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]　本開示の例示的実施形態は、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、電気バイアスの波形周期におけるソース高周波電力の反射の度合いを低コストに特定して、ソース高周波電力のソース周波数を調整する技術を提供する。

課題を解決するための手段

[0005]　一つの例示的実施形態において、プラズマ処理装置が開示される。プラズマ処理装置は、チャンバ、該チャンバ内の基板支持部、高周波電源、バイアス電源、センサ、検波器、Ａ／Ｄ変換器、及び電源制御部を含む。高周波電源は、チャンバ内の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。センサは、ソース高周波電力の反射の度合いを反映す

るセンサ信号を取得するように構成されている。検波器は、センサ信号の包絡線信号を検波するように構成されている。Ａ／Ｄ変換器は、検波器から出力される包絡線信号に対するＡ／Ｄ変換を行う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における包絡線信号からＡ／Ｄ変換器によって生成される複数のデジタル値から特定される該波形周期内の反射の度合い又は波形周期を分割する複数の位相期間の各々における反射の度合いに応じて、後の電気バイアスの波形周期において反射の度合いを低減するよう複数の位相期間の各々のためのソース高周波電力のソース周波数を調整するように構成されている。Ａ／Ｄ変換器のサンプリング周波数は、波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数と波形周期内の複数の位相期間の個数との積の２倍以上、且つ、ソース高周波電力のソース周波数以下である。

発明の効果

[0006] 一つの例示的実施形態によれば、電気バイアスの波形周期におけるソース高周波電力の反射の度合いを低コストに特定して、ソース高周波電力のソース周波数を調整する技術が提供される。

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]一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理装置を示す図である。

[図4]電気バイアスの波形の例を示す図である。

[図5]図５の（ａ）及び図５の（ｂ）の各々は、一つの例示的実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6]一つの例示的実施形態に係る制御方法を示す流れ図である。

[図7]フィードバック処理の例を示す流れ図である。

[図8]図７に示す工程ＳＴ９における処理の例を示す流れ図である。

[図9]フィードバック処理の別の例を示す流れ図である。

[図10]図９に示す工程ＳＴ９ａにおける処理の例を示す流れ図である。

[図11]一つの例示的実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]一つの例示的実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13]一つの例示的実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14]第１の例の制御方法を示す流れ図である。

[図15]図１４に示す第１の例の制御方法を説明するための図である。

[図16]第２の例の制御方法を示す流れ図である。

[図17]図１６に示す第２の例の制御方法を説明するための図である。

[図18]図１６に示す第２の例の制御方法を説明するための図である。

[図19]図１６に示す第２の例の制御方法を説明するための図である。

[図20]図１６に示す第２の例の制御方法を説明するための図である。

[図21]第３の例の制御方法を示す流れ図である。

[図22]図２１に示す第３の例の制御方法を説明するための図である。

[図23]本明細書に記載の動作をコンピュータ上で実施する処理回路のブロック図である。

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実施形態について詳細に説明する。なお、各図面において同一又は相当の部分に対しては同一の符号を附すこととする。

[0009] 図１は、プラズマ処理システムの構成例を説明するための図である。一実施形態において、プラズマ処理システムは、プラズマ処理装置１及び制御部２を含む。プラズマ処理システムは、基板処理システムの一例であり、プラズマ処理装置１は、基板処理装置の一例である。プラズマ処理装置１は、プラズマ処理チャンバ１０、基板支持部１１及びプラズマ生成部１２を含む。プラズマ処理チャンバ１０は、プラズマ処理空間を有する。また、プラズマ処理チャンバ１０は、少なくとも１つの処理ガスをプラズマ処理空間に供給

するための少なくとも１つのガス供給口と、プラズマ処理空間からガスを排出するための少なくとも１つのガス排出口とを有する。ガス供給口は、後述するガス供給部２０に接続され、ガス排出口は、後述する排気システム４０に接続される。基板支持部１１は、プラズマ処理空間内に配置され、基板を支持するための基板支持面を有する。

[0010] プラズマ生成部１２は、プラズマ処理空間内に供給された少なくとも１つの処理ガスからプラズマを生成するように構成される。プラズマ処理空間において形成されるプラズマは、容量結合プラズマ（ＣＣＰ：Ｃａｐａｃｉｔｉｖｅｌｙ Ｃｏｕｐｌｅｄ Ｐｌａｓｍａ）、誘導結合プラズマ（ＩＣＰ：Ｉｎｄｕｃｔｉｖｅｌｙ Ｃｏｕｐｌｅｄ Ｐｌａｓｍａ）、ＥＣＲプラズマ（Ｅｌｅｃｔｒｏｎ－Ｃｙｃｌｏｔｒｏｎ－Ｒｅｓｏｎａｎｃｅ Ｐｌａｓｍａ）、ヘリコン波励起プラズマ（ＨＷＰ：Ｈｅｌｉｃｏｎ Ｗａｖｅ Ｐｌａｓｍａ）、又は、表面波プラズマ（ＳＷＰ：Ｓｕｒｆａｃｅ Ｗａｖｅ Ｐｌａｓｍａ）等であってもよい。また、ＡＣ（Ａｌｔｅｒｎａｔｉｎｇ Ｃｕｒｒｅｎｔ）プラズマ生成部及びＤＣ（Ｄｉｒｅｃｔ Ｃｕｒｒｅｎｔ）プラズマ生成部を含む、種々のタイプのプラズマ生成部が用いられてもよい。一実施形態において、ＡＣプラズマ生成部で用いられるＡＣ信号（ＡＣ電力）は、１００ｋＨｚ～１０ＧＨｚの範囲内の周波数を有する。従って、ＡＣ信号は、ＲＦ（Ｒａｄｉｏ Ｆｒｅｑｕｅｎｃｙ）信号及びマイクロ波信号を含む。一実施形態において、ＲＦ信号は、１００ｋＨｚ～１５０ＭＨｚの範囲内の周波数を有する。

[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）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。シャワーヘッド１

３及び基板支持部１１は、プラズマ処理チャンバ１０の筐体とは電気的に絶縁される。

[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。基台１１１０の導電性部材は下部電極として機能し得る。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。また、後述するＲＦ電源３１及び／又はＤＣ電源３２に結合される少なくとも１つのＲＦ／ＤＣ電極がセラミック部材１１１１ａ内に配置されてもよい。この場合、少なくとも１つのＲＦ／ＤＣ電極が下部電極として機能する。後述するバイアスＲＦ信号及び／又はＤＣ信号が少なくとも１つのＲＦ／ＤＣ電極に供給される場合、ＲＦ／ＤＣ電極はバイアス電極とも呼ばれる。なお、基台１１

１０の導電性部材と少なくとも１つのＲＦ／ＤＣ電極とが複数の下部電極として機能してもよい。また、静電電極１１１１ｂが下部電極として機能してもよい。従って、基板支持部１１は、少なくとも１つの下部電極を含む。

[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] 電源３０は、少なくとも１つのインピーダンス整合回路を介してプラズマ処理チャンバ１０に結合されるＲＦ電源３１を含む。ＲＦ電源３１は、少なくとも１つのＲＦ信号（ＲＦ電力）を少なくとも１つの下部電極及び／又は少なくとも１つの上部電極に供給するように構成される。これにより、プラズマ処理空間１０ｓに供給された少なくとも１つの処理ガスからプラズマが形成される。従って、ＲＦ電源３１は、プラズマ生成部１２の少なくとも一部として機能し得る。また、バイアスＲＦ信号を少なくとも１つの下部電極に供給することにより、基板Wにバイアス電位が発生し、形成されたプラズマ中のイオン成分を基板Wに引き込むことができる。

[0021] 一実施形態において、ＲＦ電源３１は、第１のＲＦ生成部３１ａ及び第２のＲＦ生成部３１ｂを含む。第１のＲＦ生成部３１ａは、少なくとも１つのインピーダンス整合回路を介して少なくとも１つの下部電極及び／又は少なくとも１つの上部電極に結合され、プラズマ生成用のソースＲＦ信号（ソースＲＦ電力）を生成するように構成される。一実施形態において、ソースＲＦ信号は、１０ＭＨｚ～１５０ＭＨｚの範囲内の周波数を有する。一実施形態において、第１のＲＦ生成部３１ａは、異なる周波数を有する複数のソースＲＦ信号を生成するように構成されてもよい。生成された１又は複数のソースＲＦ信号は、少なくとも１つの下部電極及び／又は少なくとも１つの上部電極に供給される。

[0022] 第２のＲＦ生成部３１ｂは、少なくとも１つのインピーダンス整合回路を介して少なくとも１つの下部電極に結合され、バイアスＲＦ信号（バイアスＲＦ電力）を生成するように構成される。バイアスＲＦ信号の周波数は、ソ

ースＲＦ信号の周波数と同じであっても異なっていてもよい。一実施形態において、バイアスＲＦ信号は、ソースＲＦ信号の周波数よりも低い周波数を有する。一実施形態において、バイアスＲＦ信号は、１００ｋＨｚ～６０ＭＨｚの範囲内の周波数を有する。一実施形態において、第２のＲＦ生成部３１ｂは、異なる周波数を有する複数のバイアスＲＦ信号を生成するように構成されてもよい。生成された１又は複数のバイアスＲＦ信号は、少なくとも１つの下部電極に供給される。また、種々の実施形態において、ソースＲＦ信号及びバイアスＲＦ信号のうち少なくとも１つがパルス化されてもよい。

