明　細　書

発明の名称 ： プラズマ処理装置及びプラズマ処理方法

技術分野

[0001]　本開示の例示的実施形態は、プラズマ処理装置及びプラズマ処理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、高周波バイアス電力が用いられる。下記の特許文献１は、高周波バイアス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、プラズマの生成のために用いられる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]　一つの例示的実施形態において、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、高周波電源、及びバイアス電源を備える。基板支持部は、チャンバ内に設けられている。高周波電源は、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イオンを引き込むために、基板支持部に電気バイアスエネルギーを供給するように構成されている。電気バイアスエネルギー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で繰り返す波形を有する。高周波電源は、高周波電力が供給され且つ

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期間において、（ａ）、（ｂ）、及び（ｃ）を行う。（ａ）は、バイアス周期内の高周波電力の周波数の時系列として、予め定められた周波数の時系列である基本時系列を用いることを含む。（ｂ）は、（ａ）の後に行われる。（ｂ）は、バイアス周期において高周波電力の周波数として変更された時系列を用いることを含む。（ｃ）は、高周波電源とその負荷との間のインピーダンスの整合状態を、該整合状態を反映する評価値に基づき改善するように、（ｂ）を繰り返すことを含む。高周波電源は、（ｂ）において用いる時系列として、時系列（ＴＳ１）、時系列（ＴＳ２）、又は時系列（ＴＳ３）を用いる。時系列（ＴＳ１）は、バイアス周期に対する位相シフト量を基本時系列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、基本時系列を周波数方向に拡大又は縮小させた周波数の時系列である。時系列（ＴＳ３）は、基本時系列と同じ個数の周波数を含む周波数の時系列であって、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。

発明の効果

[0006] 一つの例示的実施形態によれば、プラズマの生成のために用いられる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]一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理装置を概略的に示す図である。

[図2]一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理装置を概略的に示す図である。

[図3]一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理方法の流れ図である。

[図4]一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理方法の工程ＳＴ３の第１の例の流れ図である。

[図5]図４に示す工程ＳＴ３の第１の例を説明するための図である。

[図6]一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理方法の工程ＳＴ３の第２の例

の流れ図である。

[図7]図６に示す工程ＳＴ３の第２の例を説明するための図である。

[図8]図６に示す工程ＳＴ３の第２の例を説明するための図である。

[図9]図６に示す工程ＳＴ３の第２の例を説明するための図である。

[図10]図６に示す工程ＳＴ３の第２の例を説明するための図である。

[図11]一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理方法の工程ＳＴ３の第３の例の流れ図である。

[図12]図１１に示す工程ＳＴ３の第３の例を説明するための図である。

[図13]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周波数設定期間に関連する一例のタイミングチャートである。

[図14]一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理装置における周波数設定期間に関連する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及び図２は、一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理装置を概略的に示す図である。

[0010] 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、少なくとも一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一つのガス供給口と、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一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。

[0011] 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一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。

[0012] 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、例えばコンピュータ２ａを含んでもよい。コンピュータ２ａは、例えば、処理部（ＣＰＵ：Ｃｅｎｔｒａｌ Ｐｒｏｃｅｓｓｉｎｇ Ｕｎｉｔ）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。処理部２ａ１は、記憶部２ａ２に格納されたプログラムに基づいて種々の制御動作を行うように構成され得る。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。

[0013] 以下に、プラズマ処理装置１の一例としての容量結合プラズマ処理装置の構成例について説明する。容量結合プラズマ処理装置１は、プラズマ処理チャンバ１０、ガス供給部２０、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

なくとも一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。側壁１０ａは接地される。シャワーヘッド１３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（ウェハ）Ｗを支持するための中央領域（基板支持面）１１１ａと、リングアセンブリ１１２を支持するための環状領域（リング支持面）１１１ｂとを有する。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。一実施形態において、本体部１１１は、基台１１１ｅ及び静電チャック１１１ｃを含む。基台１１１ｅは、導電性部材を含む。基台１１１ｅの導電性部材は下部電極として機能する。静電チャック１１１ｃは、基台１１１ｅの上に配置される。静電チャック１１１ｃの上面は、基板支持面１１１ａを有する。リングアセンブリ１１２は、１又は複数の環状部材を含む。１又は複数の環状部材のうち少なくとも一つはエッジリングである。また、図示は省略するが、基板支持部１１は、静電チャック１１１ｃ、リングアセンブリ１１２、及び基板Ｗのうち少なくとも一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、又はこれらの組み合わせを含んでもよい。流路には、ブラインやガスのような伝熱流体が流れる。また、基板支持部１

１は、基板Ｗの裏面と基板支持面１１１ａとの間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。

[0015] シャワーヘッド１３は、ガス供給部２０からの少なくとも一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、少なくとも一つのガス供給口１３ａ、少なくとも一つのガス拡散室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、導電性部材を含む。シャワーヘッド１３の導電性部材は上部電極として機能する。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。

[0016] ガス供給部２０は、一つ以上のガスソース２１及び少なくとも一つ以上の流量制御器２２を含んでもよい。一実施形態において、ガス供給部２０は、一つ以上の処理ガスを、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、一つ以上の処理ガスの流量を変調又はパルス化する一つ以上の流量変調デバイスを含んでもよい。

[0017] 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。

[0018] プラズマ処理装置１は、高周波電源３１及びバイアス電源３２を備えている。プラズマ処理装置１は、制御部３０ｃを更に備えていてもよい。

[0019] 高周波電源３１は、チャンバ１０内でプラズマを生成するために高周波電

力ＲＦを発生するように構成されている。高周波電力ＲＦは、例えば、１３ＭＨｚ以上、１５０ＭＨｚ以下の周波数を有する。一実施形態において、高周波電源３１は、高周波信号発生器３１ｇ及び増幅器３１ａを含んでいてもよい。高周波信号発生器３１ｇは、高周波信号を発生する。増幅器３１ａは、高周波信号発生器３１ｇから入力される高周波信号を増幅することにより高周波電力ＲＦを生成して、高周波電力ＲＦを出力する。

