

明 細 書

発明の名称：電源システム、プラズマ処理装置、及び制御方法

技術分野

[0001] 本開示の例示的实施形態は、電源システム、プラズマ処理装置、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、高周波電力の周波数の変動を抑制しつつ、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、チャンバ内に配置されている。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、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、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。波形周期は複数の位相期間を含み、複数の位相期間は該複数の位

相期間の個数よりも少ない複数の指定位相期間を含む。電源制御部は、波形周期の系列における i 番目の波形周期内の複数の指定位相期間のうち m 番目の指定位相期間のための高周波電力の周波数を、該系列における i 番目の波形周期までの m 番目の指定位相期間のため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から、高周波電力の反射を抑制するように調整して、複数の指定位相期間それぞれの高周波電力の周波数を決定する。電源制御部は、 i 番目の波形周期内の複数の位相期間のうち複数の指定位相期間以外の位相期間それぞれのための高周波電力の周波数を複数の指定位相期間それぞれの高周波電力の周波数を用いた補間により決定する。

発明の効果

[0006] 一つの例示的实施形態によれば、高周波電力の周波数の変動を抑制しつつ、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]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]図5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5の(b)は、図5の(a)に示す工程S T aの流れ図である。

[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タイミングチャートである。

[図8]図5の(b)に示す工程S T cにおける処理の例を示す流れ図である。

[図9]図8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。

[図10]図5の(b)に示す工程S T cにおける処理の別の例を示す流れ図で

ある。

[図11]図10に示す工程ST9aにおける処理の例を示す流れ図である。

[図12]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。

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 P

l a s m a) 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 2 a 1、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 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 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 11

11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。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を含んでいてもよい。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 50 kHz 以上、 27 MHz 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に、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 Pf を更に測定するように構成されていてもよい。

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] 電源システム30は、直流電源38を更に備えていてもよい。直流電源38は、上部電極に直流電圧DCS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(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、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。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。

[0034] 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。

[0035] 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 , ... (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。

[0036] 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PH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PH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PHとして、位相期間PH₁～PH_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。

[0037] 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。

[0038] 以下、図5の(a)、図5の(b)、図6、及び図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5の(b)は、図5の(a)に示す工程STaの流れ図である。図6及び図7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タイミングチャートである。

[0039] 図5の(a)に示す制御方法(以下、「方法MT」という)は、工程STa及び工程STbを含む。工程STaでは、チャンバ10内でガスから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HFが高周波電極に供給される。工程STbでは、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CYの時間間隔で繰り返して基板支持部11に電気バイアスEBが供給される。工程STa及び工程STbでは、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HFのパルス及び電気バイアスEBのパルスが、供給されてもよい。

[0040] 図5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及び工程STdにおいて、電源制御部は、波形周期CY内の複数の位相期間PHにおいて供給されるソース高周波電力HFのソース周波数fを決定する。図6に示すように、波形周期CY内の複数の位相期間PHは、複数の指定位相期間DPを含む。波形周期CY内の複数の指定位相期間DPの個数はM個である。Mは、波形周期CY内の複数の位相期間PHの個数であるNよりも少ない。なお、波形周期CY内の複数の指定位相期間DPの個数Mは図6の例では11であるが、個数Mは11に限定されるものではない。

[0041] 工程STcにおいて、電源制御部は、波形周期CY内の複数の指定位相期

間DPのためのソース周波数 f を、波形周期CYの系列CYSにおいてフィードバック処理を行うことにより決定する。フィードバック処理については、後述する。工程STdにおいて、電源制御部は、波形周期CY内の複数の位相期間PHのうち複数の指定位相期間DP以外の位相期間それぞれのためのソース周波数 f を、複数の指定位相期間DPのためのソース周波数 f を用いた補間により決定する。補間は、隣り合う二つの指定位相期間DPそれぞれのためのソース周波数 f を用いた線形補間であってもよい。補間は、他の方法による補間であってもよい。

[0042] 波形周期CY内の複数の指定位相期間DPの間隔は、波形周期CY内で基板Wの電位の変化が大きい区間において、波形周期CY内で基板Wの電位の変化が小さい区間の間隔よりも小さくなるように設定されてもよい。

[0043] 波形周期CYにおける複数の指定位相期間DPそれぞれの位相は予め定められていてもよい。図7に示すように、電気バイアスEBが電圧パルスVPを含む場合には、波形周期CYは、第1の期間 P_1 、第2の期間 P_2 、第3の期間 P_3 を含んでいてもよい。電圧パルスVPは、第1の期間 P_1 においてOFF状態である。第2の期間 P_2 は、第1の期間 P_1 に続いている。電圧パルスVPは、第2の期間 P_2 においてON状態である。第3の期間 P_3 は、第2の期間 P_2 に続いている。電圧パルスVPは、第3の期間 P_3 においてOFF状態である。