[0023] また、電源３０は、プラズマ処理チャンバ１０に結合されるＤＣ電源３２を含んでもよい。ＤＣ電源３２は、第１のＤＣ生成部３２ａ及び第２のＤＣ生成部３２ｂを含む。一実施形態において、第１のＤＣ生成部３２ａは、少なくとも１つの下部電極に接続され、第１のＤＣ信号を生成するように構成される。生成された第１のＤＣ信号は、少なくとも１つの下部電極に印加される。一実施形態において、第２のＤＣ生成部３２ｂは、少なくとも１つの上部電極に接続され、第２のＤＣ信号を生成するように構成される。生成された第２のＤＣ信号は、少なくとも１つの上部電極に印加される。

[0024] 種々の実施形態において、第１及び第２のＤＣ信号がパルス化されてもよい。この場合、電圧パルスのシーケンスが少なくとも１つの下部電極及び／又は少なくとも１つの上部電極に印加される。電圧パルスは、矩形、台形、三角形又はこれらの組み合わせのパルス波形を有してもよい。一実施形態において、ＤＣ信号から電圧パルスのシーケンスを生成するための波形生成部が第１のＤＣ生成部３２ａと少なくとも１つの下部電極との間に接続される。従って、第１のＤＣ生成部３２ａ及び波形生成部は、電圧パルス生成部を構成する。第２のＤＣ生成部３２ｂ及び波形生成部が電圧パルス生成部を構成する場合、電圧パルス生成部は、少なくとも１つの上部電極に接続される。電圧パルスは、正の極性を有してもよく、負の極性を有してもよい。また、電圧パルスのシーケンスは、１周期内に１又は複数の正極性電圧パルスと１又は複数の負極性電圧パルスとを含んでもよい。なお、第１及び第２のＤ

Ｃ生成部３２ａ，３２ｂは、ＲＦ電源３１に加えて設けられてもよく、第１のＤＣ生成部３２ａが第２のＲＦ生成部３１ｂに代えて設けられてもよい。

[0025] 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。

[0026] 以下、図３を参照する。図３は、一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理装置を示す図である。図３に示すように、プラズマ処理装置１は、電源システム３０Ｓを含んでいる。電源システム３０Ｓは、高周波電源４１、バイアス電源４２、センサ４５、検波器５１、及びＡ／Ｄ変換器５２を含んでいる。

[0027] 高周波電源４１は、第１のＲＦ生成部３１ａである。高周波電源４１は、ソースＲＦ信号、即ちソース高周波電力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ｆ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ｆである正弦波状の波形を有する。ソース周波数ｆは、１０ＭＨｚ～１５０ＭＨｚの範囲内の周波数であり得る。高周波電源４１は、ソース周波数ｆをその最小周波数f_{MIN}とその最大周波数f_{MAX}との間で調整可能に構成されている。一例において、最小周波数f_{MIN}は３６ＭＨｚであり、最大周波数f_{MAX}は４４ＭＨｚである。ソース周波数ｆは、後述するように、高周波電源４１の負荷からのソース高周波電力ＨＦの反射の度合いを低減するように調整される。

[0028] 高周波電源４１は、整合器４３を介して高周波電極に電気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。

[0029] 整合器４３は、可変インピーダンスを有する。整合器４３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４３は、例えば制御部２によって制御され得る。

[0030] 一実施形態において、高周波電源４１は、信号発生器４１ｇ、Ｄ／Ａ変換器４１ｃ、及び増幅器４１ａを含んでいてもよい。信号発生器４１ｇ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４１ｇは、プログラム可能なプロセッサ、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、又はＡＳＩＣ（Ａｐｐｌｉｃａｔｉｏｎ Ｓｐｅｃｉｆｉｃ Ｉｎｔｅｇｒａｔｅｄ Ｃｉｒｃｕｉｔ）のような専用回路から構成されていてもよい。

[0031] 信号発生器４１ｇの出力は、Ｄ／Ａ変換器４１ｃの入力に接続されている。Ｄ／Ａ変換器４１ｃは、信号発生器４１ｇ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４１ｃの出力は、増幅器４１ａの入力に接続されている。増幅器４１ａは、Ｄ／Ａ変換器４１ｃ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４１ａの増幅率は、制御部２から高周波電源４１に指定される。なお、高周波電源４１は、Ｄ／Ａ変換器４１ｃを含んでいなくてもよい。この場合には、信号発生器４１ｇの出力は、増幅器４１ａの入力に接続され、増幅器４１ａは、信号発生器４１ｇ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。

[0032] バイアス電源４２は、第２のＲＦ生成部３１ｂ又は第１のＤＣ生成部３２ａを含む。バイアス電源４２は、基板支持部１１に電気的に結合されている。バイアス電源４２は、基板支持部１１内のバイアス電極に電気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。

[0033] 以下、図３と共に図４を参照する。図４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４２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。バイアス周波数は、１３．５６ＭＨｚ以下又は４００ｋＨｚ以下であってもよい。

[0034] 電気バイアスＥＢは、バイアスＲＦ信号、即ち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４２は、整合器４４を介して、バイアス電極に電気的に接続される。整合器４４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。

[0035] 或いは、電気バイアスＥＢは、パルス化された第１のＤＣ信号、即ち電圧パルス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４４を備えていなくてもよい。

[0036] 以下、図３及び図４と共に、図５（ａ）及び図５（ｂ）を参照する。図５の（ａ）及び図５の（ｂ）の各々は、一つの例示的実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５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５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。

[0037] 高周波電源４１は、バイアス電源４２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。図５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。即ち、電気バイアスＥＢの連続波及びソース高周波電力ＨＦの連続波が、並行して供給されてもよい。

[0038] 或いは、図５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５の（ｂ）のＯＮの状態）と停止状態（図５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５の（ｂ）のＨＩＧＨの状態）とＬＯＷレベル状態（図５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５の（ｂ）のＯＮの状態）と停止状態（図５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５の（ｂ）のＨＩＧＨの状態）とＬＯＷレベル状態（図５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。

[0039] 図３に示すように、センサ４５は、ソース高周波電力ＨＦの負荷からの反射の度合い$Ｒ_D$を反映するセンサ信号ＳＳを取得するように構成されている。一実施形態において、センサ４５は、方向性結合器を含んでいてもよい。この場合には、センサ信号ＳＳは、ソース高周波電力ＨＦの反射波の電圧信号ＶＳである。センサ４５の出力は、検波器５１の入力に接続されている。

[0040] 検波器５１は、センサ４５から出力されるセンサ信号ＳＳの包絡線信号ＥＳを検波するように構成されている。検波器５１の出力は、Ａ／Ｄ変換器５

２の入力に接続されている。Ａ／Ｄ変換器５２は、検波器５１から出力される包絡線信号ＥＳに対するＡ／Ｄ変換を行うように構成されている。

[0041] プラズマ処理装置１は、電源制御部を更に含んでいる。図３に示す例では、電源制御部は、信号発生器４１ｇであってもよい。電源制御部は、制御部２であってもよく、プラズマ処理装置１又は電源システム３０Ｓにおける他の制御部であってもよい。

[0042] 電源制御部は、波形周期ＣＹにおける反射の度合い$Ｒ_{D}$又は波形周期ＣＹを分割する複数の位相期間ＰＨ（図４参照）の各々における反射の度合い$Ｒ_{D}$に応じて、後の波形周期ＣＹにおいて反射の度合い$Ｒ_{D}$を低減するよう複数の位相期間ＰＨの各々のためのソース周波数ｆを調整する。反射の度合い$Ｒ_{D}$は、波形周期ＣＹにおける包絡線信号ＥＳからＡ／Ｄ変換器５２によって生成される複数のデジタル値$Ｖ_{D}$から特定される。反射の度合い$Ｒ_{D}$は、電源制御部において取得され得る。

[0043] 反射の度合い$Ｒ_{D}$は、波形周期ＣＹ又は各位相期間ＰＨにおける複数のデジタル値から得られる複数の評価値の代表値である。代表値は平均値であってもよい。例えば、上述の電圧信号ＶＳの包絡線信号ＥＳから得られる複数のデジタル値$Ｖ_{D}$が用いられる場合には、複数の評価値の各々は反射波のパワーレベルであり、以下の式（１）により反射波のパワーレベルの平均値が反射の度合い$Ｒ_{D}$として取得される。

[数1]

$$R_D = \frac{1}{N_V}\sum_{j=1}^{N_V}\left(\frac{{V_{Dj}}^2}{Z_0}\right) * 10^{\frac{C}{10}} * g \qquad \cdots (1)$$

なお、式（１）において、$Ｖ_{Ｄｊ}$は、式（１）の演算に用いられる複数のデジタル値$Ｖ_{D}$のうちｊ番目のデジタル値である。また、$Ｚ_{0}$は特性インピーダンスであり、例えば５０Ωである。また、Ｃは、方向性結合器の結合係数であり、予め定められている。また、ｇは、検波器５１の特性を反映したゲインであり、予め定められている。$Ｎ_{V}$は、波形周期ＣＹにおける複数の評価値の平均値が求められる場合には、波形周期ＣＹにおける複数のデジタル値$Ｖ_{D}$の