[0020] 一実施形態において、高周波電源３１は、整合器３１ｍを介して基台１１１ｅに接続されている。整合器３１ｍは、整合回路を含んでいる。整合器３１ｍの整合回路は、可変インピーダンスを有する。整合器３１ｍの整合回路は、制御部３０ｃによって制御される。整合器３１ｍの整合回路のインピーダンスは、高周波電源３１の負荷側のインピーダンスを高周波電源３１の出力インピーダンスに整合させるように調整される。なお、高周波電源３１は、基板支持部１１の中に設けられた他の電極に電気的に接続されていてもよい。或いは、高周波電源３１は、整合器３１ｍを介して上部電極に接続されていてもよい。

[0021] バイアス電源３２は、基板支持部１１上に載置された基板Ｗにイオンを引き込むために、電気バイアスエネルギーＢＥを基板支持部１１に供給するように構成されている。バイアス電源３２は、基板支持部１１内のバイアス電極に接続されている。バイアス電極は、基台１１１ｅであってもよい。バイアス電極は、基台１１１ｅとは別の、基板支持部１１の中に設けられた他の電極であってもよい。バイアス電源３２と高周波電源３１は、基板支持部１１内の同一の電極に電気的に接続されていてもよく、基板支持部１１内の異なる電極に電気的にそれぞれ接続されていてもよい。

[0022] 電気バイアスエネルギーＢＥは、バイアス周波数の逆数の時間長を有する周期ＣＹ（波形周期）で繰り返す波形を有する。バイアス周波数は、例えば１００ｋＨｚ以上、１３．５６ＭＨｚ以下の周波数である。

[0023] 一実施形態において、電気バイアスエネルギーＢＥは、例えば図５に示すように、バイアス周波数を有する高周波電力、即ち高周波バイアス電力であ

ってもよい。高周波バイアス電力は、周期ＣＹ、即ちバイアス周期において正弦波状の波形を有する。周期ＣＹは、バイアス周波数の逆数の時間長を有する。電気バイアスエネルギーＢＥが高周波バイアス電力である場合には、バイアス電源３２は、整合器３２ｍを介してバイアス電極に接続される。整合器３２ｍは、整合回路を含んでいる。整合器３２ｍの整合回路は、可変インピーダンスを有する。整合器３２ｍの整合回路は、制御部３０ｃによって制御される。整合器３２ｍの整合回路のインピーダンスは、バイアス電源３２の負荷側のインピーダンスをバイアス電源３２の出力インピーダンスに整合させるように調整される。

[0024] 別の実施形態において、電気バイアスエネルギーＢＥは、バイアス周波数の逆数である時間長を有する時間間隔（即ち、周期ＣＹ）で周期的に発生される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として用いられる電圧のパルスは、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。電圧のパルスは、三角波、矩形波といった任意の波形を有していてもよい。電気バイアスエネルギーＢＥとして電圧のパルスが用いられる場合には、整合器３２ｍの代わりに、高周波電力ＲＦを遮断するフィルタが、バイアス電源３２とバイアス電極との間で接続されていてもよい。

[0025] プラズマ処理装置１では、周期ＣＹは、複数の位相期間ＳＰに分割されている。プラズマ処理装置１では、高周波電力ＲＦが供給され、電気バイアスエネルギーＢＥが基板支持部１１に供給されている期間において、周期ＣＹの中の複数の位相期間ＳＰのそれぞれの高周波電力ＲＦの周波数f_{RF}が調整される。このために、高周波電源３１とバイアス電源３２は、互いに同期される。このために用いられる同期信号は、バイアス電源３２から高周波電源３１に与えられてもよい。或いは、同期信号は、高周波電源３１又は高周波信号発生器３１ｇからバイアス電源３２に与えられてもよい。

[0026] 制御部３０ｃは、高周波電源３１を制御するように構成されている。制御部３０ｃは、ＣＰＵといったプロセッサから構成され得る。制御部３０ｃは、整合器３１ｍの一部であってもよく、高周波電源３１の一部であってもよ

い。制御部３０ｃは、整合器３１ｍ及び高周波電源３１から分離されていてもよい。或いは、制御部２が、制御部３０ｃを兼ねていてもよい。

[0027] 以下、高周波電源３１による周期ＣＹ内での高周波電力ＲＦの周波数の調整について説明する。また、一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理方法についても説明する。なお、以下に説明する高周波電力ＲＦの周波数の調整は、制御部３０ｃによる高周波電源３１の制御により行われ得る。

[0028] 図３は、一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理方法の流れ図である。図３に示すプラズマ処理方法（以下、「方法ＭＴ」という）は、工程ＳＴ１～工程ＳＴ３を含む。工程ＳＴ１～工程ＳＴ３は、制御部２によるプラズマ処理装置１の各部に対する制御により行われ得る。方法ＭＴでは、工程ＳＴ１～工程ＳＴ３が行われている間、ガスが、ガス供給部２０からチャンバ１０内に供給され、チャンバ内の圧力が指定された圧力に排気システム４０により調整される。

[0029] 工程ＳＴ１において、チャンバ１０内でガスからプラズマを生成するために、高周波電力ＲＦが高周波電源３１から供給される。工程ＳＴ２は、工程ＳＴ１と並行して行われる。工程ＳＴ２では、基板支持部１１上の基板にイオンを引き込むために、電気バイアスエネルギーＢＥが、基板支持部１１に供給される。一実施形態では、電気バイアスエネルギーＢＥは、基台１１１ｅに供給される。工程ＳＴ３は、高周波電力ＲＦが供給され且つ電気バイアスエネルギーＢＥが基板支持部１１に供給されている期間、即ち、工程ＳＴ１及び工程ＳＴ２が行われている期間において、行われる。工程ＳＴ３では、周期ＣＹ内の高周波電力ＲＦの周波数f_{RF}が調整される。

