

明 細 書

発明の名称：

プラズマ処理装置、制御方法、電源システム、プログラム、及び記憶媒体
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、制御方法、電源システム、プログラム、及び記憶媒体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、電気バイアスエネルギーの周期内の位相とソース高周波電力の周波数の調整のタイミングを正確に同期させる技術を提供する。

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、及び高周波電源を備える。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いる。バイアス電源は、第1のクロック信号により指定されるタイミングで、バイアス周波数を有する電気バイアスエネルギーを発生するように構成されている。高周波電源は、チャンバ内でガスが

らプラズマを生成するためにソース周波数を有するソース高周波電力を発生するように構成されている。高周波電源は、電気バイアスエネルギーが基板支持部に供給されているときに、第2のクロック信号により指定されるタイミングで調整されたソース周波数を有するソース高周波電力を出力するように構成されている。第2のクロック信号は、バイアス周波数より高い周波数を有し、第1のクロック信号に同期されている。

発明の効果

[0006] 一つの例示的实施形態によれば、電気バイアスエネルギーの周期内の位相とソース高周波電力の周波数の調整のタイミングを正確に同期させ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]一つの例示的实施形態に係る電源システムを示す図である。
[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バイアス電源を示す図である。
[図5]一つの例示的实施形態に係るプラズマ処理装置に関連する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プラズマ処理装置において採用可能な一例の分周器を示す図である。
[図7]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8]ソース周波数の調整の第1の例に関連するタイミングチャートである。
[図9]ソース周波数の調整の第2の例に関連するタイミングチャートである。
[図10]ソース周波数の調整の第3の例の流れ図である。
[図11]ソース周波数の調整の第4の例の流れ図である。
[図12]図11に示す第4の例を説明するための図である。
[図13]ソース周波数の調整の第5の例の流れ図である。
[図14]第5の例を説明するための図である。

[図15]第5の例を説明するための図である。

[図16]第5の例を説明するための図である。

[図17]第5の例を説明するための図である。

[図18]ソース周波数の調整の第6の例の流れ図である。

[図19]第6の例を説明するための図である。

[図20]図20の(a)及び図20の(b)の各々は、ソース高周波電力と電気バイアスエネルギーの一例のタイミングチャートである。

[図21]図21の(a)及び図21の(b)の各々は、ソース高周波電力と電気バイアスエネルギーの一例のタイミングチャートである。

[図22]ソース周波数の調整の第7の例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及び主制御部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] 主制御部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。主制御部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、主制御部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。主制御部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。主制御部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、後述する例示的实施形態に係る制御方法の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含む。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。このプログラムは、より上位の管理システムから主制御部2に伝送されてもよい。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）であってもよい。記憶部2a2は、RAM（Random Access Memory）、ROM（Read Only Memory）、HDD（Hard D

isk 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 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。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RFを発生するように構成されている。ソース高周波電力RFは、ソース周波数 f_{RF} を有する。即ち、ソース高周波電力RFは、その周波数がソース周波数 f_{RF} である正弦波状の波形を有する。ソース周波数 f_{RF} は、10MHz～150MHzの範囲内の周波数であり得る。高周波電源31は、整合器31m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RF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、基台 1 1 1 0 の導電性部材、セラミック部材 1 1 1 1 a 内に設けられた少なくとも一つの電極、又は上部電極であってもよい。ソース高周波電力 R F が高周波電極に供給されると、チャンバ 1 0 内のガスからプラズマが生成される。整合器 3 1 m は、可変インピーダンスを有する。整合器 3 1 m の可変インピーダンスは、ソース高周波電力 R F の負荷からの反射を低減させるよう、主制御部 2 によって制御される。

[0022] バイアス電源 3 2 は、電気バイアスエネルギー B E を発生するように構成されている。バイアス電源 3 2 は、基板支持部 1 1 に電氣的に結合されている。バイアス電源 3 2 は、基板支持部 1 1 内のバイアス電極に電氣的に接続されており、電気バイアスエネルギー B E 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 1 1 1 0 の導電性部材又はセラミック部材 1 1 1 1 a 内に設けられた少なくとも一つの電極であってもよい。電気バイアスエネルギー B E 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。

[0023] 電気バイアスエネルギー B E は、バイアス周波数を有する。バイアス周波数は、ソース周波数よりも低い。バイアス周波数は、1 0 0 k H z ~ 6 0 M H z の範囲内の周波数であってもよく、例えば 4 0 0 k H z であってもよい。電気バイアスエネルギー B E は、バイアス周波数の逆数の時間長を有するバイアス周期（時間間隔）、即ち周期 C Y で周期的にバイアス電極に供給される。

[0024] 電気バイアスエネルギー B E は、バイアス周波数を有するバイアス高周波電力 L F であってもよい（図 5 参照）。即ち、電気バイアスエネルギー B E 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 2 m を介して、バイアス電極に電氣的に接続される。整合器 3 2 m の可変インピーダンス回路（即ち、整合回路）は、バイアス高周波電力 L F の負荷からの反射を低減させるよう、主制御部 2 によって制御される。

[0025] 或いは、電気バイアスエネルギー B E は、電圧のパルス P V を含んでいて

もよい。電気バイアスエネルギーBEにおけるパルスPVの波形は、矩形波、三角波、又は任意の波形を有し得る。電気バイアスエネルギーBEのパルスPV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。電気バイアスエネルギーBEのパルスPVは、一例では、負の電圧のパルスであってもよい。電気バイアスエネルギーBEのパルスPVは、直流電源からの直流電圧に対するパルスユニットを用いた波形整形により生成されてもよい。

[0026] 以下、図3～図5を参照して電源システム30について詳細に説明する。図3は、一つの例示的实施形態に係る電源システムを示す図である。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バイアス電源を示す図である。図5は、一つの例示的实施形態に係るプラズマ処理装置に関連するタイミングチャートである。図5において、「RF」は、ソース高周波電力RFの進行波のパワーレベルを表している。

[0027] バイアス電源32は、第1のクロック信号CK1により指定されるタイミングで、電気バイアスエネルギーBEを発生するように構成されている。電源システム30は、基準クロック信号発生器33を更に含み得る。基準クロック信号発生器33は、基準クロック信号RCKを発生するように構成されている。基準クロック信号RCKの周波数は、例えば1GHzである。第1のクロック信号CK1は、分周器341によって基準クロック信号RCKを分周することにより生成されてもよい。分周器341の分周比及び第1のクロック信号CK1におけるクロックパルスのデューティー比は、制御部35から分周器341に指定される。

[0028] 一実施形態において、第1のクロック信号CK1の周波数は、バイアス周波数と同じであってもよい。この場合には、第1のクロック信号CK1は、周期CYと同じ時間間隔で周期的に発生されるクロックパルスを含む。電気バイアスエネルギーBEがバイアス高周波電力LFである場合には、バイアス電源32は、第1のクロック信号CK1に同期して周期CYが開始するよ

うにバイアス高周波電力L Fを発生する。例えば、バイアス電源3 2は、第1のクロック信号C K 1の立ち上がり及び立ち下がりのうち一方のタイミングで、周期C Yが開始するようにバイアス高周波電力L Fを発生する。なお、本明細書において、クロック信号の立ち上がり及び立ち下がりは、クロック信号におけるクロックパルスの立ち上がり及び立ち下がりを意味する。

[0029] 電気バイアスエネルギーB EがパルスP Vを含む場合には、バイアス電源3 2は、第1のクロック信号C K 1の立ち上がり及び立ち下がりのうち一方のタイミングで、パルスP Vの発生を開始する。バイアス電源3 2は、第1のクロック信号C K 1の立ち上がり及び立ち下がりのうち他方のタイミングで、パルスP Vの発生を停止する。この場合には、分周器3 4 1は、制御部3 5からの指示により、第1のクロック信号C K 1のクロックパルスのデューティー比をパルスP Vのデューティー比に応じて設定する。

[0030] 電気バイアスエネルギーB EがパルスP Vを含む場合には、バイアス電源3 2は、図4の(a)に示す構成を有し得る。図4の(a)に示す例において、バイアス電源3 2は、直流電源3 2 p、スイッチ3 2 s、3 2 t、ダンピング回路3 2 g、3 2 h、出力3 2 o、及びスイッチング制御部3 2 cを含む。スイッチ3 2 s、3 2 t及びスイッチング制御部3 2 cは、パルスユニットを構成する。直流電源3 2 pの正極はグラウンドに接続されている。直流電源3 2 pの負極は、スイッチ3 2 sに接続されている。スイッチ3 2 sは、ダンピング回路3 2 gを介して出力3 2 oに接続されている。スイッチ3 2 tは、グラウンドとダンピング回路3 2 hとの間で接続されている。ダンピング回路3 2 hは、出力3 2 oに接続されている。出力3 2 oは、バイアス電極に接続されている。なお、ダンピング回路3 2 g、3 2 hは、スイッチングの際のリングングを低減させるための回路である。ダンピング回路3 2 g、3 2 hは、必要に応じてバイアス電源3 2に組み込まれ得る。また、ダンピング回路3 2 g、3 2 hの各々は、図4の(a)に示される接続箇所とは異なる接続箇所に設けられていてもよい。

[0031] スwitchング制御部3 2 cは、第1のクロック信号C K 1の立ち上がり及

び立ち下がりのうち一方のタイミングで、スイッチ32sを閉じて、スイッチ32tを開くよう、スイッチ32s、32tを制御する。したがって、第1のクロック信号CK1の立ち上がり及び立ち下がりのうち一方のタイミングで、直流電源32pが出力32oに接続される。スイッチング制御部32cは、第1のクロック信号CK1の立ち上がり及び立ち下がりのうち他方のタイミングで、スイッチ32sを開いて、スイッチ32tを閉じるよう、スイッチ32s、32tを制御する。したがって、第1のクロック信号CK1の立ち上がり及び立ち下がりのうち他方のタイミングで、出力32oはグラウンドに接続される。或いは、スイッチング制御部32cは、出力32oが直流電源32pに接続された時点から指定時間が経過したタイミングで、スイッチ32sを開いて、スイッチ32tを閉じるよう、スイッチ32s、32tを制御してもよい。

