明　細　書

発明の名称 ：

プラズマ処理装置、電源システム、制御方法、プログラム、及び記憶媒体

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、制御方法、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、ソース高周波電力の反射波のパワーレベルを低減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、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、基板支持部に電気的に結合されており、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。電気バイアスエネルギーは、バイアス周波数を有する。電気バイアスエネルギーの波形周期は、バイアス周波数の逆数の時間長を有

する。高周波電源は、高周波電極に電気的に接続されており、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ている。高周波電源は、指定されたプロセスに応じて得られる初期周波数セットを選択する。高周波電源は、第１の期間において、電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間それぞれのためのソース高周波電力の複数のソース周波数として、初期周波数セットに含まれる複数の周波数を用いる。高周波電源は、第１の期間の後の第２の期間において、ソース高周波電力の負荷からの反射波のパワーレベルを低減するように、電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間それぞれのためのソース高周波電力の複数のソース周波数を調整する。

発明の効果

[0006] 一つの例示的実施形態によれば、ソース高周波電力の反射波のパワーレベルを低減することが可能となる。

図面の簡単な説明

[0007] [図1]プラズマ処理システムの構成例を説明するための図である。

[図2]容量結合型のプラズマ処理装置の構成例を説明するための図である。

[図3]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4]電気バイアスエネルギーの波形の例示的なタイミングチャートである。

[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エネルギー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プラズマ処理装置における一例の電気バイアスエネルギーの波形を示す図である。

[図7]図７の（ａ）及び図７の（ｂ）は、一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理装置において用いられるデータベースを示す図である。

[図8]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一例の電気バイアスエネルギーの波形を示す図である。

[図9]図９の（ａ）は、一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理装置において用いられるデータベースを示す図であり、図９の（ｂ）は、変換行列を説明するための図である。

[図10]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11]第２の期間における各波形周期の複数の位相期間それぞれのための複数のソース周波数の調整方法の第１例を示す流れ図である。

[図12]第２の期間における各波形周期の複数の位相期間それぞれのための複数のソース周波数の調整方法の第１例を示す流れ図である。

[図13]遷移期間内の各波形周期内の複数の位相期間のためのソース周波数の調整方法の例を示す流れ図である。

[図14]遷移期間内の各波形周期内の複数の位相期間のためのソース周波数の調整方法の例を示す流れ図である。

発明を実施するための形態

[0008] 以下、種々の例示的実施形態について説明する。

[0009] 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、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、基板支持部に電気的に結合されており、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。電気バイアスエネルギーは、バイアス周波数を有する。電気バイアスエネルギーの波形周期は、バイアス周波数の逆数の時間長を有する。高周波電源は、高周波電極に電気的に接続されており、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ている。高周波電源は、指定されたプロセスに応じて得られる初期周波数セットを選択する。高周波電源は、第１の期間において、電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間それぞれのためのソース高周波電力の複数のソース周波数として、初期周波数セットに含まれる複数の周波数を用いる。高周波電源は、第１の期間の後の第２の期間において、ソース高周波電力の負荷からの反射波のパワーレベルを低減するように、電気バイアス

エネルギーの波形周期内の複数の位相期間それぞれのためのソース高周波電力の複数のソース周波数を調整する。

[0010] 上記実施形態によれば、第１の期間において、指定されたプロセスに応じた初期周波数セットに含まれる複数の周波数が、電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間のそれぞれのための周波数として用いられる。したがって、指定されたプロセスが行われているときに、ソース高周波電力の反射波のパワーレベルが早期に低減される。また、第１の期間の後の第２の期間において、電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間それぞれのためのソース高周波電力の複数のソース周波数が調整されて、ソース高周波電力の負荷からの反射波のパワーレベルが更に低減される。

[0011] 一つの例示的実施形態において、高周波電源は、複数のプロセスにそれぞれ対応する複数の周波数セットから初期周波数セットを選択するように構成されていてもよい。高周波電源は、複数の周波数セットの中に指定されたプロセスに対応する周波数セットが含まれる場合に、該指定されたプロセスに対応する該周波数セットを初期周波数セットとして選択してもよい。

[0012] 一つの例示的実施形態において、電気バイアスエネルギーの波形周期が第２の期間において繰り返されてもよい。高周波電源は、波形周期の繰り返しにより得られる複数の位相期間それぞれのためのソース高周波電力の複数のソース周波数を含む周波数セットで、指定されたプロセスに対応する周波数セットを更新するように構成されてもよい。

[0013] 一つの例示的実施形態において、複数のプロセスそれぞれの複数のプロセス条件データセットと複数の周波数セットとが、互いに関連付けられてデータベースに登録されていてもよい。

[0014] 一つの例示的実施形態において、データベースは、該プラズマ処理装置、又は、該プラズマ処理装置及び他のプラズマ処理装置の双方から通信によりアクセス可能なサーバに設けられていてもよい。

[0015] 一つの例示的実施形態において、複数のプロセス条件データセットの各々は、複数の条件項目を含んでいてもよい。

[0016] 一つの例示的実施形態において、変換行列が、データベースに登録されていてもよい。変換行列は、それと複数のプロセス条件データセットを複数の列として有する入力行列との積により得られる出力行列と複数の周波数セットを複数の列として有する行列との間の誤差を最小化する。

[0017] 一つの例示的実施形態において、変換行列は、指定されたプロセスに対応する周波数セットが更新されるときに、更新されてもよい。変換行列は、それと入力行列との積により得られる出力行列と更新された周波数セットを含む複数の周波数セットを複数の列として有する行列との間の誤差を最小化するように更新され得る。

[0018] 一つの例示的実施形態において、高周波電源は、複数の周波数セットの中に指定されたプロセスに対応する周波数セットが含まれない場合に、初期周波数セットを生成するように構成されていてもよい。高周波電源は、指定されたプロセスのプロセス条件データセットと変換行列との積により得られる周波数セットを、初期周波数セットとして選択してもよい。

[0019] 一つの例示的実施形態において、複数のプロセス条件データセットの各々は、複数の条件項目として、チャンバ内の圧力、ソース高周波電力のパワーレベル、電気バイアスエネルギーの少なくとも一つのパラメータ、及びチャンバ内に供給される一つ以上のガスの各々の流量を含んでいてもよい。

[0020] 一つの例示的実施形態において、電気バイアスエネルギーは、バイアス周波数を有するバイアス高周波電力又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で周期的に発生される電圧のパルスを含んでいてもよい。電気バイアスエネルギーの少なくとも一つのパラメータは、電気バイアスエネルギーがバイアス高周波電力であるか電圧のパルスであるかを表す種別情報、バイアス周波数、バイアス高周波電力のパワーレベル、電圧のパルスのデューティー比、及び電圧のパルスの電圧レベルを含んでいてもよい。

[0021] 一つの例示的実施形態において、プラズマ処理装置は、高周波電源と高周波電極との間に設けられた整合回路を含む整合器を更に備えていてもよい。複数のプロセス条件データセットの各々は、複数の条件項目として、整合回

路の少なくとも一つの可変コンデンサのキャパシタンスを更に含んでいてもよい。

[0022] 一つの例示的実施形態において、プラズマ処理装置は、容量結合型のプラズマ処理装置であってもよい。プラズマ処理装置は、基板支持部の上方に設けられた上部電極及び上部電極に接続された直流電源を更に含んでいてもよい。複数のプロセス条件データセットの各々は、複数の条件項目として、直流電源から上部電極に印加される直流電圧の電圧レベルを更に含んでいてもよい。

[0023] 一つの例示的実施形態において、高周波電源は、第２の期間における電気バイアスエネルギーのｍ番目の波形周期内のｎ番目の位相期間のためのソース周波数として、ｍ番目の波形周期の前の電気バイアスエネルギーの波形周期内のｎ番目の位相期間のためのソース高周波電力のソース周波数に、反射波のパワーレベルを抑制するように周波数シフトを与えることにより得られる周波数を用いてもよい。ここで、「ｎ」は、１～Ｎであり、「Ｎ」は、電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間の数である。

[0024] 一つの例示的実施形態において、高周波電源は、第２の期間における電気バイアスエネルギーの波形周期内のｎ番目の位相期間において、ソース高周波電力のソース周波数として、複数の候補周波数を順に用いてもよい。高周波電源は、ｎ番目の位相期間のためのソース高周波電力のソース周波数として、複数の候補周波数のうちソース高周波電力の負荷からの反射波のパワーレベルを最小化する周波数を選択してもよい。ここで、「ｎ」は、１～Ｎであり、「Ｎ」は、電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間の数である。

[0025] 別の例示的実施形態において、電源システムが提供される。電源システムは、バイアス電源及び高周波電源を含む。バイアス電源は、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発生するように構成されている。電気バイアスエネルギーは、バイアス周波数を有する。電気バイアスエネルギーの波形周期は、バイアス周波数の

逆数の時間長を有する。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極に供給され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、複数のプロセスにそれぞれ対応する複数の周波数セットから、指定されたプロセスに対応する初期周波数セットを選択する。高周波電源は、第１の期間において、電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間それぞれのためのソース高周波電力の複数のソース周波数として、初期周波数セットに含まれる複数の周波数を用いる。高周波電源は、第１の期間の後の第２の期間において、ソース高周波電力の負荷からの反射波のパワーレベルを低減するように、電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間それぞれのためのソース高周波電力の複数のソース周波数を調整する。