[0030] 工程ＳＴ３は、工程ＳＴａ～工程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ＣＹ内の高周波電力ＲＦの周波数f_{RF}の時系列として用いられる。即ち、周波数f_{RF}の時系列は、高周波電力ＲＦの複数の周波数を含んでおり、当該複数の周波数は、周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰのそれぞれの高周波電力ＲＦの周波数として用いられる。高周波電源３１が用いる周波数f_{RF}の時系列は、制御部３０ｃか

ら指定され得る。基本時系列ＴＳ$_B$は、方法ＭＴの工程ＳＴ１の実行前の周波数設定期間Ｐ$_{fset}$において予め準備される。周波数設定期間Ｐ$_{fset}$における基本時系列ＴＳ$_B$の準備については、後述する。

[0031] 次いで、工程ＳＴｂが行われる。工程ＳＴｂでは、周期ＣＹにおける高周波電力ＲＦの周波数ｆ$_{RF}$として、変更された時系列ＴＳ$_M$が用いられる。時系列ＴＳ$_M$に含まれる複数の周波数は、周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰのそれぞれの高周波電力ＲＦ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３０ｃから指定され得る。工程ＳＴｃでは、高周波電源３１とその負荷との間のインピーダンスの整合状態を、当該整合状態を反映する評価値に基づき改善するように、工程ＳＴｂが繰り返される。

[0032] 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ＴＳ３が用いられる。時系列ＴＳ１は、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。

[0033] 評価値は、センサ３０ｓによって取得される測定値から制御部３０ｃによって決定される。評価値は、工程ＳＴｂにおいて各時系列が用いられている評価期間における整合状態を反映する単一の代表値であり得る。評価期間は、周期ＣＹ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。

[0034] センサ３０ｓは、高周波電力ＲＦの反射波のパワーレベルを測定するように構成された方向性結合器であってもよい。この場合において、測定値は、高周波電力ＲＦの反射波のパワーレベルであり、評価値は、評価期間における反射波のパワーレベル又は高周波電源３１の高周波電力ＲＦの出力パワー

レベルに対する反射波のパワーレベルの比の値を表す代表値である。評価値は、評価期間における反射波のパワーレベル又は高周波電源３１の高周波電力ＲＦの出力パワーレベルに対する反射波のパワーレベルの比の値の積分値、平均値、又はピーク値であってもよい。この場合において、センサ３０ｓは、高周波電源３１とその負荷との間に接続される。センサ３０ｓは、高周波電源３１と整合器３１ｍとの間に接続されていてもよい。

[0035] 或いは、センサ３０ｓは、電圧電流センサであってもよい。センサ３０ｓは、チャンバ１０に対する高周波電力ＲＦの給電パスにおける電圧及び電流を測定するように構成されている。センサ３０ｓは、高周波電源３１とその負荷との間に接続されている。センサ３０ｓは、高周波電源３１と整合器３１ｍとの間に接続されていてもよい。或いは、センサ３０ｓは、整合器３１ｍの一部であってもよい。この場合において、測定値は、電圧及び電流である。評価値は、評価期間における電圧と電流との間の位相差を表す代表値であってもよい。例えば、評価値は、評価期間における電圧と電流との間の位相差の積分値、平均値、又はピーク値であってもよい。或いは、評価値は、評価期間における電圧と電流から求められるインピーダンス又は当該インピーダンスの抵抗成分を表す代表値であってもよい。例えば、評価値は、評価期間における電圧と電流から求められるインピーダンス又は当該インピーダンスの抵抗成分の積分値、平均値、又はピーク値であってもよい。

[0036] 以下、工程ＳＴ３の幾つかの例について説明する。

[0037] ［第１の例］

[0038] 以下、図４及び図５を参照して、工程ＳＴ３の第１の例について説明する。図４は、一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理方法の工程ＳＴ３の第１の例の流れ図である。図５は、図４に示す工程ＳＴ３の第１の例を説明するための図である。図５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と高周波電力ＲＦの周波数f_{RF}を示している。図５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５には、周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰのそれぞれの高周波電力Ｒ

Ｆの周波数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。工程ＳＴ３の第１の例、即ち工程ＳＴ３Ａ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。

[0039] 工程ＳＴ３Ａは、図４に示すように、工程ＳＴａ１１で開始する。工程ＳＴａに関して上述したように、工程ＳＴａ１１では、基本時系列ＴＳ$_B$が、周期ＣＹ内の高周波電力ＲＦの周波数f_{RF}の時系列として用いられる。

[0040] 次いで、工程ＳＴａ１２が行われる。工程ＳＴａ１２では、評価値が取得される。評価値は、上述したようにセンサ３０ｓによって取得される測定値から決定される。評価値は、制御部３０ｃによって決定される。

[0041] 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$_M$が準備される。時系列ＴＳ$_M$は、制御部３０ｃによって準備されて、高周波電源３１に指定される。

[0042] 次いで、工程ＳＴｂ１１が行われる。工程ＳＴｂ１１では、工程ＳＴｂに関して上述したように、周期ＣＹにおける高周波電力ＲＦの周波数f_{RF}として、準備された時系列ＴＳ$_M$が用いられる。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。

[0043] 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取得される。評価値は、上述したようにセンサ３０ｓによって取得される測定値から制御部３０ｃによって決定される。

[0044] 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判定される。工程ＳＴＪ１１の判定は、制御部３０ｃによって行われる。工程ＳＴＪ１１において、終了条件は、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。