個数である。また、N_Vは、波形周期ＣＹ内の各位相期間ＰＨにおける複数の評価値の平均値が求められる場合には、各位相期間ＰＨにおける複数のデジタル値V_Dの個数である。

[0044] プラズマ処理装置１において、Ａ／Ｄ変換器５２のサンプリング周波数は、電気バイアスＥＢのバイアス周波数と波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨの個数との積の２倍以上、且つ、最小周波数f_{MIN}以下である。Ａ／Ｄ変換器５２によれば、複数の位相期間ＰＨの各々において包絡線信号ＥＳから２個以上のデジタル値V_D（即ち、サンプリング値）が取得される。また、プラズマ処理装置１によれば、比較的小さいサンプリング周波数を有するＡ／Ｄ変換器５２を用いることができる。したがって、プラズマ処理装置１によれば、波形周期ＣＹにおける反射の度合いR_D又は各位相期間ＰＨにおける反射の度合いR_Dを低コストに特定して、各位相期間ＰＨのソース周波数ｆを調整することが可能である。

[0045] 一実施形態において、検波器５１は、減衰器５１１、第１のフィルタ５１２、検波回路５１３、第２のフィルタ５１４、及び増幅器５１５を含んでいてもよい。減衰器５１１の入力は、センサ４５に接続されている。減衰器５１１は、センサ信号ＳＳの信号レベルを減衰させることにより、信号ＡＳを生成するように構成されている。減衰器５１１の出力は、第１のフィルタ５１２の入力に接続されている。

[0046] 第１のフィルタ５１２は、バンドパスフィルタであり、信号ＡＳに対するフィルタリングを行うことにより、信号ＢＰＳ（第１の信号）を生成するように構成されている。第１のフィルタ５１２の上限遮断周波数は、最大周波数f_{MAX}以上であり、且つ、最小周波数f_{MIN}の２倍以下であってもよい。第１のフィルタ５１２の下限遮断周波数は、最小周波数f_{MIN}以下であってもよい。第１のフィルタ５１２によれば、センサ信号ＳＳから、ソース周波数の２倍以上の周波数を有する高調波が実質的に除去される。第１のフィルタ５１２の出力は、検波回路５１３の入力に接続されている。なお、センサ４５の出力が第１のフィルタ５１２の入力に接続され、第１のフィルタ５１２の

出力が減衰器５１１の入力に接続され、減衰器５１１の出力が、検波回路５１３の入力に接続されていてもよい。

[0047] 検波回路５１３は、信号ＢＰＳの包絡線信号ＥＡＳ（第１の包絡線信号）を検波するように構成されている。検波回路５１３の出力は、第２のフィルタ５１４の入力に接続されている。

[0048] 第２のフィルタ５１４は、ローパスフィルタであり、包絡線信号ＥＡＳに対するフィルタリングを行うことにより、信号ＬＰＳを生成するように構成されている。第２のフィルタ５１４の上限遮断周波数は、電気バイアスＥＢのバイアス周波数と波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨの個数との積と第１のフィルタ５１２の上限遮断周波数との間の値を有する。第２のフィルタ５１４の上限遮断周波数は、最小周波数f_{MIN}以下であってもよい。第２のフィルタ５１４によれば、複数の位相期間ＰＨの各々における必要な信号成分を除去することなく、高周波成分が除去される。第２のフィルタ５１４の出力は、増幅器５１５に接続されている。

[0049] 増幅器５１５は、信号ＬＰＳを増幅することにより、上述の包絡線信号ＥＳ（即ち、第２の包絡線信号）を生成するように構成されている。増幅器５１５の出力は、Ａ／Ｄ変換器５２の入力に接続されている。Ａ／Ｄ変換器５２は、増幅器５１５から出力される包絡線信号ＥＳに対してＡ／Ｄ変換を行う。これにより、上述の複数のデジタル値V_Dが取得される。

[0050] 以下、図６を参照して、一つの例示的実施形態に係る制御方法について説明する。図６は、一つの例示的実施形態に係る制御方法を示す流れ図である。図６に示す制御方法（以下、「方法ＭＴ」という）は、プラズマ処理装置１において行われる。方法ＭＴの各工程において、プラズマ処理装置１の各部は、制御部２及び電源制御部によって制御され得る。

[0051] 方法ＭＴは、工程ＳＴｐを含んでいてもよい。工程ＳＴｐでは、チャンバ１０内に基板Ｗが準備される。基板Ｗは、基板支持部１１上に載置されて、静電チャック１１１１によって保持される。

[0052] 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４１から高周波電極にソース高周波電力ＨＦが供給される。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バイアス電源４２から基板支持部１１（又はバイアス電極）に電気バイアスＥＢが供給される。

[0053] 工程ＳＴｃでは、センサ４５によりセンサ信号ＳＳが取得される。工程ＳＴｄでは、検波器５１により包絡線信号ＥＳが検波される。工程ＳＴｅでは、Ａ／Ｄ変換器５２により、包絡線信号ＥＳに対するＡ／Ｄ変換が行われる。工程ＳＴｆでは、波形周期ＣＹにおける包絡線信号ＥＳからＡ／Ｄ変換器５２によって生成される複数のデジタル値V_Dから、波形周期ＣＹにおける反射の度合いR_D又は各位相期間ＰＨにおける反射の度合いR_Dが特定される。

[0054] 工程ＳＴＪでは、停止条件が満たされるか否かが判定される。工程ＳＴＪにおける判定は、電源制御部によって行われ得る。工程ＳＴＪにおいて、停止条件は、例えば制御部２から終了の指示が発行されている場合に満たされる。工程ＳＴＪにおいて停止条件が満たされないと判定された場合には、工程ＳＴｇが行われる。工程ＳＴｇでは、工程ＳＴｆにおいて特定された反射の度合いR_Dに応じて、後の波形周期ＣＹにおいて反射の度合いを低減するよう複数の位相期間ＰＨの各々のためのソース周波数ｆが、電源制御部により調整される。工程ＳＴｇの後に、工程ＳＴａからの処理が再び行われる。工程ＳＴａでは、工程ＳＴｇにおいて決定された複数の位相期間ＰＨそれぞれのためのソース周波数ｆを有するソース高周波電力ＨＦが供給される。一方、工程ＳＴＪにおいて停止条件が満たされていると判定された場合には、方法ＭＴは終了する。

[0055] 以下、方法ＭＴにおけるソース周波数ｆの調整に関する幾つかの実施形態について説明する。また、電源制御部によるソース周波数ｆの調整についても、あわせて説明する。

[0056] 一実施形態において、電源制御部は、フィードバック処理により、ソース周波数ｆの調整を行う。フィードバック処理は、波形周期ＣＹ内の複数の指定位相期間ＤＰに対して適用される。

[0057] 第１の実施形態に係るフィードバック処理において、波形周期ＣＹ内の複数の指定位相期間ＤＰは、波形周期ＣＹ内の全ての位相期間ＰＨであってもよい。即ち、第１の実施形態に係るフィードバック処理において、波形周期ＣＹ内の複数の指定位相期間ＤＰの個数は、Ｍ個であり、Ｍは、波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨの個数であるＮである。

[0058] 第２の実施形態に係るフィードバック処理において、波形周期ＣＹ内の複数の指定位相期間ＤＰは、波形周期ＣＹ内の全ての位相期間ＰＨのうち一部である、幾つかの選択された位相期間ＰＨであってもよい。即ち、第２の実施形態に係るフィードバック処理において、波形周期ＣＹ内の複数の指定位相期間ＤＰの個数は、Ｍ個であり、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。第２の実施形態に係るフィードバック処理において、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。

[0059] フィードバック処理において、電源制御部は、波形周期ＣＹの系列ＣＹＳにおけるｉ番目の波形周期CY_i内のｍ番目の指定位相期間DP_mのためのソース周波数ｆ［ｉ，ｍ］を、系列ＣＹＳにおいて先行する幾つかの波形周期ＣＹ内のｍ番目の指定位相期間DP_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、系列ＣＹＳにおいて波形周期CY_iに対して先行する波形周期ＣＹは、波形周期CY_{i-lfb}及び$CY_{i-2\times lfb}$を含んでいてもよい。ここで、「ｌｆｂ」は、１以上の整数である。

[0060] 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５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。

[0061] 第２のフィードバック処理は、図５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。

[0062] なお、図５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の各々の中の１番目から$Ｋ_1$番目までの波形周期ＣＹの各々に対して、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の各々の中の（$Ｋ_1$＋１）番目から最後の波形周期ＣＹに対して、第１のフィードバック処理が適用されてもよい。ここで、$Ｋ_1$は、１以上の整数である。或いは、複数のパルス期間ＰＰの各々の中の１番目から$Ｋ_1$番目までの波形周期ＣＹの各々に対して、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の各々の中の（$Ｋ_1$＋１）番目から最後の波形周期ＣＹの各々において、$Ｋ_1$番目の波形周期ＣＹ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のために用いられてもよい。

[0063] 以下、図７及び図８を参照して、各系列ＣＹＳに対して適用されるフィードバック処理の例について説明する。図７は、フィードバック処理の例を示す流れ図である。図８は、図７に示す工程ＳＴ９における処理の例を示す流れ図である。以下に説明するフィードバック処理の例は、上述の「Ｉｆｂ」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、「Ｉｆｂ」は、１よりも大きい整数であってもよい。

