

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] 本開示の例示的实施形態は、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] 一つの例示的实施形態において、プラズマ処理装置が提供される。プラズマ処理装置は、チャンバ、基板支持部、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、波形周期を有するバイアスエネルギー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。高周

波電源は、バイアスエネルギーの複数の波形周期の各々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設定するように構成されている。高周波電源は、複数の波形周期のうちm番目の波形周期内のn番目の位相期間におけるソース周波数を、ソース高周波電力の反射の度合いの変化に応じて調整するフィードバックを行うように構成されている。反射の度合いの変化は、複数の波形周期のうちm番目の波形周期の前の二つ以上の波形周期それぞれにおけるn番目の位相期間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特定される。

発明の効果

[0006] 一つの例示的实施形態によれば、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を低減することが可能となる。

図面の簡単な説明

[0007] [図1]一つの例示的实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]一つの例示的实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]バイアスエネルギー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4]バイアスエネルギーと高ソース周波電力のソース周波数の別の例のタイミングチャートである。

[図5]バイアスエネルギーの別の例のタイミングチャートである。

[図6]一つの例示的实施形態に係る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7]バイアスエネルギーとソース高周波電力のソース周波数の更に別の一例のタイミングチャートである。

[図8]一つの例示的实施形態に係るソース高周波電力のソース周波数を決定する方法の流れ図である。

[図9]バイアスエネルギーとソース高周波電力のソース周波数の更に別の一例

のタイミングチャートである。

[図10]バイアスエネルギーとソース高周波電力のソース周波数の更に別の例のタイミングチャートである。

[図11]ソース高周波電力のパワースペクトルの一例を示す図である。

[図12]別の例示的实施形態に係るソース高周波電力のソース周波数を決定する方法の流れ図である。

[図13]整合器の構成の一例を示す図である。

[図14]一つの例示的实施形態に係る最適設定を決定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、種々の例示的实施形態について説明する。

[0009] 一つの例示的实施形態において、プラズマ処理装置が提供される。プラズマ処理装置は、チャンバ、基板支持部、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、波形周期を有するバイアスエネルギー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。高周波電源は、バイアスエネルギーの複数の波形周期の各々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設定するように構成されている。高周波電源は、複数の波形周期のうち m 番目の波形周期内の n 番目の位相期間におけるソース周波数 $f(m, n)$ を、ソース高周波電力の反射の度合いの変化に応じて調整するフィードバックを行うように構成されている。 $f(m, n)$ は、 m 番目の波形周期内の n 番目の位相期間におけるソース周波数である。反射の度合いの変化は、複数の波形周期のうち m 番目の波形周期の前の二つ以上の波形周期それぞれにおける n 番目の位相期間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特定される。

[0010] 二つの以上の波形周期それぞれにおける n 番目の位相期間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、ソース周波数の変更（周波数シフ

ト)と反射の度合いの変化との関係を特定することが可能である。したがって、上記実施形態によれば、ソース高周波電力の反射の度合いの変化に応じて、 m 番目の波形周期内の n 番目の位相期間において用いられるソース周波数を、反射の度合いを低減するように調整することが可能である。また、上記実施形態によれば、バイアスエネルギーが基板支持部のバイアス電極に与えられる複数の波形周期の各々において、高速に反射の度合いを低減することが可能である。

- [0011] 一つの例示的实施形態において、二つ以上の波形周期は、 $(m-M_1)$ 番目の波形周期と $(m-M_2)$ 番目の波形周期を含んでいてもよい。ここで、 M_1 及び M_2 は、 $M_1 > M_2$ を満たす自然数である。
- [0012] 一つの例示的实施形態において、フィードバックは、ソース周波数 $f(m-M_2, n)$ に、ソース周波数 $f(m-M_1, n)$ からの減少及び増加のうち一方の周波数シフトを与えることを含んでいてもよい。一方の周波数シフトにより反射の度合いが低下する場合が生じ得る。この場合に、フィードバックは、 $f(m, n)$ を、 $f(m-M_2, n)$ に対して一方の周波数シフトを有する周波数に設定してもよい。一方の周波数シフトにより得られた $f(m, n)$ を用いることにより反射の度合いパワーレベルが増大した場合には、フィードバックは、ソース周波数 $f(m+M_3, n)$ を、中間の周波数に設定してもよい。中間の周波数は、 $f(m-M_2, n)$ と $f(m, n)$ との間の周波数である。なお、 M_3 は、自然数である。
- [0013] 一つの例示的实施形態において、 $(m+M_3)$ 番目の波形周期内の n 番目の位相期間において上記中間の周波数を用いた場合の反射の度合いが閾値よりも大きくなる場合が生じ得る。この場合には、フィードバックは、ソース周波数 $f(m+M_4, n)$ 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。他方の周波数シフトの量の絶対値は、上記一方の周波数シフトの量の絶対値よりも大きい。なお、 M_4 は、 $M_4 > M_3$ を満たす自然数である。
- [0014] 一つの例示的实施形態において、ソース周波数 $f(m, n)$ を得るために

