明　細　書

発明の名称 ：

プラズマ処理装置及びソース高周波電力のソース周波数を制御する方法

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ソース高周波電力のソース周波数を制御する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、プラズマ処理装置においてソース高周波電力の反射の度合い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、高周波電源、及びバイアス電源を備える。基板支持部は、バイアス電極を有し、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。バイアス電源は、波形周期を有する電気バイアスをバイアス電極に周期的に供給するように構成されている。高周波電

源は、波形周期の中の複数の位相期間の各々におけるソース高周波電力のソース周波数を、先行する波形周期内の同一の位相期間におけるソース周波数に、ソース高周波電力の反射の度合いを抑制するための周波数シフト量とランダムノイズを加えた周波数に設定するように構成されている。

発明の効果

[0006] 一つの例示的実施形態によれば、プラズマ処理装置においてソース高周波電力の反射の度合いが低減される。

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における電源システムの構成例を示す図である。

[図4]電気バイアスの波形の例を示す図である。

[図5]電気バイアスとソース高周波電力のソース周波数の一例のタイミングチャートである。

[図6]図６の（ａ）及び図６の（ｂ）の各々は、ソース高周波電力と電気バイアスの一例のタイミングチャートである。

[図7]図７の（ａ）及び図７の（ｂ）の各々は、ソース高周波電力と電気バイアスの一例のタイミングチャートである。

[図8]電気バイアスとソース高周波電力のソース周波数の一例のタイミングチャートである。

[図9]図９の（ａ）～図９の（ｄ）の各々は、電気バイアスの別の例のタイミングチャートである。

[図10]一つの例示的実施形態に係るソース高周波電力のソース周波数を制御する方法の流れ図である。

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。

[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）、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プロセッサであってもよい。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、電源システム３０及び排気システム４０を含む。また、プラズマ処理装置１は、基板支持部１１及びガス導入部を含む。ガス導入部は、少なくとも１つの処理ガスをプラズマ処理チャンバ１０内に導入するように構成される。ガス導入部は、シャワーヘッド１３を含む。基板支持部１１は、プラズマ処理チャンバ１０内に配置される。シャワーヘッド１３は、基板支持部１１の上方に配置される。一実施形態において、シャワーヘッド１３は、プラズマ処理チャンバ１０の天部（ｃｅｉｌｉｎｇ）の少なくとも一部を構

成する。プラズマ処理チャンバ１０は、シャワーヘッド１３、プラズマ処理チャンバ１０の側壁１０ａ及び基板支持部１１により規定されたプラズマ処理空間１０ｓを有する。プラズマ処理チャンバ１０は接地される。基板支持部１１は、プラズマ処理チャンバ１０の筐体とは電気的に絶縁される。

[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。静電チャック１１１１は、基台１１１０の上に配置される。静電チャック１１１１は、セラミック部材１１１１ａとセラミック部材１１１１ａ内に配置される静電電極１１１１ｂとを含む。セラミック部材１１１１ａは、中央領域１１１ａを有する。一実施形態において、セラミック部材１１１１ａは、環状領域１１１ｂも有する。なお、環状静電チャックや環状絶縁部材のような、静電チャック１１１１を囲む他の部材が環状領域１１１ｂを有してもよい。この場合、リングアセンブリ１１２は、環状静電チャック又は環状絶縁部材の上に配置されてもよく、静電チャック１１１１と環状絶縁部材の両方の上に配置されてもよい。

[0016] リングアセンブリ１１２は、１又は複数の環状部材を含む。一実施形態において、１又は複数の環状部材は、１又は複数のエッジリングと少なくとも１つのカバーリングとを含む。エッジリングは、導電性材料又は絶縁材料で

形成され、カバーリングは、絶縁材料で形成される。

[0017] また、基板支持部１１は、静電チャック１１１１、リングアセンブリ１１２及び基板のうち少なくとも１つをターゲット温度に調節するように構成される温調モジュールを含んでもよい。温調モジュールは、ヒータ、伝熱媒体、流路１１１０ａ、又はこれらの組み合わせを含んでもよい。流路１１１０ａには、ブラインやガスのような伝熱流体が流れる。一実施形態において、流路１１１０ａが基台１１１０内に形成され、１又は複数のヒータが静電チャック１１１１のセラミック部材１１１１ａ内に配置される。また、基板支持部１１は、基板Ｗの裏面と中央領域１１１ａとの間の間隙に伝熱ガスを供給するように構成された伝熱ガス供給部を含んでもよい。

[0018] シャワーヘッド１３は、ガス供給部２０からの少なくとも１つの処理ガスをプラズマ処理空間１０ｓ内に導入するように構成される。シャワーヘッド１３は、少なくとも１つのガス供給口１３ａ、少なくとも１つのガス拡散室１３ｂ、及び複数のガス導入口１３ｃを有する。ガス供給口１３ａに供給された処理ガスは、ガス拡散室１３ｂを通過して複数のガス導入口１３ｃからプラズマ処理空間１０ｓ内に導入される。また、シャワーヘッド１３は、少なくとも１つの上部電極を含む。なお、ガス導入部は、シャワーヘッド１３に加えて、側壁１０ａに形成された１又は複数の開口部に取り付けられる１又は複数のサイドガス注入部（ＳＧＩ：Ｓｉｄｅ　Ｇａｓ　Ｉｎｊｅｃｔｏｒ）を含んでもよい。

[0019] ガス供給部２０は、少なくとも１つのガスソース２１及び少なくとも１つの流量制御器２２を含んでもよい。一実施形態において、ガス供給部２０は、少なくとも１つの処理ガスを、それぞれに対応のガスソース２１からそれぞれに対応の流量制御器２２を介してシャワーヘッド１３に供給するように構成される。各流量制御器２２は、例えばマスフローコントローラ又は圧力制御式の流量制御器を含んでもよい。さらに、ガス供給部２０は、少なくとも１つの処理ガスの流量を変調又はパルス化する少なくとも１つの流量変調デバイスを含んでもよい。

[0020] 排気システム４０は、例えばプラズマ処理チャンバ１０の底部に設けられたガス排出口１０ｅに接続され得る。排気システム４０は、圧力調整弁及び真空ポンプを含んでもよい。圧力調整弁によって、プラズマ処理空間１０ｓ内の圧力が調整される。真空ポンプは、ターボ分子ポンプ、ドライポンプ又はこれらの組み合わせを含んでもよい。

