工程ST9は、系列CYSにおける各波形周期CY内の複数の位相期間SP、即ち位相期間SP₁～SP_Nの各々に対して行われる

。

[0044] 工程ST1では、電源制御部は、 i を1に設定する。「 i 」は、系列CY S内の波形周期CYの順番を表している。続く工程ST2では、電源制御部は、ソース周波数 $f[i, n]$ 及びシフト値 $\Delta f[i, n]$ を設定する。工程ST2では、ソース周波数 $f[i, n]$ 及びシフト値 $\Delta f[i, n]$ 、即ち、ソース周波数 $f[1, n]$ 及びシフト値 $\Delta f[1, n]$ は、事前に設定されたそれぞれの数値に設定される。

[0045] 続く工程ST3では、電源制御部は、系列CY Sにおける波形周期CY _{i} 内の位相期間SP _{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。

[0046] 続く工程ST4では、電源制御部は、系列CY Sにおける波形周期CY _{i} 内の位相期間SP _{n} におけるソース高周波電力HF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否かを判定する。工程ST4において、周波数変更条件は、系列CY Sにおける波形周期CY _{i} 内の位相期間SP _{n} におけるソース高周波電力HF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。工程ST4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SP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。

[0047] 工程ST4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ST5において、系列CY Sにおける後の波形周期CY _{$i+1$} 内の位相期間SP _{n} のためのソース周波数 $f[i+1, n]$ を、次式により設定する。

$$f[i+1, n] = f[i, n] + \Delta f[i, n]$$

[0048] 一方、工程ST4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ST5において、ソース周波数 $f[i+1, n]$ を、次式により設定する。

$$f[i+1, n] = f[i, n]$$

- [0049] 続く工程ST7では、電源制御部は、 i を1だけ増分する。続く工程ST8では、電源制御部は、系列CYSにおける波形周期CY_i内の位相期間SP_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。
- [0050] 続く工程ST9では、電源制御部は、反射の度合い $P_d[i, n]$ に応じて系列CYSにおける後の波形周期CY_{i+1}内の位相期間SP_nのためのソース周波数 $f[i+1, n]$ を決定する。
- [0051] 図7に示すように、工程ST9は、工程ST901で開始する。工程ST901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ST901において、反射の度合い $P_d[i, n]$ は、 $P_d[i, n] > P_d[i-1, n]$ 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、系列CYSにおける i 番目の波形周期CY_iまでの二つ以上の波形周期CYにわたって n 番目の位相期間SP_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。
- [0052] 工程ST901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ST902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ST902において、シフト値 $\Delta f[i, n]$ を次式により設定する。
- $$\Delta f[i, n] = \Delta f[i-1, n]$$
- [0053] 一方、工程ST901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ST903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ST903において、シフト値 $\Delta f[i, n]$ を次式により設定する。
- $$\Delta f[i, n] = -\Delta f[i-1, n]$$
- [0054] 続く工程ST904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、波形周期CY_iにおいてソース周波数 $f[i, n]$ と $(n-u)$ 番目の位相期間SP_{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 $(n + u)$ 番目の位相期間 SP_{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、波形周期 CY_i においてソース周波数 $f[i, n]$ 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。

[0055] 工程 $ST904$ 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 $ST904$ において、シフト方向変更条件は、 u が 1 から 1 より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。

[0056] 工程 $ST904$ 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 $ST905$ 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 $ST905$ において、シフト値 $\Delta f[i, n]$ を、次式により設定する。

$$\Delta f[i, n] = |\Delta f[i - 1, n]| * \text{sign}(f[i, n] - f[i, n - u])$$

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。

[0057] 一方、工程 $ST904$ 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 $ST906$ 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 $ST906$ において、シフト値 $\Delta f[i, n]$ を、次式により設定する。

$$\Delta f[i, n] = \Delta f[i, n]$$

[0058] 続く工程ST907では、電源制御部は、系列CYSにおける波形周期CY_i内の位相期間SP_nにおけるソース高周波電力HF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否かを判定する。工程ST907において、周波数変更条件は、系列CYSにおける波形周期CY_i内の位相期間SP_nにおけるソース高周波電力HF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。

[0059] 一次実施形態では、系列CYS内の何れかの波形周期における位相期間SP_nでの反射の度合いと第1の閾値P_{th1}[n]との比較の結果、当該反射の度合いが小さいと判断された場合には、以後に工程ST907において位相期間SP_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ST907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SP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。