[0064] 図７に示すように、フィードバック処理は、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内の複数の指定位相期間ＤＰに対して行われる。

[0065] 工程ＳＴ１では、電源制御部は、ｉを１に設定する。「ｉ」は、系列ＣＹＳ内の波形周期ＣＹの順番を表している。

[0066] 続く工程ＳＴ２では、系列ＣＹＳ内のｉ番目の波形周期ＣＹの複数の指定位相期間ＤＰそれぞれのためのソース周波数ｆ及びシフト値Δｆが、設定される。具体的に、工程ＳＴ２において、電源制御部は、ソース周波数ｆ［ｉ，ｍ］及びシフト値Δｆ［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Δｆ［ｉ，ｍ］、即ち、ソース周波数ｆ［１，ｍ］及びシフト値Δｆ［１，ｍ］は、事前に設定されたそれぞれの数値に設定される。なお、第２の実施形態に係るフィードバック処理の場合には、工程ＳＴ２において、複数の指定位相期間ＤＰ以外の位相期間のためのソース周波数ｆが、上述したように、補間により設定される。

[0067] 続く工程ＳＴ３は、方法ＭＴの工程ＳＴａに対応する。工程ＳＴ３では、電源制御部は、工程ＳＴ２で設定された波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨそれぞれのソース周波数ｆを有するソース高周波電力ＨＦを、高周波電源４１から供給する。即ち、工程ＳＴ３においては、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ＨＦを、高周波電源４１から供給する。また、上述の工程ＳＴｂにおいて電気バイアスが供給され、上述の工程ＳＴｃ～工程ＳＴｆにおいて反射の度合い$Ｒ_{D}$が取得される。

[0068] 工程ＳＴ４、工程ＳＴ５、及び工程ＳＴ６は、方法ＭＴの工程ＳＴｇに対応する。工程ＳＴ４、工程ＳＴ５、及び工程ＳＴ６から構成される処理は、系列ＣＹＳ内のｉ番目の波形周期ＣＹ内の複数の指定位相期間ＤＰの各々について行われる。

[0069] 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$Ｒ_{D}$、即ち反射の度合い$Ｒ_{D}$［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R_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、R_D［ｉ，ｍ］が第１の閾値R_{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R_{th1}は、互いに同一であってもよく、異なっていてもよい。

[0070] 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］＋Δｆ［ｉ，ｍ］

[0071] 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］

[0072] なお、第２の実施形態に係るフィードバック処理の場合には、次の工程ＳＴ７に処理が移る前に、複数の指定位相期間ＤＰ以外の位相期間のためのソース周波数ｆが、上述したように、補間により設定される。

[0073] 次いで、工程ＳＴ７～工程ＳＴ９が行われる。工程ＳＴ７～工程ＳＴ９は、方法ＭＴの工程ＳＴＪにおいて停止条件が満たされていると判定され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。

[0074] 工程ＳＴ８～ＳＴ９は、系列ＣＹＳ内のｉ番目の波形周期ＣＹの複数の指定位相期間ＤＰの各々について行われる。工程ＳＴ８は、方法ＭＴの工程ＳＴａに対応する。工程ＳＴ８では、電源制御部は、直前に設定された、波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨそれぞれのソース周波数ｆを有するソース高周波電力ＨＦを、高周波電源４１から供給する。即ち、工程ＳＴ８においては、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ＨＦを、高周波電源４１から供給する。また、上述の工程ＳＴｂにおいて電気バイアスが供給され、上述の工程ＳＴｃ～工程ＳＴｆにおいて反射の度合いR_Dが取得

される。

[0075] 続く工程ＳＴ９では、電源制御部は、反射の度合いR_D［ｉ，ｍ］に応じて系列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］を決定する。

[0076] 図８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R_D［ｉ，ｍ］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R_D［ｉ，ｍ］は、R_D［ｉ，ｍ］＞R_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ｍ番目の指定位相期間DP_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R_D［ｉ，ｍ］が増加傾向であると判定されてもよい。

[0077] 工程ＳＴ９０１において反射の度合いR_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ＳＴ９０２において、シフト値Δｆ［ｉ，ｍ］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Δｆ［ｉ，ｍ］を次式により設定する。

Δｆ［ｉ，ｍ］＝Δｆ［ｉ－１，ｍ］

[0078] 一方、工程ＳＴ９０１において反射の度合いR_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ＳＴ９０３において、シフト値Δｆ［ｉ，ｍ］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Δｆ［ｉ，ｍ］を次式により設定する。

Δｆ［ｉ，ｍ］＝－Δｆ［ｉ－１，ｍ］

[0079] 続く工程ＳＴ９０４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R_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ＳＴ９０４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R_D［ｉ，ｍ］が閾値よりも大きい場合に満たされる。

[0080] 一実施形態では、系列ＣＹＳ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$Ｒ_{th1}$［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$Ｒ_{th2}$［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$Ｒ_{th2}$［ｍ］は、第１の閾値$Ｒ_{th1}$［ｍ］以上である。第２の閾値$Ｒ_{th2}$［ｍ］は、第１の閾値$Ｒ_{th1}$［ｍ］よりも大きくてもよい。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$Ｒ_{th2}$［ｍ］は、互いに同一であってもよく、異なっていてもよい。

[0081] 具体的には、系列ＣＹＳ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$Ｒ_{th1}$［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$Ｒ_{th2}$［ｍ］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指定位相期間$ＤＰ_{m}$での反射の度合いが第２の閾値$Ｒ_{th2}$［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$Ｒ_{th1}$［ｍ］が用いられてもよい。

[0082] 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。

$$ｆ［ｉ＋１，ｍ］＝ｆ［ｉ，ｍ］＋Δｆ［ｉ，ｍ］$$

[0083] 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。

$$ｆ［ｉ＋１，ｍ］＝ｆ［ｉ，ｍ］$$

[0084] なお、第２の実施形態に係るフィードバック処理の場合には、次の工程に

処理が移る前に、複数の指定位相期間ＤＰ以外の位相期間のためのソース周波数ｆが、上述したように、補間により設定される。

[0085] フィードバック処理によれば、反射の度合いR_D［ｉ，ｍ］に応じてソース周波数ｆ［ｉ＋１，ｍ］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、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R_{th1}及び第２の閾値R_{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。また、第２の実施形態に係るフィードバック処理によれば、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ソース周波数は、複数の指定位相期間ＤＰ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、第２の実施形態に係るフィードバック処理によれば、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。

[0086] 以下、図９及び図１０を参照して、フィードバック処理の別の例を説明する。図９は、フィードバック処理の別の例を示す流れ図である。図１０は、図９に示す工程ＳＴ９ａにおける処理の例を示す流れ図である。以下、図９及び図１０に示すフィードバック処理について、図７及び図８に示すフィードバック処理に対する相違点の観点から説明する。図９及び図１０に示す処理では、電源制御部は、シフト値Δｆ［ｉ，ｍ］を反射の度合いR_D［ｉ，ｍ］の大きさに応じた値に設定する。

[0087] 具体的には、図９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，ｍ］及び係数α［ｉ，ｍ］を設定する。工程ＳＴ２ａでは、ソース周波数ｆ［ｉ，ｍ］及び係数α［ｉ，ｍ］、即ち、ソース周波数ｆ［１，ｍ］及び係数α［１，ｍ］は、事前に設定されたそれぞれの数値に設定される。

[0088] 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Δｆ［ｉ，ｍ］を次式により設定する。

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

[0089] 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$R_D[i, m]$に応じて系列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］を決定する。

[0090] 図１０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$R_D[i, m]$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。

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

[0091] 一方、工程ＳＴ９０１において反射の度合い$R_D[i, m]$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。

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

[0092] 図１０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。

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

[0093] 以下、図１１を参照する。図１１は、一つの例示的実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１１は、図５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１１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１１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ＣＹを含み得る。

[0094] 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ＣＹの各々の中の複数の指定位相期間ＤＰ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。

[0095] 第２の実施形態に係るフィードバック処理の場合には、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ＣＹ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ＣＹ内の１番目の指定位相期間DP_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DP_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２の実施形態に係るフィードバック処理の場合には、第１のフィードバック期間P_F［１］内の複数の波形周期ＣＹそれぞれが有する指定位相期間の個数は異なっていてもよい。また、第２の実施形態に係るフィードバック処理の場合には、第１のフィードバック期間P_F［１］内の複数の波形周期ＣＹ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いてもよい。

[0096] また、上述したように、ソース高周波電力ＨＦのパルスが供給される期間とソース高周波電力ＨＦ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ＨＦが供給されてもよい。以下、ソース高周波電力ＨＦ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ＨＦ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。

[0097] 第２の実施形態に係るフィードバック処理の場合には、第１のフィードバ

ック期間P_F［１］内の最初の波形周期ＣＹ内の１番目の位相期間PH_1は、複数の指定位相期間ＤＰのうちの１番目の指定位相期間DP_1であってもよい。或いは、第２の実施形態に係るフィードバック処理の場合に、第１のフィードバック期間P_F［１］内の最初の波形周期ＣＹ内の１番目の位相期間PH_1は、複数の指定位相期間ＤＰのうちの１番目の指定位相期間DP_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DP_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DP_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。