用いる一方の周波数シフトの量の絶対値は、ソース周波数 $f(m - M_2, n)$ を得るために用いた一方の周波数シフトの量の絶対値よりも大きくてもよい。

- [0015] 一つの例示的实施形態において、フィードバックは、ソース周波数 $f(m - M_2, n)$ に、ソース周波数 $f(m - M_1, n)$ からの減少及び増加のうち一方の周波数シフトを与えることを含んでもよい。一方の周波数シフトにより反射の度合いが増大する場合が生じ得る。この場合に、フィードバックは、 $f(m, n)$ を、 $f(m - M_2, n)$ 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。
- [0016] 一つの例示的实施形態において、バイアスエネルギーは、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ってもよい。或いは、バイアスエネルギーは、当該バイアス周波数の逆数である時間長を各々が有する複数の波形周期の各々においてバイアス電極に与えられる電圧のパルスを含んでもよい。
- [0017] 一つの例示的实施形態において、高周波電源は、複数の波形周期のうち最初の波形周期内の複数の位相期間において予め準備された初期周波数セットに含まれる複数の周波数をそれぞれ用いてもよい。
- [0018] 一つの例示的实施形態において、プラズマ処理装置は、制御部を更に備えていてもよい。
- [0019] 一つの例示的实施形態において、制御部は、各々が上記波形周期である複数の基準周期の同一の位相期間において用いるソース周波数を互いに異なる複数の周波数にそれぞれ設定してもよい。制御部は、当該複数の周波数のうち、複数の位相期間の各々において反射の度合いを最小化する適正周波数を選択することにより、複数の位相期間それぞれのための複数の適正周波数を決定してもよい。制御部は、当該複数の適正周波数を初期周波数セットの複数の周波数としてプラズマ処理装置の記憶部に記憶してもよい。
- [0020] 一つの例示的实施形態において、制御部は、上記波形周期である基準周期においてチャンバ内でプラズマを生成するために、複数の周波数成分を有す

るソース高周波電力を高周波電源に発生させてもよい。制御部は、基準周期内の複数の位相期間の各々における複数の周波数成分の進行波のパワーレベルそれぞれに対する複数の周波数成分の反射波のパワーレベルの比である複数の比を求めて、該複数の比のうちの最小の比を求めてもよい。制御部は、複数の位相期間の各々において複数の周波数成分のうち最小の比をもたらす周波数成分の周波数を特定することにより、複数の位相期間それぞれのための複数の適正周波数を決定してもよい。制御部は、複数の適正周波数を初期周波数セットの複数の周波数としてプラズマ処理装置の記憶部に記憶してもよい。

[0021] 一つの例示的实施形態において、プラズマ処理装置は、整合器を更に備えていてもよい。整合器は、第1の可変コンデンサ及び第2の可変コンデンサを含む。第1の可変コンデンサは、高周波電源とソース高周波電力が供給される高周波電極とを互いに接続する給電路上のノードとグラウンドとの間で接続されている。第2の可変コンデンサは、当該ノードと高周波電極との間で接続されている。整合器は、複数の波形周期のうち最初の波形周期において、予め準備された第1の可変コンデンサ及び第2の可変コンデンサの複数の最適整合器設定のうち、該プラズマ処理装置において行われるプロセスに応じた最適整合器設定を用いてもよい。高周波電源は、最初の波形周期内の複数の位相期間において予め準備された複数の初期周波数セットのうち該プラズマ処理装置において行われる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をそれぞれ用いてもよい。