[0060] 具体的には、系列CYS内の何れかの波形周期における位相期間SP_nでの反射の度合いが第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ST907において位相期間SP_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、系列CYS内の何れかの波形周期における位相期間SP_nでの反射の度合いが第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ST907において位相期間SP_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。

[0061] 工程ST907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ST908において、系列CYSにおける後の波形周期CY_{i+1}内の位相期間SP_nのためのソース周波数f[i+1, n]を、次式により設定する。

$$f[i+1, n] = f[i, n] + \Delta f[i, n]$$

[0062] 一方、工程ST907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ST909において、ソース周波数 $f[i+1, n]$ を、次式により設定する。

$$f[i+1, n] = f[i, n]$$

[0063] 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 $f[i+1, n]$ 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、波形周期CY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、波形周期CY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。

[0064] 以下、図8及び図9を参照して、工程STbにおける処理の別の例を説明する。図8は、図5に示す工程STbにおける処理の別の例を示す流れ図である。図9は、図8に示す工程ST9における処理の例を示す流れ図である。以下、図8及び図9に示す工程STbにおける処理について、図5及び図6に示す処理に対する相違点の観点から説明する。図8及び図9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。

[0065] 具体的には、図8に示すように、電源制御部は、工程ST1と工程ST3との間の工程ST2a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ST2a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、事前に設定されたそれぞれの数値に設定される。

[0066] 工程ST4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ST4と工程ST5の間の工程ST5aにおいて、

シフト値 $\Delta f[i, n]$ を次式により設定する。

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

[0067] そして、工程ST8に続く工程ST9aにおいて、電源制御部は、反射の度合い $P_d[i, n]$ に応じて系列CYSにおける後の波形周期 CY_{i+1} 内の位相期間 SP_n のためのソース周波数 $f[i+1, n]$ を決定する。

[0068] 図9に示すように、工程ST9aは、工程ST901で開始する。工程ST901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ST902a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ST902aにおいて、係数 $\alpha[i, n]$ を次式により設定する。

$$\alpha[i, n] = \alpha[i-1, n]$$

[0069] 一方、工程ST901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ST903a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ST903aにおいて、係数 $\alpha[i, n]$ を次式により設定する。

$$\alpha[i, n] = -\alpha[i-1, n]$$

[0070] 図9に示すように、工程ST904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ST905a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ST905aにおいて、係数 $\alpha[i, n]$ を、次式により設定する。

$$\alpha[i, n] = |\alpha[i-1, n]| * \text{sign}(f[i, n] - f[i, n-u])$$

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。

[0071] 一方、工程ST904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ST906a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ST906aにおいて、係数 $\alpha[i, n]$ を、次式により設定する。

$$\alpha[i, n] = \alpha[i, n]$$

[0072] 図9に示すように、工程ST907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ST907と工程ST908との間の工程ST908aにおいて、電源制御部は、シフト値 $\Delta f[i, n]$ を次式により設定する。

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

[0073] 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、波形周期 CY_i 内の位相期間 SP_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HFの反射の大きさを反映する。複数の位相期間 SP 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。

[0074] 反射の度合い $P_d[i, n]$ は、波形周期 CY_i 内の位相期間 SP_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、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。

[0075] 一実施形態では、反射の度合い $P_d[i, n]$ は、波形周期 CY_i 内の位相期間 SP_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 SP_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 SP におけるソース高周波電力HF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。

[0076] 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ることで他の実施形態を形成することが可能である。

[0077] 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 17] に記載する。

[0078] [E 1]

チャンバと、

前記チャンバ内に設けられた基板支持部と、

前記基板支持部に電気的に結合されており、該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、

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、

電源制御部と、

を備え、

前記電源制御部は、

前記電気バイアスの波形周期の系列における i 番目の波形周期の複数の位相期間のうち n 番目の位相期間において、事前に決定されたソース周波数 $f[i, n]$ を有する前記ソース高周波電力を前記高周波電源から供給し、

前記 i 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いに応じて前記系列における後の波形周期内の前記 n 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 $f[i + 1, n]$ を決定し、

前記ソース周波数の決定において、前記 i 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いが周波数変更条件を満たすほどに大きい場合には、事前に決定されたシフト値 $\Delta f[n]$ を前記ソース周波数 $f[i, n]$ に加えた周波数を前記ソース周波数 $f[i + 1, n]$ として設定し、該反射の度合いが前記周波数変更条件を満たさない場合には、前記ソース周波数 $f[i, n]$ を前記ソース周波数 $f[i + 1, n]$ に設定し、