[0021] 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における電源システムの構成例を示す図である。電源システム３０は、高周波電源３１及びバイアス電源３２を含む。高周波電源３１は、一実施形態のプラズマ生成部１２を構成する。高周波電源３１は、ソース高周波電力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_{HF}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_{HF}である正弦波状の波形を有する。ソース周波数f_{HF}は、１０ＭＨｚ～１５０ＭＨｚの範囲内の周波数であり得る。

[0022] 高周波電源３１は、整合器３３を介して高周波電極に電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。

[0023] 整合器３３は、可変インピーダンスを有する。整合器３３の可変インピーダンスは、ソース高周波電力ＨＦの負荷からの反射を低減するよう、設定される。整合器３３は、例えば制御部２によって制御され得る。

[0024] 一実施形態において、高周波電源３１は、信号発生器３１ｇ、Ｄ／Ａ変換器３１ｃ、及び増幅器３１ａを含んでいてもよい。信号発生器３１ｇは、ソース周波数f_{HF}を有する高周波信号を発生する。信号発生器３１ｇは、プログラム可能なプロセッサ又はＦＰＧＡ（Ｆｉｅｌｄ－Ｐｒｏｇｒａｍｍａｂｌｅ　Ｇａｔｅ　Ａｒｒａｙ）のようなプログラム可能なロジックデバイス

から構成されていてもよい。信号発生器３１ｇは、後述する信号発生器３２ｇと共に単一のプログラム可能なデバイス３０ｐから構成されていてもよく、信号発生器３２ｇとは別個のプログラム可能なデバイスから構成されていてもよい。

[0025] 信号発生器３１ｇの出力は、Ｄ／Ａ変換器３１ｃの入力に接続されている。Ｄ／Ａ変換器３１ｃは、信号発生器３１ｇからの高周波信号をアナログ信号に変換する。Ｄ／Ａ変換器３１ｃの出力は、増幅器３１ａの入力に接続されている。増幅器３１ａは、Ｄ／Ａ変換器３１ｃからのアナログ信号を増幅して、ソース高周波電力ＨＦを生成する。増幅器３１ａの増幅率は、制御部２から高周波電源３１に指定される。なお、高周波電源３１は、Ｄ／Ａ変換器３１ｃを含んでいなくてもよい。この場合には、信号発生器３１ｇの出力は、増幅器３１ａの入力に接続され、増幅器３１ａは、信号発生器３１ｇからの高周波信号を増幅して、ソース高周波電力ＨＦを生成する。

[0026] バイアス電源３２は、基板支持部１１に電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ＥＢをバイアス電極に供給するように構成されている。バイアス電極は、基台１１１０の導電性部材又はセラミック部材１１１１ａ内に設けられた少なくとも一つの電極であってもよい。バイアス電極は、高周波電極と共通であってもよい。電気バイアスＥＢがバイアス電極に供給されると、プラズマからのイオンが基板Wに引き付けられる。

[0027] 以下、図２及び図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３２は、波形周期ＣＹを有する電気バイアスＥＢをバイアス電極に周期的に与えるように構成されている。即ち、電気バイアスＥＢは、波形周期ＣＹの繰り返しである複数の波形周期ＣＹの各々においてバイアス電極に与えられる。波形周期ＣＹは、バイアス周波数で規定される。バイアス周波数は、例えば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。

[0028] 図４に示すように、電気バイアスＥＢは、バイアス周波数を有するバイア

ス高周波電力ＬＦであってもよい。即ち、電気バイアスＥＢは、その周波数がバイアス周波数である正弦波状の波形を有していてもよい。この場合には、バイアス電源３２は、整合器３４を介して、バイアス電極に電気的に接続される。整合器３４の可変インピーダンスは、バイアス高周波電力ＬＦの負荷からの反射を低減するよう、設定される。

[0029] 或いは、電気バイアスＥＢは、電圧パルスＶＰを含んでいてもよい。電圧パルスＶＰは、波形周期ＣＹ内においてバイアス電極に印加される。電圧パルスＶＰは、波形周期ＣＹの時間長と同じ長さの時間間隔で周期的にバイアス電極に印加される。電圧パルスＶＰの波形は、矩形波、三角波、又は任意の波形であり得る。電圧パルスＶＰの電圧の極性は、基板Ｗとプラズマとの間に電位差を生じさせてプラズマからのイオンを基板Ｗに引き込むことができるように設定される。電圧パルスＶＰは、負の電圧のパルス又は負の直流電圧のパルスであってもよい。なお、電気バイアスＥＢが電圧パルスＶＰである場合には、プラズマ処理装置１は整合器３４を備えていなくてもよい。

[0030] 一実施形態において、バイアス電源３２は、図３に示すように、信号発生器３２ｇ、Ｄ／Ａ変換器３２ｃ、及び増幅器３２ａを含んでいてもよい。信号発生器３２ｇは、指定された波形及び波形周期ＣＹを有するバイアス信号を、周期的に発生する。信号発生器３２ｇは、プログラム可能なプロセッサ又はＦＰＧＡのようなプログラム可能なロジックデバイスから構成されていてもよい。

[0031] 信号発生器３２ｇの出力は、Ｄ／Ａ変換器３２ｃの入力に接続されている。Ｄ／Ａ変換器３２ｃは、信号発生器３２ｇからのバイアス信号をアナログ信号に変換する。Ｄ／Ａ変換器３２ｃの出力は、増幅器３２ａの入力に接続されている。増幅器３２ａは、Ｄ／Ａ変換器３２ｃからのアナログ信号を増幅して、電気バイアスＥＢを生成する。増幅器３２ａの増幅率は、制御部２からバイアス電源３２に指定される。なお、バイアス電源３２は、Ｄ／Ａ変換器３２ｃを含んでいなくてもよい。この場合には、信号発生器３２ｇの出力は、増幅器３２ａの入力に接続され、増幅器３２ａは、信号発生器３２ｇ