[0026] 更に別の例示的実施形態において、制御方法が提供される。制御方法は、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（ａ）を含む。電気バイアスエネルギーは、バイアス周波数を有する。電気バイアスエネルギーの波形周期は、バイアス周波数の逆数の時間長を有する。制御方法は、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源から高周波電極にソース高周波電力を供給する工程（ｂ）を更に含む。工程（ｂ）は、複数のプロセスにそれぞれ対応する複数の周波数セットから、指定されたプロセスに対応する初期周波数セットを選択する工程を含む。工程（ｂ）は、第１の期間において、電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間それぞれのためのソース高周波電力の複数のソース周波数として、初期周波数セットに含まれる複数の周波数を用いる工程を更に含む。工程（ｂ）は、第１の期間の後の第２の期間において、ソース高周波電力の負荷からの反射波のパワーレベルを低減するように、電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間それぞれのためのソース高周波電力の複数のソース周波数を調整する工程を更に含む。

[0027] 更に別の例示的実施形態においては、上記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が提供される。更に別の例示的実施形態においては、このプログラムを記憶した記憶媒体が提供される。

[0028] 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。

[0029] 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。

[0030] 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。

[0031] 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、後述する例示的実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。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。

[0032] 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。

[0033] 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。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。

[0034] 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。

[0035] 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。

[0036] 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。

[0037] 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。

[0038] 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。

[0039] 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。

[0040] 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。

[0041] 以下、図２と共に、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概略的に示す図である。図２及び図３に示すように、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。

[0042] 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３３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１１１０の導電性部材、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、又は上部電極であってもよい。ソース高周波電力ＲＦ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。

[0043] 整合器３３は、整合回路を有する。整合器３３の整合回路は、可変インピーダンスを有する。整合器３３の整合回路は、第１の可変コンデンサ３３１及び第２の可変コンデンサ３３２を含んでいてもよい。第１の可変コンデン

サ３３１は、ノード３３３とグランドとの間で接続されている。ノード３３３は、高周波電源３１と高周波電極との間で接続された給電路上に設けられている。ソース高周波電力ＲＦは、この給電路を経由して高周波電極に供給される。第２の可変コンデンサ３３２は、ノード３３３と高周波電極との間で接続されている。第１の可変コンデンサ３３１のキャパシタンスＣ１及び第２の可変コンデンサ３３２のキャパシタンスＣ２は、主制御部２によって制御される。整合器３３の可変インピーダンスは、一例では、ソース高周波電力ＲＦの負荷からの反射を低減するよう、設定される。

[0044] 一実施形態において、高周波電源３１は、信号発生器３１ｇ、Ｄ／Ａ変換器３１ｃ、及び増幅器３１ａを含んでいてもよい。信号発生器３１ｇは、高周波信号を発生するように構成されている。信号発生器３１ｇは、プロセッサを含んでいてもよい。Ｄ／Ａ変換器３１ｃは、信号発生器３１ｇから出力される高周波信号（デジタル信号）に対するＤ／Ａ変換を行うように構成されている。増幅器３１ａは、Ｄ／Ａ変換器３１ｃからの高周波信号（アナログ信号）を増幅して、ソース高周波電力ＲＦを発生するように構成されている。

[0045] バイアス電源３２は、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。バイアス電源３２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３２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、電気バイアスエネルギーＢＥ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。電気バイアスエネルギーＢＥ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。

[0046] 電気バイアスエネルギーＢＥ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、１００ｋＨｚ～６０ＭＨｚの範囲内の周波数であってもよく、例えば４００ｋＨｚであってもよい。電気バイアスエネルギーＢＥは、波形周期、即ち周期ＣＹ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は、周期ＣＹ（時間間隔）で周期的にバイアス電極に供給される。

[0047] 以下、図２及び図３と共に図４を参照する。図４は、電気バイアスエネルギーの波形の例示的なタイミングチャートである。電気バイアスエネルギーＢＥは、バイアス周波数を有するバイアス高周波電力ＬＦであってもよい。即ち、電気バイアスエネルギーＢＥは、その周波数がバイアス周波数である正弦波状の波形を有していてもよい。この場合には、バイアス電源３２は、整合器３４を介して、バイアス電極に電気的に接続される。整合器３４の整合回路の可変インピーダンスは、一例で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。

[0048] 或いは、電気バイアスエネルギーＢＥは、周期ＣＹの時間間隔で周期的に発生される電圧のパルスＰＶ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。

[0049] 図２に示すように、プラズマ処理装置１は、電源３８を更に備えていてもよい。電源３８は、上部電極に電気的に接続されている。電源３８は、負の直流電圧を印加するように構成されている。電源３８は、直流電源であり得る。

[0050] 図２及び図３に示すように、プラズマ処理装置１は、センサ３５及びセンサ３６を更に備えている。センサ３５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を測定するように構成されている。センサ３５は、例えば方向性結合器及びＡ／Ｄ変換器を含む。方向性結合器は、高周波電源３１と整合器３３との間に設けられていてもよい。Ａ／Ｄ変換器は、方

向性結合器によって測定されたパワーレベルＰｒのデジタル値を生成する。センサ３５によって測定された反射波のパワーレベルＰｒ（デジタル値）は、高周波電源３１に通知される。加えて、進行波のパワーレベルＰｆ（デジタル値）が、センサ３５から高周波電源３１に通知されてもよい。

[0051] センサ３６は、電圧センサ及び電流センサを含む。センサ３６は、高周波電源３１と高周波電極とを互いに接続する給電路における電圧V_{RF}及び電流I_{RF}を測定するように構成されている。ソース高周波電力ＲＦは、この給電路を経由して高周波電極に供給される。センサ３６は、高周波電源３１と整合器３３との間に設けられていてもよい。センサ３６は、Ａ／Ｄ変換器を更に含む。Ａ／Ｄ変換器は、電圧センサ及び電流センサによって測定された電圧V_{RF}及び電流I_{RF}それぞれのデジタル値を生成する。電圧V_{RF}（デジタル値）及び電流I_{RF}（デジタル値）は、高周波電源３１に通知される。

[0052] 以下、図２及び図３と共に、図５の（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エネルギー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ＲＦの「ＯＮ」は、ソース高周波電力ＲＦが供給されていることを示しており、ソース高周波電力ＲＦの「ＯＦＦ」は、ソース高周波電力ＲＦの供給が停止されていることを示している。また、これらの図において、電気バイアスエネルギーＢＥの「ＯＮ」は、電気バイアスエネルギーＢＥが供給さ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の供給が停止されていることを示している。

[0053] 高周波電源３１は、バイアス電源３２からの電気バイアスエネルギーＢＥの周期的な供給と並行して、ソース高周波電力ＲＦを供給するように構成されている。即ち、図５の（ａ）に示すように、電気バイアスエネルギーＢＥ及びソース高周波電力ＲＦ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。以下、電気バイアスエネルギーＢＥ及びソース高周波電力ＲＦが同時且つ連続的に供給されるプロセスの開始から終了まで

の期間を連続供給期間P_Cという。

[0054] 或いは、図５の（ｂ）に示すように、電気バイアスエネルギーＢＥのパルス及びソース高周波電力ＲＦ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、電気バイアスエネルギーＢＥ及びソース高周波電力ＲＦ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、電気バイアスエネルギーＢＥが周期的に供給される。

[0055] 高周波電源３１は、各周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰの各々のためのソース高周波電力ＲＦのソース周波数f_{RF}を調整するように構成されている。高周波電源３１におけるソース周波数f_{RF}の調整は、信号発生器３１ｇによる高周波信号の周波数の調整により、行われてもよい。複数の位相期間ＳＰは、周期ＣＹを分割する複数の期間である。図４に示すように、各周期ＣＹは、複数の位相期間ＳＰとして、位相期間SP_1～SP_Nに分割される。「Ｎ」は、各周期ＣＹにおける位相期間の個数である。

[0056] 高周波電源３１は、複数の位相期間ＳＰの各々のためのソース周波数f_{RF}の設定のために、同期信号を用いて、バイアス電源３２と同期する。同期信号は、高周波電源３１（又は信号発生器３１ｇ）からバイアス電源３２に与えられてもよく、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、他のデバイスから高周波電源３１及びバイアス電源３２に与えられてもよい。

[0057] 図６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一例の電気バイアスエネルギーの波形を示す図である。連続供給期間P_Cは、図６に示すように、第１の期間P_1及び第２の期間P_2を含む。第１の期間P_1は、少なくとも一つの周期ＣＹを含む。図示された例では、第１の期間P_1は、一つの周期CY_1を含んでいる。第２の期間P_2は、第１の期間P_1の後の期間であり、複数の周期ＣＹを含む。図示された例では、第２の期間P_2は、周期CY_2～CY_Mを含んでいる。連続供給期間P_Cは、着火期間P_{IG}を更に含んでいて