[0098] 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ＣＹの各々の中の複数の指定位相期間ＤＰ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、第２の実施形態に係るフィードバック処理の場合には、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ＣＹの各々の中の複数の指定位相期間ＤＰ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ＤＰ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ＣＹの各々の中の複数の位相期間ＰＨ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ＣＹの中の複数の位相期間ＰＨのためのソース周波数を用いてもよい。

[0099] 以下、図１２及び図１３を参照して、第２の実施形態に係るフィードバック処理における波形周期ＣＹ内の複数の指定位相期間ＤＰについて説明する。図１２及び図１３の各々は、一つの例示的実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１２に示すように、波形周期ＣＹ内の複数の指定位相期間ＤＰの個数である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１２の例では１１であるが、個数Ｍは１１に限定

されない。

[0100] 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。

[0101] 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１３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$Ｐ_2$、及び第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。

[0102] 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。

[0103] 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。

[0104] 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$ＳＰ_3$を含んでいてもよい。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、互いに異なっていてもよい。

[0105] 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について上述の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］よりも大きいか、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。

[0106] また、複数の指定位相期間ＤＰ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ＣＹの系列ＣＹＳにおける各位相期間ＰＨについて上述の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ＤＰの間隔が小さいく

なるように、複数の指定位相期間ＤＰを決定する。

[0107] 一実施形態において、電源制御部は、電気バイアスＥＢ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ＤＰの間隔を上述したように設定してもよい。

[0108] 以下、方法ＭＴにおける電源制御部によるソース周波数ｆの調整をシフト及び／又はスケーリングの処理（以下、「ＳＳ処理」という）により行う幾つかの実施形態について説明する。

[0109] ＳＳ処理においても、図５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は、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。また、ＳＳ処理においても、図５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は、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から構成される。或いは、ＳＳ処理において、複数のパルス期間ＰＰの各々の１番目から$Ｋ_1$番目までの波形周期ＣＹの各々については、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が系列ＣＹＳを形成し、また、複数のパルス期間ＰＰの各々の（$Ｋ_1$＋１）番目から最後の波形周期ＣＹが系列ＣＹＳを形成してもよい。或いは、ＳＳ処理において、複数のパルス期間ＰＰの各々の１番目から$Ｋ_1$番目までの波形周期ＣＹの各々については、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が系列ＣＹＳを形成し、また、複数のパルス期間ＰＰの各々の（$Ｋ_1$＋１）番目から最後の波形周期ＣＹの各々において、$Ｋ_1$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。以下、各系列ＣＹＳに対して適用されるＳＳ処理について説明する。

[0110] ＳＳ処理を含む方法ＭＴにおいて初期的には、電源制御部は、工程ＳＴａにおいて、予め定められた周波数の時系列である基本時系列$ＴＳ_B$を波形周期

ＣＹ内のソース周波数ｆの時系列として用いて、高周波電源４１からソース高周波電力ＨＦを供給する。ソース周波数ｆ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、波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨのそれぞれのソース高周波電力ＨＦの周波数として用いられる。基本時系列$ＴＳ_B$は、予め準備されている。基本時系列$ＴＳ_B$は、上述の第１のフィードバック処理又は第２のフィードバック処理を事前に行うことにより、決定されてもよい。

[0111] また、工程ＳＴｂ～工程ＳＴｆを経て、波形周期ＣＹにおける反射の度合い$Ｒ_D$が取得される。ＳＳ処理においては、反射の度合い$Ｒ_D$は、波形周期ＣＹにおける複数のデジタル値$Ｖ_D$から得られる複数の評価値の代表値、例えば平均値である。

[0112] 次いで、工程ＳＴｇにおいて、電源制御部は、ソース周波数ｆの時系列を調整して、ソース周波数ｆの変更された時系列$ＴＳ_M$を作成する。そして、電源制御部は、工程ＳＴａにおいて、系列ＣＹＳにおける後続の波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨのそれぞれのソース周波数ｆとして時系列$ＴＳ_M$の複数の周波数を有するソース高周波電力ＨＦを高周波電源４１から供給する。そして、工程ＳＴｂ～工程ＳＴｇが再び行われる。ＳＳ処理を含む方法ＭＴでは、系列ＣＹＳにおいて波形周期ＣＹにおける反射の度合い$Ｒ_D$を低減するように、工程ＳＴａ～工程ＳＴｇが繰り返される。

[0113] 工程ＳＴｇでは、時系列$ＴＳ_M$として、時系列ＴＳ１、時系列ＴＳ２、又は時系列ＴＳ３が用いられる。時系列ＴＳ１は、波形周期ＣＹに対する位相シフト量を基本時系列$ＴＳ_B$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ＴＳ２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）させた周波数の時系列である。時系列ＴＳ３は、基本時系列$ＴＳ_B$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ＴＳ３は、基本時系列$ＴＳ_B$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。

[0114] 以下、ＳＳ処理を含む方法ＭＴの幾つかの例について説明する。

[0115] ［第１の例］

[0116] 図１４及び図１５を参照し、ＳＳ処理を含む方法ＭＴの第１の例、即ち第１の例の制御方法（以下、「方法ＭＴＡ」という）について説明する。図１４は、第１の例の制御方法を示す流れ図である。図１５は、図１４に示す第１の例の制御方法を説明するための図である。図１５において横軸は時間を示しており、縦軸は電気バイアスＥＢとソース周波数ｆを示している。図１５には、波形周期ＣＹにおける電気バイアスＥＢの波形の例が示されている。また、図１５には、波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨのそれぞれのためのソース周波数ｆ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。方法ＭＴＡでは、変更された時系列$ＴＳ_M$として、上述した時系列ＴＳ１が用いられる。

[0117] 方法ＭＴＡは、各系列ＣＹＳに対して適用される。図１４に示すように、方法ＭＴＡは、工程ＳＴＡａ１で開始する。工程ＳＴＡａ１は、工程ＳＴａに対応する。工程ＳＴＡａ１では、電源制御部は、波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨのそれぞれのためのソース周波数ｆとして基本時系列$ＴＳ_B$の複数の周波数を有するソース高周波電力ＨＦを高周波電源４１から供給する。なお、方法ＭＴについて上述したように、方法ＭＴＡでも工程ＳＴｂが行われ得る。

[0118] 次いで、工程ＳＴＡｆ１が行われる。工程ＳＴＡｆ１は、工程ＳＴｃ～工程ＳＴｆに対応する。工程ＳＴＡｆ１では、波形周期ＣＹにおける反射の度合い$Ｒ_D$が取得される。

[0119] 次いで、工程ＳＴＡｇ１が行われる。工程ＳＴＡｇ１は、工程ＳＴｇに対応する。工程ＳＴＡｇ１では、電源制御部は、波形周期ＣＹに対して基本時系列$ＴＳ_B$に位相シフト量を与えることにより得られる時系列$ＴＳ_M$を準備する。

[0120] 次いで、工程ＳＴＡａ２が行われる。工程ＳＴＡａ２は、工程ＳＴａに対応する。工程ＳＴＡａ２では、電源制御部は、波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨのそれぞれのためのソース周波数ｆとして時系列$ＴＳ_M$の複数の周波

数を有するソース高周波電力ＨＦを高周波電源４１から供給する。

[0121] 次いで、工程ＳＴＡｆ２が行われる。工程ＳＴＡｆ２では、工程ＳＴＡｆ１と同様に、波形周期ＣＹにおける反射の度合いR_Dが取得される。

[0122] 次いで、工程ＳＴＡＪ１が行われる。工程ＳＴＡＪ１は、工程ＳＴＪに対応する。工程ＳＴＡＪ１における判定は、電源制御部によって行われ得る。工程ＳＴＡＪ１において、停止条件が満たされないと判定された場合には、工程ＳＴＡＪ２が行われる。

[0123] 工程ＳＴＡＪ２では、工程ＳＴＡｆ２で取得された反射の度合いR_Dが指定値以下であるか否かが判定される。工程ＳＴＡＪ２における判定は、電源制御部によって行われ得る。反射の度合いR_Dが指定値以下であることは、整合状態が良好であることを示す。工程ＳＴＡＪ２において反射の度合いR_Dが指定値以下であると判定された場合には、工程ＳＴＡａ２からの処理が繰り返される。一方、工程ＳＴＡＪ２において反射の度合いR_Dが指定値よりも大きいと判定されると、工程ＳＴＡＪ３が行われる。

[0124] 工程ＳＴＡＪ３では、工程ＳＴＡｆ２で取得された波形周期ＣＹにおける反射の度合いR_Dと系列ＣＹＳに対する処理においてその直前に取得された反射の度合いR_Dとが互いに比較されて、反射の度合いR_Dが改善しているか、即ち反射の度合いR_Dが低減されたか否かが判定される。工程ＳＴＡＪ３の判定は、電源制御部によって行われる。工程ＳＴＡＪ３において反射の度合いR_Dが改善しているものと判定された場合には、工程ＳＴＡｇ２が行われる。一方、工程ＳＴＡＪ３において反射の度合いR_Dが改善していないものと判定された場合には、工程ＳＴＡｇ３が行われる。