[0045] 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３０ｃによって行われる。評価値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。

[0046] 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、整合状態が改善しているか否かが判定される。工程ＳＴＪ１３の判定は、制御部３０ｃによって行われる。工程ＳＴＪ１３において整合状態が改善しているものと判定された場合には、工程ＳＴｃ１１が行われる。一方、工程ＳＴＪ１３において整合状態が改善していないものと判定された場合には、工程ＳＴｃ１２が行われる。

[0047] 工程ＳＴｃ１１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ＳＴｃ１１では、図５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ＳＴｃ１１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。時系列TS_Mは、制御部３０ｃによって準備され、高周波電源３１に指定される。そして、工程ＳＴｂ１１が再び行われる。

[0048] 工程ＳＴｃ１２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ＳＴｃ１２では、図５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ＳＴｃ１２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。時系列TS_Mは、制御部３０ｃによって準備され、高周波

電源３１に指定される。そして、工程ＳＴｂ１１が再び行われる。

[0049] 工程ＳＴｂ１１が繰り返されて、工程ＳＴＪ１１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ＳＴ３Ａは終了する。

[0050] ［第２の例］

[0051] 以下、図６～図１０を参照して、工程ＳＴ３の第２の例について説明する。図６は、一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理方法の工程ＳＴ３の第２の例の流れ図である。図７～図１０の各々は、図６に示す工程ＳＴ３の第２の例を説明するための図である。図７～図１０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と高周波電力ＲＦの周波数f_{RF}を示している。図７～図１０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７～図１０の各々には、周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰのそれぞれの高周波電力ＲＦの周波数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。工程ＳＴ３の第２の例、即ち工程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。

[0052] 図６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。

[0053] 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、即ち拡大若しく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３０ｃによって準備され、高周波電源３１に指定される。

[0054] 工程ＳＴｐ２１において準備される時系列TS_Mは、図７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７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８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８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９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９に示すように変更された時系列を時系列ＴＳ２３という。工程ＳＴｐ２１において準備される時系列TS_Mは、図１０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１０に示すように変更された時系列を時系列ＴＳ２４という。

[0055] 次いで、工程ＳＴｂ２１が行われる。工程ＳＴｂ２１では、工程ＳＴｂに関して上述したように、周期ＣＹにおける高周波電力ＲＦの周波数f_{RF}として、準備された時系列TS_Mが用いられる。そして、工程ＳＴｃ２において、工程ＳＴｂ２１が繰り返される。高周波電源３１は、工程ＳＴｂ２１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。

[0056] 工程ＳＴｂ２１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ＳＴｂ２１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。

[0057] 工程ＳＴｃ２においては、工程ＳＴｂ２２が、工程ＳＴｂ２１の後に行われる。工程ＳＴｂ２２は、工程ＳＴｂ１２と同じ工程である。

[0058] 工程ＳＴｃ２においては、工程ＳＴＪ２１が工程ＳＴｂ２２の後に行われる。工程ＳＴＪ２１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ＳＴＪ２１の判定は、制御部３０ｃによって行われる。工程ＳＴＪ２１において、スケーリングの終了条件は、工程ＳＴｂ２１の繰り返しが所定回数行われている場合に満たされる。

[0059] 工程ＳＴＪ２１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ＳＴｃ２１が行われる。工程ＳＴｃ２１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７～図１０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３０ｃによって準備され、高周波電源３１に指定される。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。

[0060] 工程ＳＴｄ２１では、整合状態を最も改善する時系列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。高周波電源３１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のそれぞれの高周波電力ＲＦの周波数として用いる。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。

[0061] ［第３の例］

[0062] 以下、図１１及び図１２を参照して、工程ＳＴ３の第３の例について説明する。図１１は、一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理方法の工程ＳＴ３の第３の例の流れ図である。図１２は、図１１に示す工程ＳＴ３の第３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ＢＥと高周波電力ＲＦの周波数ｆ$_{RF}$を示している。図１２には、電気バイアスエネルギーＢＥの周期ＣＹにおける波形が示されている。また、図１２には、周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰのそれぞれの高周波電力ＲＦの周波数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。工程ＳＴ３の第３の例、即ち工程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。

[0063] 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整合状態を最も改善する時系列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。

[0064] 次いで、工程ＳＴｐ３３が行われる。工程ＳＴｐ３３では、工程ＳＴｐ３２で選択された基本時系列を用いて、工程ＳＴ３Ｂが行われる。次いで、工程ＳＴｐ３４が行われる。工程ＳＴｐ３４では、工程ＳＴｐ３３で用いた複数の時系列のうち整合状態を最も改善する時系列TS_M（第２の時系列）が、工程ＳＴｐ３３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。

[0065] 次いで、工程ＳＴｐ３５が実行される。工程ＳＴｐ３５では、工程ＳＴｐ３４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が準備される。工程ＳＴｐ３５において、時系列TS_Mは制御部３０ｃによって準備される。なお、工程ＳＴｐ３１～工程ＳＴｐ３４の代わりに工程ＳＴａ１１及び工程ＳＴａ１２が行われて、工程ＳＴｐ３５において基本時系列TS_Bが用いられてもよい。

[0066] 複数の時間ゾーンは、図１２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ＳＴｐ３５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、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。

[0067] 工程ＳＴｐ３５においは、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。

[0068] 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、周期ＣＹにおける高周波電力ＲＦの周波数f_{RF}として、準備された時系列TS_Mが用いられる。そして、工程ＳＴｃ３において、工程ＳＴｂ３１が繰り返される。高周波電源３１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。

[0069] 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。

[0070] 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。工程ＳＴｃ３１により、時系列TS_Mが準備される。時系列TS_Mは、制御部３０ｃによって準備され、高周波電源３１に指定される。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。

[0071] 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整合状態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。

[0072] 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整合状態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。