からのバイアス信号を増幅して、電気バイアスＥＢを生成する。

[0032] 高周波電源３１は、波形周期ＣＹの中の複数の位相期間ＳＰの各々におけるソース周波数を、先行する波形周期ＣＹ内の同一の位相期間におけるソース周波数に、ソース高周波電力ＨＦの反射の度合いを抑制するためのシフト量と外乱を加えた周波数に設定する。外乱の一例は、ランダムノイズである。ランダムノイズは、平均値が０である正規分布に従って発生されてもよい。正規分布に従って発生されるランダムノイズの絶対値の最大値は、０．０１ＭＨｚ以上、５ＭＨｚ以下であってもよく、例えば０．５ＭＨｚである。正規分布の分散は、０．０１ＭＨｚ以上、５ＭＨｚ以下であってもよく、例えば０．４ＭＨｚである。ランダムノイズは、一様分布に従って発生されてもよい。一様分布に従って発生されるランダムノイズの絶対値の最大値は、０．０１ＭＨｚ以上、５ＭＨｚ以下であってもよく、例えば０．５ＭＨｚである。ランダムノイズが従う正規分布の平均値及び分散、並びにランダムノイズが従う一様分布の絶対値の最大値は、プラズマ処理時間又は先行する同一期間における反射の度合いに応じて変化してもよい。高周波電源３１によるソース周波数の設定は、第１のフィードバック及び／又は第２のフィードバックにより行われ得る。第１のフィードバック及び第２のフィードバックの詳細については、後述する。

[0033] プラズマ処理装置１は、波形周期ＣＹ内の複数の位相期間ＳＰそれぞれのソース周波数を調整することにより、波形周期ＣＹ内の負荷のインピーダンスの変動に応じてソース高周波電力ＨＦの反射を抑制することが可能である。波形周期ＣＹの中の複数の位相期間ＳＰの各々におけるソース周波数は、先行する波形周期ＣＹ内の同一の位相期間におけるソース周波数に上述のシフト量とランダムノイズを加えることにより得られる。プラズマ処理装置１によれば、かかるランダムノイズにより、反射の度合いの局所的な最小値に対応する周波数に留まることを回避して、反射の度合いを低減するソース周波数を探索することが可能である。

[0034] ［第１のフィードバック］

[0035] 以下、第１のフィードバックについて、図５を参照しつつ説明する。図５は、電気バイアスとソース高周波電力のソース周波数の一例のタイミングチャートである。第１のフィードバックは、連続する複数の波形周期ＣＹの各々の中の複数の位相期間ＳＰ各々におけるソース周波数の調整のために行われる。複数の波形周期ＣＹの各々は、Ｎ個の位相期間ＳＰ（１）～ＳＰ（Ｎ）を含んでいる。Ｎは、２以上の整数である。Ｎ個の位相期間ＳＰ（１）～ＳＰ（Ｎ）は、複数の波形周期ＣＹの各々をＮ個の位相期間に分割している。以下の説明において、波形周期ＣＹ（ｍ）は、複数の波形周期ＣＹのうち、ｍ番目の波形周期を表す。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、波形周期ＣＹ（ｍ）におけるｎ番目の位相期間を表す。

[0036] 第１のフィードバックにおけるソース周波数の設定は、高周波電源３１（又はその信号発生器３１ｇ）によって行われ得る。高周波電源３１は、位相期間ＳＰ（ｍ，ｎ）におけるソース高周波電力ＨＦのソース周波数を、ソース高周波電力ＨＦの反射の度合いの変化に応じて設定する。

[0037] ソース高周波電力ＨＦの反射の度合いを決定するために、プラズマ処理装置１は、センサ３５及び／又はセンサ３６を更に備えていてもよい（図２参照）。センサ３５は、ソース高周波電力ＨＦの負荷からの反射波のパワーレベルＰｒを測定するように構成されている。センサ３５は、例えば方向性結合器を含む。この方向性結合器は、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。なお、センサ３５は、ソース高周波電力ＨＦの進行波のパワーレベルＰｆを更に測定するように構成されていてもよい。センサ３５によって測定された反射波のパワーレベルＰｒ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が、センサ３５から高周波電源３１に通知されてもよい。

[0038] 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_{HF}及び電流I_{HF}を測定するように構成されている。ソース高周波電力ＨＦは、この給電

路を経由して高周波電極に供給される。センサ３６は、高周波電源３１と整合器３３との間に設けられていてもよい。電圧V_{HF}及び電流I_{HF}は、高周波電源３１に通知される。

[0039] 高周波電源３１は、複数の位相期間ＳＰの各々における測定値から代表値を生成する。測定値は、センサ３５によって取得される反射波のパワーレベルＰｒであってもよい。測定値は、ソース高周波電力ＨＦ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（即ち、反射率）であってもよい。測定値は、複数の位相期間ＳＰの各々においてセンサ３６によって取得される電圧V_{HF}と電流I_{HF}の位相差θであってもよい。測定値は、複数の位相期間ＳＰの各々における高周波電源３１の負荷側のインピーダンスZ_Lであってもよい。インピーダンスZ_Lは、センサ３６によって取得される電圧V_{HF}と電流I_{HF}から決定される。測定値は、インピーダンスZ_Lと高周波電源３１の出力インピーダンスから求められる反射係数であってもよい。代表値は、複数の位相期間ＳＰの各々における当該測定値の平均値又は最大値であってもよい。高周波電源３１は、複数の位相期間ＳＰの各々における代表値を、ソース高周波電力ＨＦの反射の度合いを表す値として用いる。

[0040] 第１のフィードバックにおいて、高周波電源３１は、波形周期ＣＹ（ｍ）の前の二つ以上の波形周期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ソース周波数を用いることにより、反射の度合いの変化を特定する。

[0041] 一実施形態において、波形周期ＣＹ（ｍ）の前の二つ以上の波形周期ＣＹは、図５に示すように、波形周期ＣＹ（ｍ－M_1）及び波形周期ＣＹ（ｍ－M_2）を含む。ここで、M_1及びM_2は、$M_1 > M_2$を満たす自然数である。一実施形態において、波形周期ＣＹ（ｍ－M_1）は、波形周期ＣＹ（ｍ－２Ｑ）であり、波形周期ＣＹ（ｍ－M_2）は、波形周期ＣＹ（ｍ－Ｑ）である。「Ｑ」及び「M_2」は「１」であってもよく、「２Ｑ」及び「M_1」は「２」であってもよい。「Ｑ」は、２以上の整数であってもよい。なお、図５の例では、波形周期ＣＹ（ｍ－M_1）における複数の位相期間ＳＰのそれぞれにおけるソー