[0125] 工程ＳＴＡｇ２は、工程ＳＴｇに対応する。工程ＳＴＡｇ２は、電源制御部によって行われ得る。工程ＳＴＡｇ２では、系列ＣＹＳに対する処理において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が変更される。系列ＣＹＳに対する処理において直前に用いられた位相シフト量が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ＳＴＡｇ２では、図１５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。系列ＣＹＳに対する処理において直前に用いられた位相シフト量が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ＳＴＡｇ２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TS_Bに与えることにより得られる時系列TS_Mが準備される。そして、工程ＳＴＡｇ２において準備された時系列TS_Mを用いて、工程ＳＴＡａ２が再び行われる。

[0126] 工程ＳＴＡｇ３は、工程ＳＴｇに対応する。工程ＳＴＡｇ３は、電源制御部によって行われ得る。工程ＳＴＡｇ３では、系列ＣＹＳに対する処理において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が変更される。直前に用いられた位相シフト量が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ＳＴＡｇ３では、図１５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。系列ＣＹＳに対する処理において直前に用いられた位相シフト量が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ＳＴＡｇ３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TS_Bに与えることにより得られる時系列TS_Mが準備される。そして、工程ＳＴＡａ２が再び行われる。即ち、工程ＳＴＡｇ３において準備された時系列TS_Mを用いて、工程ＳＴＡａ２が再び行われる。

[0127] 方法ＭＴＡは、工程ＳＴＪ１において停止条件が満たされていると判定されると、終了する。

[0128] ［第２の例］

[0129] 以下、図１６～図２０を参照して、ＳＳ処理を含む方法ＭＴの第２の例、即ち第２の例の制御方法（以下、「方法ＭＴＢ」という）について説明する。図１６は、第２の例の制御方法を示す流れ図である。図１７～図２０の各々は、図１６に示す第２の例の制御方法を説明するための図である。図１７～図２０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ＥＢとソース周波数ｆを示している。図１７～図２０の各々には、波形周期ＣＹにおける電気バイアスＥＢの波形の例が示されている。また、図１７～図２

０の各々には、波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨのそれぞれのソース周波数ｆ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。方法ＭＴＢ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。

[0130] 方法ＭＴＢは、各系列ＣＹＳに対して適用される。図１６に示すように、方法ＭＴＢは、工程ＳＴＢａ１で開始する。工程ＳＴＢａ１は工程ＳＴＡａ１と同様の工程である。次いで、工程ＳＴＢｆ１が行われる。工程ＳＴＢｆ１は工程ＳＴＡｆ１と同様の工程である。

[0131] 次いで、工程ＳＴＢｇ１が行われる。工程ＳＴＢｇ１は、工程ＳＴｇに対応する。工程ＳＴＢｇ１では、電源制御部は、基本時系列ＴＳ$_B$を周波数方向にスケーリング、即ち拡大若しくは縮小させることにより得られる時系列ＴＳ$_M$を準備する。

[0132] 工程ＳＴＢｇ１において準備される時系列ＴＳ$_M$は、図１７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１７に示すように変更された時系列を時系列ＴＳ２１という。工程ＳＴＢｇ１において準備される時系列ＴＳ$_M$は、図１８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１８に示すように変更された時系列を時系列ＴＳ２２という。工程ＳＴＢｇ１において準備される時系列ＴＳ$_M$は、図１９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１９に示すように変更された時系列を時系列ＴＳ２３という。工程ＳＴＢｇ１において準備される時系列ＴＳ$_M$は、図２０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２０に示すように変更された

時系列を時系列ＴＳ２４という。工程ＳＴＢｇ１においては、時系列ＴＳ２１～ＴＳ２４のうち何れかが時系列TS_Mとして準備される。

[0133] 次いで、工程ＳＴＢａ２が行われる。工程ＳＴＢａ２は、工程ＳＴａに対応する。工程ＳＴＢａ２では、電源制御部は、波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨのそれぞれのためのソース周波数ｆとして時系列TS_Mの複数の周波数を有するソース高周波電力ＨＦを高周波電源４１から供給する。

[0134] 次いで、工程ＳＴＢｆ２が行われる。工程ＳＴＢｆ２では、工程ＳＴＢｆ１と同様に、波形周期ＣＹにおける反射の度合いR_Dが取得される。

[0135] 次いで、工程ＳＴＢＪが行われる。工程ＳＴＢＪにおける判定は、電源制御部によって行われ得る。工程ＳＴＢＪにおいて、停止条件は、例えば、工程ＳＴＢａ２を含むサイクルが所定回数行われている場合に満たされる。

[0136] 工程ＳＴＢＪにおいて、停止条件が満たされないと判定されると、工程ＳＴＢｇ２が行われる。工程ＳＴＢｇ２は、工程ＳＴｇに対応する。工程ＳＴＢｇ２は、電源制御部によって行われ得る。工程ＳＴＢｇ２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１７～図２０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、電源制御部によって準備される。そして、工程ＳＴＢｇ２において準備された時系列TS_Mを用いて、工程ＳＴＢａ２が再び行われる。即ち、方法ＭＴＢでは、工程ＳＴＢａ２を含むサイクルが繰り返される。工程ＳＴＢａ２を含むサイクルの繰り返しにおいては、時系列ＴＳ２１～ＴＳ２４のうち何れか一つが用いられ、スケーリングの倍率が変更されてもよい。工程ＳＴＢａ２を含むサイクルの繰り返しにおいては、時系列ＴＳ２１～ＴＳ２４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。工程ＳＴＢＪにおいて、停止条件が満たされているものと判定されると、工程ＳＴＢｈが行われる。

[0137] 工程ＳＴＢｈでは、反射の度合いR_Dを最も改善する、即ち、反射の度合いR_Dを最も低減する時系列TS_M（第１の時系列）が、得られている複数の反射の度合いR_Dに基づいて選択される。電源制御部は、選択された時系列ＴＳ

$_M$に含まれる複数の周波数を波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨのそれぞれのソース周波数ｆとして有するソース高周波電力ＨＦを高周波電源４１から供給する。この工程ＳＴＢｈの後、方法ＭＴＢは終了してもよい。或いは、工程ＳＴＢｈの後に、工程ＳＴＢｉが行われてもよい。工程ＳＴＢｉでは、工程ＳＴＢｈで選択された時系列ＴＳ$_M$を基本時系列として用いて、方法ＭＴＡが行われる。

[0138] ［第３の例］

[0139] 以下、図２１及び図２２を参照して、ＳＳ処理を含む方法ＭＴの第３の例、即ち第３の例の制御方法（以下、「方法ＭＴＣ」という）について説明する。図２１は、第３の例の制御方法を示す流れ図である。図２２は、図２１に示す第３の例の制御方法を説明するための図である。図２２において横軸は時間を示しており、縦軸は電気バイアスＥＢとソース周波数ｆを示している。図２２には、波形周期ＣＹにおける電気バイアスＥＢの波形の例が示されている。また、図２２には、波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨのそれぞれのソース周波数ｆとして用いられる基本時系列が示されている。方法ＭＴＣ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。

[0140] 方法ＭＴＣは、各系列ＣＹＳに対して適用される。図２１に示すように、方法ＭＴＣは、工程ＳＴＣｐ１で開始してもよい。工程ＳＴＣｐ１では、基本時系列ＴＳ$_B$を用いて方法ＭＴＡが行われる。次いで、工程ＳＴＣｐ２が行われてもよい。工程ＳＴＣｐ２では、工程ＳＴＣｐ１で用いた複数の時系列のうち反射の度合いＲ$_D$を最も改善する、即ち反射の度合いＲ$_D$を最も低減する時系列ＴＳ$_M$（第１の時系列）が、工程ＳＴＣｐ１で得られた複数の反射の度合いＲ$_D$に基づいて特定され、基本時系列として選択される。

[0141] 次いで、工程ＳＴＣｐ３が行われてもよい。工程ＳＴＣｐ３では、工程ＳＴＣｐ２で選択された基本時系列を用いて、方法ＭＴＢが行われる。次いで、工程ＳＴＣｐ４が行われてもよい。工程ＳＴＣｐ４では、工程ＳＴＣｐ３で用いた複数の時系列のうち反射の度合いＲ$_D$を最も改善する、即ち反射の度

合いR_Dを最も低減する時系列TS_M（第２の時系列）が、工程ＳＴＣｐ３で得られた複数の反射の度合いR_Dに基づいて特定され、基本時系列として選択される。

[0142] 次いで、工程ＳＴＣｇ１が実行される。工程ＳＴＣｇ１は、工程ＳＴｇに対応する。工程ＳＴＣｇ１では、電源制御部は、工程ＳＴＣｐ４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を準備する。なお、工程ＳＴＣｐ１～工程ＳＴＣｐ４を行うことなく、方法ＭＴＡの工程ＳＴＡａ１及び工程ＳＴＡｆ１が行われて、工程ＳＴＣｇ１において基本時系列TS_Bから時系列TS_Mが準備されてもよい。

[0143] 複数の時間ゾーンは、図２２に示すように、ゾーンＺ１～Ｚ６を含んでいてもよい。ゾーンＺ１～Ｚ６を決定するために、工程ＳＴＣｇ１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Ｚ２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Ｚ５として決定される。また、波形周期ＣＹの開始時点からゾーンＺ２の開始時点までの時間ゾーンが、ゾーンＺ１として決定される。また、ゾーンＺ２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Ｚ３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Ｚ５の開始時点までの時間ゾーンが、ゾーンＺ４として決定される。また、ゾーンＺ５の終了時点から波形周期ＣＹの終了時点までの時間ゾーンがゾーンＺ６として決定される。