[0022] 一つの例示的实施形態において、制御部は、上記プロセスの条件の下、第1の可変コンデンサ及び第2の可変コンデンサの複数の整合器設定を順に用いつつ、複数の暫定設定を生成してもよい。複数の暫定設定を生成するために、制御部は、複数の整合器設定の各々の下で、各々が波形周期である複数の基準周期の同一の位相期間において用いるソース周波数を互いに異なる複数の周波数にそれぞれ設定してもよく、当該複数の周波数のうち、複数の位相期間の各々において反射の度合いを最小化する暫定周波数を選択してもよ

い。これにより、制御部は、複数の位相期間それぞれのための複数の暫定周波数を含む暫定周波数セットと複数の整合器設定のうち対応の整合器設定を各々が含む複数の暫定設定を生成してもよい。制御部は、複数の暫定設定のうち反射の度合いを最小化する暫定設定を特定してもよい。制御部は、特定した暫定設定に含まれる整合器設定及び暫定周波数セットを、上記プロセスに応じた最適整合器設定及び初期周波数セットとして、プラズマ処理装置の記憶部に記憶してもよい。

[0023] 一つの例示的实施形態において、制御部は、上記プロセスの条件の下、第1の可変コンデンサ及び第2の可変コンデンサの複数の整合器設定を順に用いつつ、複数の暫定設定を生成してもよい。複数の暫定設定を生成するために、制御部は、(a) 複数の整合器設定の各々の下で、波形周期である基準周期においてチャンバ内でプラズマを生成するために、複数の周波数成分を有するソース高周波電力を前記高周波電源に発生させてもよく、(b) 基準周期内の複数の位相期間の各々における複数の周波数成分の進行波のパワーレベルそれぞれに対する複数の周波数成分の反射波のパワーレベルの比である複数の比を求めて、該複数の比のうちの最小の比を求めてもよく、(c) 複数の位相期間の各々において複数の周波数成分のうち最小の比をもたらす周波数成分の周波数を特定することにより、複数の位相期間それぞれのための複数の暫定周波数を決定してもよい。これにより、制御部は、複数の位相期間それぞれのための複数の暫定周波数を含む暫定周波数セットと複数の整合器設定のうち対応の整合器設定を各々が含む複数の暫定設定を生成してもよい。制御部は、複数の暫定設定のうち、反射の度合いを最小化する暫定設定を特定してもよい。制御部は、特定した暫定設定に含まれる整合器設定及び暫定周波数セットを、上記プロセスに応じた最適整合器設定及び初期周波数セットとして、プラズマ処理装置の記憶部に記憶してもよい。

[0024] 別の例示的实施形態においては、ソース高周波電力のソース周波数を制御する方法が提供される。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のバイアス電極にバイアスエネルギーを与える工程(a)を含

む。バイアスエネルギーは、波形周期を有し、バイアス電極に周期的に与えられる。方法は、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ソース高周波電力を供給する工程（b）を更に含む。方法は、複数の波形周期の各々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設定する工程（c）を更に含む。ソース周波数 $f(m, n)$ は、ソース高周波電力の反射の度合いの変化に応じて調整される。反射の度合いの変化は、 m 番目の波形周期の前の二つ以上の周期それぞれにおける n 番目の位相期間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、特定される。

[0025] 以下、図面を参照して種々の例示的实施形態について詳細に説明する。なお、各図面において同一又は相当の部分に対しては同一の符号を附することとする。

[0026] 図1及び図2は、一つの例示的实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。

[0027] 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。

[0028] 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。また、AC (Alternating Current) プラズマ生成部及びDC (Direct Current) プラズマ生成部を含む、種々のタイプのプラズマ生成部が用いられてもよい。

[0029] 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。

[0030] 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、電源30、及び排気システム40を含む。また、プラズマ処理装置1は、基板支持部11及びガス導入部を含む。ガス導入部は、少なくとも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の筐体とは電氣的に絶縁される。

[0031] 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11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。

- [0032] 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。
- [0033] 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。
- [0034] 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。
- [0035] 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を更に備えている。プラズマ処理装置1は、センサ31s及び制御部30cを更に備えていてもよい。
- [0036] 高周波電源31は、チャンバ(プラズマ処理チャンバ10)内でプラズマを生成するためにソース高周波電力RFを発生するように構成されている。