[0073] 工程ＳＴｄ３１では、工程ＳＴｃ３において得られた複数の評価値から整合状態を最も改善する時系列$ＴＳ_{M}$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３０ｃによって行われる。そして、高周波電源３１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、周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰのそれぞれの高周波電力ＲＦの周波数として用いる。なお、第３の時系列を基本時系列として用いて、工程ＳＴｐ３１からの処理が繰り返されてもよい。

[0074] 以上説明したように、プラズマ処理装置１では、周期ＣＹにおける高周波電力ＲＦの周波数$ｆ_{ＲＦ}$の時系列が、評価値に基づき整合状態を改善させるように、工程ＳＴｂの繰り返しにおいて時系列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高周波電力ＲＦの反射を簡単に抑制することが可能となる。

[0075] 以下、周波数設定期間$Ｐ_{ｆｓｅｔ}$において事前に行われる基本時系列$ＴＳ_{B}$の準備に関する幾つかの実施形態について説明する。なお、基本時系列$ＴＳ_{B}$の準備は、基準のプラズマ処理装置を用いて準備される。基準のプラズマ処理装置は、プラズマ処理装置１と略同一の構成を有するが、基準のプラズマ処理装置における制御部３０ｃは、周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰごとに、整

合状態を検出し、高周波電力ＲＦの周波数を決定することが可能な処理能力を有する。基準のプラズマ処理装置において行われる基本時系列$ＴＳ_{B}$の準備に関する以下の説明においては、基準のプラズマ処理装置の各部の参照符号として、プラズマ処理装置１の対応の部分と同じ参照符号を用いる。

[0076] ［周波数$ｆ_{ＲＦ}$の決定の第１の実施形態］

[0077] 図１３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周波数設定期間に関連する一例のタイミングチャートである。図１３に示すように、第１の実施形態において、周波数設定期間$Ｐ_{ｆｓｅｔ}$は、複数の周期ＣＹ（Ｍ個の周期ＣＹ（１）～ＣＹ（Ｍ））を含む。複数の周期ＣＹの各々は、Ｎ個の位相期間ＳＰ（１）～ＳＰ（Ｎ）を含む。即ち、複数の周期ＣＹの各々は、Ｎ個の位相期間ＳＰ（１）～ＳＰ（Ｎ）に分割されている。Ｎは、２以上の整数である。複数の周期ＣＹの各々において、複数の位相期間ＳＰは、互いに同じ時間長を有していてもよく、互いに異なる時間長を有していてもよい。なお、以下の説明においては、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、複数の周期ＣＹのうちｍ番目の周期ＣＹ（ｍ）におけるｎ番目の位相期間を表す。

[0078] 制御部３０ｃは、複数の周期ＣＹの同一の位相期間ＳＰ（ｎ）において用いる高周波電力ＲＦの周波数を互いに異なる複数の周波数にそれぞれ設定するよう、高周波電源３１を制御する。制御部３０ｃは、複数の周波数のうち、複数の位相期間ＳＰの各々において高周波電力ＲＦの反射波のパワーレベルＰｒを最小化する適正周波数を選択することにより、複数の位相期間ＳＰそれぞれのための高周波電力の複数の適正周波数を決定する。

[0079] 図１３に示す例では、周期ＣＹ（１）～ＣＹ（Ｍ）の各々における高周波電力ＲＦの周波数は、一定の周波数に設定され、周期ＣＹ（１）～ＣＹ（Ｍ）のうち他の周期における高周波電力ＲＦの周波数とは異なる周波数に設定される。そして、周期ＣＹ（１）～ＣＹ（Ｍ）それぞれの位相期間ＳＰ（１）～ＳＰ（Ｎ）の高周波電力ＲＦの反射波のパワーレベルＰｒが取得される

。そして、取得された反射波のパワーレベルＰｒから、位相期間ＳＰ（１）～ＳＰ（Ｎ）のそれぞれにおける反射波のパワーレベルＰｒを最小化する位相期間ＳＰ（１）～ＳＰ（Ｎ）それぞれのための高周波電力ＲＦの適正周波数が、選択される。位相期間ＳＰ（１）～ＳＰ（Ｎ）それぞれのための高周波電力ＲＦの適正周波数は、基本時系列$ＴＳ_{B}$を構成する。基準のプラズマ処理装置において準備された基本時系列$ＴＳ_{B}$は、プラズマ処理装置１の制御部３０ｃに事前に与えられる。

[0080] ［周波数$ｆ_{ＲＦ}$の決定の第２の実施形態］

[0081] 図１４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周波数設定期間に関連する一例のタイミングチャートである。図１４に示すように、第２の実施形態において、周波数設定期間$Ｐ_{ｆｓｅｔ}$は、複数の周期ＣＹ（Ｍ個の周期ＣＹ（１）～ＣＹ（Ｍ））を含む。

[0082] 制御部３０ｃは、周期ＣＹ（ｍ）内の位相期間ＳＰ（ｎ）、即ち位相期間ＳＰ（ｍ，ｎ）における高周波電力ＲＦの周波数を、高周波電力ＲＦの反射波のパワーレベルＰｒの変化に応じて、調整するように構成されている。反射波のパワーレベルＰｒの変化は、周期ＣＹ（ｍ）の前の二つ以上の周期ＣＹ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高周波電力ＲＦの周波数を用いることにより特定される。

[0083] 一実施形態において、周期ＣＹ（ｍ）の前の二つ以上の周期ＣＹは、第１の周期及び第２の周期を含む。図１４の例において、第１の周期は、周期ＣＹ（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ＣＹ（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。