前記シフト値 $\Delta f[n]$ の決定において、

前記系列における前記 i 番目の波形周期までに前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いが増加傾向でない場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を維持し、前記系列における前記 i 番目の波形周期までに前記 n 番目の位相期間における前記反射の度合いが増加傾向である場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を変更し、

前記 i 番目の波形周期において前記ソース周波数 $f[i, n]$ と $(n - u)$ 番目の位相期間の前記ソース高周波電力のソース周波数 $f[i, n - u]$ との差の絶対値及び前記ソース周波数 $f[i, n]$ と $(n + u)$ 番目の位相期間の前記ソース高周波電力のソース周波数 $f[i, n + u]$ との差の絶対値の各々と所定値との比較の結果、前記ソース周波数の変化が大きいと判断され、且つ、前記ソース周波数 $f[i, n - u]$ 及び前記ソース周波数 $f[i, n + u]$ の双方が前記ソース周波数 $f[i, n]$ よりも大きい、小さい場合に、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を変更する、

ように構成されている、

プラズマ処理装置。

[0079] [E 2]

前記電源制御部は、前記系列における前記 i 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間における前記反射の度合いと第 1 の閾値との比較の結果、前記反射の度合いが小さいと判断される場合に、前記系列における前記 i 番目の波形周期の後の波形周期において前記 n 番目の位相期間における前記反射の度合いと第 2 の閾値との比較の結果、前記反射の度合いが大きいと判定されるまで、前記 n 番目の位相期間のための前記ソース周波数を変更しないように構成されており、

前記第 2 の閾値は、前記第 1 の閾値以上である、

E 1 に記載のプラズマ処理装置。

[0080] [E 3]

前記電源制御部は、前記系列における前記 i 番目の波形周期までの二つ以

上の波形周期にわたって前記 n 番目の位相期間における前記反射の度合いが増加傾向である場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を変更するように構成されている、E 1 又は E 2 に記載のプラズマ処理装置。

[0081] [E 4]

前記電源制御部は、前記系列における前記 i 番目の波形周期において前記ソース周波数 $f[i, n]$ と前記ソース周波数 $f[i, n-u]$ との差の絶対値及び前記ソース周波数 $f[i, n]$ と前記ソース周波数 $f[i, n+u]$ との差の絶対値の各々と所定値との比較の結果、前記ソース周波数の変化が大きいと判断され、且つ、前記ソース周波数 $f[i, n-u]$ 及び前記ソース周波数 $f[i, n+u]$ の双方が前記ソース周波数 $f[i, n]$ よりも大きい、小さいことが、前記 u が 1 から 1 より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る場合に、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を変更するように構成されている、E 1 ～ E 3 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0082] [E 5]

前記電源制御部は、前記 n 番目の位相期間における前記反射の度合いとして、前記 n 番目の位相期間内の複数のサンプル時点それぞれの前記ソース高周波電力の反射の大きさを反映する複数の評価値に窓関数を掛けることにより得られる平均値を用いるように、構成されており、

前記窓関数は、前記 n 番目の位相期間内の中央からの時間差に応じて減少する重みを有する、

E 1 ～ E 4 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0083] [E 6]

前記複数の位相期間それぞれの前記複数のサンプル時点の個数は、同一である、E 5 に記載のプラズマ処理装置。

[0084] [E 7]

前記複数の評価値の各々は、前記ソース高周波電力の反射波のパワーレベル又は前記ソース高周波電力の反射率から求められる、E 5 又は E 6 に記載

のプラズマ処理装置。

[0085] [E 8]

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るか、該波形周期の時間長と同じ時間間隔で周期的に発生される電圧パルスを含む、E 1 ～ E 7 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0086] [E 9]

プラズマ処理装置のチャンバ内に設けられた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、

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、

電源制御部と、

を備え、

前記電源制御部は、

前記電気バイアスの波形周期の系列における i 番目の波形周期の複数の位相期間のうち n 番目の位相期間において、事前に決定されたソース周波数 $f[i, n]$ を有する前記ソース高周波電力を前記高周波電源から供給し、

前記 i 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いに応じて前記系列における後の波形周期内の前記 n 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 $f[i + 1, n]$ を決定し、