ス周波数は、互いに同一であり、ｆ０であるが、互いに異なっていてもよい。

[0042] 第１のフィードバックにおいて、高周波電源３１は、ソース周波数f_{HF}（ｍ－M_2，ｎ）を、f_{HF}（ｍ－M_2，ｎ）＝f_{HF}（ｍ－M_1，ｎ）＋Δ（ｍ－M_2，ｎ）＋Ｒ（ｍ－M_2，ｎ）により求める。そして、ソース周波数f_{HF}（ｍ，ｎ）を、f_{HF}（ｍ，ｎ）＝f_{HF}（ｍ－M_2，ｎ）＋Δ（ｍ，ｎ）＋Ｒ（ｍ，ｎ）により求める。ここで、f_{HF}（ｍ，ｎ）は、位相期間ＳＰ（ｍ，ｎ）におけるソース高周波電力ＨＦのソース周波数を表す。Δ（ｍ，ｎ）は、ソース周波数f_{HF}（ｍ，ｎ）を求めるために用いられる周波数のシフト量である。Ｒ（ｍ，ｎ）は、ソース周波数f_{HF}（ｍ，ｎ）を求めるために用いられるランダムノイズである。Δ（ｍ，ｎ）は、周波数の増加又は減少を与える量である。Δ（ｍ，ｎ）は、それが正の値を有する場合には、正のシフト方向の周波数のシフトを与える。Δ（ｍ，ｎ）は、それが負の値を有する場合には、負のシフト方向の周波数のシフトを与える。

[0043] 第１のフィードバックにおいて、位相期間ＳＰ（ｍ－M_2，ｎ）における反射の度合いが、位相期間ＳＰ（ｍ－M_1，ｎ）における反射の度合いから低下する場合が生じ得る。この場合には、高周波電源３１は、ソース周波数f_{HF}（ｍ，ｎ）を求めるために用いるΔ（ｍ，ｎ）を、f_{HF}（ｍ－M_1，ｎ）に対してf_{HF}（ｍ－M_2，ｎ）が有するシフト方向と同一のシフト方向を有する量に設定する。

[0044] 第１のフィードバックにおいて、位相期間ＳＰ（ｍ－M_2，ｎ）における反射の度合いが、位相期間ＳＰ（ｍ－M_1，ｎ）における反射の度合いから増大する場合が生じ得る。この場合には、高周波電源３１は、ソース周波数f_{HF}（ｍ，ｎ）を求めるために用いるΔ（ｍ，ｎ）を、f_{HF}（ｍ－M_1，ｎ）に対してソース周波数f_{HF}（ｍ－M_2，ｎ）が有するシフト方向と逆のシフト方向を有する量に設定する。

[0045] 一実施形態において、シフト量Δ（ｍ，ｎ）は、固定された絶対値を有していてもよい。即ち、複数の位相期間ＳＰそれぞれにおけるソース周波数を

求めるために用いられるシフト量は、同一且つ固定された絶対値を有していてもよい。別の実施形態において、シフト量Δ（ｍ，ｎ）は、位相期間ＳＰ（ｍ－M_2，ｎ）における反射の度合いの大きさに応じた絶対値を有していてもよい。

[0046] ［第２のフィードバック］

[0047] 第２のフィードバックは、バイアス電源３２が電気バイアスＥＢのパルスＥＢＰを周期的にバイアス電極に供給する場合に用いられる。パルスＥＢＰは、複数のパルス期間ＰＰの各々においてバイアス電極に供給される。複数のパルス期間ＰＰの各々は、波形周期ＣＹの繰り返しを含む。即ち、複数のパルス期間ＰＰの各々では、電気バイアスＥＢが周期的にバイアス電極に供給される。

[0048] ここで、図６の（ａ）、図６の（ｂ）、図７の（ａ）、及び図７の（ｂ）を参照する。図６の（ａ）、図６の（ｂ）、図７の（ａ）、及び図７の（ｂ）の各々は、ソース高周波電力ＨＦと電気バイアスＥＢ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、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がバイアス電極に与えられていることを示しており、電気バイアスＥＢの「ＯＦＦ」は、電気バイアスＥＢがバイアス電極に与えられていないことを示している。また、これらの図において、電気バイアスＥＢの「ＨＩＧＨ」は、「ＬＯＷ」で示される電気バイアスＥＢのレベルよりも高いレベルを有する電気バイアスＥＢがバイアス電極に与えられていることを示している。

[0049] 複数のパルス期間ＰＰは、時間的に順に出現する。複数のパルス期間ＰＰは、パルス周波数の逆数の時間間隔（周期）で順に出現する。以下の説明において、パルス期間ＰＰ（ｋ）は、複数のパルス期間ＰＰのうちｋ番目のパルス期間を表している。パルス周波数は、バイアス周波数よりも低く、例え

ば、１ｋＨｚ以上、１００ｋＨｚ以下の周波数である。上述したように、電気バイアスＥＢは、複数のパルス期間ＰＰの各々において、周期的にバイアス電極に与えられる。複数のパルス期間ＰＰ以外の期間において、電気バイアスＥＢは、バイアス電極に与えられなくてもよい。或いは、複数のパルス期間ＰＰにおける電気バイアスＥＢのレベルよりも低いレベルを有する電気バイアスＥＢが、複数のパルス期間ＰＰ以外の期間において、バイアス電極に与えられてもよい。

[0050] 図６の（ａ）に示すように、ソース高周波電力ＨＦは、連続波として供給されてもよい。図６の（ａ）に示す例では、複数のパルス期間ＰＰにおいてソース高周波電力ＨＦが供給される複数の重複期間ＯＰはそれぞれ、複数のパルス期間ＰＰと一致する。

[0051] 或いは、図６の（ｂ）、図７の（ａ）、及び図７の（ｂ）に示すように、ソース高周波電力ＨＦのパルスが、供給されてもよい。図６の（ｂ）に示すように、ソース高周波電力ＨＦのパルスは、複数のパルス期間ＰＰとそれぞれ一致する複数の期間の各々において供給されてもよい。図６の（ｂ）に示す例では、複数のパルス期間ＰＰにおいてソース高周波電力ＨＦが供給される複数の重複期間ＯＰはそれぞれ、複数のパルス期間ＰＰと一致する。図７の（ａ）及び図７の（ｂ）に示すように、ソース高周波電力ＨＦのパルスは、複数のパルス期間ＰＰとそれぞれ部分的に重複する複数の期間の各々において供給されてもよい。図７の（ａ）及び図７の（ｂ）の各々に示す例では、複数のパルス期間ＰＰにおいてソース高周波電力ＨＦが供給される複数の重複期間ＯＰの各々は、複数のパルス期間ＰＰのうち対応のパルス期間ＰＰの一部である。なお、以下の説明において、重複期間ＯＰ（ｋ）は、複数の重複期間ＯＰのうちｋ番目の重複期間を表している。