[0084] 制御部３０ｃは、位相期間ＳＰ（ｍ－Ｑ（１），ｎ）における高周波電力ＲＦの周波数ｆ（ｍ－Ｑ（１），ｎ）に、位相期間ＳＰ（ｍ－Ｑ（２），ｎ）における高周波電力ＲＦ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）で用いられる高周波電力ＲＦの周波数を表す。ｆ（ｍ，ｎ）は、ｆ（ｍ，ｎ）＝ｆ（ｍ－Ｑ（１），ｎ

）＋Δ（ｍ，ｎ）で表される。Δ（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、Δ（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、Δ（ｍ，ｎ）は正の値を有する。

[0085] なお、図１４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、互いに異なっていてもよい。また、図１４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。

[0086] 一方の周波数シフトによりパワーレベルＰｒ（ｍ－Ｑ（１），ｎ）がパワーレベルＰｒ（ｍ－２Ｑ，ｎ）から減少した場合には、制御部３０ｃは、周波数ｆ（ｍ，ｎ）を、周波数ｆ（ｍ－Ｑ，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、Ｐｒ（ｍ，ｎ）は、位相期間ＳＰ（ｍ，ｎ）における高周波電力ＲＦの反射波のパワーレベルＰｒを表している。

[0087] 位相期間ＳＰ（ｍ，ｎ）における一方の周波数シフトの量Δ（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Δ（ｍ－Ｑ（１），ｎ）と同一であってもよい。即ち、周波数シフトの量Δ（ｍ，ｎ）の絶対値は、周波数シフトの量Δ（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Δ（ｍ，ｎ）の絶対値は、周波数シフトの量Δ（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Δ（ｍ，ｎ）の絶対値は、位相期間ＳＰ（ｍ－Ｑ（１），ｎ）における反射波のパワーレベルＰｒ（ｍ－Ｑ（１），ｎ）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Δ（ｍ，ｎ）の絶対値は、反射波のパワーレベルＰｒ（ｍ－Ｑ（１），ｎ）の関数により決定されてもよい。

[0088] 一方の周波数シフトにより反射波のパワーレベルＰｒ（ｍ－Ｑ（１），ｎ

）が反射波のパワーレベルＰｒ（ｍ－Ｑ（２），ｎ）から増加する場合が生じ得る。この場合には、制御部３０ｃ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）それぞれの反射波のパワーレベルＰｒ又はそれらの平均値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。

[0089] 一方の周波数シフトにより反射波のパワーレベルＰｒ（ｍ，ｎ）が反射波のパワーレベルＰｒ（ｍ－Ｑ（１），ｎ）から増加した場合には、制御部３０ｃは、周期ＣＹ（ｍ＋Ｑ（１））内の位相期間ＳＰ（ｎ）における高周波電力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。

[0090] 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パワーレベルＰｒ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３０ｃは、周期ＣＹ（ｍ＋Ｑ（２））内の位相期間ＳＰ（ｎ）における高周波電力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（２））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Δ（ｍ＋Ｑ（２），ｎ）の絶対値は、一方の周波

数シフトの量Δ（ｍ，ｎ）の絶対値よりも大きい。この場合には、反射波のパワーレベルＰｒ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、異なっていてもよい。

[0091] 第２の実施形態においては、周波数設定期間P_{fset}内の周期ＣＹ（Ｍ）の位相期間ＳＰ（１）～ＳＰ（Ｎ）それぞれのために設定された高周波電力ＲＦの周波数が、適正周波数として決定される。位相期間ＳＰ（１）～ＳＰ（Ｎ）それぞれのための高周波電力ＲＦの適正周波数は、基本時系列TS_Bを構成する。基準のプラズマ処理装置において準備された基本時系列TS_Bは、プラズマ処理装置１の制御部３０ｃに事前に与えられる。

[0092] 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。

[0093] 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、高周波電力ＲＦは、プラズマの生成のために用いられる。

[0094] ここで、本開示に含まれる種々の例示的実施形態を、以下の［Ｅ１］～［Ｅ１０］に記載する。

[0095] ［Ｅ１］

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エネルギーを供給するように構成されたバイアス電源であり、該電

気バイアスエネルギーはバイアス周波数の逆数の時間長を有する周期で繰り返す波形を有する、該バイアス電源と、

を備え、

前記高周波電源は、前記高周波電力が供給され且つ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期間において、

（ａ）前記周期内の前記高周波電力の周波数の時系列として予め定められた周波数の時系列である基本時系列を用いること、

（ｂ）次いで、前記周期において前記高周波電力の周波数の変更された時系列を用いること、及び、

（ｃ）前記高周波電源とその負荷との間のインピーダンスの整合状態を、該整合状態を反映する評価値に基づき改善するように、前記（ｂ）を繰り返すこと、

を行い、

前記高周波電源は、前記（ｂ）において用いる前記時系列として、

前記周期に対する位相シフト量を前記基本時系列に与えることにより得られる周波数の時系列（ＴＳ１）、

前記基本時系列を周波数方向に拡大若しくは縮小させた周波数の時系列（ＴＳ２）、又は、

前記基本時系列と同じ個数の周波数を含む周波数の時系列（ＴＳ３）であって、前記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拡大若しくは縮小することにより得られる該周波数の時系列（ＴＳ３）、

を用いる、

プラズマ処理装置。

[0096] ［Ｅ１］の実施形態においては、バイアス周期における高周波電力の周波数の時系列が、評価値に基づき整合状態を改善させるように、（ｂ）の繰り返しにおいて時系列（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、基本時系列から簡単に得られる。したがって、上記実施形態によれば、プラズマの生成のために用いられる高周波電

力の反射を簡単に抑制することが可能となる。

[0097] ［Ｅ２］

前記高周波電源は、前記（ｂ）の繰り返しにおいて前記位相シフト量を変更するように構成されている、［Ｅ１］に記載のプラズマ処理装置。

[0098] ［Ｅ３］

前記高周波電源は、前記（ｂ）の繰り返しにおいて、

前記基本時系列における最低周波数を維持しつつ前記基本時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、