前記ソース周波数の決定において、前記 i 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いが周波数変更条件を満たすほどに大きい場合には、事前に決定されたシフト値 $\Delta f[n]$ を前記ソース周波数 $f[i, n]$ に加えた周波数を前記ソース周波数 $f[i + 1, n]$ として設定し、該反射の度合いが前記周波数変更条件を満たさない場合には、前記ソース周波数 $f[i, n]$ を前記ソース周波数 $f[i + 1, n]$ に設定し、

前記シフト値 $\Delta f[n]$ の決定において、

前記系列における前記 i 番目の波形周期までに前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いが増加傾向でない場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を維持し、前記系列における前記 i 番目の波形周期までに前記 n 番目の位相期間における前記反射の度合いが増加傾向である場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を変更し、

前記 i 番目の波形周期において前記ソース周波数 $f[i, n]$ と $(n - u)$ 番目の位相期間の前記ソース高周波電力のソース周波数 $f[i, n - u]$ との差の絶対値及び前記ソース周波数 $f[i, n]$ と $(n + u)$ 番目の位相期間の前記ソース高周波電力のソース周波数 $f[i, n + u]$ との差の絶対値の各々と所定値との比較の結果、前記ソース周波数の変化が大きいと判断され、且つ、前記ソース周波数 $f[i, n - u]$ 及び前記ソース周波数 $f[i, n + u]$ の双方が前記ソース周波数 $f[i, n]$ よりも大きい、小さい場合に、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を変更する、

ように構成されている、

電源システム。

[0087] [E 1 0]

(a) プラズマ処理装置のチャンバ内に設けられた基板支持部にバイアス電源から電気バイアスを供給する工程と、

(b) 前記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、

を含み、

前記 (b) は、

(b-1) 前記電気バイアスの波形周期の系列における i 番目の波形周期の複数の位相期間のうち n 番目の位相期間において、事前に決定されたソース周波数 $f[i, n]$ を有する前記ソース高周波電力を前記高周波電源から供給する工程と、

(b-2) 前記 i 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間における前

記ソース高周波電力の反射の度合いに応じて前記系列における後の波形周期内の前記 n 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 $f[i+1, n]$ を決定する工程と、

を含み、

前記 (b-2) において、前記 i 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いが周波数変更条件を満たすほどに大きい場合には、事前に決定されたシフト値 $\Delta f[n]$ を前記ソース周波数 $f[i, n]$ に加えた周波数が前記ソース周波数 $f[i+1, n]$ として設定され、該反射の度合いが前記周波数変更条件を満たさない場合には、前記ソース周波数 $f[i, n]$ が前記ソース周波数 $f[i+1, n]$ に設定され、

前記シフト値 $\Delta f[n]$ の決定において、

前記系列における前記 i 番目の波形周期までに前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いが増加傾向でない場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号が維持され、前記系列における前記 i 番目の波形周期までに前記 n 番目の位相期間における前記反射の度合いが増加傾向である場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号が変更され、

前記 i 番目の波形周期において前記ソース周波数 $f[i, n]$ と $(n-u)$ 番目の位相期間の前記ソース高周波電力のソース周波数 $f[i, n-u]$ との差の絶対値及び前記ソース周波数 $f[i, n]$ と $(n+u)$ 番目の位相期間の前記ソース高周波電力のソース周波数 $f[i, n+u]$ との差の絶対値の各々と所定値との比較の結果、前記ソース周波数の変化が大きいと判断され、且つ、前記ソース周波数 $f[i, n-u]$ 及び前記ソース周波数 $f[i, n+u]$ の双方が前記ソース周波数 $f[i, n]$ よりも大きい、小さい場合に、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号が変更される、
制御方法。

[0088] [E 1 1]

前記 (b) において、前記系列における前記 i 番目の波形周期内の前記 n

番目の位相期間における前記反射の度合いと第1の閾値との比較の結果、前記反射の度合いが小さいと判断される場合に、前記系列における前記i番目の波形周期の後の波形周期において前記n番目の位相期間における前記反射の度合いと第2の閾値との比較の結果、前記反射の度合いが大きいと判定されるまで、前記n番目の位相期間のための前記ソース周波数が変更されず、

前記第2の閾値は、前記第1の閾値以上である、

E10に記載の制御方法。

[0089] [E12]