[0032] 別の実施形態において、第1のクロック信号CK1の周波数は、バイアス周波数よりも高くてもよい。電源システム30は、分周器341を有していてもよく、第1のクロック信号CK1は基準クロック信号RCKであってもよい。或いは、第1のクロック信号CK1は、分周器341によって基準クロック信号RCKを分周することにより生成されてもよい。この実施形態において、電気バイアスエネルギーBEは、バイアス高周波電力LFであるか、バイアス周波数の逆数である時間間隔で周期的に発生される電圧（例えば、パルスPV）であってもよい。この実施形態において、バイアス電源32は、図4の（b）に示すように、D/A変換器32da（デジタルーアナログ変換器）、フィルタ32f、及び増幅器32aを含み得る。

[0033] D/A変換器32daは、メモリ36に格納されている電気バイアスエネルギーBEの波形データを制御部35から受ける。D/A変換器32daは、第1のクロック信号CK1で指定されるタイミングで波形データのデジタルーアナログ変換（D/A変換）を行うことにより、アナログ信号を生成して、生成したアナログ信号をその出力から出力する。D/A変換器32daの出力は、フィルタ32fを介して増幅器32aの入力に接続されている。

フィルタ 3 2 f は、入力されたアナログ信号から不要な高周波成分を除去する。増幅器 3 2 a は、フィルタ 3 2 f からのアナログ信号を増幅することにより、電気バイアスエネルギー B E を生成する。なお、D / A 変換器 3 2 d a の出力は、増幅器 3 2 a の入力に直接的に接続されていてもよい。

[0034] 高周波電源 3 1 は、ソース周波数 f_{RF} を有するソース高周波電力 R F を出力するように構成されている。ソース周波数 f_{RF} は、電気バイアスエネルギー B E がバイアス電極に供給されているときに、第 2 のクロック信号 C K 2 により指定されるタイミングで調整される。電気バイアスエネルギー B E の各周期 C Y は、それぞれの開始タイミングが第 2 のクロック信号 C K 2 の立ち上がり及び立ち下がりのうち一方に同期する複数の位相期間 S P に分割される。複数の位相期間 S P の各々の時間長は、互いに等しい。ソース周波数 f_{RF} は、各周期 C Y 内の複数の位相期間 S P の各々において、その開始タイミングで設定されて、維持される。ソース周波数 f_{RF} の調整の詳細については、後述する。

[0035] 第 2 のクロック信号 C K 2 は、バイアス周波数より高い周波数を有し、第 1 のクロック信号 C K 1 に同期されている。第 2 のクロック信号 C K 2 の周波数は、ソース周波数 f_{RF} よりも低くてもよい。第 2 のクロック信号 C K 2 の周波数は、バイアス周波数の N 倍である。ここで、N は、各周期 C Y における複数の位相期間 S P の個数であり、例えば 5 0 である。第 2 のクロック信号 C K 2 は、分周器 3 4 2 によって基準クロック信号 R C K を分周することにより生成される。分周器 3 4 2 の分周比は、制御部 3 5 から分周器 3 4 2 に指定される。

[0036] 一実施形態において、高周波電源 3 1 は、D / A 変換器 3 1 d a (デジタル-アナログ変換器)、フィルタ 3 1 f、及び増幅器 3 1 a を含み得る。D / A 変換器 3 1 d a は、メモリ 3 6 に格納されているソース高周波電力 R F の波形データを制御部 3 5 から受ける。D / A 変換器 3 1 d a は、第 4 のクロック信号 C K 4 で指定されるタイミングで波形データのデジタル-アナログ変換 (D / A 変換) を行うことにより、アナログ信号を生成して、生成し

たアナログ信号をその出力から出力する。D/A変換器31daの出力は、フィルタ31fを介して増幅器31aの入力に接続されている。フィルタ31fは、入力されたアナログ信号から不要な高周波成分を除去する。増幅器31aは、フィルタ31fからのアナログ信号を増幅することにより、ソース高周波電力RFを生成する。なお、D/A変換器31daの出力は、増幅器31aの入力に直接的に接続されていてもよい。

[0037] 第4のクロック信号CK4の周波数は、第2のクロック信号CK2の周波数よりも高い。第4のクロック信号CK4は、基準クロック信号RCKであってもよい。或いは、第4のクロック信号CK4は、分周器344によって基準クロック信号RCKを分周することにより生成されてもよい。分周器344の分周比は、制御部35によって指定される。

[0038] 図2に示すように、プラズマ処理装置1は、センサ31sを更に備えている。センサ31sは、ソース高周波電力RFの負荷からの反射の度合いを反映する電気信号SS（図3参照）を出力するように構成されている。センサ31sは、例えば、高周波電源31と整合器31mとの間に設けられる。センサ31sは、方向性結合器であってもよく、電気信号SSは、ソース高周波電力RFの負荷からの反射波のパワーレベルPrを表す信号であってもよい。センサ31s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及び電流を検出するように構成されていてもよく、電気信号SSは、当該電圧及び電流を表す信号であってもよい。

[0039] 電源システム30は、A/D変換器38（アナログーデジタル変換器）を更に含んでいる。センサ31sの出力は、A/D変換器38の入力に接続されている。センサ31sの出力は、フィルタ37を介してA/D変換器38の入力に接続されていてもよい。フィルタ37は、電気信号SSにおけるソース周波数 f_{RF} の成分以外の高調波成分、相互変調歪み成分、及びバイアス成分を除去することによりフィルタリングされた信号を生成して、当該フィルタリングされた信号を出力するように構成されている。A/D変換器38は、第3のクロック信号CK3により指定されるタイミングで、電気信号S

S又はフィルタリングされた信号に対してアナログーデジタル変換（A/D変換）を行ってデジタル信号DSを生成するように構成されている。第3のクロック信号CK3は、基準クロック信号RCKであってもよい。或いは、第3のクロック信号CK3は、分周器343によって基準クロック信号RCKを分周することにより生成されてもよい。分周器343の分周比は、制御部35によって指定される。

[0040] 制御部35は、複数の位相期間SPの各々におけるデジタル信号DSから代表値RVを生成するように構成されている。このため、制御部35は、デジタル信号DSから測定値を決定する。測定値は、反射波のパワーレベルPrであってもよい。測定値は、ソース高周波電力RFの出力パワーレベルに対する反射波のパワーレベルPrの比の値であってもよい。測定値は、複数の位相期間SPの各々における電圧と電流の各値、平均値若しくは実効値、或いは、当該電圧と電流の位相差であってもよい。代表値RVは、複数の位相期間SPの各々における当該測定値の平均値又は最大値であってもよい。制御部35は、当該代表値RVに基づいてソース高周波電力RFの反射を抑制するか、プラズマにソース高周波電力RFを効率良く伝達可能であるか、或いは、センサの位置でのインピーダンスを理想値（即ち50Ω）に接近させるソース周波数f_{RF}を決定する。制御部35は、決定したソース周波数f_{RF}を、後続の周期CY内の同一の位相期間におけるソース高周波電力RFのソース周波数f_{RF}として用いる。制御部35は、決定したソース周波数f_{RF}を有する波形データを高周波電源31のD/A変換器31daに与える。

[0041] 以上説明したプラズマ処理装置1では、電気バイアスエネルギーBEの周期CY内の複数の位相においてソース高周波電力RFのソース周波数f_{RF}が調整される。ソース周波数f_{RF}数が調整されるタイミングは、第2のクロック信号CK2によって指定される。第2のクロック信号CK2は、電気バイアスエネルギーBEを発生するタイミングを指定する第1のクロック信号CK1に同期されている。したがって、電気バイアスエネルギーBEの周期CY内の位相とソース周波数f_{RF}の調整のタイミングを正確に同期させること

が可能となる。

[0042] 一実施形態において、上述した分周器341, 342, 343, 及び344のうち少なくとも一つは、図6に示す分周器340であってもよい。図6は、一つの例示的实施形態に係るプラズマ処理装置において採用可能な一例の分周器を示す図である。分周器340は、分周器340a及びPLL回路340b(Phase Locked Loop 回路)を含む。PLL回路340bは、位相比較器340c、ローパスフィルタ340d、電圧制御発振器340e、及び分周器340fを含んでいる。分周器340aの入力は、基準クロック信号発生器33の出力に接続されている。分周器340aの出力は、位相比較器340cの参照入力に接続されている。位相比較器340cの出力は、ローパスフィルタ340dの入力に接続されている。ローパスフィルタ340dの出力は、電圧制御発振器340eの入力に接続されている。電圧制御発振器340eの出力、即ち分周器340の出力からは、基準クロック信号RCKを分周することにより生成されたクロック信号が出力される。電圧制御発振器340eの出力は、位相比較器340cのフィードバック入力に分周器340fを介して接続されている。分周器340aの分周比X及び分周器340fの分周比Yは、制御部35から指定される。ここで、 $Y < X$ であり、分周器340の分周比は、 Y/X である。なお、分周器340から出力されるクロックパルスのデューティー比を調整するために、制御部35から分周器340a及び電圧制御発振器340eにクロックパルスのデューティー比が指定されてもよい。

[0043] 以下、図7を参照して、一つの例示的实施形態にかかる制御方法について説明する。制御方法MTは、工程ST1～工程ST3を含む。工程ST1では、基板支持部11にバイアス電源32から電気バイアスエネルギーBEが供給される。工程ST1において、電気バイアスエネルギーBEは、上述したように第1のクロック信号CK1により指定されるタイミングで発生される。

[0044] 工程ST2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 RF が供給される。電気バイアスエネルギー BE が基板支持部 11 に供給されているときに又はその供給と同時に、工程 ST2 において、高周波電源 31 は、上述したように、第 2 のクロック信号 CK2 により指定されるタイミングで調整されたソース周波数 f_{RF} を有するソース高周波電力 RF を出力する。第 2 のクロック信号 CK2 は、ソース周波数よりも低くバイアス周波数より高い周波数を有し、第 1 のクロック信号 CK1 に同期されている。上述したように、ソース周波数 f_{RF} は、複数の位相期間 SP の各々において取得される電気信号 SS の代表値 RV に応じてソース高周波電力 RF の反射を抑制するように設定される。複数の位相期間 SP の各々において設定されたソース周波数は、後続の周期 CY の同一の位相期間においてソース高周波電力 RF のソース周波数として用いられる。

[0045] 以下、複数の位相期間 SP の各々のソース周波数 f_{RF} の調整について幾つかの例を示す。

[0046] [ソース周波数 f_{RF} の調整の第 1 の例]