前記基本時系列における最高周波数を維持しつつ前記基本時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、

前記基本時系列において指定周波数以下の周波数を維持しつつ前記基本時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、及び、

前記基本時系列において指定周波数以上の周波数を維持しつつ前記基本時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、

のうち少なくとも一つを用いて、前記拡大又は前記縮小の倍率を変更する、

［Ｅ１］に記載のプラズマ処理装置。

[0099] ［Ｅ４］

前記高周波電源は、

前記（ｂ）の繰り返しにおいて用いられた前記高周波電力の周波数の複数の時系列のうち前記評価値に基づく前記整合状態を最も改善する第１の時系列を選択し、

前記周期に対する位相シフト量を前記第１の時系列に与えることにより得られる周波数の第２の時系列を用いて、前記（ｂ）を更に繰り返し、

前記（ｂ）を更に繰り返すことにおいて、前記位相シフト量を変更する

、

ように構成されている、［Ｅ３］に記載のプラズマ処理装置。

[0100] ［Ｅ５］

前記高周波電源は、

前記（ｂ）の第１の繰り返しにおいて前記位相シフト量を変更し、該第１の繰り返しにおいて用いられた前記高周波電力の周波数の複数の時系列のうち前記評価値に基づく前記整合状態を最も改善する周波数の第１の時系列を選択し、

前記（ｂ）の第２の繰り返しにおいて、

前記第１の時系列における最低周波数を維持しつつ前記第１の時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、

前記第１の時系列における最高周波数を維持しつつ前記第１の時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、

前記第１の時系列において指定周波数以下の周波数を維持しつつ前記第１の時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、及び、

前記第１の時系列において指定周波数以上の周波数を維持しつつ前記第１の時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、

のうち少なくとも一つを用いて、前記拡大又は前記縮小の倍率を変更し、該第２の繰り返しにおいて用いられた前記高周波電力の周波数の複数の時系列のうち前記評価値に基づく前記整合状態を最も改善する周波数の第２の時系列を選択し、

前記（ｂ）の第３の繰り返しにおいて、前記第２の時系列と同じ個数の周波数を含む周波数の時系列であって、前記第２の時系列の複数の時間ゾー

ンの各々を時間方向に拡大又は縮小することにより得られる周波数の時系列を用いて、該時間方向の該拡大又は該縮小の倍率を変更し、該第３の繰り返しにおいて用いられた前記高周波電力の周波数の複数の時系列のうち前記評価値に基づく前記整合状態を最も改善する周波数の第３の時系列を選択する、

ように構成されている、［Ｅ１］に記載のプラズマ処理装置。

[0101] ［Ｅ６］

前記評価値は、前記周期の時間長以上の時間長を有する期間における単一の代表値である、［Ｅ１］～［Ｅ５］の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0102] ［Ｅ７］

前記評価値は、前記高周波電源の負荷から該高周波電源に戻される前記高周波電力の反射波のパワーレベル又は前記高周波電源の該高周波電力の出力パワーレベルに対する該反射波のパワーレベルの比の値を表す前記代表値である、［Ｅ６］に記載のプラズマ処理装置。

[0103] ［Ｅ８］

前記評価値は、前記高周波電源とその負荷との間で測定される前記高周波電力の電圧と電流との間の位相差、該電圧と該電流から求められるインピーダンス、又は該インピーダンスの抵抗成分を表す前記代表値である、［Ｅ６］に記載のプラズマ処理装置。

[0104] ［Ｅ９］

前記電気バイアスエネルギーは、高周波バイアス電力又は前記バイアス周波数の逆数である時間長を有する時間間隔で周期的に発生される電圧のパルスである、［Ｅ１］～［Ｅ８］の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0105] ［Ｅ１０］

プラズマ処理装置の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高周波電力を供給する工程であり、該プラズマ処理装置は、前記チャンバ内に設けられた基板支持部を含む、該工程と、

前記基板支持部上の基板に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エネルギーを供給する工程であり、該電気バイアスエネルギーはバイアス周波数の逆数の時間長を有する周期で繰り返す波形を有する、該工程と、

前記高周波電力が供給され且つ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期間において、前記周期内の前記高周波電力の周波数を調整する工程と、

を含み、

前記周波数を調整する工程は、

（ａ）前記周期内の前記高周波電力の周波数の時系列として、予め定められた周波数の時系列である基本時系列を用いる工程と、

（ｂ）次いで、前記周期において前記高周波電力の周波数の変更された時系列を用いる工程と、

（ｃ）前記高周波電源とその負荷との間のインピーダンスの整合状態を、該整合状態を反映する評価値に基づき改善するように、前記（ｂ）を繰り返す工程と、

を含み、

前記（ｂ）において用いられる前記時系列は、

前記周期に対する位相シフト量を前記基本時系列に与えることにより得られる周波数の時系列、

前記基本時系列を周波数方向に拡大若しくは縮小させた周波数の時系列、又は、

前記基本時系列と同じ個数の周波数を含む周波数の時系列であって、前記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拡大若しくは縮小することにより得られる該周波数の時系列、

である、

プラズマ処理方法。

[0106] 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

[0107] １…プラズマ処理装置、１０…チャンバ、１１…基板支持部、３１…高周波電源、３２…バイアス電源、３０ｃ…制御部。

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エネルギーを供給するように構成されたバイアス電源であり、該電気バイアスエネルギーはバイアス周波数の逆数の時間長を有する周期で繰り返す波形を有する、該バイアス電源と、

を備え、

前記高周波電源は、前記高周波電力が供給され且つ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期間において、