前記シフト値 $\Delta f[n]$ の決定において、前記系列における前記i番目の波形周期までの二つ以上の波形周期にわたって前記n番目の位相期間における前記反射の度合いが増加傾向である場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号が変更される、E10又はE11に記載の制御方法。

[0090] [E13]

前記シフト値 $\Delta f[n]$ の決定において、前記系列における前記i番目の波形周期において前記ソース周波数 $f[i, n]$ と前記ソース周波数 $f[i, n-u]$ との差の絶対値及び前記ソース周波数 $f[i, n]$ と前記ソース周波数 $f[i, n+u]$ との差の絶対値の各々と所定値との比較の結果、前記ソース周波数の変化が大きいと判断され、且つ、前記ソース周波数 $f[i, n-u]$ 及び前記ソース周波数 $f[i, n+u]$ の双方が前記ソース周波数 $f[i, n]$ よりも大きい、小さいことが、前記uが1から1より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る場合に、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号が変更される、E10～E12の何れか一項に記載の制御方法。

[0091] [E14]

前記n番目の位相期間における前記反射の度合いとして、前記n番目の位相期間内の複数のサンプル時点それぞれの前記ソース高周波電力の反射の大きさを反映する複数の評価値に窓関数を掛けることにより得られる平均値が用いられ、

前記窓関数は、前記 n 番目の位相期間内の中央からの時間差に応じて減少する重みを有する、

E 1 0 ~ E 1 3 の何れか一項に記載の制御方法。

[0092] [E 1 5]

前記複数の位相期間それぞれの前記複数のサンプル時点の個数は、同一である、E 1 4 に記載の制御方法。

[0093] [E 1 6]

前記複数の評価値の各々は、前記ソース高周波電力の反射波のパワーレベル又は前記ソース高周波電力の反射率から求められる、E 1 4 又は E 1 5 に記載の制御方法。

[0094] [E 1 7]

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るか、該波形周期の時間長と同じ時間間隔で周期的に発生される電圧パルスを含む、E 1 0 ~ E 1 6 の何れか一項に記載の制御方法。

[0095] 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

[0096] 1 … プラズマ処理装置、1 0 … チャンバ、1 1 … 基板支持部、3 1 … 高周波電源、3 2 … バイアス電源。

請求の範囲

[請求項1]

チャンバと、
前記チャンバ内に設けられた基板支持部と、
前記基板支持部に電氣的に結合されており、該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、
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、
電源制御部と、
を備え、
前記電源制御部は、
前記電気バイアスの波形周期の系列における i 番目の波形周期の複数の位相期間のうち n 番目の位相期間において、事前に決定されたソース周波数 $f[i, n]$ を有する前記ソース高周波電力を前記高周波電源から供給し、
前記 i 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いに応じて前記系列における後の波形周期内の前記 n 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 $f[i + 1, n]$ を決定し、
前記ソース周波数の決定において、前記 i 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いが周波数変更条件を満たすほどに大きい場合には、事前に決定されたシフト値 $\Delta f[n]$ を前記ソース周波数 $f[i, n]$ に加えた周波数を前記ソース周波数 $f[i + 1, n]$ として設定し、該反射の度合いが前記周波数変更条件を満たさない場合には、前記ソース周波数 $f[i, n]$ を前記ソース周波数 $f[i + 1, n]$ に設定し、
前記シフト値 $\Delta f[n]$ の決定において、
前記系列における前記 i 番目の波形周期までに前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いが増加傾向でな

い場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を維持し、前記系列における前記 i 番目の波形周期までに前記 n 番目の位相期間における前記反射の度合いが増加傾向である場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を変更し、

前記 i 番目の波形周期において前記ソース周波数 $f[i, n]$ と $(n-u)$ 番目の位相期間の前記ソース高周波電力のソース周波数 $f[i, n-u]$ との差の絶対値及び前記ソース周波数 $f[i, n]$ と $(n+u)$ 番目の位相期間の前記ソース高周波電力のソース周波数 $f[i, n+u]$ との差の絶対値の各々と所定値との比較の結果、前記ソース周波数の変化が大きいと判断され、且つ、前記ソース周波数 $f[i, n-u]$ 及び前記ソース周波数 $f[i, n+u]$ の双方が前記ソース周波数 $f[i, n]$ よりも大きい、小さい場合に、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を変更する、

ように構成されている、

プラズマ処理装置。

[請求項2]