もよい。着火期間P_{IG}は、第１の期間P_1の前の期間であり、少なくとも一つの周期ＣＹを含んでいる。

[0058] 高周波電源３１は、着火期間P_{IG}においては、各周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰそれぞれのための複数のソース周波数f_{RF}として、予め準備された着火期間P_{IG}用の周波数セットに含まれる複数の周波数を用いる。着火期間P_{IG}用の周波数セットは、後述するデータベース５０に登録されていてもよく、主制御部２の記憶部２ａ２に記憶されていてもよく、或いは、高周波電源３１内の記憶部に記憶されていてもよい。

[0059] 高周波電源３１は、第１の期間P_1においては、各周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰそれぞれのための複数のソース周波数f_{RF}として、初期周波数セットに含まれる複数の周波数を用いる。高周波電源３１は、データベース５０に登録されている複数の周波数セットの中に、主制御部２によって指定されたプロセスに対応する周波数セットがある場合には、当該指定されたプロセスに対応する周波数セットを、初期周波数セットとして選択する。データベース５０は、記憶部２ａ２に設けられていてもよく、或いは、高周波電源３１内の記憶部に設けられていてもよい。或いは、データベース５０は、プラズマ処理装置１、又は、プラズマ処理装置１及び他のプラズマ処理装置の双方から通信によりアクセス可能なサーバ１００に設けられていてもよい。

[0060] 図７の（ａ）及び図７の（ｂ）は、一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理装置において用いられるデータベースを示す図である。図７の（ａ）及び図７の（ｂ）に示すように、データベース５０は、複数のプロセスそれぞれの複数のプロセス条件データセットと複数の周波数セットとを互いに関連付けている。図示された例では、複数のプロセスをそれぞれ特定する複数のプロセスＩＤに、複数のプロセスそれぞれの複数のプロセス条件データセットが関連付けられている。また、複数のプロセスをそれぞれ特定する複数のプロセスＩＤに、複数のプロセスそれぞれのための複数の周波数セットが関連付けられている。

[0061] 図７の（ａ）に示す例では、データベース５０には、Ｘ個のプロセス条件

データセットが登録されている。各プロセス条件データセットは、Ｙ個の条件項目を含んでいる。例えば、プロセスＩＤが「１」であるプロセスのためのプロセス条件データセットは、条件項目b_{11}～b_{Y1}を含んでいる。また、プロセスＩＤが「Ｘ」であるプロセスのためのプロセス条件データセットは、条件項目b_{1X}～b_{YX}を含んでいる。各プロセス条件データセットの複数の条件項目は、チャンバ１０内の圧力、ソース高周波電力ＲＦのパワーレベル、電気バイアスエネルギーＢＥの少なくとも一つのパラメータ、及びチャンバ１０内に供給される一つ以上のガスの各々の流量を含んでいてもよい。電気バイアスエネルギーＢＥの少なくとも一つのパラメータは、電気バイアスエネルギーＢＥがバイアス高周波電力ＬＦであるか電圧のパルスＰＶであるかを表す種別情報、バイアス周波数、バイアス高周波電力ＬＦのパワーレベル、電圧のパルスＰＶのデューティー比、及び電圧のパルスＰＶの電圧レベルを含んでいてもよい。識別情報は、電気バイアスエネルギーＢＥの種別（バイアス高周波電力ＬＦ又は電圧のパルスＰＶ）を特定する数値である。また、各プロセス条件データセットの複数の条件項目は、キャパシタンスＣ１及び／又はキャパシタンスＣ２を更に含んでいてもよい。また、各プロセス条件データセットの複数の条件項目は、電源３８から上部電極に印加される直流電圧の電圧レベルを更に含んでいてもよい。

[0062] 図７の（ｂ）に示す例では、データベース５０には、Ｘ個の周波数セットが登録されている。各周波数セットは、Ｎ個の周波数を含んでいる。例えば、プロセスＩＤが「１」であるプロセスのための周波数セットは、周波数f_{11}～f_{N1}を含んでいる。また、プロセスＩＤが「Ｘ」であるプロセスのための周波数セットは、周波数f_{1X}～f_{NX}を含んでいる。各周波数セットは、対応のプロセスにおいて周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰそれぞれのための複数のソース周波数f_{RF}として用いられる場合にソース高周波電力ＲＦの負荷からの反射波のパワーレベルを低減するよう、予め準備されている。

[0063] 高周波電源３１は、主制御部２によって指定されたプロセス（プロセスＩＤ）に対応する周波数セットがデータベース５０に登録されていない場合に

は、他の周波数セットを初期周波数セットとして選択してもよい。例えば、高周波電源３１は、データベース５０内の複数の周波数セットのうち、指定されたプロセスのプロセス条件データセットに最も近いプロセス条件データセットを有するプロセスに対応する周波数セットを、初期周波数セットとして選択してもよい。或いは、高周波電源３１は、指定されたプロセスのプロセス条件データセットと後述する変換行列との積により得られる周波数セットを、初期周波数セットとして選択してもよい。

[0064] 高周波電源３１は、第２の期間P_2においては、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を低減するように、各周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰそれぞれのための複数のソース周波数f_{RF}を調整する。

[0065] 第１例において、高周波電源３１は、第２の期間P_2におけるｍ番目の周期CY_m内のｎ番目の位相期間SP_nのためのソース周波数f_{RF}として、周期CY_mの前の周期ＣＹ内の位相期間SP_nのためのソース周波数f_{RF}に、反射波のパワーレベルを抑制するように周波数シフトを与えることにより得られる周波数を用いる。なお、周期CY_mの前の周期ＣＹは、一例では、周期CY_{m-1}である。第１例のソース周波数f_{RF}の調整の詳細については後述する。

[0066] 第２例において、高周波電源３１は、第２の期間P_2における少なくとも一つの周期ＣＹの中のｎ番目の位相期間SP_nにおいて、ソース周波数f_{RF}として、複数の候補周波数を順に用いる。高周波電源３１は、位相期間SP_nのためのソース周波数f_{RF}として、複数の候補周波数のうちソース高周波電力ＲＦの負荷からの反射波のパワーレベルを最小化する周波数を選択する。高周波電源３１は、位相期間SP_nのためのソース周波数f_{RF}として選択された周波数を、第２の期間P_2における他の周期ＣＹの各々の中の位相期間SP_nのためのソース周波数f_{RF}として用いる。

[0067] 電気バイアスエネルギーＢＥのパルス及びソース高周波電力ＲＦのパルスが、互いに同期して供給される場合には、パルス期間PP_1～パルス期間PP_Jの各々は、連続供給期間P_Cと同様に、着火期間P_{IG}、第１の期間P_1、及び第２の期間P_2を含む。高周波電源３１は、パルス期間PP_1～パルス期間Ｐ

P_Jの各々においては、連続供給期間P_Cと同様に、各周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰのそれぞれのためのソース周波数f_{RF}を設定する。但し、高周波電源３１は、パルス期間PP_2～のパルス期間PP_Jの第１の期間P_1においては、パルス期間PP_1の最終の周期ＣＹにおいて得られた複数の位相期間ＳＰそれぞれのための複数のソース周波数f_{RF}を、初期周波数セットとして用いてもよい。なお、パルス期間PP_Jは、パルス期間PP_2であってもよく、パルス期間PP_2より後のパルス期間であってもよい。

[0068] 図８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一例の電気バイアスエネルギーの波形を示す図である。パルス期間PP_{J+1}～PP_Kの各々は、図８に示すように、連続供給期間P_Cと同様に、着火期間P_{IG}、第１の期間P_1、及び第２の期間P_2を含む。パルス期間PP_{J+1}～PP_Kの各々は、着火期間P_{IG}と第１の期間P_1との間に、遷移期間P_Tを更に含む。なお、パルス期間PP_{J+1}は、パルス期間PP_3であってもよく、パルス期間PP_3より後のパルス期間であってもよい。

[0069] 高周波電源３１は、パルス期間PP_{J+1}～PP_Kの各々の着火期間P_{IG}においては、パルス期間PP_1～パルス期間PP_Jの各々と同様に、各周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰのそれぞれのためのソース周波数f_{RF}を設定する。

[0070] 高周波電源３１は、パルス期間PP_{J+1}～PP_Kの各々（パルス期間PP_k）においては、遷移期間P_T内の各周期ＣＹ内の各位相期間ＳＰのためのソース周波数f_{RF}を、パルス期間PP_kの前のパルス期間における同一の周期ＣＹ内の同一の位相期間ＳＰにおけるソース高周波電力ＲＦの反射の度合いに応じて、調整する。パルス期間PP_kの前のパルス期間は、例えば、直前のパルス期間、即ちパルス期間PP_{k-1}である。遷移期間P_T内の各周期ＣＹ内の各位相期間ＳＰのためのソース周波数f_{RF}の調整に関する詳細については後述する。

[0071] 高周波電源３１は、パルス期間PP_{J+1}～PP_Kの各々（パルス期間PP_k）の第１の期間P_1及び第２の期間P_2においては、パルス期間PP_Jの第１の期間P_1及び第２の期間P_2と同様に、各周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰのそ

れぞれのためのソース周波数f_{RF}を設定する。なお、高周波電源３１は、パルス期間PP_kの第１の期間P_1においては、パルス期間PP_{k-1}の最終の周期ＣＹにおいて得られた複数の位相期間ＳＰそれぞれのための複数のソース周波数f_{RF}を、初期周波数セットとして用いてもよい。