[0144] 工程ＳＴＣｇ１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。

[0145] 次いで、工程ＳＴＣａが行われる。工程ＳＴＣａは、工程ＳＴａに対応する。工程ＳＴＣａでは、電源制御部は、波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨのそれぞれのためのソース周波数ｆとして時系列TS_Mの複数の周波数を有するソース高周波電力ＨＦを高周波電源４１から供給する。

[0146] 次いで、工程ＳＴＣｆが行われる。工程ＳＴＣｆでは、工程ＳＴＡｆ１と同様に、波形周期ＣＹにおける反射の度合いR_Dが取得される。

[0147] 次いで、工程ＳＴＣＪが行われる。工程ＳＴＣＪは、工程ＳＴＪに対応する。工程ＳＴＣＪにおける判定は、電源制御部によって行われ得る。工程ＳＴＣＪにおいて、停止条件は、例えば、工程ＳＴＣａを含むサイクルが所定回数行われている場合に満たされる。

[0148] 工程ＳＴＣＪ１において、停止条件が満たされないと判定されると、工程ＳＴＣｇ２が行われる。工程ＳＴＣｇ２は、工程ＳＴｇに対応する。工程ＳＴＣｇ２は、電源制御部によって行われ得る。工程ＳＴＣｇ２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。工程ＳＴＣｇ２により、時系列TS_Mが準備される。そして、工程ＳＴＣｇ２において準備された時系列TS_Mを用いて、工程ＳＴＣａが再び行われる。即ち、工程ＳＴＣａを含むサイクルが繰り返される。一方、工程ＳＴＣＪにおいて、停止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ＳＴＣｈが行われる。

[0149] 工程ＳＴＣａを含むサイクルの繰り返しにおいては、工程ＳＴＣｇ１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ＳＴＣｆにおいて取得される反射の度合いR_Dに基づき反射の度合いR_Dが改善しなくなっているものと判断されるまで行われる。

[0150] 次いで、工程ＳＴＣａを含むサイクル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ＳＴＣｆにおいて取得される反射の度合いR_Dに基づき反射の度合いR_Dが改善しなくなっているものと判断されるまで行われる。

[0151] 工程ＳＴＣｈでは、工程ＳＴＣａを含むサイクルの繰り返しにおいて得られた複数の反射の度合いR_Dから反射の度合いR_Dを最も改善する、即ち反射の度合いR_Dを最も低減する時系列TS_Mが特定されて、第３の時系列として選択される。工程ＳＴＣｈにおける第３の時系列の選択は、電源制御部によって行われる。そして、電源制御部は、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を、波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＰＨのそれぞれのソース周波数ｆとして用いる。なお、第３の時系列を基本時系列として用いて、工程ＳＴＣｐ１からの処理が繰り返されてもよい。

[0152] 以上説明したように、プラズマ処理装置１では、波形周期ＣＹにおけるソース周波数ｆの時系列が、反射の度合いR_Dに応じて反射の度合いR_Dを改善するように、時系列ＴＳ１、時系列ＴＳ２、又は時系列ＴＳ３に変更される。これらの時系列は、基本時系列TS_Bから簡単に得られる。したがって、プラズマの生成のために用いられるソース高周波電力ＨＦの反射を簡単に抑制することが可能となる。

[0153] 以下、センサ４５の幾つかの別の例について説明する。別の例において、センサ４５によって取得されるセンサ信号ＳＳは、ソース高周波電力ＨＦの反射波の電圧信号ＶＳに加えて、ソース高周波電力ＨＦの進行波の電圧信号を含んでいてもよい。この場合には、進行波の電圧信号からも検波器５１において包絡線信号が得られ、Ａ／Ｄ変換器５２において複数のデジタル値が得られる。この場合には、電源制御部は、反射波の電圧信号ＶＳから得られる複数のデジタル値と進行波の電圧信号から得られる複数のデジタル値とを用いて、反射の度合いR_Dとして、反射率、即ち、（反射波のパワーレベル）／（進行波のパワーレベル）を求めてもよい。

[0154] 更に別の例において、センサ４５は、電圧センサ及び電流センサを含んで

いてもよい。この例において、センサ４５は、高周波電源４１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_{HF}及び電流I_{HF}を測定するように構成される。この場合には、センサ信号ＳＳは、電圧V_{HF}及び電流I_{HF}から特定される高周波電源４１の負荷のインピーダンスZ_Lを表す信号、電圧V_{HF}と電流I_{HF}との間の位相差θを表す信号、又は、電圧V_{HF}及び電流I_{HF}から特定される反射係数Γを表す信号であってもよい。この例においても、電源制御部は、センサ信号ＳＳから検波器５１及びＡ／Ｄ変換器５２を介して得られる複数のデジタル値を用いて反射の度合いR_Dを特定し得る。なお、反射の度合いR_Dは、波形周期ＣＹ又は複数の位相期間ＰＨの各々におけるインピーダンスZ_Lと特性インピーダンス（例えば５０Ω）との間の差の代表値（例えば平均値）であってもよい。或いは、反射の度合いR_Dは、波形周期ＣＹ又は複数の位相期間ＰＨの各々における位相差θの代表値（例えば平均値）であってもよい。或いは、反射の度合いR_Dは、波形周期ＣＹ又は複数の位相期間ＰＨの各々における反射係数Γの代表値（例えば平均値）であってもよい。

[0155] 以下、制御部２及び／又は電源制御部のようなプラズマ処理装置１における一つ以上の処理回路として用いられ得る処理回路の例について説明する。図２３は、本明細書に記載の動作をコンピュータ上で実施する処理回路のブロック図である。図２３は、任意のコンピュータ上の制御処理を制御するために使用され得る処理回路１３０を図示している。フローチャートにおける記述又はブロックは、処理の特定の論理機能又はステップを実施するための一つ以上の実行可能な命令を含むモジュール、セグメント、又はコードの一部を表すものである。当業者によって理解されるように、関連する機能に応じて、略同時、又は逆の順序等、図示又は記載の順序とは異なる順序で実行可能な機能を有する別の実施例が、本開示の例示的実施形態の範囲内に含まれる。本明細書に記載の様々な要素、特徴、及び処理は互いに独立に使用されてもよく、様々な方法で組み合わせられてもよい。考えられ得るあらゆる組合せ及び部分的な組合せが、本開示の範囲に含まれ得る。

[0156] 図２３では、処理回路１３０は、上述／後述の一つ以上の制御処理を実施するＣＰＵ１２００を含む。処理データ及び命令は、メモリ１２０２に格納されてもよい。これらの処理データ及び命令は、ハードディスクドライブ（ＨＤＤ:Hard Disk Drive）や可搬記憶媒体等の記憶媒体ディスク１２０４に格納されても、遠隔で格納されてもよい。更に、特許請求の範囲に記載する本開示は、本発明による処理の命令が格納されるコンピュータ可読媒体の形態によって限定されるものではない。例えば、これらの命令は、ＣＤ、ＤＶＤ、フラッシュメモリ、ＲＡＭ、ＲＯＭ、ＰＲＯＭ、ＥＰＲＯＭ、ＥＥＰＲＯＭ、ハードディスク、又は処理回路１３０が通信するサーバ及び／又はコンピュータ等の任意の他の情報処理装置に格納されてもよい。

[0157] 更に、特許請求の範囲に記載する本開示は、ユーティリティアプリケーション、バックグラウンドデーモン、オペレーティングシステムの構成要素、又はそれらの組合せとして提供されてもよく、ＣＰＵ１２００及びマイクロソフトウィンドウズ（登録商標）、ＵＮＩＸ（登録商標）、Ｓｏｌａｒｉｓ（登録商標）、ＬＩＮＵＸ（登録商標）、Ａｐｐｌｅ　ＭＡＣ－ＯＳ等の当業者に既知のオペレーティングシステムと連動して実行されてもよい。

[0158] 処理回路１３０を構築するハードウェア要素は、様々な回路要素によって実現することができる。更に、上述の実施形態の各機能は、一つ以上の処理回路を含む回路によって実施することができる。図２３に示すように、処理回路は、特定のプログラムがなされた処理装置、例えば処理装置（ＣＰＵ）１２００を含む。処理回路はまた、特定用途向け回路（ＡＳＩＣ: application specific integrated circuit）や記載の機能を実施するように構成された従来の回路部品等のデバイスを含む。

[0159] 図２３では、処理回路１３０は上述の処理を実施するＣＰＵ１２００を含む。処理回路１３０は、汎用コンピュータ又は特定の専用機であってもよい。一実施形態では、処理装置１２００がプラズマ生成部１２及びガス供給部２０の制御、或いは又は加えて、上述のソース周波数ｆの調整においてプラズマ処理装置１の各部の制御を行うようにプログラミングされている場合に

は、処理回路１３０は特定の専用機として機能する。

[0160] 或いは又は更に、ＣＰＵ１２００は、当業者には理解されるように、ＦＰＧＡ、ＡＳＩＣ、ＰＬＤ上で、又は離散した論理回路を用いて実装されてもよい。更に、ＣＰＵ１２００は、上述の本発明の処理の命令を並行して実施するように協働する複数の処理装置として実施してもよい。