[0044] 一実施形態において、複数の指定位相期間DPは、それらの第2の期間 P_2 における間隔が、複数の指定位相期間DPの第1の期間 P_1 及び第3の期間 P_3 の各々におけるそれらの間隔よりも小さくなるように、予め定められていてもよい。この場合には、基板の電位が大きく変化する第2の期間 P_2 において、ソース高周波電力HFの反射をより効果的に抑制するようにソース周波数 f を調整することができる。

[0045] 一実施形態において、複数の指定位相期間DPの第3の期間 P_3 における間隔は、複数の指定位相期間DPの第1の期間 P_1 における間隔と同じであってもよく、複数の指定位相期間DPの第1の期間 P_1 の期間における間隔よりも

小さくてもよい。複数の指定位相期間 DP の第3の期間 P_3 における間隔が複数の指定位相期間 DP の第1の期間 P_1 の期間における間隔よりも小さい場合には、電圧パルス VP が ON 状態から OFF 状態に切り替わった直後でのソース高周波電力 HF の反射をより効果的に抑制するようにソース周波数 f を調整することができる。

[0046] 一実施形態において、第2の期間 P_2 は、第1の副期間 SP_1 、第2の副期間 SP_2 、及び第3の副期間 SP_3 を含んでもよい。第1の副期間 SP_1 は、第1の期間 P_1 の直後の期間である。第1の副期間 SP_1 において、電圧パルス VP の電圧レベルは、その基準電圧レベル（例えば、 $0V$ ）から設定電圧レベルまで負方向に変化する。第2の副期間 SP_2 は、第1の副期間 SP_1 に続いている。第2の副期間 SP_2 において、電圧パルス VP の電圧レベルは、その設定電圧レベルである。第3の副期間 SP_3 は、第2の副期間 SP_2 に続いている。第3の副期間 SP_3 において、電圧パルス VP の電圧レベルは、その設定電圧レベルから基準電圧レベルまで変化する。第1の副期間 SP_1 、第2の副期間 SP_2 、及び第3の副期間 SP_3 それぞれにおける複数の指定位相期間 DP の間隔は、同一であってもよく、互いに異なってもよい。

[0047] 一実施形態において、波形周期 CY の系列 CYS における各位相期間 PH について後述するフィードバック処理を行うことにより得られる波形周期 CY 内の複数の位相期間 PH それぞれのためのソース周波数 f から、複数の指定位相期間 DP が事前に決定されてもよい。具体的には、波形周期 CY 内の n 番目の位相期間 PH_n のソース周波数 $f[n]$ と波形周期 CY 内の $(n-u)$ 番目の位相期間 PH_{n-u} のソース周波数 $f[n-u]$ との差の絶対値及びソース周波数 $f[n]$ と波形周期 CY 内の $(n+u)$ 番目の位相期間 PH_{n+u} のソース周波数 $f[n+u]$ 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 $f[n-u]$ 及びソース周波数 $f[n+u]$ の双方がソース周波数 $f[n]$ よりも大きい、小さい場合に、位相期間 PH_n を除外するように、複数の位相期間 PH から複数の指定位相期間 DP が、事前に選択されてもよい。