[0072] プラズマ処理装置１によれば、第１の期間P_1において、指定されたプロセスに応じた初期周波数セット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のそれぞれのための周波数として用いられる。したがって、指定されたプロセスが行われているときに、ソース高周波電力ＲＦの反射波のパワーレベルが早期に低減される。また、第１の期間P_1の後の第２の期間P_2において、ＣＹ周期内の複数の位相期間ＳＰそれぞれのための複数のソース周波数f_{RF}が調整されて、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が更に低減される。

[0073] 一つの例示的実施形態において、高周波電源３１（又は信号発生器３１ｇ）は、指定されたプロセスに対応するデータベース５０内の周波数セットを更新してもよい。指定されたプロセスに対応するデータベース５０内の周波数セットは、周期ＣＹの繰り返しにより最終的に得られる複数の位相期間ＳＰそれぞれのための複数のソース周波数f_{RF}を含む周波数セットで、更新される。

[0074] 以下、図９の（ａ）及び図９の（ｂ）を参照する。図９の（ａ）は、一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理装置において用いられるデータベースを示す図であり、図９の（ｂ）は、変換行列を説明するための図である。一実施形態において、図９の（ａ）に示す変換行列Ａが、データベース５０に更に登録されていてもよい。変換行列Ａは、Ｎ行×Ｙ列の要素を含んでいる。変換行列Ａは、図９の（ｂ）に示すように、変換行列Ａと入力行列Ｂとの積により得られる出力行列Ｏと行列Ｆとの間の誤差を最小化するように、設定される。入力行列Ｂは、データベース５０に登録されている複数のプロセス条件データセットを複数の列として有する。行列Ｆは、データベース５０に登録されている複数の周波数セットを複数の列として有する。変換行列Ａ

は、例えば最小二乗法により求められる。変換行列Ａは、高周波電源３１若しくは信号発生器３１ｇ、主制御部２、又はサーバ１００において求められて、データベース５０に登録されてもよい。

[0075] 一実施形態において、変換行列Ａは、指定されたプロセスに対応する周波数セットが更新されるときに、更新されてもよい。変換行列Ａは、変換行列Ａと入力行列Ｂとの積により得られる出力行列Ｏと、更新された周波数セットを含む複数の周波数セットを複数の列として有する行列Ｆとの間の誤差を最小化するように更新される。変換行列Ａは、例えば最小二乗法により求められる。変換行列Ａは、高周波電源３１若しくは信号発生器３１ｇ、主制御部２、又はサーバ１００において求められて、データベース５０に登録されてもよい。

[0076] プラズマ処理装置１によれば、新たなプロセスにおける各周期ＣＹの複数の位相期間ＳＰのぞれぞれのための複数のソース周波数f_{RF}を含む周波数セットを、容易に求めることが可能となる。具体的には、新たなプロセスにおける各周期ＣＹの複数の位相期間ＳＰのぞれぞれのための複数のソース周波数f_{RF}を含む周波数セットは、変換行列Ａと新たなプロセスのプロセス条件データセットを含む入力行列との積により求められる。

[0077] 以下、図１０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１０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１０に示す制御方法（以下、「方法ＭＴ」という）では、プラズマ処理装置１の各部は、主制御部２によって指定されたプロセスを当該プロセスのプロセス条件の下で行うように、主制御部２によって制御される。

[0078] 方法ＭＴは、工程ＳＴａ及び工程ＳＴｂを含む。工程ＳＴａでは、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。電気バイアスエネルギーＢＥは、周期ＣＹで周期的に供給される。工程ＳＴｂ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から高周波電極にソース高周波電力が供給される。

[0079] 工程ＳＴｂは、工程ＳＴｂ１、工程ＳＴｂ２、及び工程ＳＴｂ３を含む。

工程ＳＴｂ１は、複数のプロセスにそれぞれ対応する複数の周波数セットから、指定されたプロセスに対応する初期周波数セットが選択される。なお、上述したように、複数の周波数セットは、データベース５０に登録されている。工程ＳＴｂ２は、第１の期間$Ｐ_1$において行われる。工程ＳＴｂ２では、各周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰそれぞれのための複数のソース周波数$ｆ_{RF}$として、初期周波数セットに含まれる複数の周波数が用いられる。

[0080] 工程ＳＴｂ３は、第２の期間$Ｐ_2$において行われる。工程ＳＴｂ３では、各周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰそれぞれのための複数のソース周波数$ｆ_{RF}$が、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を低減するように、調整される。第２の期間$Ｐ_2$における各周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰそれぞれのための複数のソース周波数$ｆ_{RF}$の調整は、上述した第１例又は第２例により行われる。

[0081] 以下、図１１及び図１２を参照して、第２の期間$Ｐ_2$における各周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰそれぞれのための複数のソース周波数$ｆ_{RF}$の調整方法の第１例について、詳細に説明する。図１１及び図１２の各々は、第２の期間における各波形周期の複数の位相期間それぞれのための複数のソース周波数の調整の第１例を示す流れ図である。

[0082] 図１１及び図１２の各々に示す調整方法（以下、「方法ＭＴＡ」という）の工程ＳＴ１は、第１の期間$Ｐ_1$において行われる。工程ＳＴ１では、ソース高周波電力ＲＦが供給される。第１の期間$Ｐ_1$においては、上述したように、各周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰそれぞれのための複数のソース周波数$ｆ_{RF}$として、初期周波数セットに含まれる複数の周波数が用いられる。

[0083] 続く工程ＳＴ２では、ｍが１に設定される。次いで、工程ＳＴ３～工程ＳＴ５が行われる。工程ＳＴ３～工程ＳＴ５は、ｎが１～Ｎのそれぞれに順に設定されつつ、行われる。

[0084] 工程ＳＴ３では、Ｐｒ［ｍ，ｎ］が、Ｐｔｈ［ｎ］よりも大きいか否かが判定される。Ｐｒ［ｍ，ｎ］は、ｍ番目の周期$ＣＹ_m$内のｎ番目の位相期間$ＳＰ_n$におけるソース高周波電力ＲＦの反射波のパワーレベルの代表値である。

代表値は、平均値又は最大値であり得る。Ｐｔｈ［ｎ］は、位相期間$ＳＰ_n$のための閾値であり、予め定められている。Ｐｒ［ｍ，ｎ］が、Ｐｔｈ［ｎ］よりも大きい場合、即ち、周期$ＣＹ_m$内の位相期間$ＳＰ_n$における反射波のパワーレベルが大きい場合には、工程ＳＴ４が行われる。一方、Ｐｒ［ｍ，ｎ］が、Ｐｔｈ［ｎ］以下である場合、即ち、周期$ＣＹ_m$内の位相期間$ＳＰ_n$における反射波のパワーレベルが小さい場合には、工程ＳＴ５が行われる。

[0085] 図１１に示すように、工程ＳＴ４では、$ｆ_{RF}$［ｍ＋１，ｎ］が、$ｆ_{RF}$［ｍ，ｎ］とΔｆ［ｍ＋１，ｎ］の和に設定される。$ｆ_{RF}$［ｍ，ｎ］は、周期$ＣＹ_m$内の位相期間$ＳＰ_n$のためのソース周波数$ｆ_{RF}$である。Δｆ［ｍ，ｎ］は、ソース周波数$ｆ_{RF}$［ｍ，ｎ］の決定のために、$ｆ_{RF}$［ｍ－１，ｎ］に加算される周波数シフトであり、その初期値（即ち、Δｆ［２，ｎ］）は予め定められている。

[0086] 或いは、工程ＳＴ４では、図１２に示すように、Δｆ［ｍ＋１，ｎ］が、α［ｍ＋１，ｎ］＊（Ｐｒ［ｍ，ｎ］－Ｐｔｈ［ｎ］）に設定される。α［ｍ＋１，ｎ］は、周期$ＣＹ_{m+1}$内のｎ番目の位相期間$ＳＰ_n$のための係数であり、その初期値（即ち、α［２，ｎ］）は予め定められている。図１２に示す工程ＳＴ４では、Δｆ［ｍ＋１，ｎ］が、反射波のパワーレベルと閾値との間の差に応じた値に設定される。そして、図１２に示す工程ＳＴ４では、$ｆ_{RF}$［ｍ＋１，ｎ］が、$ｆ_{RF}$［ｍ，ｎ］とΔｆ［ｍ＋１，ｎ］の和に設定される。

[0087] 図１１及び図１２に示すように、工程ＳＴ５では、$ｆ_{RF}$［ｍ＋１，ｎ］は、$ｆ_{RF}$［ｍ，ｎ］と同じ値に設定される。

[0088] 続く工程ＳＴ６においては、ｍが１だけ増分されて、第２の期間$Ｐ_2$が開始する。そして、工程ＳＴ７～工程ＳＴ１３が、行われる。工程ＳＴ７～工程ＳＴ１３は、ｎが１～Ｎのそれぞれに順に設定されつつ、行われる。工程ＳＴ７では、ソース高周波電力ＲＦが周期$ＣＹ_m$において供給される。周期$ＣＹ_m$内の位相期間$ＳＰ_n$においては、ソース周波数$ｆ_{RF}$は、$ｆ_{RF}$［ｍ，ｎ］に設定される。