[0047] 図 8 は、ソース周波数の調整の第 1 の例に関連するタイミングチャートである。以下に説明する何れの例においても、ソース周波数 f_{RF} は、電気バイアスエネルギー BE とソース高周波電力 RF が共に供給されている期間、即ち重複期間において調整される。重複期間は、図 8 に示すように、複数の周期 CY、即ち M 個の周期 CY (1) ~ CY (M) を含む。複数の周期 CY の各々は、複数の位相期間 SP、即ち N 個の位相期間 SP (1) ~ SP (N) を含む。以下の説明において、位相期間 SP (n) は、位相期間 SP (1) ~ SP (N) のうち、n 番目の位相期間を表す。また、位相期間 SP (m, n) は、m 番目の周期 CY (m) における n 番目の位相期間 SP (n) を表す。また、代表値 RV (n) は、位相期間 SP (1) ~ SP (N) のうち、n 番目の位相期間 SP (n) において取得される代表値 RV を表す。また、代表値 RV (m, n) は、m 番目の周期 CY 内の n 番目の位相期間において取得される代表値 RV を表す。

[0048] 第 1 の例において、制御部 35 は、複数の周期 CY の同一の位相期間 SP

(n) において用いるソース高周波電力 R_F のソース周波数 f_{RF} を互いに異なる複数の周波数にそれぞれ設定する。制御部 35 は、複数の周期 C_Y の同一の位相期間 $SP(n)$ において取得された代表値 $RV(n)$ を比較することにより、複数の周波数のうちソース高周波電力 R_F の反射を最も抑制する周波数を選択する。例えば、制御部 35 は、ソース高周波電力 R_F の反射波のパワーレベル P_r を最小化する周波数を選択する。制御部 35 は、選択した周波数を後の周期 C_Y 内の位相期間 $SP(n)$ のためのソース周波数 f_{RF} として用いる。

[0049] [ソース周波数 f_{RF} の調整の第 2 の例]

[0050] 図 9 は、ソース周波数の調整の第 2 の例に関連するタイミングチャートである。図 9 に示すように、第 2 の例において、制御部 35 は、周期 $C_Y(m)$ 内の位相期間 $SP(n)$ 、即ち位相期間 $SP(m, n)$ におけるソース高周波電力 R_F のソース周波数 f_{RF} を、代表値 $RV(n)$ の変化に応じて、調整するように構成されている。代表値 $RV(n)$ の変化は、周期 $C_Y(m)$ の前の二つ以上の周期 C_Y それぞれにおける対応の位相期間 $SP(n)$ において互いに異なるソース高周波電力 R_F の周波数を用いることにより特定される。

[0051] 周期 $C_Y(m)$ の前の二つ以上の周期 C_Y は、第 1 の周期及び第 2 の周期を含む。図 9 の例において、第 1 の周期は、周期 $C_Y(m - Q(2))$ であり、第 2 の周期は、第 1 の周期の後の周期であり、周期 $C_Y(m - Q(1))$ である。 $Q(1)$ は 1 以上の整数であり、 $Q(2)$ は 2 以上の整数であり、 $Q(1) < Q(2)$ が満たされる。

[0052] 制御部 35 は、位相期間 $SP(m - Q(1), n)$ におけるソース高周波電力 R_F の周波数 $f(m - Q(1), n)$ に、位相期間 $SP(m - Q(2), n)$ におけるソース高周波電力 R_F の周波数からの一方の周波数シフトを与える。ここで、 $f(m, n)$ は、位相期間 $SP(m, n)$ で用いられるソース高周波電力 R_F の周波数を表す。 $f(m, n)$ は、 $f(m, n) = f(m - Q(1), n) + \Delta(m, n)$ で表される。 $\Delta(m, n)$ は、周波数シ

フトの量を表す。一方の周波数シフトは、周波数の減少及び周波数の増加のうち一方である。一方の周波数シフトが周波数の減少であれば、 $\Delta(m, n)$ は負の値を有する。一方の周波数シフトが周波数の増加であれば、 $\Delta(m, n)$ は正の値を有する。

[0053] なお、図9において、周期CY ($m-Q(2)$) における複数の位相期間SPのそれぞれにおけるソース高周波電力RFの周波数は、互いに同一であり、 f_0 であるが、互いに異なってもよい。また、図9において、周期CY ($m-Q(1)$) における複数の位相期間SPのそれぞれにおけるソース高周波電力RFの周波数は、互いに同一であり、周波数 f_0 から減少された周波数に設定されているが、周波数 f_0 から増加されてもよい。

[0054] 制御部35は、周波数シフトによるソース高周波電力RFの反射の度合い（例えば、反射波のパワーレベルPr）の増減を、代表値RV ($m-Q(2)$), n)と代表値RV ($m-Q(1)$), n)との間の变化から特定する。一方の周波数シフトによりソース高周波電力RFの反射の度合いが減少している場合には、制御部35は、周波数 $f(m, n)$ を、周波数 $f(m-Q(1)$), n)に対して一方の周波数シフトを有する周波数に設定する。

[0055] 位相期間SP (m, n) における一方の周波数シフトの量 $\Delta(m, n)$ は、位相期間SP ($m-Q(1)$), n)における一方の周波数シフトの量 $\Delta(m-Q(1)$), n)と同一であってもよい。即ち、周波数シフトの量 $\Delta(m, n)$ の絶対値は、周波数シフトの量 $\Delta(m-Q(1)$), n)と同一であってもよい。或いは、周波数シフトの量 $\Delta(m, n)$ の絶対値は、周波数シフトの量 $\Delta(m-Q(1)$), n)よりも大きくてもよい。或いは、周波数シフトの量 $\Delta(m, n)$ の絶対値は、位相期間SP ($m-Q(1)$), n)における反射の度合いが大きいほど大きくなるように、設定されてもよい。例えば、周波数シフトの量 $\Delta(m, n)$ の絶対値は、反射の度合いの関数により決定されてもよい。

[0056] 一方の周波数シフトによりソース高周波電力RFの反射の度合いが増加する場合が生じ得る。この場合には、制御部35は、周波数 $f(m, n)$ を、

周波数 $f(m - Q(1), n)$ に対して他方の周波数シフトを有する周波数に設定してもよい。なお、周期 $CY(m)$ の前の二つ以上の周期の各々の位相期間 $SP(n)$ のソース高周波電力 RF の周波数が、その前の周期の位相期間 $SP(n)$ のソース高周波電力 RF の周波数に対して一方の周波数シフトを有するように更新されてもよい。この場合において、当該二つ以上の周期の位相期間 $SP(n)$ それぞれのソース高周波電力 RF の反射の度合いが増加傾向にある場合には、他方の周波数シフトが、周期 $CY(m)$ の位相期間 $SP(n)$ のソース高周波電力 RF の周波数に与えられてもよい。例えば、周期 $CY(m)$ の位相期間 $SP(n)$ のソース高周波電力 RF の周波数は、当該二つ以上の周期のうち最も早い周期のソース高周波電力の周波数に対して他方の周波数シフトを有する周波数に設定されてもよい。

[0057] 一方の周波数シフトにより位相期間 $SP(m, n)$ のソース高周波電力 RF の反射の度合いが位相期間 $SP(m - Q(1), n)$ のソース高周波電力 RF の反射の度合いから増加した場合には、制御部 35 は、周期 $CY(m + Q(1))$ 内の位相期間 $SP(n)$ におけるソース高周波電力 RF の周波数を中間の周波数に設定してもよい。周期 $CY(m + Q(1))$ は、周期 $CY(m)$ の後の第 3 の周期である。位相期間 $SP(m + Q(1), n)$ において設定され得る中間の周波数は、 $f(m - Q(1), n)$ と $f(m, n)$ との間の周波数であり、 $f(m - Q(1), n)$ と $f(m, n)$ の平均値であってもよい。

[0058] 位相期間 $SP(m + Q(1), n)$ において中間の周波数を用いた場合のソース高周波電力 RF の反射の度合い（例えば、反射波のパワーレベル P_r ）が所定の閾値よりも大きくなる場合が生じ得る。この場合に、制御部 35 は、周期 $CY(m + Q(2))$ 内の位相期間 $SP(n)$ におけるソース高周波電力 RF の周波数を、中間の周波数に対して他方の周波数シフトを有する周波数に設定してもよい。周期 $CY(m + Q(2))$ は、周期 $CY(m + Q(1))$ の後の第 4 の周期である。閾値は、予め定められている。他方の周波数シフトの量 $\Delta(m + Q(2), n)$ の絶対値は、一方の周波数シフトの

量 $\Delta(m, n)$ の絶対値よりも大きい。この場合には、ソース高周波電力 R_F の反射量をローカルな極小値から減少させることができなくなることを回避することが可能となる。なお、複数の周期 C_Y の各々における複数の位相期間 S_P のそれぞれのための閾値は、互いに同一であってもよく、異なってもよい。

[0059] 第2の例においては、周期 $C_Y(M)$ の位相期間 $S_P(1) \sim S_P(N)$ それぞれのために設定されたソース高周波電力 R_F の周波数は、後続の周期 C_Y 内の位相期間 $S_P(1) \sim S_P(N)$ それぞれのソース周波数 f_{RF} として用いられる。

[0060] [ソース周波数 f_{RF} の調整の第3の例]

[0061] 図10は、ソース周波数の調整の第3の例の流れ図である。図3には、工程 $ST3$ の一例として、ソース周波数の調整の第3の例が示されている。

[0062] 図10に示す工程 $ST3$ は、工程 $STa \sim STc$ を含む。工程 STa では、予め定められた周波数の時系列である基本時系列 TS_B が、周期 C_Y 内の複数の位相期間 S_P のソース高周波電力 R_F のソース周波数 f_{RF} として用いられる。即ち、周波数の時系列は、複数の周波数を含んでおり、当該複数の周波数は、周期 C_Y 内の複数の位相期間 S_P のそれぞれのソース高周波電力 R_F のソース周波数 f_{RF} として用いられる。周波数の時系列は、制御部35によって指定され得る。基本時系列 TS_B は、上述のソース周波数 f_{RF} の調整の第1の例又は第2の例を事前に行うことにより、準備され得る。

[0063] 図10に示す工程 $ST3$ では、次いで、工程 STb が行われる。工程 STb では、変更された時系列 TS_M が用いられる。即ち、時系列 TS_M に含まれる複数の周波数が、周期 C_Y 内の複数の位相期間 S_P のそれぞれのソース高周波電力 R_F の周波数として用いられる。工程 STb において用いられる時系列 TS_M は、制御部35によって指定され得る。工程 STc では、評価値に応じてソース高周波電力 R_F の負荷からの反射の度合いを減少させるように、工程 STb が繰り返される。