- [0048] また、複数の指定位相期間 $D P$ は、電源制御部による計算によって決定されてもよい。一実施形態において、電源制御部は、準備期間において、波形周期 $C Y$ の系列 $C Y S$ における各位相期間 $P H$ について後述するフィードバック処理を行うことにより得られる波形周期 $C Y$ 内の複数の位相期間 $P H$ のためのソース周波数 f の系列を取得する。電源制御部は、ソース周波数 f の系列を平滑化することにより得られるソース周波数 f の系列においてソース周波数 f の変化が大きい区間ほど、複数の指定位相期間 $D P$ の間隔が小さくなるように、複数の指定位相期間 $D P$ を決定する。
- [0049] 一実施形態において、電源制御部は、電気バイアス $E B$ の電圧波形を取得してもよい。この実施形態において、電源制御部は、取得した電圧波形から上述の第1の期間 P_1 、第2の期間 P_2 、及び第3の期間 P_3 を特定し、第1の期間 P_1 、第2の期間 P_2 、及び第3の期間 P_3 の各々における複数の指定位相期間 $D P$ の間隔を上述したように設定してもよい。
- [0050] 以下、工程 $S T c$ において複数の指定位相期間 $D P$ それぞれのためのソース周波数 f を決定するためのフィードバック処理について説明する。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 m 番目の指定位相期間 $D P_m$ のためのソース周波数 $f[i, m]$ を、系列 $C Y S$ において先行する幾つかの波形周期 $C Y$ 内の m 番目の指定位相期間 $D P_m$ のソース周波数の変化とソース高周波電力の反射の度合いから、反射の度合いを抑制するように決定する。なお、波形周期 $C Y_i$ に対して系列 $C Y S$ において先行する波形周期 $C Y$ は、波形周期 $C Y_{i-1 f b}$ 及び $C Y_{i-2 \times 1 f b}$ を含んでいてもよい。ここで、「 $1 f b$ 」は、1以上の整数である。
- [0051] 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 $H F$ 及び電気バイアス $E B$ 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 $C Y S$ は、連続的に繰り返す複数の波形周期 $C Y$ から構成される。
- [0052] 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 $H F$ 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 $C Y S$ は、複数のパルス期間 $P P$ のそれぞれにおける同一順番の波形周期 $C Y$ 、即ち複数のパルス期間 $P P$ のそれぞれにおける k 番目の波形周期 $C Y_k$ 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 $P P$ の各々の全ての波形周期 $C Y$ 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 $P P$ の各々の1番目から K_1 番目までの波形周期 $C Y$ 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 $P P$ の各々の $(K_1 + 1)$ 番目から最後の波形周期 $C Y$ 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、 K_1 は、1以上の整数である。或いは、複数のパルス期間 $P P$ の各々の1番目から K_1 番目までの波形周期 $C Y$ 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 $P P$ の各々の $(K_1 + 1)$ 番目から最後の波形周期 $C Y$ の各々においては、 K_1 番目の波形周期 $C Y$ の各指定位相期間のソース周波数が同一の指定位相期間において用いられてもよい。

[0053] 以下、図8及び図9を参照して、工程 $S T c$ におけるフィードバック処理の例について説明する。図8は、図5の(b)に示す工程 $S T c$ における処理の例を示す流れ図である。図9は、図8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。以下に説明するフィードバック処理の例は、上述の「 $l f b$ 」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、「 $l f b$ 」は、1よりも大きい整数であってもよい。

[0054] 図8に示すように、工程 $S T a$ は、工程 $S T 1 \sim$ 工程 $S T 9$ を含んでいてもよい。工程 $S T 1 \sim$ 工程 $S T 9$ は、系列 $C Y S$ における各波形周期 $C Y$ 内の複数の指定位相期間 $D P$ 、即ち指定位相期間 $D P_1 \sim D P_M$ の各々に対して行われる。

[0055] 工程 $S T 1$ では、電源制御部は、 i を1に設定する。「 i 」は、系列 $C Y S$ 内の波形周期 $C Y$ の順番を表している。続く工程 $S T 2$ では、電源制御部は、ソース周波数 $f[i, m]$ 及びシフト値 $\Delta f[i, m]$ を設定する。工

程ST2では、ソース周波数 $f[i, m]$ 及びシフト値 $\Delta f[i, m]$ 、即ち、ソース周波数 $f[1, m]$ 及びシフト値 $\Delta f[1, m]$ は、事前に設定されたそれぞれの数値に設定される。

[0056] 続く工程ST3では、電源制御部は、系列CYSにおける波形周期 CY_i 内の m 番目の指定位相期間 DP_m において、ソース周波数 $f[i, m]$ 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。

[0057] 続く工程ST4では、電源制御部は、系列CYSにおける波形周期 CY_i 内の指定位相期間 DP_m におけるソース高周波電力HFの反射の度合い $P_d[i, m]$ 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CYSにおける波形周期 CY_i 内の指定位相期間 DP_m におけるソース高周波電力HFの反射の度合い $P_d[i, m]$ 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、 $P_d[i, m]$ が第1の閾値 $P_{th1}[m]$ よりも大きい場合に満たされてもよい。なお、複数の指定位相期間DP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。

[0058] 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CYSにおける後の波形周期 CY_{i+1} 内の指定位相期間 DP_m のためのソース周波数 $f[i+1, m]$ を、次式により設定する。

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

[0059] 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ST6において、ソース周波数 $f[i+1, m]$ を、次式により設定する。

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

[0060] 次いで、工程ST7～工程ST9が行われる。工程ST7～工程ST9は、終了の指示があるまで繰り返される。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 内の指定位相期間 DP_m において、ソース周波数 $f[i, m]$