[0089] 続く工程ＳＴ８では、周期ＣＹ$_m$内の位相期間ＳＰ$_n$における反射波のパワーレベルが、その前の周期ＣＹ（例えば、周期ＣＹ$_{m-1}$）内の同一の位相期間ＳＰ$_n$における反射波のパワーレベルから許容できない程度に増加したか否かが判定される。一例として、工程ＳＴ８では、Ｐｒ［ｍ，ｎ］とＰｒ［ｍ－１，ｎ］との間の差が、ΔｄＰｔｈ［ｎ］よりも大きいか否かが判定される。ΔｄＰｔｈ［ｎ］は、ｎ番目の位相期間ＳＰ$_n$のための閾値であり、予め定められている。ΔｄＰｔｈ［ｎ］は、ゼロであってもよい。

[0090] 工程ＳＴ８の判定結果が「ＹＥＳ」の場合、即ち、周期ＣＹ$_m$内の位相期間ＳＰ$_n$における反射波のパワーレベルが許容できない程度に増加している場合には、工程ＳＴ９が行われる。図１１に示すように、工程ＳＴ９においては、Δｆ［ｍ＋１，ｎ］が、－Δｆ［ｍ，ｎ］に設定される。即ち、工程ＳＴ９においては、周波数シフトの方向が、反対方向に設定される。換言すると、工程ＳＴ９では、周波数シフトが、正の周波数シフト及び負の周波数シフトうち一方の周波数シフトから、他方の周波数シフトに変更される。或いは、図１２に示すように、工程ＳＴ９においては、α［ｍ＋１，ｎ］が－α［ｍ，ｎ］に設定される。

[0091] 一方、工程ＳＴ８の判定結果が「ＮＯ」の場合、即ち、周期ＣＹ$_m$内の位相期間ＳＰ$_n$における反射波のパワーレベルが許容できる程度である場合には、工程ＳＴ１０が行われる。工程ＳＴ１０においては、図１１に示すように、Δｆ［ｍ＋１，ｎ］は、Δｆ［ｍ，ｎ］と同一の値に設定される。或いは、図１２に示すように、工程ＳＴ１０においては、α［ｍ＋１，ｎ］がα［ｍ，ｎ］と同一の値に設定される。

[0092] 続く工程ＳＴ１１では、Ｐｒ［ｍ，ｎ］が、Ｐｔｈ［ｎ］よりも大きいか否かが判定される。Ｐｒ［ｍ，ｎ］が、Ｐｔｈ［ｎ］よりも大きい場合、即ち、周期ＣＹ$_m$内の位相期間ＳＰ$_n$における反射波のパワーレベルが大きい場合には、工程ＳＴ１２が行われる。一方、Ｐｒ［ｍ，ｎ］が、Ｐｔｈ［ｎ］以下である場合、即ち、周期ＣＹ$_m$内の位相期間ＳＰ$_n$における反射波のパワーレベルが小さい場合には、工程ＳＴ１３が行われる。

[0093] 図１１に示すように、工程ＳＴ１２では、f_{RF}［ｍ＋１，ｎ］が、f_{RF}［ｍ，ｎ］とΔｆ［ｍ＋１，ｎ］の和に設定される。或いは、工程ＳＴ１２では、図１２に示すように、Δｆ［ｍ＋１，ｎ］が、α［ｍ＋１，ｎ］＊（Ｐｒ［ｍ，ｎ］－Ｐｔｈ［ｎ］）に設定される。即ち、図１２に示す工程ＳＴ１２では、Δｆ［ｍ＋１，ｎ］が、反射波のパワーレベルと閾値との間の差に応じた値に設定される。そして、図１２に示す工程ＳＴ１２では、f_{RF}［ｍ＋１，ｎ］が、f_{RF}［ｍ，ｎ］とΔｆ［ｍ＋１，ｎ］の和に設定される。

[0094] 図１１及び図１２に示すように、工程ＳＴ１３では、f_{RF}［ｍ＋１，ｎ］は、f_{RF}［ｍ，ｎ］と同じ値に設定される。

[0095] 続く工程ＳＴ１４では、ｍがＭであるか否かが判定される。即ち、第２の期間$Ｐ_2$における最終の周期ＣＹに関する処理が終了しているか否かが判定される。最終の周期ＣＹに関する処理が終了していない場合には、工程ＳＴ６からの処理が繰り返される。一方、最終の周期ＣＹに関する処理が終了している場合には、方法ＭＴＡは終了する。

[0096] 以上説明したように、方法ＭＴＡでは、ｍ番目の周期$ＣＹ_m$内の位相期間$ＳＰ_n$のための周波数シフトが、周期$ＣＹ_m$の前の二つの周期ＣＹそれぞれの同一の位相期間$ＳＰ_n$におけるソース高周波電力ＲＦの反射波のパワーレベルの変化に応じて、調整される。

[0097] なお、周波数シフトΔｆ［ｍ，ｎ］の方向が周波数シフトΔｆ［ｍ－１，ｎ］の方向と同一方向である場合が生じ得る。この場合において、周期$ＣＹ_m$内の位相期間$ＳＰ_n$のソース高周波電力ＲＦの反射波のパワーレベルの代表値が閾値よりも大きい場合には、f_{RF}［ｍ＋１，ｎ］は、f_{RF}［ｍ－１，ｎ］とf_{RF}［ｍ，ｎ］との間の中間の周波数（例えば平均値）に設定されてもよい。また、ソース周波数f_{RF}［ｍ＋１，ｎ］として当該中間の周波数を用いたときのソース高周波電力$_{RF}$の反射波のパワーレベルの代表値が閾値よりも大きい場合には、周波数シフトΔｆ［ｍ＋２，ｎ］の方向が、周波数シフトΔｆ［ｍ，ｎ］の方向と反対方向に設定され、周波数シフトΔｆ［ｍ＋２，ｎ］の絶対値が、周波数シフトΔｆ［ｍ，ｎ］の絶対値よりも大きい絶対値

に設定されてもよい。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。

[0098] 以下、図１３及び図１４を参照して、遷移期間P_T内の各周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰそれぞれのための複数のソース周波数f_{RF}の調整方法について、詳細に説明する。図１３及び図１４の各々は、遷移期間内の各波形周期内の複数の位相期間のためのソース周波数の調整方法の例を示す流れ図である。

[0099] 図１３及び図１４の各々に示す調整方法（以下、「方法ＭＴＢ」という）の工程ＳＴ３２では、ｋが２に設定される。次いで、工程ＳＴ３３～工程ＳＴ３５が行われる。工程ＳＴ３３～工程ＳＴ３５は、ｍが１～M_Tのそれぞれに順に変更され、且つ、ｎが１～Ｎのそれぞれに順に変更されつつ、行われる。M_Tは、遷移期間P_T内の周期ＣＹの数である。

[0100] 工程ＳＴ３３では、Ｐｒ［ｋ，ｍ，ｎ］が、Ｐｔｈ［ｎ］よりも大きいか否かが判定される。Ｐｒ［ｋ，ｍ，ｎ］は、ｋ番目のパルス期間PP_kにおけるｍ番目の周期CY_m内のｎ番目の位相期間SP_nにおけるソース高周波電力ＲＦの反射波のパワーレベルの代表値である。代表値は、平均値又は最大値であり得る。Ｐｔｈ［ｎ］は、ｎ番目の位相期間SP_nのための閾値であり、予め定められている。Ｐｒ［ｋ，ｍ，ｎ］が、Ｐｔｈ［ｎ］よりも大きい場合、即ち、パルス期間PP_kにおける周期CY_m内の位相期間SP_nにおける反射波のパワーレベルが大きい場合には、工程ＳＴ３４が行われる。一方、Ｐｒ［ｋ，ｍ，ｎ］が、Ｐｔｈ［ｎ］以下である場合、即ち、パルス期間PP_kにおける周期CY_m内の位相期間SP_nにおける反射波のパワーレベルが小さい場合には、工程ＳＴ３５が行われる。

[0101] 図１３に示すように、工程ＳＴ３４では、f_{RF}［ｋ＋１，ｍ，ｎ］が、f_{RF}［ｋ，ｍ，ｎ］とΔｆ［ｋ＋１，ｍ，ｎ］の和に設定される。f_{RF}［ｋ，ｍ，ｎ］は、パルス期間PP_kにおける周期CY_m内の位相期間SP_nのためのソース周波数f_{RF}である。Δｆ［ｋ，ｍ，ｎ］は、ソース周波数f_{RF}［ｋ，ｍ

，ｎ］の決定のために、ｆ$_{RF}$［ｋ－１，ｍ，ｎ］に加算される周波数シフトであり、その初期値（即ち、Δｆ［３，ｍ，ｎ］）は予め定められている。

[0102] 或いは、工程ＳＴ３４では、図１４に示すように、Δｆ［ｋ＋１，ｍ，ｎ］が、β［ｋ＋１，ｍ，ｎ］＊（Ｐｒ［ｋ，ｍ，ｎ］－Ｐｔｈ［ｎ］）に設定される。β［ｋ＋１，ｍ，ｎ］は、パルス期間ＰＰ$_{k}$における周期ＣＹ$_{m}$内の位相期間ＳＰ$_{n}$のための係数であり、その初期値（即ち、β［３，ｍ，ｎ］）は予め定められている。図１４に示す工程ＳＴ３４では、Δｆ［ｋ＋１，ｍ，ｎ］が、反射波のパワーレベルと閾値との間の差に応じた値に設定される。そして、図１４に示す工程ＳＴ３４では、ｆ$_{RF}$［ｋ＋１，ｍ，ｎ］が、ｆ$_{RF}$［ｋ，ｍ，ｎ］とΔｆ［ｋ＋１，ｍ，ｎ］の和に設定される。