[0064] 工程 STb では、時系列 TS_M として、時系列 $TS1$ 、時系列 $TS2$ 、又は

時系列 $T S_3$ が用いられる。時系列 $T S_1$ は、周期 $C Y$ に対する位相シフト量を基本時系列 $T S_B$ に与えることにより得られる周波数の時系列である。時系列 $T S_2$ は、基本時系列 $T S_B$ を周波数方向にスケーリング（即ち、拡大又は縮小）させた周波数の時系列である。時系列 $T S_3$ は、基本時系列 $T S_B$ と同じ個数の周波数を含む周波数の時系列である。時系列 $T S_3$ は、基本時系列 $T S_B$ の複数の時間ゾーンのうち二つ以上を時間方向にスケーリング（拡大又は縮小）することにより得られる周波数の時系列である。

[0065] 評価値は、上述の測定値から制御部 35 によって決定される。評価値は、評価期間における測定値から決定される単一の代表値である。評価期間は、周波数の各時系列が継続して用いられる期間であり、周期 $C Y$ の時間長以上の時間長を有し得る。評価値は、評価期間における測定値又は当該測定値から得られる値の積分値、平均値、又はピーク値であってもよい。

[0066] [ソース周波数 f_{RF} の調整の第 4 の例]

[0067] 以下、図 11 及び図 12 を参照する。図 11 は、ソース周波数の調整の第 4 の例の流れ図である。図 12 は、図 11 に示す第 4 の例を説明するための図である。図 12 において横軸は時間を示しており、縦軸は電気バイアスエネルギー $B E$ とソース高周波電力 $R F$ のソース周波数 f_{RF} を示している。図 12 には、電気バイアスエネルギー $B E$ の周期 $C Y$ における波形が示されている。また、図 12 には、周期 $C Y$ 内の複数の位相期間 $S P$ のそれぞれのソース高周波電力 $R F$ のソース周波数 f_{RF} として用いられる基本時系列 $T S_B$ 及び変更された時系列 $T S_M$ が示されている。図 11 に示す工程 $S T 3 A$ は、図 10 に示す工程 $S T 3$ として用いられ得る。工程 $S T 3 A$ では、変更された時系列 $T S_M$ として、上述した時系列 $T S_1$ が用いられる。

[0068] 工程 $S T 3 A$ は、図 11 に示すように、工程 $S T a 1 1$ で開始する。工程 $S T a 1 1$ では、工程 $S T a$ に関して上述したように、基本時系列 $T S_B$ が用いられる。即ち、基本時系列 $T S_B$ に含まれる複数の周波数が、周期 $C Y$ 内の複数の位相期間 $S P$ のソース高周波電力 $R F$ のソース周波数 f_{RF} として用いられる。

- [0069] 次いで、工程STa12が行われる。工程STa12では、基本時系列 T_{S_B} を用いた場合の上述の測定値から上述の評価値が、制御部35によって決定される。
- [0070] 次いで、工程STp11が行われる。工程STp11では、周期CYに対して基本時系列 T_{S_B} に位相シフト量を与えることにより得られる時系列 T_{S_M} が準備される。時系列 T_{S_M} は、制御部35によって準備される。
- [0071] 次いで、工程STb11が行われる。工程STb11では、準備された時系列 T_{S_M} が用いられる。即ち、時系列 T_{S_M} に含まれる複数の周波数が、周期CY内の複数の位相期間SPのそれぞれのソース高周波電力RFのソース周波数 f_{RF} として用いられる。そして、工程STc1において、位相シフト量を変更しつつ、工程STb11が繰り返される。
- [0072] 工程STc1においては、工程STb12が工程STb11の後に行われる。工程STb12では、工程STb11が行われている期間、即ち評価期間における評価値が、制御部35によって取得される。
- [0073] 工程STc1においては、次いで、工程STJ11が行われる。工程STJ11では、終了条件が満たされるか否かが判定される。工程STJ11の判定は、制御部35によって行われる。工程STJ11において、終了条件は、主制御部2からプラズマ処理の終了が指示されているときに満たされる。
- [0074] 工程STJ11において終了条件が満たされないと判定された場合には、工程STJ12が行われる。工程STJ12では、工程STb12で取得された評価値が指定値以下であるか否かが判定される。工程STJ12の判定は、制御部35によって行われる。評価値が指定値以下であることは、ソース高周波電力RFの負荷からの反射の度合いが十分に小さいことを示す。工程STJ12において評価値が指定値以下であると判定された場合には、工程STb11からの処理が繰り返される。一方、工程STJ12において評価値が指定値よりも大きいと判定されると、工程STJ13が行われる。
- [0075] 工程STJ13では、工程STb12で取得された評価値とその直前に取得された評価値とが互いに比較されて、ソース高周波電力RFの負荷からの

反射の度合いが減少しているか否かが判定される。工程 S T J 1 3 の判定は、制御部 3 5 によって行われる。工程 S T J 1 3 においてソース高周波電力 R F の負荷からの反射の度合いが減少していると判定された場合には、工程 S T c 1 1 が行われる。一方、工程 S T J 1 3 においてソース高周波電力 R F の負荷からの反射の度合いが減少していないものと判定された場合には、工程 S T c 1 2 が行われる。

[0076] 工程 S T c 1 1 では、直前に用いられた位相シフト量と同一方向に位相シフト量に変更される。直前に用いられた位相シフト量とその前に用いられた位相シフト量に対して増加している場合には、工程 S T c 1 1 では、図 1 2 において右向きの矢印で示すように、位相シフト量が増加される。直前に用いられた位相シフト量とその前に用いられた位相シフト量に対して減少している場合には、工程 S T c 1 1 では、位相シフト量が減少される。そして、変更された位相シフト量を基本時系列 $T S_B$ に与えることにより得られる時系列 $T S_M$ が準備される。時系列 $T S_M$ は、制御部 3 5 によって準備される。そして、工程 S T b 1 1 が再び行われる。

[0077] 工程 S T c 1 2 では、直前に用いられた位相シフト量と逆方向に位相シフト量に変更される。直前に用いられた位相シフト量とその前に用いられた位相シフト量に対して増加している場合には、工程 S T c 1 2 では、図 1 2 において左向きの矢印で示すように、位相シフト量が減少される。直前に用いられた位相シフト量とその前に用いられた位相シフト量に対して減少している場合には、工程 S T c 1 2 では、位相シフト量が増加される。そして、変更された位相シフト量を基本時系列 $T S_B$ に与えることにより得られる時系列 $T S_M$ が準備される。時系列 $T S_M$ は、制御部 3 5 によって準備される。そして、工程 S T b 1 1 が再び行われる。

[0078] 工程 S T b 1 1 が繰り返されて、工程 S T J 1 1 において終了条件が満たされているものと判定されると、工程 S T 3 A は終了する。

[0079] [ソース周波数 f_{RF} の調整の第 5 の例]

[0080] 以下、図 1 3 ～図 1 7 を参照する。図 1 3 は、ソース周波数の調整の第 5

の例の流れ図である。図14～図17の各々は、第5の例を説明するための図である。図14～図17の各々において横軸は時間を示しており、縦軸は電気バイアスエネルギーBEとソース高周波電力RFのソース周波数 f_{RF} を示している。図14～図17の各々には、電気バイアスエネルギーBEの周期CYにおける波形が示されている。また、図14～図17の各々には、周期CY内の複数の位相期間SPのそれぞれのソース高周波電力RFのソース周波数 f_{RF} として用いられる基本時系列TS_B及び変更された時系列TS_Mが示されている。図13に示す工程ST3Bは、図10に示す工程ST3として用いられ得る。工程ST3Bでは、変更された時系列TS_Mとして、上述した時系列TS2が用いられる。

[0081] 図13に示すように、工程ST3Bは、工程ST3Aと同様に、工程STa11で開始する。次いで、工程ST3Aと同様に、工程STa12が行われる。

[0082] 次いで、工程STp21が行われる。工程STp21では、基本時系列TS_Bを周波数方向にスケーリング、即ち拡大又は縮小させることにより得られる時系列TS_Mが準備される。時系列TS_Mは、制御部35によって準備される。

[0083] 工程STp21において準備される時系列TS_Mは、図14に示すように、基本時系列TS_Bにおける最低周波数 f_{min} を維持しつつ基本時系列TS_Bを周波数方向にスケーリングすることにより得られる時系列であってもよい。以下の説明では、図14に示すように変更された時系列を時系列TS21という。工程STp21において準備される時系列TS_Mは、図15に示すように、基本時系列TS_Bにおける最高周波数 f_{max} を維持しつつ基本時系列TS_Bを周波数方向にスケーリングすることにより得られる時系列であってもよい。以下の説明では、図15に示すように変更された時系列を時系列TS22という。工程STp21において準備される時系列TS_Mは、図16に示すように、基本時系列TS_Bにおいて指定周波数 f_{sp} 以下の周波数を維持しつつ基本時系列TS_Bを周波数方向にスケーリングすることにより得られる時系列であ

ってもよい。以下の説明では、図 1 6 に示すように変更された時系列を時系列 TS_{23} という。工程 ST_{p21} において準備される時系列 TS_M は、図 1 7 に示すように、基本時系列 TS_B において指定周波数 f_{sp} 以上の周波数を維持しつつ基本時系列 TS_B を周波数方向にスケーリングすることにより得られる時系列であってもよい。以下の説明では、図 1 7 に示すように変更された時系列を時系列 TS_{24} という。

[0084] 次いで、工程 ST_{b21} が行われる。工程 ST_{b21} では、工程 ST_b に関して上述したように、準備された時系列 TS_M が用いられる。即ち、時系列 TS_M に含まれる複数の周波数が、周期 C_Y における複数の位相期間 SP のそれぞれのソース高周波電力 RF のソース周波数 f_{RF} として用いられる。そして、工程 ST_{c2} において、工程 ST_{b21} が繰り返される。制御部 35 は、工程 ST_{b21} の繰り返しにおいて基本時系列 TS_B に対する周波数方向へのスケーリングの倍率を変更する。

[0085] 工程 ST_{b21} の繰り返しにおいては、時系列 $TS_{21} \sim TS_{24}$ のうち何れかが用いられ、スケーリングの倍率に変更されてもよい。工程 ST_{b21} の繰り返しにおいては、時系列 $TS_{21} \sim TS_{24}$ がスケーリングの倍率を変更しつつ順に用いられてもよい。

[0086] 工程 ST_{c2} においては、工程 ST_{b22} が、工程 ST_{b21} の後に行われる。工程 ST_{b22} は、工程 ST_{b12} と同じ工程である。