[0052] 電気バイアスＥＢは、複数のパルス期間ＰＰの各々の中の複数の波形周期ＣＹの各々においてバイアス電極に与えられる。以下の説明において、波形周期ＣＹ（ｍ）は、複数の重複期間ＯＰの各々の中の複数の波形周期ＣＹ（１）～ＣＹ（Ｍ）のうち、ｍ番目の波形周期を表す。また、波形周期ＣＹ（

ｋ，ｍ）は、ｋ番目の重複期間内のｍ番目の波形周期を表す。また、位相期間ＳＰ（ｎ）は、複数の重複期間ＯＰの各々の中の複数の波形周期ＣＹの各々における複数の位相期間ＳＰ（１）～ＳＰ（Ｎ）のうちｎ番目の位相期間を表している。また、位相期間ＳＰ（ｍ，ｎ）は、波形周期ＣＹ（ｍ）におけるｎ番目の位相期間を表す。また、位相期間ＳＰ（ｋ，ｍ，ｎ）は、ｋ番目の重複期間ＯＰ（ｋ）内の波形周期ＣＹ（ｍ）におけるｎ番目の位相期間を表す。

[0053] 重複期間ＯＰ（１）～ＯＰ（Ｔ－１）の各々における複数の波形周期ＣＹの各々の中の複数の位相期間ＳＰの各々のソース周波数の設定は、上述した第１のフィードバックにより行われ得る。なお、Ｔは、３以上の整数である。或いは、重複期間ＯＰ（１）～ＯＰ（Ｔ－１）の各々における複数の波形周期ＣＹの各々の中の複数の位相期間ＳＰの各々のソース周波数は、予め準備されたテーブルに登録されている周波数に設定されてもよい。

[0054] 重複期間ＯＰ（Ｔ）以降の重複期間におけるソース高周波電力ＨＦのソース周波数の設定には、第２のフィードバックが用いられ得る。以下、図８を参照して、第２のフィードバックについて説明する。図８は、電気バイアスとソース高周波電力のソース周波数の一例のタイミングチャートである。

[0055] 第２のフィードバックにおいて、高周波電源３１は、ソース周波数f_{HF}（ｋ，ｍ，ｎ）を、ソース高周波電力ＨＦの上述した反射の度合いの変化に応じて、調整する。第２のフィードバックでは、反射の度合いの変化は、重複期間ＯＰ（ｋ）の前の二つ以上の重複期間ＯＰ内の波形周期ＣＹ（ｍ）内の対応の位相期間ＳＰ（ｎ）において互いに異なるソース高周波電力ＨＦのソース周波数を用いることにより特定される。

[0056] 一実施形態において、重複期間ＯＰ（ｋ）の前の二つ以上の重複期間ＯＰは、（ｋ－K_1）番目の重複期間ＯＰ（ｋ－K_1）と（ｋ－K_2）番目の重複期間ＯＰ（ｋ－K_2）を含む。ここで、K_1及びK_2は、$K_1 > K_2$を満たす自然数である。一実施形態においては、重複期間ＯＰ（ｋ－K_1）は、重複期間ＯＰ（ｋ－２）である。重複期間ＯＰ（ｋ－K_2）は、重複期間ＯＰ（ｋ－K_1）

の後の重複期間であり、一実施形態においては、重複期間ＯＰ（ｋ－１）である。即ち、一実施形態において、K_2、K_1はそれぞれ、１、２である。

[0057] 第２のフィードバックにおいて、高周波電源３１は、ソース周波数f_{HF}（ｋ－K_2，ｍ，ｎ）を、f_{HF}（ｋ－K_2，ｍ，ｎ）＝f_{HF}（ｋ－K_1，ｍ，ｎ）＋Δ（ｋ－K_2，ｍ，ｎ）＋Ｒ（ｋ－K_2，ｍ，ｎ）により求める。そして、ソース周波数f_{HF}（ｋ，ｍ，ｎ）を、f_{HF}（ｋ，ｍ，ｎ）＝f_{HF}（ｋ－K_2，ｍ，ｎ）＋Δ（ｋ，ｍ，ｎ）＋Ｒ（ｋ，ｍ，ｎ）により求める。ここで、f_{HF}（ｋ，ｍ，ｎ）は、位相期間ＳＰ（ｋ，ｍ，ｎ）におけるソース高周波電力ＨＦのソース周波数を表す。Δ（ｋ，ｍ，ｎ）は、位相期間ＳＰ（ｋ，ｍ，ｎ）におけるソース周波数f_{HF}（ｋ，ｍ，ｎ）を求めるために用いられる周波数のシフト量である。Ｒ（ｋ，ｍ，ｎ）は、位相期間ＳＰ（ｋ，ｍ，ｎ）におけるソース周波数f_{HF}（ｋ，ｍ，ｎ）を求めるために用いられるランダムノイズである。Δ（ｋ，ｍ，ｎ）は、周波数の増加又は減少を与える量である。Δ（ｋ，ｍ，ｎ）は、それが正の値を有する場合には、正のシフト方向の周波数のシフトを与える。Δ（ｋ，ｍ，ｎ）は、それが負の値を有する場合には、負のシフト方向の周波数のシフトを与える。

[0058] 第２のフィードバックにおいて、位相期間ＳＰ（ｋ－K_2，ｍ，ｎ）における反射の度合いが、位相期間ＳＰ（ｋ－K_1，ｍ，ｎ）における反射の度合いから低下する場合が生じ得る。この場合には、高周波電源３１は、ソース周波数f_{HF}（ｋ，ｍ，ｎ）を求めるために用いるΔ（ｋ，ｍ，ｎ）を、f_{HF}（ｋ－K_1，ｍ，ｎ）に対してf_{HF}（ｋ－K_2，ｍ，ｎ）が有するシフト方向と同一のシフト方向を有する量に設定する。