（ａ）前記周期内の前記高周波電力の周波数の時系列として予め定められた周波数の時系列である基本時系列を用いること、

（ｂ）次いで、前記周期において前記高周波電力の周波数の変更された時系列を用いること、及び、

（ｃ）前記高周波電源とその負荷との間のインピーダンスの整合状態を、該整合状態を反映する評価値に基づき改善するように、前記（ｂ）を繰り返すこと、

を行い、

前記高周波電源は、前記（ｂ）において用いる前記時系列として、

前記周期に対する位相シフト量を前記基本時系列に与えることにより得られる周波数の時系列、

前記基本時系列を周波数方向に拡大若しくは縮小させた周波数の時系列、又は、

前記基本時系列と同じ個数の周波数を含む周波数の時系列であって、前記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拡大若しくは縮小することにより得られる該周波数の時系列、

を用いる、

プラズマ処理装置。

[請求項2] 前記高周波電源は、前記（ｂ）の繰り返しにおいて前記位相シフト量を変更するように構成されている、請求項１に記載のプラズマ処理装置。

[請求項3] 前記高周波電源は、前記（ｂ）の繰り返しにおいて、

前記基本時系列における最低周波数を維持しつつ前記基本時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、

前記基本時系列における最高周波数を維持しつつ前記基本時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、

前記基本時系列において指定周波数以下の周波数を維持しつつ前記基本時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、及び、

前記基本時系列において指定周波数以上の周波数を維持しつつ前記基本時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、

のうち少なくとも一つを用いて、前記拡大又は前記縮小の倍率を変更する、

請求項１に記載のプラズマ処理装置。

[請求項4] 前記高周波電源は、

前記（ｂ）の繰り返しにおいて用いられた前記高周波電力の周波数の複数の時系列のうち前記評価値に基づく前記整合状態を最も改善する第１の時系列を選択し、

前記周期に対する位相シフト量を前記第１の時系列に与えることにより得られる周波数の第２の時系列を用いて、前記（ｂ）を更に繰り返し、

前記（ｂ）を更に繰り返すことにおいて、前記位相シフト量を変更する、

ように構成されている、請求項３に記載のプラズマ処理装置。

[請求項5] 前記高周波電源は、

前記（ｂ）の第１の繰り返しにおいて前記位相シフト量を変更し、該第１の繰り返しにおいて用いられた前記高周波電力の周波数の複数の時系列のうち前記評価値に基づく前記整合状態を最も改善する周波数の第１の時系列を選択し、

前記（ｂ）の第２の繰り返しにおいて、

前記第１の時系列における最低周波数を維持しつつ前記第１の時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、

前記第１の時系列における最高周波数を維持しつつ前記第１の時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、

前記第１の時系列において指定周波数以下の周波数を維持しつつ前記第１の時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、及び、

前記第１の時系列において指定周波数以上の周波数を維持しつつ前記第１の時系列を周波数方向に拡大又は縮小することにより得られる前記高周波電力の周波数の時系列、

のうち少なくとも一つを用いて、前記拡大又は前記縮小の倍率を変更し、該第２の繰り返しにおいて用いられた前記高周波電力の周波数の複数の時系列のうち前記評価値に基づく前記整合状態を最も改善する周波数の第２の時系列を選択し、

前記（ｂ）の第３の繰り返しにおいて、前記第２の時系列と同じ個数の周波数を含む周波数の時系列であって、前記第２の時系列の複数の時間ゾーンの各々を時間方向に拡大又は縮小することにより得ら

れる周波数の時系列を用いて、該時間方向の該拡大又は該縮小の倍率を変更し、該第３の繰り返しにおいて用いられた前記高周波電力の周波数の複数の時系列のうち前記評価値に基づく前記整合状態を最も改善する周波数の第３の時系列を選択する、

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6] 前記評価値は、前記周期の時間長以上の時間長を有する期間における単一の代表値である、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] 前記評価値は、前記高周波電源の負荷から該高周波電源に戻される前記高周波電力の反射波のパワーレベル又は前記高周波電源の該高周波電力の出力パワーレベルに対する該反射波のパワーレベルの比の値を表す前記代表値である、請求項６に記載のプラズマ処理装置。

[請求項8] 前記評価値は、前記高周波電源とその負荷との間で測定される前記高周波電力の電圧と電流との間の位相差、該電圧と該電流から求められるインピーダンス、又は該インピーダンスの抵抗成分を表す前記代表値である、請求項６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、高周波バイアス電力又は前記バイアス周波数の逆数である時間長を有する時間間隔で周期的に発生される電圧のパルスである、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10] プラズマ処理装置の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高周波電力を供給する工程であり、該プラズマ処理装置は、前記チャンバ内に設けられた基板支持部を含む、該工程と、

前記基板支持部上の基板に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エネルギーを供給する工程であり、該電気バイアスエネルギーはバイアス周波数の逆数の時間長を有する周期で繰り返す波形を有する、該工程と、

前記高周波電力が供給され且つ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期間において、前記周期内の前記高周波電力の周波数を調整する工程と、

を含み、

前記周波数を調整する工程は、

（ａ）前記周期内の前記高周波電力の周波数の時系列として、予め定められた周波数の時系列である基本時系列を用いる工程と、

（ｂ）次いで、前記周期において前記高周波電力の周波数の変更された時系列を用いる工程と、

（ｃ）前記高周波電源とその負荷との間のインピーダンスの整合状態を、該整合状態を反映する評価値に基づき改善するように、前記（ｂ）を繰り返す工程と、

を含み、

前記（ｂ）において用いられる前記時系列は、

前記周期に対する位相シフト量を前記基本時系列に与えることにより得られる周波数の時系列、

前記基本時系列を周波数方向に拡大若しくは縮小させた周波数の時系列、又は、

前記基本時系列と同じ個数の周波数を含む周波数の時系列であって、前記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拡大若しくは縮小することにより得られる該周波数の時系列、

である、

プラズマ処理方法。