[0087] 工程 ST_{c2} においては、工程 ST_{J21} が工程 ST_{b22} の後に行われる。工程 ST_{J21} では、スケーリングの終了条件が満たされるか否か判定される。工程 ST_{J21} の判定は、制御部 35 によって行われる。工程 ST_{J21} において、スケーリングの終了条件は、工程 ST_{b21} の繰り返しが所定回数行われている場合に満たされる。

[0088] 工程 ST_{J21} において、スケーリングの終了条件が満たされないと判定されると、工程 ST_{c21} が行われる。工程 ST_{c21} では、基本時系列 TS_B に対する周波数方向へのスケーリングの倍率が、図 1 4 ~ 図 1 7 において矢印で示すように変更されることにより、時系列 TS_M が準備される。時系列

TS_M は、制御部35によって準備される。一方、工程STJ21において、スケーリングの終了条件が満たされているものと判定されると、工程STd21が行われる。

[0089] 工程STd21では、ソース高周波電力RFの反射の度合いを最も小さくする時系列 TS_M （第1の時系列）が、得られている複数の評価値に基づいて選択される。制御部35は、選択された時系列 TS_M に含まれる複数の周波数を、周期CY内の複数の位相期間SPのそれぞれのソース高周波電力RFのソース周波数 f_{RF} として用いる。この工程STd21の後、工程ST3Bは終了してもよい。或いは、工程STd21の後に、工程STe21が行われてもよい。工程STe21では、工程STd21で選択された時系列 TS_M を基本時系列として用いて、工程ST3Aが行われる。

[0090] [ソース周波数 f_{RF} の調整の第6の例]

[0091] 以下、図18及び図19を参照する。図18は、ソース周波数の調整の第6の例の流れ図である。図19は、第6の例を説明するための図である。図19において横軸は時間を示しており、縦軸は電気バイアスエネルギーBEとソース高周波電力RFのソース周波数 f_{RF} を示している。図19には、電気バイアスエネルギーBEの周期CYにおける波形が示されている。また、図19には、周期CY内の複数の位相期間SPのそれぞれのソース高周波電力RFのソース周波数 f_{RF} として用いられる基本時系列 TS_B 及び変更された時系列 TS_M が示されている。図18に示す工程ST3Cは、図10に示す工程ST3として用いられ得る。工程ST3Cでは、変更された時系列 TS_M として、上述した時系列TS3が用いられる。

[0092] 工程ST3Cは、工程STp31で開始する。工程STp31では、基本時系列 TS_B を用いて工程ST3Aが行われる。次いで、工程STp32が行われる。工程STp32では、工程STp31で用いた複数の時系列のうち、ソース高周波電力RFの反射の度合いを最も小さくする時系列 TS_M （第1の時系列）が、工程STp31で得られた複数の評価値に基づいて特定され、基本時系列として選択される。

- [0093] 次いで、工程 S T p 3 3 が行われる。工程 S T p 3 3 では、工程 S T p 3 2 で選択された基本時系列を用いて、工程 S T 3 B が行われる。次いで、工程 S T p 3 4 が行われる。工程 S T p 3 4 では、工程 S T p 3 3 で用いた複数の時系列のうち、ソース高周波電力 R F の反射の度合いを最も小さくする時系列 T S_M（第 2 の時系列）が、工程 S T p 3 3 で得られた複数の評価値に基づいて特定され、基本時系列として選択される。
- [0094] 次いで、工程 S T p 3 5 が実行される。工程 S T p 3 5 では、工程 S T p 3 4 で選択された基本時系列の複数の時間ゾーンのうち二つ以上を時間方向にスケーリング（拡大又は縮小）して、基本時系列 T S_B と同じ個数の周波数を含む変更された時系列 T S_M が準備される。工程 S T p 3 5 において、時系列 T S_M は制御部 3 5 によって準備される。なお、工程 S T p 3 1 ～工程 S T p 3 4 の代わりに工程 S T a 1 1 及び工程 S T a 1 2 が行われて、工程 S T p 3 5 において基本時系列 T S_B から時系列 T S_M が準備されてもよい。
- [0095] 複数の時間ゾーンは、図 1 9 に示すように、ゾーン Z 1 ～ Z 6 を含んでいてもよい。ゾーン Z 1 ～ Z 6 を決定するために、工程 S T p 3 5 で用いられる基本時系列の最低周波数 f_{min} 、最高周波数 f_{max} 、及び平均周波数 f_{ave} が特定される。そして、基本時系列に含まれる最低周波数 f_{min} と最大周波数 f_{max} の差、即ち周波数幅が求められる。そして、最小周波数 f_{min} から最小周波数 f_{min} と周波数幅の 10 % との加算値までの範囲に対応する時間ゾーンが、ゾーン Z 2 として決定される。また、最大周波数 f_{max} から周波数幅の 10 % を減算した値から最大周波数 f_{max} までの範囲に対応する時間ゾーンが、ゾーン Z 5 として決定される。また、周期 C Y の開始時点からゾーン Z 2 の開始時点までの時間ゾーンが、ゾーン Z 1 として決定される。また、ゾーン Z 2 の終了時点から平均周波数 f_{ave} に対応する時点までの時間ゾーンが、ゾーン Z 3 として決定される。また、平均周波数 f_{ave} に対応する時点からゾーン Z 5 の開始時点までの時間ゾーンが、ゾーン Z 4 として決定される。また、ゾーン Z 5 の終了時点から周期 C Y の終了時点までの時間ゾーンがゾーン Z 6 として決定される。

- [0096] 工程STp35においては、基本時系列のゾーンZ2が時間方向に拡大されてもよい。また、基本時系列TS_Bと同じ個数の周波数を含む変更された時系列TS_Mを生成するために、基本時系列のゾーンZ1とゾーンZ3が時間方向に縮小されてもよい。
- [0097] 次いで、工程STb31が行われる。工程STb31では、工程STbに関して上述したように、準備された時系列TS_Mが用いられる。即ち、時系列TS_Mに含まれる複数の周波数が、周期CYにおける複数の位相期間SPのそれぞれのソース高周波電力RFのソース周波数 f_{RF} として用いられる。そして、工程STc3において、工程STb31が繰り返される。制御部35は、工程STb31の繰り返しにおいて基本時系列の複数の時間ゾーンのうち二つ以上の時間方向へのスケーリングの倍率を変更する。
- [0098] 工程STc3においては、工程STb32が、工程STb31の後に行われる。工程STb32は、工程STb12と同じ工程である。次いで、工程STJ31が行われる。工程STJ31では、スケーリングの終了条件が満たされるか否かが判定される。工程STJ31において、スケーリングの終了条件は、工程STb31の繰り返しが所定回数行われている場合に満たされる。
- [0099] 工程STJ31において、スケーリングの終了条件が満たされないと判定されると、工程STc31が行われる。工程STc31では、基本時系列の複数の時間ゾーンのうち二つ以上の時間方向へのスケーリングの倍率が変更されることにより、時系列TS_Mが準備される。時系列TS_Mは、制御部35によって準備される。準備された時系列TS_Mは、工程STb31において用いられる。一方、工程STJ31において、スケーリングの終了条件が満たされているものと判定されると、後述する工程STd31が行われる。
- [0100] 工程STb31の繰り返しにおいては、工程STp35と同様に、基本時系列のゾーンZ2を時間方向に拡大し、基本時系列のゾーンZ1とゾーンZ3を時間方向に縮小することが、ゾーンZ2の時間方向へのスケーリングの倍率を変更しつつ行われてもよい。この処理は、工程STb32において取

得される評価値からソース高周波電力 R_F の反射の度合いが減少しなくなっているものと判断されるまで行われる。

[0101] 次いで、工程 $STb31$ の繰り返しにおいては、基本時系列のゾーン $Z5$ を時間方向に拡大し、基本時系列のゾーン $Z4$ とゾーン $Z6$ を時間方向に縮小することが、ゾーン $Z5$ の時間方向へのスケーリングの倍率を変更しつつ行われてもよい。この処理は、工程 $STb32$ において取得される評価値からソース高周波電力 R_F の反射の度合いが減少しなくなっているものと判断されるまで行われる。

[0102] 工程 $STd31$ では、工程 $STc3$ において得られた複数の評価値からソース高周波電力 R_F の反射の度合いを最も小さくする時系列 TS_M が特定されて、第3の時系列として選択される。工程 $STd31$ における第3の時系列の選択は、制御部35によって行われる。そして、選択された時系列（第3の時系列）に含まれる複数の周波数が、周期 CY 内の複数の位相期間 SP のそれぞれのソース高周波電力 R_F のソース周波数 f_{RF} として用いられる。なお、第3の時系列を基本時系列として用いて、工程 $STp31$ からの処理が繰り返されてもよい。

[0103] [ソース周波数 f_{RF} の調整の第7の例]

[0104] 以下、図20の(a)、図20の(b)、図21の(a)、図21の(b)、及び図22を参照する。図20の(a)、図20の(b)、図21の(a)、及び図21の(b)の各々は、ソース高周波電力と電気バイアスエネルギーの一例のタイミングチャートである。図22は、ソース周波数の調整の第7の例に関連する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 R_F の「ON」は、ソース高周波電力 R_F が高周波電極に供給されていることを示しており、ソース高周波電力 R_F の「OFF」は、ソース高周波電力 R_F の供給が停止されていることを示している。ソース高周波電力 R_F の「HIGH」は、「LOW」で示されるソース高周波電力 R_F のレベルよりも高いレベルを有するソース高周波電力 R_F が高周波電極に供給されていることを示している。また、電気バイアスエネルギー BE の「O

N」は、電気バイアスエネルギーBEがバイアス電極に与えられていることを示しており、電気バイアスエネルギーBEの「OFF」は、電気バイアスエネルギーBEがバイアス電極に与えられていないことを示している。また、電気バイアスエネルギーBEの「HIGH」は、「LOW」で示される電気バイアスエネルギーBEのレベルよりも高いレベルを有する電気バイアスエネルギーBEがバイアス電極に与えられていることを示している。

[0105] 図20の(a)、図20の(b)、図21の(a)、及び図21の(b)の何れの例においても、電気バイアスエネルギーBEは、ON/OFFパルス又はHIGH/LOWパルスとしてバイアス電極に供給される。ON/OFFパルス又はHIGH/LOWパルスの周波数は、バイアス周波数よりも低く、例えば、1kHz以上、100kHz以下である。