[0059] 第２のフィードバックにおいて、位相期間ＳＰ（ｋ－K_2，ｍ，ｎ）における反射の度合いが、位相期間ＳＰ（ｋ－K_1，ｍ，ｎ）における反射の度合いから増大する場合が生じ得る。この場合には、高周波電源３１は、ソース周波数f_{HF}（ｋ，ｍ，ｎ）を求めるために用いるΔ（ｋ，ｍ，ｎ）を、f_{HF}（ｋ－K_1，ｍ，ｎ）に対してf_{HF}（ｋ－K_2，ｍ，ｎ）が有するシフト方向と逆のシフト方向を有する量に設定する。

[0060] 一実施形態において、シフト量Δ（ｋ，ｍ，ｎ）は、固定された絶対値を有していてもよい。即ち、複数の位相期間ＳＰそれぞれにおけるソース周波数を求めるために用いられるシフト量は、同一且つ固定された絶対値を有していてもよい。別の実施形態において、シフト量Δ（ｋ，ｍ，ｎ）は、位相期間ＳＰ（ｋ－K_2，ｍ，ｎ）における反射の度合いの大きさに応じた絶対値を有していてもよい。

[0061] 以下、図９の（ａ）～図９（ｄ）を参照する。図９の（ａ）～図９の（ｄ）の各々は、電気バイアスの別の例のタイミングチャートである。一実施形態において、複数の重複期間ＯＰは、１番目からK_a番目の重複期間ＯＰ（１）～ＯＰ（K_a）を含んでいてもよい。ここで、K_aは２以上の自然数である。

[0062] 高周波電源３１は、重複期間ＯＰ（１）～ＯＰ（K_a）の各々に含まれる複数の波形周期ＣＹのうち１番目からM_a番目の波形周期ＣＹ（１）～ＣＹ（M_a）の各々において、初期処理を行ってもよい。ここで、M_aは、自然数である。初期処理においては、波形周期ＣＹ（１）～ＣＹ（M_a）それぞれのための複数の周波数セットを含む周波数セット群が用いられてもよく、当該周波数セット群に含まれる複数の周波数セットは互いに異なっていてもよい。また、重複期間ＯＰ（１）～ＯＰ（K_a）のそれぞれのための複数の周波数セット群が用いられてもよく、これら複数の周波数セット群は互いに異なっていてもよい。高周波電源３１は、重複期間ＯＰ（１）～ＯＰ（K_a）の各々における１番目からM_a番目の波形周期ＣＹ（１）～ＣＹ（M_a）の各々における複数の位相期間ＳＰにおいて、ソース周波数として、対応の周波数セットに含まれる複数の周波数をそれぞれ用いる。なお、複数の周波数セット並びに複数の周波数セット群は、制御部２又は高周波電源３１の記憶部に記憶されていてもよい。

[0063] 高周波電源３１は、重複期間ＯＰ（１）～ＯＰ（K_a）の各々において、波形周期ＣＹ（M_a）の後に、上述の第１のフィードバックを行ってもよい。即ち、高周波電源３１は、重複期間ＯＰ（１）～ＯＰ（K_a）の各々に含まれる

波形周期ＣＹ（M_a＋１）～ＣＹ（Ｍ）において、上述の第１のフィードバックを行ってもよい。

[0064] 一実施形態において、複数の重複期間ＯＰは、（K_a＋１）番目からK_b番目の重複期間ＯＰ（K_a＋１）～ＯＰ（K_b）を更に含んでいてもよい。ここで、K_bは、（K_a＋１）以上の自然数であり、K_b＝K_a＋１を満たしてもよい。

[0065] 高周波電源３１は、重複期間ＯＰ（K_a＋１）～ＯＰ（K_b）の各々に含まれる複数の波形周期ＣＹのうち１番目からM_{b1}番目の波形周期ＣＹ（１）～ＣＹ（M_{b1}）の各々において上述の初期処理を行いってもよい。ここで、M_{b1}は、自然数である。M_{b1}及びM_aは、M_{b1}＜M_aを満たしてもよい。

[0066] 高周波電源３１は、重複期間ＯＰ（K_a＋１）～ＯＰ（K_b）の各々に含まれる複数の波形周期ＣＹのうち（M_{b1}＋１）番目の波形周期ＣＹ（M_{b1}＋１）～M_{b2}番目の波形周期ＣＹ（M_{b2}）において、上述の第２のフィードバックを行ってもよい。ここで、M_{b2}は、M_{b2}＞M_{b1}を満たす自然数である。

[0067] 高周波電源３１は、重複期間ＯＰ（K_a＋１）～ＯＰ（K_b）の各々において、波形周期ＣＹ（M_{b2}）の後に、上述の第１のフィードバックを行ってもよい。即ち、高周波電源３１は、重複期間ＯＰ（K_a＋１）～ＯＰ（K_b）の各々に含まれる波形周期ＣＹ（M_{b2}＋１）～ＣＹ（Ｍ）において、上述の第１のフィードバックを行ってもよい。

[0068] また、高周波電源３１は、（K_b＋１）番目から最後の重複期間ＯＰ（K_b＋１）～ＯＰ（Ｋ）の各々に含まれる１番目からM_c番目の波形周期ＣＹ（１）～ＣＹ（M_c）において、上述の第２のフィードバックを行ってもよい。ここで、M_cは、自然数である。また、高周波電源３１は、重複期間ＯＰ（K_b＋１）～ＯＰ（Ｋ）の各々において、波形周期ＣＹ（M_c）の後に、上述の第１のフィードバックを行ってもよい。即ち、高周波電源３１は、重複期間ＯＰ（K_b＋１）～ＯＰ（Ｋ）の各々に含まれる波形周期ＣＹ（M_c＋１）～ＣＹ（Ｍ）において、上述の第１のフィードバックを行ってもよい。

[0069] 以下、図１０を参照して、一つの例示的実施形態に係るソース高周波電力

のソース周波数を制御する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ソース高周波電力のソース周波数を制御する方法の流れ図である。図１０に示す方法ＭＴは、工程ＳＴａ又は工程ＳＴｂで開始する。

[0070] 工程ＳＴａでは、電気バイアスＥＢがバイアス電極に供給される。電気バイアスＥＢは、上述したように、連続的に又は周期的なパルスＥＢＰとして供給される。工程ＳＴｂは、工程ＳＴａと並列して行われる。工程ＳＴｂでは、ソース高周波電力ＨＦが、チャンバ内で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ＨＦは、上述したように、連続的に又は周期的なパルスとして供給される。