] を有するソース高周波電力 $H F$ を、高周波電源 31 から供給する。

[0061] 続く工程 $S T 9$ では、電源制御部は、反射の度合い $P_d [i, m]$ に応じて系列 $C Y S$ における後の波形周期 $C Y_{i+1}$ 内の指定位相期間 $D P_m$ のためのソース周波数 $f [i+1, m]$ を決定する。

[0062] 図 9 に示すように、工程 $S T 9$ は、工程 $S T 9 0 1$ で開始する。工程 $S T 9 0 1$ では、電源制御部は、反射の度合い $P_d [i, m]$ が増加傾向であるか否かを判定する。工程 $S T 9 0 1$ において、反射の度合い $P_d [i, m]$ は、 $P_d [i, m] > P_d [i-1, m]$ 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 $C Y S$ における i 番目の波形周期 $C Y_i$ までの二つ以上の波形周期 $C Y$ にわたって m 番目の指定位相期間 $D P_m$ 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 $P_d [i, m]$ が増加傾向であると判定されてもよい。

[0063] 工程 $S T 9 0 1$ において反射の度合い $P_d [i, m]$ 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 $S T 9 0 2$ において、シフト値 $\Delta f [i, m]$ の符号を維持する。即ち、電源制御部は、工程 $S T 9 0 2$ において、シフト値 $\Delta f [i, m]$ を次式により設定する。

$$\Delta f [i, m] = \Delta f [i-1, m]$$

[0064] 一方、工程 $S T 9 0 1$ において反射の度合い $P_d [i, m]$ 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 $S T 9 0 3$ において、シフト値 $\Delta f [i, m]$ の符号を変更する。即ち、電源制御部は、工程 $S T 9 0 3$ において、シフト値 $\Delta f [i, m]$ を次式により設定する。

$$\Delta f [i, m] = -\Delta f [i-1, m]$$

[0065] 続く工程 $S T 9 0 4$ では、電源制御部は、系列 $C Y S$ における波形周期 $C Y_i$ 内の指定位相期間 $D P_m$ におけるソース高周波電力 $H F$ の反射の度合い $P_d [i, m]$ が周波数変更条件を満たすほどに大きいかなんかを判定する。工程 $S T 9 0 4$ において、周波数変更条件は、系列 $C Y S$ における波形周期 $C Y_i$ 内の指定位相期間 $D P_m$ におけるソース高周波電力 $H F$ の反射の度合い $P_d [i, m]$ が閾値よりも大きい場合に満たされる。

[0066] 一実施形態では、系列C Y S内の何れかの波形周期における指定位相期間 DP_m での反射の度合いと第1の閾値 P_{th1} [m] 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ST904において指定位相期間 DP_m での反射の度合いと第2の閾値 P_{th2} [m] 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ST904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} [m] は、第1の閾値 P_{th1} [m] 以上である。第2の閾値 P_{th2} [m] は、第1の閾値 P_{th1} [m] よりも大きいてもよい。なお、複数の指定位相期間 DP それぞれのための第2の閾値 P_{th2} [m] は、互いに同一であってもよく、異なってもよい。

[0067] 具体的には、系列C Y S内の何れかの波形周期における指定位相期間 DP_m での反射の度合いが第1の閾値 P_{th1} [m] 以下であると判断された場合には、以後に工程ST904において指定位相期間 DP_m 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} [m] が用いられてもよい。そして、系列C Y S内の何れかの波形周期における指定位相期間 DP_m での反射の度合いが第2の閾値 P_{th2} [m] よりも大きいと判断された場合には、以後に工程ST904において指定位相期間 DP_m 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} [m] が用いられてもよい。

[0068] 工程ST904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ST905において、系列C Y Sにおける後の波形周期 CY_{i+1} 内の指定位相期間 DP_m のためのソース周波数 $f[i+1, m]$ を、次式により設定する。

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

[0069] 一方、工程ST904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ST906において、ソース周波数 $f[i+1, m]$ を、次式により設定する。

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

[0070] 方法MTでは、反射の度合い $P_d[i, m]$ に応じてソース周波数 $f[i+1, m]$ を、次式により設定する。

1, m] を調整することにより、ソース高周波電力 H F の反射が抑制される。また、方法 M T では、上述のフィードバック処理により複数の指定位相期間 D P のためのソース周波数が決定される。また、方法 M T では、複数の位相期間 P H のうち複数の指定位相期間 D P 以外の位相期間それぞれのソース周波数は複数の指定位相期間 D P のためのソース周波数に基づく補間により決定される。したがって、方法 M T によれば、波形周期 C Y 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 M T 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。