[0106] バイアス電源32は、主制御部2から与えられる第1の制御信号が第1の状態（例えば、ON状態）を有する期間において、ON又はHIGH状態の電気バイアスエネルギーBEを供給する。バイアス電源32は、第1の制御信号が第2の状態（例えば、OFF状態）を有する期間において、電気バイアスエネルギーBEをOFF又はLOW状態に設定する。第1の制御信号が第1状態を有する期間は第1のクロック信号と同期していてもよく、同期していなくてもよい。

[0107] 第1の制御信号が第1状態を有する期間と第1のクロック信号の両者が同期していない場合には、ON又はHIGH状態の電気バイアスエネルギーBEの供給は、第1の制御信号の状態が第1の状態となった直後に第1のクロック信号によって指定されるタイミングで開始されてもよい。一方、第1の制御信号が第1状態を有する期間と第1のクロック信号の両者が同期している場合には、バイアス電源32は、第1の制御信号の状態が第1の状態となったときに電気バイアスエネルギーBEの供給を開始する。

[0108] バイアス電源32は、第1の制御信号の状態が第1の状態から第2の状態となったときに、電気バイアスエネルギーBEをOFF又はLOW状態に設定してもよい。或いは、バイアス電源32は、第1の制御信号の状態が第1

の状態から第2の状態となったときに継続中の電気バイアスエネルギーBEの周期CYが終了するタイミングで、電気バイアスエネルギーBEをOFF又はLOW状態に設定してもよい。

[0109] 図20の(a)に示すように、ソース高周波電力RFは、連続波として高周波電極に供給されてもよい。図20の(a)に示す例では、ソース高周波電力RFとON又はHIGH状態の電気バイアスエネルギーBEが、複数の重複期間OPにおいて同時に供給される。

[0110] 或いは、図20の(b)、図21の(a)、及び図21の(b)に示すように、ソース高周波電力RFは、ON/OFFパルス又はHIGH/LOWパルスとして高周波電極に供給されてもよい。高周波電源31は、主制御部2から与えられる第2の制御信号が第1の状態(例えば、ON状態)を有する期間において、ON又はHIGH状態のソース高周波電力RFを供給する。なお、電気バイアスエネルギーBEが供給されている期間において第2の制御信号の状態が第1の状態になる場合には、高周波電源31は、第2の制御信号の状態が第1の状態になった後、電気バイアスエネルギーBEの最初の周期CYと同期するタイミングでON又はHIGH状態のソース高周波電力RFの供給を開始してもよい。また、高周波電源31は、第2の制御信号が第2の状態(例えば、OFF状態)を有する期間において、ソース高周波電力RFをOFF又はLOW状態に設定する。

[0111] 図20の(b)に示すように、電気バイアスエネルギーBEのパルスが供給される期間とソース高周波電力RFのパルスが供給される期間は、互いに同一であってもよい。この場合には、複数の重複期間OPはそれぞれ、電気バイアスエネルギーBEのパルスが供給される期間と一致し、ソース高周波電力RFのパルスが供給される期間と一致する。

[0112] 図21の(a)及び図21の(b)に示すように、ソース高周波電力RFのパルスが供給される複数の期間の各々は、電気バイアスエネルギーBEのパルスが供給される複数の期間のうち一つと部分的に重複していてもよい。即ち、複数の重複期間OPの各々は、電気バイアスエネルギーBEのパルス

が供給されている期間内でソース高周波電力 R_F のパルスが同時に供給される一部の期間である。

[0113] 図 21 の (a) に示すように、電気バイアスエネルギー B_E のパルスの供給が開始されるときにソース高周波電力 R_F が供給されている場合には、第 1 の制御信号の状態が第 1 の状態となった後、最初に第 1 のクロック信号によって指定されるタイミングまでの間、電気バイアスエネルギー B_E のレベルが低いレベルに設定されてもよい。また、図 21 の (a) に示すように、重複期間 OP の直後には、電気バイアスエネルギー B_E のレベルは、低いレベルに設定されてもよい。

[0114] 以下の説明において、重複期間 $OP(k)$ は、複数の重複期間 OP のうち k 番目の重複期間を表している。即ち、重複期間 $OP(k)$ は、複数の重複期間 OP のうち任意の重複期間を表している。複数の重複期間 OP は、複数 (M 個) の周期 CY を含む。各周期 CY は、複数 (N 個) の位相期間 SP を含む。周期 $CY(m)$ は、複数の重複期間 OP の各々における複数の周期 CY のうち、 m 番目の周期を表す。また、周期 $CY(k, m)$ は、 k 番目の重複期間内の m 番目の周期を表す。

[0115] ソース周波数 f_{RF} の調整の第 7 の例においては、制御部 35 により、複数の重複期間 OP の各々に含まれる複数の周期 CY の各々の中の複数の位相期間 SP の各々におけるソース高周波電力 R_F のソース周波数 f_{RF} が調整される。

[0116] 以下では、まず、1 番目の重複期間 OP 、即ち重複期間 $OP(1)$ におけるソース高周波電力 R_F の周波数の設定について説明する。制御部 35 は、重複期間 $OP(1)$ 内の周期 $CY(1, m)$ 内の位相期間 $SP(1, m, n)$ におけるソース高周波電力 R_F のソース周波数 f_{RF} を、代表値 $RV(n)$ の変化に応じて調整する。なお、位相期間 $SP(k, m, n)$ は、 k 番目の重複期間 $OP(k)$ 内の周期 $CY(k, m)$ における n 番目の位相期間 SP を表す。位相期間 $SP(1, m, n)$ のソース高周波電力 R_F の周波数の調整は、第 2 の例における位相期間 $SP(m, n)$ のソース高周波電力 R_F の

ソース周波数 f_{RF} の調整と同一の処理である。

[0117] 以下、2番目から $(T-1)$ 番目までの重複期間 $OP(k)$ におけるソース高周波電力 RF のソース周波数 f_{RF} の設定について説明する。なお、 T は、3以上且つ K より小さい整数である。重複期間 $OP(k)$ 内の複数の周期 CY 中の複数の位相期間 SP のソース高周波電力 RF のソース周波数 f_{RF} は、重複期間 $OP(1)$ 内の複数の周期 CY 中の複数の位相期間 SP のソース高周波電力 RF のソース周波数 f_{RF} の上述の設定処理と同一の設定処理を用いて設定されてもよい。なお、重複期間 $OP(k)$ 内の周期 $CY(1)$ 中の複数の位相期間 SP のソース高周波電力 RF のソース周波数 f_{RF} の設定では、重複期間 $OP(k-1)$ 内の周期 $CY(M-1)$ 及び周期 $CY(M)$ が、第1の周期及び第2の周期として用いられてもよい。また、重複期間 $OP(k)$ 内の $CY(2)$ 中の複数の位相期間 SP のソース高周波電力 RF の周波数の設定では、重複期間 $OP(k-1)$ 内の周期 $CY(M)$ 及び重複期間 $OP(k)$ 内の周期 $CY(1)$ が、第1の周期及び第2の周期として用いられてもよい。

[0118] 或いは、重複期間 $OP(k)$ 内の複数の周期 CY 中の複数の位相期間 SP のソース高周波電力 RF のソース周波数 f_{RF} は、予め準備されたテーブルに登録されているそれぞれの周波数を用いて設定されてもよい。

[0119] 以下、図22を参照して、 T 番目から K 番目までの重複期間 $OP(k)$ におけるソース高周波電力 RF のソース周波数 f_{RF} の設定について説明する。制御部35は、重複期間 $OP(k)$ 内の周期 $CY(m)$ 内の位相期間 $SP(n)$ 、即ち位相期間 $SP(k, m, n)$ におけるソース高周波電力 RF のソース周波数 f_{RF} を、代表値 $RV(n)$ の変化に応じて、調整する。代表値 $RV(n)$ の変化は、重複期間 $OP(k)$ の前の二つ以上の重複期間 OP 内の周期 $CY(m)$ 内の対応の位相期間 $SP(n)$ において互いに異なるソース高周波電力 RF のソース周波数 f_{RF} を用いることにより特定される。

[0120] 重複期間 $OP(k)$ の前の二つ以上の重複期間 OP は、第1の重複期間及び第2の重複期間を含む。第1の重複期間は、重複期間 $OP(k-Q(2))$

）であり、第2の重複期間は、第1の重複期間の後の重複期間であり、重複期間 $OP(k - Q(1))$ である。 $Q(1)$ は1以上の整数であり、 $Q(2)$ は2以上の整数であり、 $Q(1) < Q(2)$ が満たされる。

[0121] 制御部35は、位相期間 $SP(k - Q(1), m, n)$ におけるソース高周波電力RFの周波数 $f(k - Q(1), m, n)$ に、位相期間 $SP(k - Q(2), m, n)$ におけるソース高周波電力RFの周波数から的一方の周波数シフトを与える。ここで、 $f(k, m, n)$ は、位相期間 $SP(k, m, n)$ で用いられるソース高周波電力RFの周波数を表す。 $f(k, m, n)$ は、 $f(k, m, n) = f(k - Q(1), m, n) + \Delta(k, m, n)$ で表される。 $\Delta(k, m, n)$ は、周波数シフトの量を表す。一方の周波数シフトは、周波数の減少及び周波数の増加のうち一方である。一方の周波数シフトが周波数の減少であれば、 $\Delta(k, m, n)$ は負の値を有する。一方の周波数シフトが周波数の増加であれば、 $\Delta(k, m, n)$ は正の値を有する。

[0122] 制御部35は、周波数シフトによるソース高周波電力RFの反射の度合い（例えば、反射波のパワーレベル P_r ）の増減を、代表値 $RV(k - Q(2), m, n)$ と代表値 $RV(k - Q(1), m, n)$ との間の変化から特定する。一方の周波数シフトによりソース高周波電力RFの反射の度合いが減少している場合には、制御部35は、周波数 $f(k, m, n)$ を、周波数 $f(k - Q(1), m, n)$ に対して一方の周波数シフトを有する周波数に設定する。なお、 $RV(k, m, n)$ は、位相期間 $SP(k, m, n)$ における代表値 RV を表している。

[0123] 重複期間 $OP(k)$ の前の二つ以上の重複期間の各々の位相期間 $SP(m, n)$ のソース高周波電力RFの周波数が、その前の重複期間の位相期間 $SP(m, n)$ のソース高周波電力RFの周波数に対して一方の周波数シフトを有するように更新されてもよい。この場合において、当該二つ以上の重複期間の位相期間 $SP(m, n)$ それぞれのソース高周波電力RFの反射の度合いが増加傾向にある場合には、他方の周波数シフトが、重複期間 $OP(k)$