[0071] 工程ＳＴｃでは、複数の波形周期ＣＹの複数の位相期間ＳＰの各々において用いられるソース高周波電力ＨＦのソース周波数が、設定される。工程ＳＴｃにおいて、波形周期ＣＹの中の複数の位相期間ＳＰの各々におけるソース周波数は、先行する波形周期ＣＹ内の同一の位相期間におけるソース周波数に、ソース高周波電力の反射の度合いを抑制するためのシフト量と外乱（例えば、ランダムノイズ）を加えた周波数に設定される。ソース周波数の設定の具体例については、上述した高周波電源３１によって行われるソース周波数の設定に関する説明を参照されたい。

[0072] 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。

[0073] 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ＨＦは、プラズマの生成のために用いられ、複数の波形周期ＣＹの複数の位相期間ＳＰにおいて用いられるソース高周波電力ＨＦのソース周波数は、プラズマ処理装置１に関して上述したように、設定される。

[0074] また、更に別の実施形態においては、上述のランダムノイズの代わりに、他の外乱が用いられてもよい。他の外乱は、ランダムに与えられる固定値であってもよい。或いは、他の外乱は、変動値であってもよい。

[0075] 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］～［Ｅ１２］に記載する。

[0076] ［Ｅ１］

チャンバと、

バイアス電極を有し、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、

波形周期を有する電気バイアスを前記バイアス電極に周期的に供給するように構成されたバイアス電源と、

を備え、

前記高周波電源は、前記波形周期内の複数の位相期間の各々における前記ソース高周波電力のソース周波数を、先行する前記波形周期内の同一の位相期間における前記ソース周波数に、前記ソース高周波電力の反射の度合いを抑制するためのシフト量とランダムノイズを加えた周波数に設定するように構成されている、

プラズマ処理装置。

[0077] ［Ｅ２］

前記高周波電源は、

前記波形周期の繰り返しである複数の波形周期のうち（ｍ－M_2）番目の波形周期内のｎ番目の位相期間における前記反射の度合いが、前記複数の波形周期のうち（ｍ－M_1）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いから低下している場合には、前記複数の波形周期のうちｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数を設定するために前記（ｍ－M_2）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に加える前記シフト量を、前記（ｍ－M_1）番目の波形周

期内の前記ｎ番目の位相期間の前記ソース周波数に対して前記（ｍ－M_2）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数が有するシフト方向と同一のシフト方向を有する量に設定し、

前記複数の波形周期のうち前記（ｍ－M_2）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いが、前記（ｍ－M_1）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いから増大している場合には、前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数を設定するために前記（ｍ－M_2）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に加える前記シフト量を、前記（ｍ－M_1）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間の前記ソース周波数に対して前記（ｍ－M_2）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数が有するシフト方向と逆のシフト方向を有する量に設定する、

ように構成されており、ここで、M_1及びM_2は、$M_1 > M_2$を満たす自然数である、

［Ｅ１］に記載のプラズマ処理装置。

[0078] ［Ｅ３］

前記シフト量は、固定された絶対値を有する、［Ｅ２］に記載のプラズマ処理装置。

[0079] ［Ｅ４］

前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数を設定するために、前記（ｍ－M_2）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に加えられる前記シフト量は、前記（ｍ－M_2）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いの大きさに応じた絶対値を有する、［Ｅ２］に記載のプラズマ処理装置。

[0080] ［Ｅ５］

前記バイアス電源は、複数のパルス期間の各々において前記波形周期の繰り返しである複数の波形周期をもたらすよう前記電気バイアスを周期的に供給するように構成されており、

前記高周波電源は、

前記複数のパルス期間とそれぞれ重複する複数の重複期間のうち（ｋ－K_2）番目の重複期間内のｍ番目の波形周期内のｎ番目の位相期間における前記反射の度合いが、前記複数の重複期間のうち（ｋ－K_1）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いから低下している場合には、前記複数の重複期間のうちｋ番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数を設定するために前記（ｋ－K_2）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に加える前記シフト量を、前記（ｋ－K_1）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に対して前記（ｋ－K_2）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数が有するシフト方向と同一のシフト方向を有する量に設定し、

前記（ｋ－K_2）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いが、前記（ｋ－K_1）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いから増大している場合には、前記ｋ番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数を設定するために前記（ｋ－K_2）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に加える前記シフト量を、前記（ｋ－K_1）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に対して前記（ｋ－K_2）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数が有するシフト方向と逆のシフト方向を有する量に設定する、

ように構成されており、ここで、K_1及びK_2は、$K_1 > K_2$を満たす自然数である、

［Ｅ１］に記載のプラズマ処理装置。

[0081] ［Ｅ６］

前記シフト量は、固定された絶対値を有する、［Ｅ５］に記載のプラズマ処理装置。

[0082] ［Ｅ７］

前記ｋ番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数を設定するために、前記（ｋ－K_2）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に加えられる前記シフト量は、前記（ｋ－K_2）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いの大きさに応じた絶対値を有する、［Ｅ５］に記載のプラズマ処理装置。

[0083] ［Ｅ８］

前記ランダムノイズは、平均値が０である正規分布に従って発生される、［Ｅ１］～［Ｅ７］の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0084] ［Ｅ９］

前記ランダムノイズは、一様分布に従って発生される、［Ｅ１］～［Ｅ７］の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0085] ［Ｅ１０］

前記電気バイアスは、前記波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数を有するバイアス高周波電力であるか、前記波形周期の時間間隔で周期的に発生される電圧パルスを含む、［Ｅ１］～［Ｅ９］の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0086] ［Ｅ１１］

チャンバと、

バイアス電極を有し、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、

波形周期を有する電気バイアスを前記バイアス電極に周期的に供給するように構成されたバイアス電源と、

を備え、

前記高周波電源は、前記波形周期内の複数の位相期間の各々における前記ソース高周波電力のソース周波数を、先行する前記波形周期内の同一の位相期間における前記ソース周波数に、前記ソース高周波電力の反射の度合いを抑制するためのシフト量と外乱を加えた周波数に設定するように構成されている、