[0103] 図１３及び図１４に示すように、工程ＳＴ３５では、ｆ$_{RF}$［ｋ＋１，ｍ，ｎ］は、ｆ$_{RF}$［ｋ，ｍ，ｎ］と同じ値に設定される。

[0104] 続く工程ＳＴ３６においては、ｋが１だけ増分される。そして、工程ＳＴ３７～工程ＳＴ４３が、行われる。工程ＳＴ３７～工程ＳＴ４３は、ｍが１～Ｍ$_{T}$のそれぞれに順に変更され、且つ、ｎが１～Ｎのそれぞれに順に変更されつつ、行われる。工程ＳＴ３７では、ソース高周波電力ＲＦがパルス期間ＰＰ$_{k}$において供給される。パルス期間ＰＰ$_{k}$における周期ＣＹ$_{m}$内の位相期間ＳＰ$_{n}$においては、ソース周波数ｆ$_{RF}$は、ｆ$_{RF}$［ｋ，ｍ，ｎ］に設定される。

[0105] 続く工程ＳＴ３８では、パルス期間ＰＰ$_{k}$における周期ＣＹ$_{m}$内の位相期間ＳＰ$_{n}$における反射波のパワーレベルが、その前のパルス期間ＰＰ$_{k}$（例えば、パルス期間ＰＰ$_{k-1}$）における同一の周期ＣＹ$_{m}$内の同一の位相期間ＳＰ$_{n}$における反射波のパワーレベルから許容できない程度に増加したか否かが判定される。一例として、工程ＳＴ３８では、Ｐｒ［ｋ，ｍ，ｎ］とＰｒ［ｋ－１，ｍ，ｎ］との間の差が、ΔｄＰｔｈ［ｎ］よりも大きいか否かが判定される。ΔｄＰｔｈ［ｎ］は、ｎ番目の位相期間ＳＰ$_{n}$のための閾値であり、予め定められている。ΔｄＰｔｈ［ｎ］は、ゼロであってもよい。

[0106] 工程ＳＴ３８の判定結果が「ＹＥＳ」の場合、即ち、パルス期間ＰＰ$_{k}$における周期ＣＹ$_{m}$内の位相期間ＳＰ$_{n}$における反射波のパワーレベルが許容でき

ない程度に増加している場合には、工程ＳＴ３９が行われる。図１３に示すように、工程ＳＴ３９においては、Δｆ［ｋ＋１，ｍ，ｎ］が、－Δｆ［ｋ，ｍ，ｎ］に設定される。即ち、工程ＳＴ３９においては、周波数シフトの方向が、反対方向に設定される。換言すると、工程ＳＴ３９では、周波数シフトが、正の周波数シフト及び負の周波数シフトうち一方の周波数シフトから、他方の周波数シフトに変更される。或いは、図１４に示すように、工程ＳＴ３９においては、β［ｋ＋１，ｍ，ｎ］が－β［ｋ，ｍ，ｎ］に設定される。

[0107] 一方、工程ＳＴ３８の判定結果が「ＮＯ」の場合、即ち、パルス期間PP_kにおける周期CY_m内の位相期間SP_nにおける反射波のパワーレベルが許容できる程度である場合には、工程ＳＴ４０が行われる。工程ＳＴ４０においては、図１３に示すように、Δｆ［ｋ＋１，ｍ，ｎ］は、Δｆ［ｋ，ｍ，ｎ］と同一の値に設定される。或いは、図１４に示すように、工程ＳＴ４０においては、β［ｋ＋１，ｍ，ｎ］がβ［ｋ，ｍ，ｎ］と同一の値に設定される。

[0108] 続く工程ＳＴ４１では、Ｐｒ［ｋ，ｍ，ｎ］が、Ｐｔｈ［ｎ］よりも大きいか否かが判定される。Ｐｒ［ｋ，ｍ，ｎ］が、Ｐｔｈ［ｎ］よりも大きい場合、即ち、周期CY_m内の位相期間SP_nにおける反射波のパワーレベルが大きい場合には、工程ＳＴ４２が行われる。一方、Ｐｒ［ｋ，ｍ，ｎ］が、Ｐｔｈ［ｎ］以下である場合、即ち、周期CY_m内の位相期間SP_nにおける反射波のパワーレベルが小さい場合には、工程ＳＴ４３が行われる。

[0109] 図１３に示すように、工程ＳＴ４２では、f_{RF}［ｋ＋１，ｍ，ｎ］が、f_{RF}［ｋ，ｍ，ｎ］とΔｆ［ｋ＋１，ｍ，ｎ］の和に設定される。或いは、工程ＳＴ４２では、図１４に示すように、Δｆ［ｋ＋１，ｍ，ｎ］が、β［ｋ＋１，ｍ，ｎ］＊（Ｐｒ［ｋ，ｍ，ｎ］－Ｐｔｈ［ｎ］）に設定される。即ち、図１４に示す工程ＳＴ４２では、Δｆ［ｋ＋１，ｍ，ｎ］が、反射波のパワーレベルと閾値との間の差に応じた値に設定される。そして、図１４に示す工程ＳＴ１４では、f_{RF}［ｋ＋１，ｍ，ｎ］が、f_{RF}［ｋ，ｍ，ｎ］とΔ

ｆ［ｋ＋１，ｍ，ｎ］の和に設定される。

[0110] 図１３及び図１４に示すように、工程ＳＴ４３では、f_{RF}［ｋ＋１，ｍ，ｎ］は、f_{RF}［ｋ，ｍ，ｎ］と同じ値に設定される。

[0111] 続く工程ＳＴ４４では、ｋがＫであるか否かが判定される。即ち、最終のパルス期間PP_Kに関する処理が終了しているか否かが判定される。最終のパルス期間PP_Kに関する処理が終了していない場合には、工程ＳＴ３６からの処理が繰り返される。一方、最終のパルス期間PP_Kに関する処理が終了している場合には、方法ＭＴＢは終了する。

[0112] 以上説明したように、方法ＭＴＢでは、パルス期間PP_kにおけるｍ番目の周期CY_m内の位相期間SP_nのための周波数シフトが、パルス期間PP_kの前の二つのパルス期間ＰＰそれぞれの同一の周期CY_m内の同一の位相期間SP_nにおけるソース高周波電力ＲＦの反射波のパワーレベルの変化に応じて、調整される。

[0113] なお、周波数シフトΔｆ［ｋ，ｍ，ｎ］の方向が周波数シフトΔｆ［ｋ－１，ｍ，ｎ］の方向と同一方向である場合が生じ得る。この場合において、パルス期間PP_kにおける周期CY_m内の位相期間SP_nのソース高周波電力ＲＦの反射波のパワーレベルの代表値が閾値よりも大きい場合には、f_{RF}［ｋ＋１，ｍ，ｎ］は、f_{RF}［ｋ－１，ｍ，ｎ］とf_{RF}［ｋ，ｍ，ｎ］との間の中間の周波数（例えば平均値）に設定されてもよい。また、ソース周波数f_{RF}［ｋ＋１，ｍ，ｎ］として当該中間の周波数を用いたときのソース高周波電力$_{RF}$の反射波のパワーレベルの代表値が閾値よりも大きい場合には、周波数シフトΔｆ［ｋ＋２，ｍ，ｎ］の方向が、周波数シフトΔｆ［ｋ，ｍ，ｎ］の方向と反対方向に設定され、周波数シフトΔｆ［ｋ＋２，ｍ，ｎ］の絶対値が、周波数シフトΔｆ［ｋ，ｍ，ｎ］の絶対値よりも大きい絶対値に設定されてもよい。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。

[0114] 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。

[0115] 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ＲＦは、プラズマの生成のために用いられる。

[0116] また、方法ＭＴＡ及び方法ＭＴＢにおいては、位相期間$ＳＰ_n$における代表値として、位相期間$ＳＰ_n$におけるソース高周波電力ＲＦの反射波のパワーレベルの代表値が用いられている。位相期間$ＳＰ_n$における代表値は、位相期間$ＳＰ_n$におけるソース高周波電力ＲＦの反射の度合いを表すことができれば、任意の値であってもよい。位相期間$ＳＰ_n$における他の代表値は、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の比の値の代表値（例えば、平均値又は最大値）であってもよい。或いは、位相期間$ＳＰ_n$における他の代表値は、センサ３６によって取得される電圧と電流の位相差の代表値（例えば、平均値又は最大値）であってもよい。