）の位相期間 $SP(m, n)$ のソース高周波電力 RF の周波数に与えられてもよい。例えば、重複期間 $OP(k)$ の位相期間 $SP(m, n)$ のソース高周波電力 RF の周波数は、当該二つ以上の重複期間のうち最も早い重複期間のソース高周波電力 RF の周波数に対して他方の周波数シフトを有する周波数に設定されてもよい。

[0124] 位相期間 $SP(k, m, n)$ における一方の周波数シフトの量 $\Delta(m, n)$ は、位相期間 $SP(k - Q(1), m, n)$ における一方の周波数シフトの量 $\Delta(k - Q(1), m, n)$ と同一であってもよい。即ち、周波数シフトの量 $\Delta(k, m, n)$ の絶対値は、周波数シフトの量 $\Delta(k - Q(1), m, n)$ と同一であってもよい。或いは、周波数シフトの量 $\Delta(k, m, n)$ の絶対値は、周波数シフトの量 $\Delta(k - Q(1), m, n)$ よりも大きくてもよい。或いは、周波数シフトの量 $\Delta(k, m, n)$ の絶対値は、位相期間 $SP(k - Q(1), m, n)$ における反射の度合いが大きいほど大きくなるように、設定されてもよい。例えば、周波数シフトの量 $\Delta(k, m, n)$ の絶対値は、反射の度合いの関数により決定されてもよい。

[0125] 一方の周波数シフトにより位相期間 $SP(k - Q(1), m, n)$ のソース高周波電力 RF の反射の度合いが位相期間 $SP(k - Q(2), m, n)$ のソース高周波電力 RF の反射の度合いから増加する場合が生じ得る。この場合に、制御部 35 は、周波数 $f(k, m, n)$ を、周波数 $f(k - Q(1), m, n)$ に対して他方の周波数シフトを有する周波数に設定してもよい。

[0126] また、一方の周波数シフトにより位相期間 $SP(k, m, n)$ のソース高周波電力 RF の反射の度合いが位相期間 $SP(k - Q(1), m, n)$ のソース高周波電力 RF の反射の度合いから増加する場合が生じ得る。この場合には、制御部 35 は、位相期間 $SP(k + Q(1), m, n)$ におけるソース高周波電力 RF の周波数を中間の周波数に設定してもよい。即ち、この場合には、重複期間 $OP(k + Q(1))$ 内の周期 $CY(m)$ 内の位相期間 $SP(n)$ におけるソース高周波電力 RF の周波数を中間の周波数に設定して

もよい。重複期間 $OP(k+Q(1))$ は、重複期間 $OP(k)$ の後の第3の重複期間である。位相期間 $SP(k+Q(1), m, n)$ において設定され得る中間の周波数は、 $f(k-Q(1), m, n)$ と $f(k, m, n)$ との間の周波数であり、 $f(k-Q(1), m, n)$ と $f(k, m, n)$ の平均値であってもよい。

[0127] また、位相期間 $SP(k+Q(1), m, n)$ において中間の周波数を用いた場合のソース高周波電力 RF の反射の度合いが所定の閾値よりも大きくなる場合が生じ得る。この場合に、制御部35は、位相期間 $SP(k+Q(2), m, n)$ におけるソース高周波電力 RF の周波数を、中間の周波数に対して他方の周波数シフトを有する周波数に設定してもよい。即ち、この場合には、重複期間 $OP(k+Q(2))$ 内の周期 $CY(m)$ 内の位相期間 $SP(n)$ におけるソース高周波電力 RF の周波数に、他方の周波数シフトを与えてもよい。重複期間 $OP(k+Q(2))$ は、重複期間 $OP(k+Q(1))$ の後の第4の重複期間である。閾値は、予め定められている。他方の周波数シフトの量 $\Delta(k+Q(2), m, n)$ の絶対値は、一方の周波数シフトの量 $\Delta(k, m, n)$ の絶対値よりも大きい。この場合には、ソース高周波電力 RF の反射量をローカルな極小値から減少させることができなくなることを回避することが可能となる。なお、複数の重複期間 OP 内の複数の周期 CY の各々における複数の位相期間 SP のそれぞれのための閾値は、互いに同一であってもよく、異なってもよい。

[0128] なお、複数の重複期間 OP 以外の期間で供給されるソース高周波電力 RF のソース周波数 f_{RF} は固定されていてもよい。或いは、複数の重複期間 OP と同様に、複数の重複期間 OP_{HL} においても、ソース高周波電力 RF のソース周波数 f_{RF} が調整されてもよい。複数の重複期間 OP_{HL} は、HIGH又はON状態のソース高周波電力 RF とLOW状態の電気バイアスエネルギー BE が同時に供給される期間である。また、複数の重複期間 OP と同様に、複数の重複期間 OP_{LL} においても、ソース高周波電力 RF のソース周波数 f_{RF} が調整されてもよい。複数の重複期間 OP_{LL} は、LOW状態のソース高周波

電力 R_F と LOW 状態の電気バイアスエネルギー B_E が同時に供給される期間である。また、複数の重複期間 OP と同様に、複数の重複期間 OP_{LH} においても、ソース高周波電力 R_F のソース周波数 f_{RF} が調整されてもよい。複数の重複期間 OP_{LH} は、LOW 状態のソース高周波電力 R_F と HIGH 状態の電気バイアスエネルギー B_E が同時に供給される期間である。

[0129] [ソース周波数 f_{RF} の調整の第 8 の例]

[0130] 第 8 の例では、各周期 CY の複数の位相期間 SP の各々のためのソース高周波電力 R_F のソース周波数 f_{RF} は、事前に決定される。具体的には、周期 CY 内の各位相期間 SP において、複数の周波数オフセットの各々と基準周波数との加算により決定される周波数が、ソース高周波電力 R_F のソース周波数 f_{RF} として用いられる。複数の周波数オフセットの各々は正又は負の値を有する。そして、プラズマに伝達されるソース高周波電力 R_F のパワーレベルを最大化する各位相期間 SP のための周波数オフセットが決定される。なお、プラズマに伝達されるソース高周波電力 R_F のパワーレベルは、ソース高周波電力 R_F の進行波のパワーレベルと反射波のパワーレベルの差であり得る。複数の位相期間 SP それぞれのための決定された周波数オフセットはテーブルに格納される。制御部 35 は、各周期 CY 内の各位相期間 SP において、基準周波数とテーブルに格納されている対応の周波数オフセットとの加算により決定される周波数を、ソース高周波電力 R_F のソース周波数 f_{RF} として用いる。

[0131] 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。

[0132] 別の実施形態においては、プラズマ処理装置は、誘導結合型のプラズマ処理装置、ECR プラズマ処理装置、ヘリコン波励起プラズマ処理装置、又は表面波プラズマ処理装置であってもよい。何れのプラズマ処理装置においても、ソース高周波電力 R_F は、プラズマの生成のために用いられる。

[0133] 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 16〕に記載する。

[0134] 〔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氣的に結合されており、第1のクロック信号により指定されるタイミングで、バイアス周波数を有する電気バイアスエネルギーを発生するように構成されたバイアス電源と、

前記チャンバ内でガスからプラズマを生成するためにソース周波数を有するソース高周波電力を発生するように構成された高周波電源と、
を備え、

前記高周波電源は、前記電気バイアスエネルギーが前記基板支持部に供給されているときに、第2のクロック信号により指定されるタイミングで調整された前記ソース周波数を有する前記ソース高周波電力を出力するように構成されており、

前記第2のクロック信号は、前記バイアス周波数より高い周波数を有し、前記第1のクロック信号に同期されている、
プラズマ処理装置。

[0135] E 1の実施形態では、電気バイアスエネルギーの周期内の複数の位相においてソース高周波電力のソース周波数が調整される。ソース高周波電力のソース周波数が調整されるタイミングは、第2のクロック信号によって指定される。第2のクロック信号は、電気バイアスエネルギーを発生するタイミングを指定する第1のクロック信号に同期されている。したがって、E 1の実施形態によれば、電気バイアスエネルギーの周期内の位相とソース高周波電力のソース周波数の調整のタイミングを正確に同期させることが可能となる。

[0136] 〔E 2〕

基準クロック信号を発生するように構成された基準クロック信号発生器と

、
前記基準クロック信号を分周することにより前記第2のクロック信号を生成するように構成された分周器と、
を更に備え、

前記第1のクロック信号は、前記基準クロック信号であるか、別の分周器において前記基準クロック信号を分周することにより生成される、
E 1 に記載のプラズマ処理装置。

[0137] [E 3]

前記第2のクロック信号を生成する前記分周器及び／又は前記別の分周器は、周波数通倍器であるPLL回路と、該PLL回路の参照入力と前記基準クロック信号発生器の出力との間で接続された分周器と、を含む、E 2 に記載のプラズマ処理装置。

[0138] [E 4]

前記ソース高周波電力の負荷からの反射の度合いを反映する電気信号を出力するように構成されたセンサと、

前記センサの出力に接続されたアナログーデジタル変換器と、
を更に備え、

前記アナログーデジタル変換器は、第3のクロック信号により指定されるタイミングで、前記電気信号に対するアナログーデジタル変換を行ってデジタル信号を生成するように構成されており、

前記第3のクロック信号は、前記基準クロック信号であるか別の分周器によって該基準クロック信号を分周することにより生成される、

E 2 又はE 3 に記載のプラズマ処理装置。

[0139] [E 5]

前記第3のクロック信号を発生する前記分周器は、周波数通倍器であるPLL回路と、前記基準クロック信号発生器の出力と前記PLL回路の参照入力との間で接続された分周器と、を含む、E 4 に記載のプラズマ処理装置。

[0140] [E 6]

前記第2のクロック信号と同期した複数の位相期間の各々における前記デジタル信号から代表値を生成し、該複数の位相期間の各々において前記代表値に基づいて前記ソース高周波電力の反射を抑制するよう、前記ソース高周波電力の前記ソース周波数を設定するように構成された制御部を更に備える、E 4又はE 5に記載のプラズマ処理装置。

[0141] [E 7]

前記高周波電源は、

前記第1のクロック信号に同期された第4のクロック信号により指定されるタイミングで前記ソース高周波電力の波形データのデジタルーアナログ変換を行うように構成されたデジタルーアナログ変換器と、

前記デジタルーアナログ変換器の出力に接続されており、前記ソース高周波電力を出力するように構成された増幅器と、

を含み、

前記第4のクロック信号は、前記基準クロック信号であるか、別の分周器において前記基準クロック信号を分周することにより生成される、

E 2～E 6の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0142] [E 8]