プラズマ処理装置。

[0087] ［Ｅ１２］

ソース高周波電力のソース周波数を制御する方法であって、

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のバイアス電極に電気バイアスを与える工程であり、該電気バイアスは、波形周期を有し、前記バイアス電極に周期的に与えられる、該工程と、

前記チャンバ内でプラズマを生成するために高周波電源から前記ソース高周波電力を供給する工程と、

前記波形周期内の複数の位相期間の各々における前記ソース高周波電力の前記ソース周波数を設定する工程と、

を含み、

前記ソース周波数を設定する前記工程において、前記波形周期内の複数の位相期間の各々における前記ソース高周波電力の前記ソース周波数は、先行する前記波形周期内の同一の位相期間における前記ソース高周波電力の前記ソース周波数に、前記ソース高周波電力の反射の度合いを抑制するためのシフト量とランダムノイズを加えた周波数に設定される、方法。

[0088] 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

[0089] １…プラズマ処理装置、１０…チャンバ、３１…高周波電源、３２…バイ

アス電源。

請求の範囲

[請求項1] チャンバと、

バイアス電極を有し、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、

波形周期を有する電気バイアスを前記バイアス電極に周期的に供給するように構成されたバイアス電源と、

を備え、

前記高周波電源は、前記波形周期内の複数の位相期間の各々における前記ソース高周波電力のソース周波数を、先行する前記波形周期内の同一の位相期間における前記ソース周波数に、前記ソース高周波電力の反射の度合いを抑制するためのシフト量とランダムノイズを加えた周波数に設定するように構成されている、

プラズマ処理装置。

[請求項2] 前記高周波電源は、

前記波形周期の繰り返しである複数の波形周期のうち（$m-M_2$）番目の波形周期内のｎ番目の位相期間における前記反射の度合いが、前記複数の波形周期のうち（$m-M_1$）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いから低下している場合には、前記複数の波形周期のうちｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数を設定するために前記（$m-M_2$）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に加える前記シフト量を、前記（$m-M_1$）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間の前記ソース周波数に対して前記（$m-M_2$）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数が有するシフト方向と同一のシフト方向を有する量に設定し、

前記複数の波形周期のうち前記（$m-M_2$）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いが、前記（$m-M_1$

）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いから増大している場合には、前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数を設定するために前記（ｍ－M_2）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に加える前記シフト量を、前記（ｍ－M_1）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間の前記ソース周波数に対して前記（ｍ－M_2）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数が有するシフト方向と逆のシフト方向を有する量に設定する、

ように構成されており、ここで、M_1及びM_2は、$M_1 > M_2$を満たす自然数である、

請求項１に記載のプラズマ処理装置。

[請求項3] 前記シフト量は、固定された絶対値を有する、請求項２に記載のプラズマ処理装置。

[請求項4] 前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数を設定するために、前記（ｍ－M_2）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に加えられる前記シフト量は、前記（ｍ－M_2）番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いの大きさに応じた絶対値を有する、請求項２に記載のプラズマ処理装置。

[請求項5] 前記バイアス電源は、複数のパルス期間の各々において前記波形周期の繰り返しである複数の波形周期をもたらすよう前記電気バイアスを周期的に供給するように構成されており、

前記高周波電源は、

前記複数のパルス期間とそれぞれ重複する複数の重複期間のうち（ｋ－K_2）番目の重複期間内のｍ番目の波形周期内のｎ番目の位相期間における前記反射の度合いが、前記複数の重複期間のうち（ｋ－K_1）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いから低下している場合には、前記複

数の重複期間のうちｋ番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数を設定するために前記（ｋ－K_2）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に加える前記シフト量を、前記（ｋ－K_1）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に対して前記（ｋ－K_2）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数が有するシフト方向と同一のシフト方向を有する量に設定し、

前記（ｋ－K_2）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いが、前記（ｋ－K_1）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いから増大している場合には、前記ｋ番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数を設定するために前記（ｋ－K_2）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に加える前記シフト量を、前記（ｋ－K_1）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に対して前記（ｋ－K_2）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数が有するシフト方向と逆のシフト方向を有する量に設定する、

ように構成されており、ここで、K_1及びK_2は、$K_1 > K_2$を満たす自然数である、

請求項１に記載のプラズマ処理装置。

[請求項6] 前記シフト量は、固定された絶対値を有する、請求項５に記載のプラズマ処理装置。

[請求項7] 前記ｋ番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数を設定するために、前記（ｋ－K

$_2$）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記ソース周波数に加えられる前記シフト量は、前記（ｋ－Ｋ$_2$）番目の重複期間内の前記ｍ番目の波形周期内の前記ｎ番目の位相期間における前記反射の度合いの大きさに応じた絶対値を有する、請求項５に記載のプラズマ処理装置。

[請求項8] 前記ランダムノイズは、平均値が０である正規分布に従って発生される、請求項１～７の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項9] 前記ランダムノイズは、一様分布に従って発生される、請求項１～７の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項10] 前記電気バイアスは、前記波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数を有するバイアス高周波電力であるか、前記波形周期の時間間隔で周期的に発生される電圧パルスを含む、請求項１～７の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項11] チャンバと、

バイアス電極を有し、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、

波形周期を有する電気バイアスを前記バイアス電極に周期的に供給するように構成されたバイアス電源と、

を備え、

前記高周波電源は、前記波形周期内の複数の位相期間の各々における前記ソース高周波電力のソース周波数を、先行する前記波形周期内の同一の位相期間における前記ソース周波数に、前記ソース高周波電力の反射の度合いを抑制するためのシフト量と外乱を加えた周波数に設定するように構成されている、

プラズマ処理装置。

[請求項12] ソース高周波電力のソース周波数を制御する方法であって、

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のバイアス

電極に電気バイアスを与える工程であり、該電気バイアスは、波形周期を有し、前記バイアス電極に周期的に与えられる、該工程と、

前記チャンバ内でプラズマを生成するために高周波電源から前記ソース高周波電力を供給する工程と、

前記波形周期内の複数の位相期間の各々における前記ソース高周波電力の前記ソース周波数を設定する工程と、

を含み、

前記ソース周波数を設定する前記工程において、前記波形周期内の複数の位相期間の各々における前記ソース高周波電力の前記ソース周波数は、先行する前記波形周期内の同一の位相期間における前記ソース高周波電力の前記ソース周波数に、前記ソース高周波電力の反射の度合いを抑制するためのシフト量とランダムノイズを加えた周波数に設定される、方法。