[0161] 図２３の処理回路１３０はまた、ネットワーク１２２８とインターフェース接続するためのネットワーク制御器１２０６、例えば米国インテル株式会社のIntel Ethernet PROネットワークインターフェースカード等を含む。ネットワーク１２２８は、理解可能なように、インターネット等のパブリックネットワーク、ＬＡＮやＷＡＮ等のプライベートネットワーク、又はそれらの任意の組合せでよく、また、ＰＳＴＮやＩＳＤＮ等のサブネットワークを含んでもよい。ネットワーク１２２８はまた、イーサネットネットワーク等のような有線でもよく、ＥＤＧＥ、３Ｇ、４Ｇ無線セルラシステムを含むセルラネットワーク等の無線でもよい。無線ネットワークはまた、Wi-Fi、Bluetooth（登録商標）、又は他の任意の既知の無線通信形態でもよい。

[0162] 処理回路１３０は、モニタ等の表示装置１２１０とインターフェース接続するためのグラフィックカードやグラフィックアダプタ等の表示装置制御器１２０８を更に含む。汎用Ｉ／Ｏインターフェース１２１２が、キーボード及び／又はマウス１２１４、並びに表示装置１２１０と一体、又は別体のタッチパネル１２１６とインターフェース接続されている。汎用Ｉ／Ｏインターフェースはまた、プリンタ及びスキャナ等の様々な周辺機器１２１８に接続されている。

[0163] 記憶装置制御器１２２４は、ＩＳＡ、ＥＩＳＡ、ＶＥＳＡ、ＰＣＩ等の通信バス１２２６を介して記憶媒体ディスク１２０４に接続され、処理回路１３０のすべての構成要素が互いに接続されている。表示装置１２１０、キーボード及び／又はマウス１２１４、並びに表示装置制御器１２０８、記憶装置制御器１２２４、ネットワーク制御器１２０６、音声制御器１２２０、及び汎用Ｉ／Ｏインターフェース１２１２の一般的な特徴及び機能については

、本明細書では簡略化のために既知のものとして説明を省略する。

[0164] 本開示で記載する例示的な回路要素は、他の要素と置換え可能であり、本明細書に記載の例と異なる構造を有してもよい。更に、本明細書に記載の特徴を実施するように構成された回路は、複数の回路ユニット（例えば、チップ）で実施されても、又はこれらの特徴が単一のチップセットの回路に組みこまれてもよい。

[0165] 本明細書に記載の機能及び特徴はまた、システム上で分散配置された様々な構成要素によって実行されてもよい。例えば、一つ以上の処理装置がこれらのシステムの機能を実行してもよく、その場合、処理装置はネットワーク内で通信している複数の構成要素にわたって分散して配置される。分散配置された構成要素として、様々なヒューマンインターフェース及び通信装置（表示モニタ、スマートフォン、タブレット、個人情報端末（ＰＤＡ:Personal Digital Assistant）等）に加えて、処理を共有できる一つ以上のクライアント機及びサーバ機が含まれ得る。ネットワークは、ＬＡＮやＷＡＮ等のプライベートネットワークでも、インターネット等のパブリックネットワークでもよい。システムへの入力は、ユーザによる直接入力によって受け付けても、リアルタイムで又はバッチ処理として遠隔に受け付けてもよい。更に、実施例の一部を上述のものと同一ではないモジュール又はハードウェア上で実施してもよい。したがって、他の実施例も特許請求の範囲に含まれる。

[0166] 以上、種々の例示的実施形態について説明してきたが、上述した例示的実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。

[0167] 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

[0168] １…プラズマ処理装置、１０…チャンバ、３０Ｓ…電源システム、４１…高周波電源、４２…バイアス電源、４５…センサ、５１…検波器、５２…Ａ／Ｄ変換器。

請求の範囲

[請求項1] チャンバと、

前記チャンバ内の基板支持部と、

前記チャンバ内の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、

前記ソース高周波電力の反射の度合いを反映するセンサ信号を取得するように構成されたセンサと、

前記センサ信号の包絡線信号を検波するように構成された検波器と、

前記検波器から出力される前記包絡線信号に対するＡ／Ｄ変換を行うように構成されたＡ／Ｄ変換器と、

前記高周波電源を制御するように構成された電源制御部と、

を備え、

前記電源制御部は、前記電気バイアスの波形周期における前記包絡線信号から前記Ａ／Ｄ変換器によって生成される複数のデジタル値から特定される該波形周期における前記反射の度合い又は前記波形周期を分割する複数の位相期間の各々における前記反射の度合いに応じて、後の前記電気バイアスの波形周期において前記反射の度合いを低減するよう前記複数の位相期間の各々のための前記ソース高周波電力のソース周波数を調整するように構成されており、

前記Ａ／Ｄ変換器のサンプリング周波数は、前記波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数と前記波形周期内の前記複数の位相期間の個数との積の２倍以上、且つ、前記高周波電源が調整可能な前記ソース周波数の最小周波数以下である、

プラズマ処理装置。

[請求項2] 前記検波器は、

検波回路と、

前記センサと前記検波回路との間で接続された減衰器及び第１のフィルタと、

前記検波回路と前記Ａ／Ｄ変換器との間で接続された第２のフィルタ及び増幅器と、

を含み、

前記検波回路は、前記センサ信号の前記減衰器での減衰及び前記第１のフィルタでのフィルタリングにより生成される第１の信号から第１の包絡線信号を検波するように構成されており、

前記検波器は、前記第１の包絡線信号に対する前記第２のフィルタでのフィルタリング及び前記増幅器での増幅により生成される第２の包絡線信号を、前記Ａ／Ｄ変換器に出力するように構成されている、請求項１に記載のプラズマ処理装置。

[請求項3] 前記第１のフィルタの上限遮断周波数は、前記高周波電源が調整可能な前記ソース周波数の最大周波数以上であり、且つ、前記最小周波数の２倍以下であり、

前記第１のフィルタの下限遮断周波数は、前記最小周波数以下である、

請求項２に記載のプラズマ処理装置。

[請求項4] 前記第２のフィルタは、ローパスフィルタであり、

前記第２のフィルタの上限遮断周波数は、前記バイアス周波数と前記波形周期内の前記複数の位相期間の個数との積と前記第１のフィルタの前記上限遮断周波数との間の値を有する、

請求項３に記載のプラズマ処理装置。

[請求項5] 前記第２のフィルタの前記上限遮断周波数は、前記最小周波数以下である、請求項４に記載のプラズマ処理装置。

[請求項6] 前記センサは、方向性結合器であり、

前記センサ信号は、前記ソース高周波電力の反射波の電圧信号である、

請求項１～５の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項7] プラズマ処理装置のチャンバ内の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、

前記ソース高周波電力の反射の度合いを反映するセンサ信号を取得するように構成されたセンサと、

前記センサ信号の包絡線信号を検波するように構成された検波器と、

前記検波器から出力される前記包絡線信号に対するＡ／Ｄ変換を行うように構成されたＡ／Ｄ変換器と、

前記高周波電源を制御するように構成された電源制御部と、

を備え、

前記電源制御部は、前記電気バイアスの波形周期における前記包絡線信号から前記Ａ／Ｄ変換器によって生成される複数のデジタル値から特定される該波形周期における前記反射の度合い又は前記波形周期を分割する複数の位相期間の各々における前記反射の度合いに応じて、後の前記電気バイアスの波形周期において前記反射の度合いを低減するよう前記複数の位相期間の各々のための前記ソース高周波電力のソース周波数を調整するように構成されており、

前記Ａ／Ｄ変換器のサンプリング周波数は、前記波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数と前記波形周期内の前記複数の位相期間の個数との積の２倍以上、且つ、前記高周波電源が調整可能な前記ソース周波数の最小周波数以下である、

電源システム。

[請求項8] 前記センサは、方向性結合器であり、

前記センサ信号は、前記ソース高周波電力の反射波の電圧信号である、

請求項７に記載の電源システム。

[請求項9] （ａ）プラズマ処理装置のチャンバ内の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高周波電力を供給する工程と、

（ｂ）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バイアス電源から前記基板支持部に電気バイアスを供給する工程と、

（ｃ）センサにおいて、前記ソース高周波電力の反射の度合いを反映するセンサ信号を取得する工程と、

（ｄ）検波器において、前記センサ信号の包絡線信号を検波する工程と、

（ｅ）Ａ／Ｄ変換器において、前記検波器から出力される前記包絡線信号に対するＡ／Ｄ変換を行う工程と、

（ｆ）前記電気バイアスの波形周期における前記包絡線信号から前記Ａ／Ｄ変換器によって生成される複数のデジタル値から、該波形周期における前記反射の度合い又は前記波形周期を分割する複数の位相期間の各々における前記反射の度合いを特定する工程と、

（ｇ）電源制御部により、前記（ｆ）において特定された前記反射の度合いに応じて、後の前記電気バイアスの波形周期において前記反射の度合いを低減するよう前記複数の位相期間の各々のための前記ソース高周波電力のソース周波数を調整する工程と、

を含み、

前記Ａ／Ｄ変換器のサンプリング周波数は、前記波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数と前記波形周期内の前記複数の位相期間の個数との積の２倍以上、且つ、前記高周波電源が調整可能な前記ソース周波数の最小周波数以下である、

制御方法。

[請求項10] 前記センサは、方向性結合器であり、

前記センサ信号は、前記ソース高周波電力の反射波の電圧信号である、

請求項９に記載の制御方法。