前記電源制御部は、前記系列における前記 i 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間における前記反射の度合いと第1の閾値との比較の結果、前記反射の度合いが小さいと判断される場合に、前記系列における前記 i 番目の波形周期の後の波形周期において前記 n 番目の位相期間における前記反射の度合いと第2の閾値との比較の結果、前記反射の度合いが大きいと判定されるまで、前記 n 番目の位相期間のための前記ソース周波数を変更しないように構成されており、

前記第2の閾値は、前記第1の閾値以上である、

請求項1に記載のプラズマ処理装置。

[請求項3]

前記電源制御部は、前記系列における前記 i 番目の波形周期までの二つ以上の波形周期にわたって前記 n 番目の位相期間における前記反射の度合いが増加傾向である場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を変更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] 前記電源制御部は、前記系列における前記 i 番目の波形周期において前記ソース周波数 $f[i, n]$ と前記ソース周波数 $f[i, n - u]$ との差の絶対値及び前記ソース周波数 $f[i, n]$ と前記ソース周波数 $f[i, n + u]$ との差の絶対値の各々と所定値との比較の結果、前記ソース周波数の変化が大きいと判断され、且つ、前記ソース周波数 $f[i, n - u]$ 及び前記ソース周波数 $f[i, n + u]$ の双方が前記ソース周波数 $f[i, n]$ よりも大きい、小さいことが、前記 u が 1 から 1 より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る場合に、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を変更するように構成されている、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5] 前記電源制御部は、前記 n 番目の位相期間における前記反射の度合いとして、前記 n 番目の位相期間内の複数のサンプル時点それぞれの前記ソース高周波電力の反射の大きさを反映する複数の評価値に窓関数を掛けることにより得られる平均値を用いるように、構成されており、

前記窓関数は、前記 n 番目の位相期間内の中央からの時間差に応じて減少する重みを有する、

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6] 前記複数の位相期間それぞれの前記複数のサンプル時点の個数は、同一である、請求項 5 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項7] 前記複数の評価値の各々は、前記ソース高周波電力の反射波のパワーレベル又は前記ソース高周波電力の反射率から求められる、請求項 5 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項8] 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るか、該波形周期の時間長と同じ時間間隔で周期的に発生される電圧パルスを含む、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に設けられた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、

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、

電源制御部と、

を備え、

前記電源制御部は、

前記電気バイアスの波形周期の系列における i 番目の波形周期の複数の位相期間のうち n 番目の位相期間において、事前に決定されたソース周波数 $f[i, n]$ を有する前記ソース高周波電力を前記高周波電源から供給し、

前記 i 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いに応じて前記系列における後の波形周期内の前記 n 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 $f[i + 1, n]$ を決定し、

前記ソース周波数の決定において、前記 i 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いが周波数変更条件を満たすほどに大きい場合には、事前に決定されたシフト値 $\Delta f[n]$ を前記ソース周波数 $f[i, n]$ に加えた周波数を前記ソース周波数 $f[i + 1, n]$ として設定し、該反射の度合いが前記周波数変更条件を満たさない場合には、前記ソース周波数 $f[i, n]$ を前記ソース周波数 $f[i + 1, n]$ に設定し、

前記シフト値 $\Delta f[n]$ の決定において、

前記系列における前記 i 番目の波形周期までに前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いが増加傾向でない場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を維持し、前記系列における前記 i 番目の波形周期までに前記 n 番目の位相期間における前記

反射の度合いが増加傾向である場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を変更し、

前記 i 番目の波形周期において前記ソース周波数 $f[i, n]$ と $(n - u)$ 番目の位相期間の前記ソース高周波電力のソース周波数 $f[i, n - u]$ との差の絶対値及び前記ソース周波数 $f[i, n]$ と $(n + u)$ 番目の位相期間の前記ソース高周波電力のソース周波数 $f[i, n + u]$ との差の絶対値の各々と所定値との比較の結果、前記ソース周波数の変化が大きいと判断され、且つ、前記ソース周波数 $f[i, n - u]$ 及び前記ソース周波数 $f[i, n + u]$ の双方が前記ソース周波数 $f[i, n]$ よりも大きい、小さい場合に、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号を変更する、

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に設けられた基板支持部にバイアス電源から電気バイアスを供給する工程と、

(b) 前記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、

を含み、

前記 (b) は、

(b - 1) 前記電気バイアスの波形周期の系列における i 番目の波形周期の複数の位相期間のうち n 番目の位相期間において、事前に決定されたソース周波数 $f[i, n]$ を有する前記ソース高周波電力を前記高周波電源から供給する工程と、