[0117] また、データベース５０には、連続供給期間$Ｐ_C$内の着火期間$Ｐ_{IG}$及び第１の期間$Ｐ_1$に含まれる全周期ＣＹのそれぞれのための複数の周波数セットがプロセス（プロセスＩＤ）に対応付けて格納されていてもよい。高周波電源３１は、指定されたプロセス（プロセスＩＤ）に対応する複数の周波数セットを、連続供給期間$Ｐ_C$内の着火期間$Ｐ_{IG}$及び第１の期間$Ｐ_1$に含まれる全周期ＣＹにおいて、それぞれ用いてもよい。この場合には、変換行列Ａは、（Ｌ×Ｎ）行×Ｙ行の要素を含む行列であってもよい。ここで、「Ｌ」は、複数の周波数セットの個数であり、連続供給期間$Ｐ_C$内の着火期間$Ｐ_{IG}$及び第１の期間$Ｐ_1$に含まれる全周期ＣＹの個数である。この場合において、出力行列Ｏと行列Ｆの各々は、（Ｌ×Ｎ）行×Ｘ行の要素を含む。

[0118] また、データベース５０には、複数のパルス期間$ＰＰ_1$～$ＰＰ_K$の全てにおいて共通に用いられる単一の周波数セット群が、プロセス（プロセスＩＤ）

に対応付けて格納されていてもよい。単一の周波数セット群は、複数の周波数セットを含む。高周波電源３１は、単一の周波数セット群に含まれる複数の周波数セットを、複数のパルス期間PP_1～PP_Kの各々における着火期間P_{IG}及び第１の期間P_1に含まれる全ての周期において、それぞれ用いてもよい。この場合にも、変換行列Ａは、（Ｌ×Ｎ）行×Ｙ行の要素を含む行列であってもよい。ここで、「Ｌ」は、単一の周波数セット群に含まれる複数の周波数セットの個数であり、複数のパルス期間PP_1～PP_Kの各々の着火期間P_{IG}及び第１の期間P_1に含まれる全周期ＣＹの個数である。この場合において、出力行列Ｏと行列Ｆの各々は、（Ｌ×Ｎ）行×Ｘ行の要素を含む。

[0119] また、データベース５０には、複数のパルス期間PP_1～PP_Kそれぞれのための複数の周波数セット群がプロセス（プロセスＩＤ）に対応付けて格納されていてもよい。複数の周波数セット群の各々は、複数の周波数セットを含む。高周波電源３１は、指定されたプロセス（プロセスＩＤ）に対応する複数の周波数セット群からそのパルス期間用の周波数セット群を選択してもよい。高周波電源３１は、選択した周波数セット群に含まれる複数の周波数セットを、そのパルス期間内の着火期間P_{IG}及び第１の期間P_1に含まれる全ての周期において、それぞれ用いてもよい。この場合には、複数のパルス期間PP_1～PP_Kのそれぞれのための複数の変換行列Ａが作成される。複数の変換行列Ａの各々は、（Ｌ×Ｎ）行×Ｙ行の要素を含む行列であってもよい。ここで、「Ｌ」は、そのパルス期間のための複数の周波数セットの個数であり、そのパルス期間内の着火期間P_{IG}及び第１の期間P_1に含まれる全周期ＣＹの個数である。この場合において、出力行列Ｏと行列Ｆの各々は、（Ｌ×Ｎ）行×Ｘ行の要素を含む。

[0120] 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］～［Ｅ１９］に記載する。

[0121] ［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、

前記基板支持部に電気的に結合されており、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であり、該電気バイアスエネルギーは、バイアス周波数を有し、該電気バイアスエネルギーの波形周期は、該バイアス周波数の逆数の時間長を有する、該バイアス電源と、

高周波電極に電気的に接続されており、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、

指定されたプロセスに応じて得られる初期周波数セットを選択し、

第１の期間において、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間それぞれのための前記ソース高周波電力の複数のソース周波数として、前記初期周波数セットに含まれる複数の周波数を用い、

前記第１の期間の後の第２の期間において、前記ソース高周波電力の負荷からの反射波のパワーレベルを低減するように、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の前記複数の位相期間それぞれのための前記ソース高周波電力の前記複数のソース周波数を調整する、

ように構成されている、

プラズマ処理装置。

[0122] ［Ｅ２］

前記高周波電源は、複数のプロセスにそれぞれ対応する複数の周波数セットの中に前記指定されたプロセスに対応する周波数セットが含まれる場合に、該指定されたプロセスに対応する該周波数セットを前記初期周波数セットとして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。

[0123] ［Ｅ３］

前記高周波電源は、前記第２の期間における前記電気バイアスエネルギーの波形周期の繰り返しにより得られる前記複数の位相期間それぞれのための前記ソース高周波電力の複数のソース周波数を含む周波数セットで、前記指

定されたプロセスに対応する前記周波数セットを更新するように構成されている、Ｅ２に記載のプラズマ処理装置。

[0124] ［Ｅ４］

前記複数のプロセスそれぞれの複数のプロセス条件データセットと前記複数の周波数セットとが、互いに関連付けられてデータベースに登録されている、Ｅ３に記載のプラズマ処理装置。

[0125] ［Ｅ５］

前記データベースは、該プラズマ処理装置、又は、該プラズマ処理装置及び他のプラズマ処理装置の双方から通信によりアクセス可能なサーバに設けられている、Ｅ４に記載のプラズマ処理装置。

[0126] ［Ｅ６］

前記複数のプロセス条件データセットの各々は、複数の条件項目を含む、Ｅ４又はＥ５に記載のプラズマ処理装置。

[0127] ［Ｅ７］

それと前記複数のプロセス条件データセットを複数の列として有する入力行列との積により得られる出力行列と前記複数の周波数セットを複数の列として有する行列との間の誤差を最小化する変換行列が、前記データベースに登録される、Ｅ６に記載のプラズマ処理装置。

[0128] ［Ｅ８］

前記指定されたプロセスに対応する前記周波数セットが更新されるときに、それと前記入力行列との積により得られる出力行列と更新された前記周波数セットを含む前記複数の周波数セットを複数の列として有する行列との間の誤差を最小化するように前記変換行列が更新される、Ｅ７に記載のプラズマ処理装置。

[0129] ［Ｅ９］

前記高周波電源は、前記複数のプロセスにそれぞれ対応する前記複数の周波数セットの中に前記指定されたプロセスに対応する周波数セットが含まれない場合に、該指定されたプロセスのプロセス条件データセットと前記変換

行列との積により得られる周波数セットを、前記初期周波数セットとして選択するように構成されている、Ｅ７又はＥ８に記載のプラズマ処理装置。

[0130] ［Ｅ１０］

前記複数のプロセス条件データセットの各々は、前記複数の条件項目として、前記チャンバ内の圧力、前記ソース高周波電力のパワーレベル、前記電気バイアスエネルギーの少なくとも一つのパラメータ、及び前記チャンバ内に供給される一つ以上のガスの各々の流量を含む、Ｅ６～Ｅ９の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0131] ［Ｅ１１］

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を含み、

前記電気バイアスエネルギーの少なくとも一つのパラメータは、前記電気バイアスエネルギーが前記バイアス高周波電力であるか前記電圧のパルスであるかを表す種別情報、前記バイアス周波数、前記バイアス高周波電力のパワーレベル、前記電圧のパルスのデューティー比、及び前記電圧のパルスの電圧レベルを含む、Ｅ１０に記載のプラズマ処理装置。

[0132] ［Ｅ１２］

前記高周波電源と前記高周波電極との間に設けられた整合回路を含む整合器を更に備え、

前記複数のプロセス条件データセットの各々は、前記複数の条件項目として、前記整合回路の少なくとも一つの可変コンデンサのキャパシタンスを更に含む、

Ｅ１１に記載のプラズマ処理装置。

[0133] ［Ｅ１３］

該プラズマ処理装置は、容量結合型のプラズマ処理装置であり、

前記基板支持部の上方に設けられた上部電極と、

前記上部電極に接続された直流電源と、

を更に備え、

前記複数のプロセス条件データセットの各々は、前記複数の条件項目として、前記直流電源から前記上部電極に印加される直流電圧の電圧レベルを更に含む、Ｅ１１又はＥ１２に記載のプラズマ処理装置。

[0134] ［Ｅ１４］

前記高周波電源は、前記第２の期間における前記電気バイアスエネルギーのｍ番目の波形周期内のｎ番目の位相期間のための前記ソース高周波電力の前記ソース周波数として、該ｍ番目の波形周期の前の前記電気バイアスエネルギーの波形周期内のｎ番目の位相期間のための前記ソース高周波電力の前記ソース周波数に、前記反射波のパワーレベルを抑制するように周波数シフトを与えることにより得られる周波数を用いるよう、構成されており、

前記ｎは、１～Ｎであり、該Ｎは、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の前記複数の位相期間の数である、

Ｅ１～Ｅ１３の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0135] ［Ｅ１５］

前記高周波電源は、

前記第２の期間における前記電気バイアスエネルギーの波形周期内のｎ番目の位相期間において、前記ソース高周波電力のソース周波数として、複数の候補周波数を順に用い、

前記ｎ番目の位相期間のための前記ソース高周波電力のソース周波数として、前記複数の候補周波数のうち前記ソース高周波電力の負荷からの反射波のパワーレベルを最小化する周波数を選択する、

ように構成されており、

前記ｎは、１～Ｎであり、該Ｎは、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の前記複数の位相期間の数である、