[0071] 以下、図 10 及び図 11 を参照して、工程 S T c における処理の別の例を説明する。図 10 は、図 5 の (b) に示す工程 S T c における処理の別の例を示す流れ図である。図 11 は、図 10 に示す工程 S T 9 a における処理の例を示す流れ図である。以下、図 10 及び図 11 に示す工程 S T c における処理について、図 8 及び図 9 に示す処理に対する相違点の観点から説明する。図 10 及び図 11 に示す処理では、電源制御部は、シフト値 $\Delta f [i, m]$ を反射の度合い $P_d [i, m]$ の大きさに応じた値に設定する。

[0072] 具体的には、図 10 に示すように、電源制御部は、工程 S T 1 と工程 S T 3 との間の工程 S T 2 a において、ソース周波数 $f [i, m]$ 及び係数 $\alpha [i, m]$ を設定する。工程 S T 2 a では、ソース周波数 $f [i, m]$ 及び係数 $\alpha [i, m]$ 、即ち、ソース周波数 $f [1, m]$ 及び係数 $\alpha [1, m]$ は、事前に設定されたそれぞれの数値に設定される。

[0073] 工程 S T 4 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 4 と工程 S T 5 の間の工程 S T 5 a において、シフト値 $\Delta f [i, m]$ を次式により設定する。

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

[0074] そして、工程 S T 8 に続く工程 S T 9 a において、電源制御部は、反射の度合い $P_d [i, m]$ に応じて系列 C Y S における後の波形周期 C Y_{i+1} 内の

指定位相期間 DP_m のためのソース周波数 $f[i+1, m]$ を決定する。

- [0075] 図 11 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 $P_d[i, m]$ 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 $\alpha[i, m]$ 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 $\alpha[i, m]$ を次式により設定する。

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

- [0076] 一方、工程 ST901 において反射の度合い $P_d[i, m]$ 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 $\alpha[i, m]$ 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 $\alpha[i, m]$ を次式により設定する。

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

- [0077] 図 11 に示すように、工程 ST904 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 ST904 と工程 ST905 との間の工程 ST905a において、電源制御部は、シフト値 $\Delta f[i, m]$ を次式により設定する。

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

- [0078] 以下、反射の度合い $P_d[i, m]$ について説明する。反射の度合い $P_d[i, m]$ は、波形周期 CY_i 内の指定位相期間 DP_m 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。複数の指定位相期間 DP 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。

- [0079] 反射の度合い $P_d[i, m]$ は、波形周期 CY_i 内の指定位相期間 DP_m 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 35, 36 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33の入口（即ち、高周波電源31側の整合器33の入力）又は高周波電源31から見たソース高周波電力HFの伝送系の抵抗値と所定の抵抗値（50Ω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HF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（90度等）との間の差であってもよい。

[0080] 一実施形態では、反射の度合い $P_d[i, m]$ は、波形周期 CY_i 内の指定位相期間 DP_m 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、指定位相期間 DP_m 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、各指定位相期間 DP 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 $P_d[i, m]$ の計算値のばらつきを抑制することが可能である。

[0081] 以下、図12を参照する。図12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12は、図4の（b）と同様に、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る例を示している。図12では、全てのパルス期間のうちパルス期間 PP_k が示されている。図12に示すように、各パルス期間 PP は、第1のフィードバック期間 $P_F[1]$ 及び第2のフィードバック期間 $P_F[2]$ を含んでいてもよい。第1のフィードバック期間 $P_F[1]$ は、パルス期間 PP の開始時点から当該開始時点とパルス期間 PP の終了時点との間の時点までの期間である。第2のフィードバック期間 $P_F[2]$ は、第1のフィードバック期間 $P_F[1]$ に続き、パルス期間 PP の終了時点まで続く期間である。第1のフィードバック期間 $P_F[1]$ 及び第2のフィードバック期間 $P_F[2]$ の各々は、複数

の波形周期 C_Y を含み得る。

[0082] 電源制御部は、第1のフィードバック期間 $P_F[1]$ 内の複数の波形周期 C_Y の各々の中の複数の指定位相期間 D_P の各々のソース周波数 f を決定するために、上述の第2のフィードバック処理を行ってもよい。また、電源制御部は、第1のフィードバック期間 $P_F[1]$ 内の複数の波形周期 C_Y の各々の中の複数の指定位相期間 D_P 以外の各位相期間のソース周波数 f を、複数の指定位相期間 D_P のためのソース周波数 f を用いた補間により決定してもよい。