(b - 2) 前記 i 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いに応じて前記系列における後の波形周期内の前記 n 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 $f[i + 1, n]$ を決定する工程と、

を含み、

前記 (b-2) において、前記 i 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いが周波数変更条件を満たすほどに大きい場合には、事前に決定されたシフト値 $\Delta f[n]$ を前記ソース周波数 $f[i, n]$ に加えた周波数が前記ソース周波数 $f[i+1, n]$ として設定され、該反射の度合いが前記周波数変更条件を満たさない場合には、前記ソース周波数 $f[i, n]$ が前記ソース周波数 $f[i+1, n]$ に設定され、

前記シフト値 $\Delta f[n]$ の決定において、

前記系列における前記 i 番目の波形周期までに前記 n 番目の位相期間における前記ソース高周波電力の反射の度合いが増加傾向でない場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号が維持され、前記系列における前記 i 番目の波形周期までに前記 n 番目の位相期間における前記反射の度合いが増加傾向である場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号が変更され、

前記 i 番目の波形周期において前記ソース周波数 $f[i, n]$ と $(n-u)$ 番目の位相期間の前記ソース高周波電力のソース周波数 $f[i, n-u]$ との差の絶対値及び前記ソース周波数 $f[i, n]$ と $(n+u)$ 番目の位相期間の前記ソース高周波電力のソース周波数 $f[i, n+u]$ との差の絶対値の各々と所定値との比較の結果、前記ソース周波数の変化が大きいと判断され、且つ、前記ソース周波数 $f[i, n-u]$ 及び前記ソース周波数 $f[i, n+u]$ の双方が前記ソース周波数 $f[i, n]$ よりも大きい、小さい場合に、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号が変更される、
制御方法。

[請求項11]

前記 (b) において、前記系列における前記 i 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間における前記反射の度合いと第1の閾値との比較の結果、前記反射の度合いが小さいと判断される場合に、前記系列における前記 i 番目の波形周期の後の波形周期において前記 n 番目の

位相期間における前記反射の度合いと第2の閾値との比較の結果、前記反射の度合いが大きいと判定されるまで、前記n番目の位相期間のための前記ソース周波数が変更されず、

前記第2の閾値は、前記第1の閾値以上である、
請求項10に記載の制御方法。

[請求項12] 前記シフト値 $\Delta f[n]$ の決定において、前記系列における前記i番目の波形周期までの二つ以上の波形周期にわたって前記n番目の位相期間における前記反射の度合いが増加傾向である場合には、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号が変更される、請求項10に記載の制御方法。

[請求項13] 前記シフト値 $\Delta f[n]$ の決定において、前記系列における前記i番目の波形周期において前記ソース周波数 $f[i, n]$ と前記ソース周波数 $f[i, n-u]$ との差の絶対値及び前記ソース周波数 $f[i, n]$ と前記ソース周波数 $f[i, n+u]$ との差の絶対値の各々と所定値との比較の結果、前記ソース周波数の変化が大きいと判断され、且つ、前記ソース周波数 $f[i, n-u]$ 及び前記ソース周波数 $f[i, n+u]$ の双方が前記ソース周波数 $f[i, n]$ よりも大きい、小さいことが、前記uが1から1より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る場合に、前記シフト値 $\Delta f[n]$ の符号が変更される、請求項10～12の何れか一項に記載の制御方法。

[請求項14] 前記n番目の位相期間における前記反射の度合いとして、前記n番目の位相期間内の複数のサンプル時点それぞれの前記ソース高周波電力の反射の大きさを反映する複数の評価値に窓関数を掛けることにより得られる平均値が用いられ、

前記窓関数は、前記n番目の位相期間内の中央からの時間差に応じて減少する重みを有する、
請求項10～12の何れか一項に記載の制御方法。

- [請求項15] 前記複数の位相期間それぞれの前記複数のサンプル時点の個数は、同一である、請求項 1 4 に記載の制御方法。
- [請求項16] 前記複数の評価値の各々は、前記ソース高周波電力の反射波のパワーレベル又は前記ソース高周波電力の反射率から求められる、請求項 1 4 に記載の制御方法。
- [請求項17] 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るか、該波形周期の時間長と同じ時間間隔で周期的に発生される電圧パルスを含む、請求項 1 0 ～ 1 2 の何れか一項に記載の制御方法。