Ｅ１～Ｅ１３の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0136] ［Ｅ１６］

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発生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、バイアス周波数を有し、該電気バイアスエネルギーの波形周期は、該バイアス周波数の逆数の時間長を有する、該バイアス電源と、

前記チャンバ内でガスからプラズマを生成するために高周波電極に供給され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、

指定されたプロセスに応じて得られる初期周波数セットを選択し、

第１の期間において、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間それぞれのための前記ソース高周波電力の複数のソース周波数として、前記初期周波数セットに含まれる複数の周波数を用い、

前記第１の期間の後の第２の期間において、前記ソース高周波電力の負荷からの反射波のパワーレベルを低減するように、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の前記複数の位相期間それぞれのための前記ソース高周波電力の前記複数のソース周波数を調整する、

ように構成されている、

電源システム。

[0137] ［Ｅ１７］

（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であり、該電気バイアスエネルギーは、バイアス周波数を有し、該電気バイアスエネルギーの波形周期は、該バイアス周波数の逆数の時間長を有する、該工程と、

（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高周波電極にソース高周波電力を供給する工程と、

を含み、

前記（ｂ）は、

指定されたプロセスに応じて得られる初期周波数セットを選択する工程と、

第１の期間において、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間それぞれのための前記ソース高周波電力の複数のソース周波数として、前記初期周波数セットに含まれる複数の周波数を用いる工程と、

前記第１の期間の後の第２の期間において、前記ソース高周波電力の負荷からの反射波のパワーレベルを低減するように、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の前記複数の位相期間それぞれのための前記ソース高周波電力の前記複数のソース周波数を調整する工程と、

を含む、

制御方法。

[0138] ［Ｅ１８］

Ｅ１７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。

[0139] ［Ｅ１９］

Ｅ１８に記載のプログラムを記憶した記憶媒体。

[0140] 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

[0141] 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、３５…センサ、３６…センサ。

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気的に結合されており、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であり、該電気バイアスエネルギーは、バイアス周波数を有し、該電気バイアスエネルギーの波形周期は、該バイアス周波数の逆数の時間長を有する、該バイアス電源と、

高周波電極に電気的に接続されており、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、

指定されたプロセスに応じて得られる初期周波数セットを選択し、

第１の期間において、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間それぞれのための前記ソース高周波電力の複数のソース周波数として、前記初期周波数セットに含まれる複数の周波数を用い、

前記第１の期間の後の第２の期間において、前記ソース高周波電力の負荷からの反射波のパワーレベルを低減するように、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の前記複数の位相期間それぞれのための前記ソース高周波電力の前記複数のソース周波数を調整する、

ように構成されている、

プラズマ処理装置。

[請求項2] 前記高周波電源は、複数のプロセスにそれぞれ対応する複数の周波数セットの中に前記指定されたプロセスに対応する周波数セットが含まれる場合に、該指定されたプロセスに対応する該周波数セットを前

記初期周波数セットとして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3] 前記高周波電源は、前記第２の期間における前記電気バイアスエネルギーの波形周期の繰り返しにより得られる前記複数の位相期間それぞれのための前記ソース高周波電力の複数のソース周波数を含む周波数セットで、前記指定されたプロセスに対応する前記周波数セットを更新するように構成されている、請求項２に記載のプラズマ処理装置。

[請求項4] 前記複数のプロセスそれぞれの複数のプロセス条件データセットと前記複数の周波数セットとが、互いに関連付けられてデータベースに登録されている、請求項３に記載のプラズマ処理装置。

[請求項5] 前記データベースは、該プラズマ処理装置、又は、該プラズマ処理装置及び他のプラズマ処理装置の双方から通信によりアクセス可能なサーバに設けられている、請求項４に記載のプラズマ処理装置。

[請求項6] 前記複数のプロセス条件データセットの各々は、複数の条件項目を含む、請求項４に記載のプラズマ処理装置。

[請求項7] それと前記複数のプロセス条件データセットを複数の列として有する入力行列との積により得られる出力行列と前記複数の周波数セットを複数の列として有する行列との間の誤差を最小化する変換行列が、前記データベースに登録される、請求項６に記載のプラズマ処理装置。

[請求項8] 前記指定されたプロセスに対応する前記周波数セットが更新されるときに、それと前記入力行列との積により得られる出力行列と更新された前記周波数セットを含む前記複数の周波数セットを複数の列として有する行列との間の誤差を最小化するように前記変換行列が更新される、請求項７に記載のプラズマ処理装置。

[請求項9] 前記高周波電源は、前記複数のプロセスにそれぞれ対応する前記複数の周波数セットの中に前記指定されたプロセスに対応する周波数セ

ットが含まれない場合に、該指定されたプロセスのプロセス条件データセットと前記変換行列との積により得られる周波数セットを、前記初期周波数セットとして選択するように構成されている、請求項７に記載のプラズマ処理装置。

[請求項10] 前記複数のプロセス条件データセットの各々は、前記複数の条件項目として、前記チャンバ内の圧力、前記ソース高周波電力のパワーレベル、前記電気バイアスエネルギーの少なくとも一つのパラメータ、及び前記チャンバ内に供給される一つ以上のガスの各々の流量を含む、請求項６に記載のプラズマ処理装置。

[請求項11] 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を含み、

前記電気バイアスエネルギーの少なくとも一つのパラメータは、前記電気バイアスエネルギーが前記バイアス高周波電力であるか前記電圧のパルスであるかを表す種別情報、前記バイアス周波数、前記バイアス高周波電力のパワーレベル、前記電圧のパルスのデューティー比、及び前記電圧のパルスの電圧レベルを含む、請求項１０に記載のプラズマ処理装置。

[請求項12] 前記高周波電源と前記高周波電極との間に設けられた整合回路を含む整合器を更に備え、

前記複数のプロセス条件データセットの各々は、前記複数の条件項目として、前記整合回路の少なくとも一つの可変コンデンサのキャパシタンスを更に含む、

請求項１１に記載のプラズマ処理装置。

[請求項13] 該プラズマ処理装置は、容量結合型のプラズマ処理装置であり、

前記基板支持部の上方に設けられた上部電極と、

前記上部電極に接続された直流電源と、

を更に備え、

前記複数のプロセス条件データセットの各々は、前記複数の条件項目として、前記直流電源から前記上部電極に印加される直流電圧の電圧レベルを更に含む、請求項１１に記載のプラズマ処理装置。

[請求項14] 前記高周波電源は、前記第２の期間における前記電気バイアスエネルギーのｍ番目の波形周期内のｎ番目の位相期間のための前記ソース高周波電力の前記ソース周波数として、該ｍ番目の波形周期の前の前記電気バイアスエネルギーの波形周期内のｎ番目の位相期間のための前記ソース高周波電力の前記ソース周波数に、前記反射波のパワーレベルを抑制するように周波数シフトを与えることにより得られる周波数を用いるよう、構成されており、

前記ｎは、１～Ｎであり、該Ｎは、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の前記複数の位相期間の数である、

請求項１～１３の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項15] 前記高周波電源は、

前記第２の期間における前記電気バイアスエネルギーの波形周期内のｎ番目の位相期間において、前記ソース高周波電力のソース周波数として、複数の候補周波数を順に用い、

前記ｎ番目の位相期間のための前記ソース高周波電力のソース周波数として、前記複数の候補周波数のうち前記ソース高周波電力の負荷からの反射波のパワーレベルを最小化する周波数を選択する、

ように構成されており、

前記ｎは、１～Ｎであり、該Ｎは、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の前記複数の位相期間の数である、

請求項１～１３の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項16] 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発生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、バイアス周波数を有し、該電気バイアスエネルギーの波形周期は、該バイアス周波数の逆数の時間

長を有する、該バイアス電源と、

前記チャンバ内でガスからプラズマを生成するために高周波電極に供給され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、

指定されたプロセスに応じて得られる初期周波数セットを選択し、

第１の期間において、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間それぞれのための前記ソース高周波電力の複数のソース周波数として、前記初期周波数セットに含まれる複数の周波数を用い、

前記第１の期間の後の第２の期間において、前記ソース高周波電力の負荷からの反射波のパワーレベルを低減するように、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の前記複数の位相期間それぞれのための前記ソース高周波電力の前記複数のソース周波数を調整する、

ように構成されている、

電源システム。

[請求項17] （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であり、該電気バイアスエネルギーは、バイアス周波数を有し、該電気バイアスエネルギーの波形周期は、該バイアス周波数の逆数の時間長を有する、該工程と、

（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高周波電極にソース高周波電力を供給する工程と、

を含み、

前記（ｂ）は、

指定されたプロセスに応じて得られる初期周波数セットを選択す

る工程と、

第１の期間において、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の複数の位相期間それぞれのための前記ソース高周波電力の複数のソース周波数として、前記初期周波数セットに含まれる複数の周波数を用いる工程と、

前記第１の期間の後の第２の期間において、前記ソース高周波電力の負荷からの反射波のパワーレベルを低減するように、前記電気バイアスエネルギーの波形周期内の前記複数の位相期間それぞれのための前記ソース高周波電力の前記複数のソース周波数を調整する工程と、

を含む、

制御方法。

[請求項18] 請求項１７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19] 請求項１８に記載のプログラムを記憶した記憶媒体。