[0083] 電源制御部は、第1のフィードバック期間 $P_F[1]$ 内の j 番目の波形周期 C_Y 内の最後の指定位相期間と第1のフィードバック期間 $P_F[1]$ 内の $(j+1)$ 番目の波形周期 C_Y 内の1番目の指定位相期間 D_{P_1} との間の各位相期間のソース周波数 f を、当該最後の指定位相期間のソース周波数 f と当該1番目の指定位相期間 D_{P_1} のソース周波数 f を用いて補間（例えば、線形補間）した値に設定してもよい。なお、第1のフィードバック期間 $P_F[1]$ 内の複数の波形周期 C_Y それぞれが有する指定位相期間の個数は異なってもよい。また、第1のフィードバック期間 $P_F[1]$ 内の複数の波形周期 C_Y のそれぞれにおいて、複数の指定位相期間の時間的位置は異なってもよい。

[0084] また、上述したように、ソース高周波電力 H_F のパルスが供給される期間とソース高周波電力 H_F の次のパルスとが供給される期間との間の期間で、当該パルスの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 H_F が供給されてもよい。以下、ソース高周波電力 H_F のパルスの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 H_F が供給される当該期間を LOW 期間という。 LOW 期間において用いられるソース周波数 f は、一定であってもよく、予め定められていてもよい。

[0085] 第1のフィードバック期間 $P_F[1]$ 内の最初の波形周期 C_Y 内の1番目の位相期間 P_{H_1} は、複数の指定位相期間 D_P のうちの1番目の指定位相期間 D_{P_1} であってもよい。或いは、第1のフィードバック期間 $P_F[1]$ 内の最初

の波形周期 C_Y 内の 1 番目の位相期間 P_{H_1} は、複数の指定位相期間 D_P のうちの 1 番目の指定位相期間 D_{P_1} でなくてもよい。後者の場合には、電源制御部は、LOW 期間内の最終時点と第 1 のフィードバック期間 $P_F [1]$ 内の 1 番目の指定位相期間 D_{P_1} との間の各位相期間のソース周波数 f を、LOW 期間のソース周波数 f と第 1 のフィードバック期間 $P_F [1]$ 内の 1 番目の指定位相期間 D_{P_1} のソース周波数 f とを用いて補間（例えば、線形補間）した値に設定してもよい。

[0086] また、電源制御部は、第 2 のフィードバック期間 $P_F [2]$ 内の複数の波形周期 C_Y の各々の中の複数の指定位相期間 D_P の各々のソース周波数 f を決定するために、上述の第 1 のフィードバック処理を行ってもよい。また、電源制御部は、第 2 のフィードバック期間 $P_F [2]$ 内の複数の波形周期 C_Y の各々の中の複数の指定位相期間 D_P 以外の各位相期間のソース周波数 f を、複数の指定位相期間 D_P のためのソース周波数 f を用いた補間により決定してもよい。或いは、電源制御部は、第 2 のフィードバック期間 $P_F [2]$ 内の複数の波形周期 C_Y の各々の中の複数の位相期間 P_H のためのソース周波数として、直前の第 1 のフィードバック期間 $P_F [1]$ 内の最終の波形周期 C_Y の中の複数の位相期間 P_H のためのソース周波数を用いてもよい。

[0087] なお、上述したフィードバック処理は、複数の指定位相期間 D_P を決定するために複数の位相期間 P_H それぞれのためのソース周波数 f を決定する処理においても利用され得る。この場合には、上述のフィードバック処理における指定位相期間 D_{P_m} に対する処理が位相期間 P_{H_n} に対して適用される。

[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、
前記波形周期は複数の位相期間を含み、該複数の位相期間は該複数の位相期間の個数よりも少ない複数の指定位相期間を含み、
前記電源制御部は、
前記波形周期の系列における i 番目の波形周期内の前記複数の指定位相期間のうち m 番目の指定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、該系列における前記 i 番目の波形周期までの前記 m 番目の指定位相期間のため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から、該ソース高周波電力の反射を抑制するように調整して、前記複数の指定位相期間それぞれのソース周波数を決定し、
前記 i 番目の波形周期内の前記複数の位相期間のうち前記複数の指定位相期間以外の位相期間それぞれのための前記ソース周波数を前記複数の指定位相期間それぞれのソース周波数を用いた補間により決定する、
ように構成されている、
プラズマ処理装置。

[0091] [E 2]

前記波形周期における前記複数の指定位相期間それぞれの位相は、予め定

められている、E 1 に記載のプラズマ処理装置。

[0092] [E 3]

前記電気バイアスは、前記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み、

前記波形周期は、前記電圧パルスがOFF状態である第1の期間、該第1の期間に続き前記電圧パルスがON状態である第2の期間、及び該第2の期間に続き前記電圧パルスがOFF状態である第3の期間を含み、