前記第4のクロック信号を生成する前記分周器は、周波数通倍器であるPLL回路と、前記基準クロック信号発生器の出力と前記PLL回路の参照入力との間で接続された分周器と、を含む、E 7に記載のプラズマ処理装置。

[0143] [E 9]

前記電気バイアスエネルギーは、前記バイアス周波数を有するバイアス高周波電力であるか、前記バイアス周波数の逆数である時間間隔で周期的に発生される電圧であり、

前記バイアス電源は、

前記第1のクロック信号により指定されるタイミングで前記電気バイアスエネルギーの波形データのデジタルーアナログ変換を行うように構成されたデジタルーアナログ変換器と、

該バイアス電源の前記デジタル－アナログ変換器の出力に接続されており、前記電気バイアスエネルギーを出力するように構成された増幅器と、
を含む、
E 2 ～ E 8 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0144] [E 1 0]

前記電気バイアスエネルギーは、前記バイアス周波数の逆数である時間間隔で周期的に発生される電圧のパルスであり、
前記バイアス電源は、
直流電源と、
前記第 1 のクロック信号の立ち上がり及び立ち下りのうち一方のタイミングで前記直流電源を該バイアス電源の出力に結合し、該立ち上がり及び該立ち下りのうち他方のタイミングで該バイアス電源の出力をグラウンドに接続するように構成されたパルスユニットと、
を含む、
E 2 ～ E 8 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0145] [E 1 1]

(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バイアス周波数を有する電気バイアスエネルギーを供給する工程と、
、
(b) 前記チャンバ内でガスからプラズマを生成するために高周波電源からソース周波数を有するソース高周波電力を供給する工程と、
を含み、
前記 (a) において、前記電気バイアスエネルギーは、第 1 のクロック信号により指定されるタイミングで発生され、
前記電気バイアスエネルギーが前記基板支持部に供給されているときに、
前記 (b) において、前記高周波電源は、第 2 のクロック信号により指定されるタイミングで調整された前記ソース周波数を有する前記ソース高周波電力を出力し、

前記第2のクロック信号は、前記バイアス周波数より高い周波数を有し、
前記第1のクロック信号に同期されている、
制御方法。

[0146] [E 1 2]

前記第2のクロック信号は、基準クロック信号発生器により発生される基準クロック信号を分周器により分周することにより発生され、

前記第1のクロック信号は、前記基準クロック信号であるか、別の分周器において前記基準クロック信号を分周することにより生成される、

E 1 1 に記載の制御方法。

[0147] [E 1 3]

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供給される電気バイアスエネルギーを第1のクロック信号により指定されるタイミングで発生するように構成されたバイアス電源と、

前記チャンバ内でガスからプラズマを生成するためにソース高周波電力を発生するように構成された高周波電源と、

を備え、

前記高周波電源は、前記電気バイアスエネルギーが前記基板支持部に供給されているときに、第2のクロック信号により指定されるタイミングで調整されたソース周波数を有する前記ソース高周波電力を出力するように構成されており、

前記第2のクロック信号は、前記電気バイアスエネルギーのバイアス周波数より高い周波数を有し、前記第1のクロック信号に同期されている、

電源システム。

[0148] [E 1 4]

基準クロック信号を発生するように構成された基準クロック信号発生器と、
、

前記基準クロック信号を分周することにより前記第2のクロック信号を発生するように構成された分周器と、

を更に備え、

前記第１のクロック信号は、前記基準クロック信号であるか、別の分周器において前記基準クロック信号を分周することにより生成される、

Ｅ１３に記載の電源システム。

[0149] [Ｅ１５]

Ｅ１１に記載の制御方法をプラズマ処理装置によって実行させるよう、該プラズマ処理装置のコンピュータによって実行されるプログラム。

[0150] [Ｅ１６]

Ｅ１５に記載のプログラムを記憶した記憶媒体。

[0151] 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

[0152] 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、第1のクロック信号により指定されるタイミングで、バイアス周波数を有する電気バイアスエネルギーを発生するように構成されたバイアス電源と、
 前記チャンバ内でガスからプラズマを生成するためにソース周波数を有するソース高周波電力を発生するように構成された高周波電源と、
 、
 を備え、
 前記高周波電源は、前記電気バイアスエネルギーが前記基板支持部に供給されているときに、第2のクロック信号により指定されるタイミングで調整された前記ソース周波数を有する前記ソース高周波電力を出力するように構成されており、
 前記第2のクロック信号は、前記バイアス周波数より高い周波数を有し、前記第1のクロック信号に同期されている、
 プラズマ処理装置。
- [請求項2] 基準クロック信号を発生するように構成された基準クロック信号発生器と、
 前記基準クロック信号を分周することにより前記第2のクロック信号を生成するように構成された分周器と、
 を更に備え、
 前記第1のクロック信号は、前記基準クロック信号であるか、別の分周器において前記基準クロック信号を分周することにより生成される、
 請求項1に記載のプラズマ処理装置。
- [請求項3] 前記第2のクロック信号を生成する前記分周器及び／又は前記別の分周器は、周波数通倍器であるPLL回路と、該PLL回路の参照入

力と前記基準クロック信号発生器の出力との間で接続された分周器と、を含む、請求項 2 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項4] 前記ソース高周波電力の負荷からの反射の度合いを反映する電気信号を出力するように構成されたセンサと、

前記センサの出力に接続されたアナログーデジタル変換器と、を更に備え、

前記アナログーデジタル変換器は、第 3 のクロック信号により指定されるタイミングで、前記電気信号に対するアナログーデジタル変換を行ってデジタル信号を生成するように構成されており、

前記第 3 のクロック信号は、前記基準クロック信号であるか別の分周器によって該基準クロック信号を分周することにより生成される、請求項 2 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項5] 前記第 3 のクロック信号を発生する前記分周器は、周波数逓倍器である PLL 回路と、前記基準クロック信号発生器の出力と前記 PLL 回路の参照入力との間で接続された分周器と、を含む、請求項 4 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項6] 前記第 2 のクロック信号と同期した複数の位相期間の各々における前記デジタル信号から代表値を生成し、該複数の位相期間の各々において前記代表値に基づいて前記ソース高周波電力の反射を抑制するように、前記ソース高周波電力の前記ソース周波数を設定するように構成された制御部を更に備える、請求項 4 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項7] 前記高周波電源は、

前記第 1 のクロック信号に同期された第 4 のクロック信号により指定されるタイミングで前記ソース高周波電力の波形データのデジタルーアナログ変換を行うように構成されたデジタルーアナログ変換器と、

前記デジタルーアナログ変換器の出力に接続されており、前記ソース高周波電力を出力するように構成された増幅器と、

を含み、

前記第4のクロック信号は、前記基準クロック信号であるか、別の分周器において前記基準クロック信号を分周することにより生成される、

請求項2～6の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項8]

前記第4のクロック信号を生成する前記分周器は、周波数逡倍器であるPLL回路と、前記基準クロック信号発生器の出力と前記PLL回路の参照入力との間で接続された分周器と、を含む、請求項7に記載のプラズマ処理装置。

[請求項9]

前記電気バイアスエネルギーは、前記バイアス周波数を有するバイアス高周波電力であるか、前記バイアス周波数の逆数である時間間隔で周期的に発生される電圧であり、

前記バイアス電源は、

前記第1のクロック信号により指定されるタイミングで前記電気バイアスエネルギーの波形データのデジタルーアナログ変換を行うように構成されたデジタルーアナログ変換器と、

該バイアス電源の前記デジタルーアナログ変換器の出力に接続されており、前記電気バイアスエネルギーを出力するように構成された増幅器と、

を含む、

請求項2～6の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項10]

前記電気バイアスエネルギーは、前記バイアス周波数の逆数である時間間隔で周期的に発生される電圧のパルスであり、

前記バイアス電源は、

直流電源と、

前記第1のクロック信号の立ち上がり及び立ち下がりのうち一方のタイミングで前記直流電源を該バイアス電源の出力に結合し、該立ち上がり及び該立ち下がりのうち他方のタイミングで該バイアス電源

の出力をグラウンドに接続するように構成されたパルスユニットと、
を含む、

請求項 2 ～ 6 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項11]

(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バイアス周波数を有する電気バイアスエネルギーを供給する工程と、

(b) 前記チャンバ内でガスからプラズマを生成するために高周波電源からソース周波数を有するソース高周波電力を供給する工程と、
を含み、

前記 (a) において、前記電気バイアスエネルギーは、第 1 のクロック信号により指定されるタイミングで発生され、

前記電気バイアスエネルギーが前記基板支持部に供給されているときに、前記 (b) において、前記高周波電源は、第 2 のクロック信号により指定されるタイミングで調整された前記ソース周波数を有する前記ソース高周波電力を出力し、

前記第 2 のクロック信号は、前記バイアス周波数より高い周波数を有し、前記第 1 のクロック信号に同期されている、
制御方法。

[請求項12]

前記第 2 のクロック信号は、基準クロック信号発生器により発生される基準クロック信号を分周器により分周することにより発生され、

前記第 1 のクロック信号は、前記基準クロック信号であるか、別の分周器において前記基準クロック信号を分周することにより生成される、

請求項 11 に記載の制御方法。

[請求項13]

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供給される電気バイアスエネルギーを第 1 のクロック信号により指定されるタイミングで発生するように構成されたバイアス電源と、

前記チャンバ内でガスからプラズマを生成するためにソース高周波

電力を発生するように構成された高周波電源と、
を備え、

前記高周波電源は、前記電気バイアスエネルギーが前記基板支持部に供給されているときに、第2のクロック信号により指定されるタイミングで調整されたソース周波数を有する前記ソース高周波電力を出力するように構成されており、

前記第2のクロック信号は、前記電気バイアスエネルギーのバイアス周波数より高い周波数を有し、前記第1のクロック信号に同期されている、
電源システム。

[請求項14] 基準クロック信号を発生するように構成された基準クロック信号発生器と、

前記基準クロック信号を分周することにより前記第2のクロック信号を発生するように構成された分周器と、
を更に備え、

前記第1のクロック信号は、前記基準クロック信号であるか、別の分周器において前記基準クロック信号を分周することにより生成される、

請求項13に記載の電源システム。

[請求項15] 請求項11に記載の制御方法をプラズマ処理装置によって実行させるよう、該プラズマ処理装置のコンピュータによって実行されるプログラム。

[請求項16] 請求項15に記載のプログラムを記憶した記憶媒体。