前記複数の指定位相期間の前記第2の期間における間隔は、前記複数の指定位相期間の前記第1の期間及び前記第3の期間の各々における間隔よりも小さい、

E 2 に記載のプラズマ処理装置。

[0093] [E 4]

前記複数の指定位相期間の前記第3の期間における間隔は、前記複数の指定位相期間の前記第1の期間における間隔と同じか、前記複数の指定位相期間の前記第1の期間における間隔よりも小さい、E 3 に記載のプラズマ処理装置。

[0094] [E 5]

前記電圧パルスは、基準電圧レベルに対して負の設定電圧レベルを有し、

前記第2の期間は、前記電圧パルスの電圧レベルが前記基準電圧レベルから前記設定電圧レベルまで変化する第1の副期間、前記電圧パルスの電圧レベルが前記設定電圧レベルである第2の副期間、及び前記電圧パルスの電圧レベルが前記設定電圧レベルから前記基準電圧レベルまで変化する第3の副期間を含み、

前記複数の指定位相期間の前記第1の副期間における間隔、前記複数の指定位相期間の前記第2の副期間における間隔、及び前記複数の指定位相期間の前記第3の副期間における間隔が互いに異なる、E 3 又はE 4 に記載のプラズマ処理装置。

[0095] [E 6]

前記電源制御部は、

前記複数の指定位相期間それぞれの前記ソース周波数を決定する処理を行う前の準備期間において、該処理と同じ処理を前記複数の位相期間それぞれについて行うことにより、前記複数の位相期間それぞれの前記ソース周波数を決定し、

前記複数の位相期間それぞれの前記ソース周波数の系列に対する平滑化により得られる前記ソース周波数の系列において前記ソース周波数の変化が大きい区間ほど、前記複数の指定位相期間の間隔が小さくなるように、前記複数の指定位相期間を決定する、

ように構成されている、

E 1 に記載のプラズマ処理装置。

[0096] [E 7]

前記電源制御部は、前記補間として線形補間を用いるように構成されている、E 1 ～ E 6 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0097] [E 8]

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複数の指定位相期間のうち前記 m 番目の指定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 m 番目の指定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 m 番目の指定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 の閾値より大きい、

E 1 ～ E 7 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、

前記チャンバ内の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、

前記波形周期は複数の位相期間を含み、該複数の位相期間は該複数の位相期間の個数よりも少ない複数の指定位相期間を含み、

前記電源制御部は、

前記波形周期の系列における i 番目の波形周期内の前記複数の指定位相期間のうち m 番目の指定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、該系列における前記 i 番目の波形周期までの前記 m 番目の指定位相期間のため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から、該ソース高周波電力の反射を抑制するように調整して、前記複数の指定位相期間それぞれのソース周波数を決定し、

前記 i 番目の波形周期内の前記複数の位相期間のうち前記複数の指定位相期間以外の位相期間それぞれのための前記ソース周波数を前記複数の指定位相期間それぞれのソース周波数を用いた補間により決定する、

ように構成されている、

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、

前記波形周期は複数の位相期間を含み、該複数の位相期間は該複数の位相期間の個数よりも少ない複数の指定位相期間を含み、

前記 (a) は、

(c) 前記波形周期の系列における i 番目の波形周期内の前記複数の指定位相期間のうち m 番目の指定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、該系列における前記 i 番目の波形周期までの前記 m 番目の指定位相期間のため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から、該ソース高周波電力の反射を抑制するように調整して、前記複数の指定位相期間それぞれのソース周波数を決定する工程と、

(d) 前記 i 番目の波形周期内の前記複数の位相期間のうち前記複数の指定位相期間以外の位相期間それぞれのための前記ソース周波数を前記複数の指定位相期間それぞれのソース周波数を用いた補間により決定する工程と、

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、
前記波形周期は複数の位相期間を含み、該複数の位相期間は該複数の位相期間の個数よりも少ない複数の指定位相期間を含み、
前記電源制御部は、
前記波形周期の系列における i 番目の波形周期内の前記複数の指定位相期間のうち m 番目の指定位相期間のための前記高周波電力の周波数を、該系列における前記 i 番目の波形周期までの前記 m 番目の指定位相期間のため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から、該高周波電力の反射を抑制するように調整して、前記複数の指定位相期間それぞれの前記高周波電力の前記周波数を決定し、
前記 i 番目の波形周期内の前記複数の位相期間のうち前記複数の指定位相期間以外の位相期間それぞれのための前記高周波電力の前記周波数を前記複数の指定位相期間それぞれの前記高周波電力の前記周波数を用いた補間により決定する、
ように構成されている、

プラズマ処理装置。

[請求項2] 前記波形周期における前記複数の指定位相期間それぞれの位相は、予め定められている、請求項1に記載のプラズマ処理装置。

[請求項3] 前記電気バイアスは、前記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み、

前記波形周期は、前記電圧パルスがOFF状態である第1の期間、該第1の期間に続き前記電圧パルスがON状態である第2の期間、及び該第2の期間に続き前記電圧パルスがOFF状態である第3の期間を含み、

前記複数の指定位相期間の前記第2の期間における間隔は、前記複数の指定位相期間の前記第1の期間及び前記第3の期間の各々における間隔よりも小さい、

請求項2に記載のプラズマ処理装置。

[請求項4] 前記複数の指定位相期間の前記第3の期間における間隔は、前記複数の指定位相期間の前記第1の期間における間隔と同じか、前記複数の指定位相期間の前記第1の期間における間隔よりも小さい、請求項3に記載のプラズマ処理装置。

[請求項5] 前記電圧パルスは、基準電圧レベルに対して負の設定電圧レベルを有し、

前記第2の期間は、前記電圧パルスの電圧レベルが前記基準電圧レベルから前記設定電圧レベルまで変化する第1の副期間、前記電圧パルスの電圧レベルが前記設定電圧レベルである第2の副期間、及び前記電圧パルスの電圧レベルが前記設定電圧レベルから前記基準電圧レベルまで変化する第3の副期間を含み、

前記複数の指定位相期間の前記第1の副期間における間隔、前記複数の指定位相期間の前記第2の副期間における間隔、及び前記複数の指定位相期間の前記第3の副期間における間隔が互いに異なる、請求項3又は4に記載のプラズマ処理装置。

[請求項6]

前記電源制御部は、

前記複数の指定位相期間それぞれの前記高周波電力の前記周波数を決定する処理を行う前の準備期間において、該処理と同じ処理を前記複数の位相期間それぞれについて行うことにより、前記複数の位相期間それぞれの前記高周波電力の前記周波数を決定し、

前記複数の位相期間それぞれの前記高周波電力の前記周波数の系列に対する平滑化により得られる前記高周波電力の前記周波数の系列において前記高周波電力の前記周波数の変化が大きい区間ほど、前記複数の指定位相期間の間隔が小さくなるように、前記複数の指定位相期間を決定する、

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7]

前記電源制御部は、前記補間として線形補間を用いるように構成されている、請求項 1 ～ 4 及び 6 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項8]

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複数の指定位相期間のうち前記 m 番目の指定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 m 番目の指定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 m 番目の指定位相期間のための前記高周波電力の前記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 の閾値より大きい、

請求項 1 ～ 4 及び 6 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、

前記チャンバ内の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、

前記波形周期は複数の位相期間を含み、該複数の位相期間は該複数の位相期間の個数よりも少ない複数の指定位相期間を含み、

前記電源制御部は、

前記波形周期の系列における i 番目の波形周期内の前記複数の指定位相期間のうち m 番目の指定位相期間のための前記高周波電力の周波数を、該系列における前記 i 番目の波形周期までの前記 m 番目の指定位相期間のため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から、該高周波電力の反射を抑制するように調整して、前記複数の指定位相期間それぞれの前記高周波電力の前記周波数を決定し、

前記 i 番目の波形周期内の前記複数の位相期間のうち前記複数の指定位相期間以外の位相期間それぞれのための前記高周波電力の前記周波数を前記複数の指定位相期間それぞれの前記高周波電力の前記周波数を用いた補間により決定する、

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、

前記波形周期は複数の位相期間を含み、該複数の位相期間は該複数の位相期間の個数よりも少ない複数の指定位相期間を含み、

前記（a）は、

（c）前記波形周期の系列における i 番目の波形周期内の前記複数の指定位相期間のうち m 番目の指定位相期間のための前記高周波電力の周波数を、該系列における前記 i 番目の波形周期までの前記 m 番目の指定位相期間のため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から、該高周波電力の反射を抑制するように調整して、前記複数の指定位相期間それぞれの前記高周波電力の前記周波数を決定する工程と、

（d）前記 i 番目の波形周期内の前記複数の位相期間のうち前記複数の指定位相期間以外の位相期間それぞれのための前記高周波電力の前記周波数を前記複数の指定位相期間それぞれの前記高周波電力の前記周波数を用いた補間により決定する工程と、

を含む、制御方法。