ソース高周波電力 R F は、例えば、13 MHz 以上、150 MHz 以下のソース周波数を有する。一実施形態において、高周波電源 31 は、高周波信号発生器 31 g 及び増幅器 31 a を含んでもよい。高周波信号発生器 31 g は、高周波信号を発生する。増幅器 31 a は、高周波信号発生器 31 g から入力される高周波信号を増幅することによりソース高周波電力 R F を生成して、ソース高周波電力 R F を出力する。なお、高周波信号発生器 31 g は、プログラム可能なプロセッサ又は F P G A 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。また、高周波信号発生器 31 g と増幅器 31 a との間には、D/A 変換器が接続されていてもよい。

[0037] 高周波電源 31 は、整合器 31 m を介して高周波電極に接続されている。基台 111 e は、一実施形態において高周波電極を構成する。別の実施形態において、高周波電極は、静電チャック 111 c の中に設けられた電極であってもよい。高周波電極は、後述するバイアス電極と共通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。整合器 31 m は、整合回路を含んでいる。整合器 31 m の整合回路は、可変インピーダンスを有する。整合器 31 m の整合回路は、制御部 30 c によって制御される。整合器 31 m 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。

[0038] センサ 31 s は、高周波電源 31 の負荷から戻されるソース高周波電力 R F の反射波を制御部 30 c に出力するように構成されている。センサ 31 s は、高周波電源 31 と整合器 31 m との間で接続されていてもよい。センサ 31 s は、整合器 31 m と高周波電極との間で接続されていてもよい。例えば、センサ 31 s は、整合器 31 m からバイアス電極に向けて延びる電氣的パスと後述の整合器 32 m からバイアス電極に向けて延びる電氣的パスとの合流点とバイアス電極との間で接続されていてもよい。或いは、センサ 31 s は、当該合流点と整合器 31 m との間で接続されていてもよい。センサ 31 s は、例えば方向性結合器を含む。方向性結合器は、高周波電源 31 の負

荷から戻される反射波を出力する。方向性結合器から出力される反射波は、A/D変換によりデジタル信号に変換されて、デジタル化された反射波が、制御部30cにおいて利用される。なお、センサ31sは、整合器31mから分離されたセンサであってもよく、或いは、整合器31mの一部であってもよい。

[0039] バイアス電源32は、バイアス電極に電氣的に接続されている。基台11eは、一実施形態においてバイアス電極を構成する。別の実施形態において、バイアス電極は、静電チャック111cの中に設けられた電極であってもよい。バイアス電源32は、波形周期CYを有するバイアスエネルギーBE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、バイアスエネルギーBEは、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。一実施形態では、複数の波形周期CYの各々は、プラズマ処理装置1において基板Wに対するプロセスが行われているプロセス期間においてバイアス電極に与えられるバイアスエネルギーBEの波形周期である。複数の波形周期CYの各々は、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。複数の波形周期CYの各々の時間長は、バイアス周波数の逆数である。複数の波形周期CYは時間的に順に出現する。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。即ち、波形周期CY(m)は、複数の波形周期CYのうち任意の波形周期を表している。

[0040] ここで、図3及び図4を参照する。図3は、バイアスエネルギー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4は、バイアスエネルギーとソース高周波電力のソース周波数の別の例のタイミングチャートである。図3及び図4に示すように、一実施形態において、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であってもよい。この場合には、図2に示すように、バイアス電源32は、高周波信号発生器32g及び増幅器32aを含んでいてもよい。高周波信号発生器32gは、高周波信号を発生する。増幅器32aは、高周波信号発生器32g

から入力される高周波信号を増幅することによりバイアス高周波電力を生成して、生成したバイアス高周波電力をバイアスエネルギーB Eとしてバイアス電極に供給する。なお、高周波信号発生器3 2 gは、プログラム可能なプロセッサ又はF P G A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。また、高周波信号発生器3 2 gと増幅器3 2 aとの間には、D / A変換器が接続されていてもよい。

[0041] バイアスエネルギーB Eがバイアス高周波電力である場合には、バイアス電源3 2は、整合器3 2 mを介してバイアス電極に接続される。整合器3 2 mは、整合回路を含んでいる。整合器3 2 mの整合回路は、可変インピーダンスを有する。整合器3 2 mの整合回路は、制御部3 0 cによって制御される。整合器3 2 mの整合回路のインピーダンスは、バイアス電源3 2の負荷側のインピーダンスをバイアス電源3 2の出力インピーダンスに整合させるように調整される。

[0042] 図5は、バイアスエネルギーの別の例のタイミングチャートである。図5に示すように、別の実施形態において、バイアスエネルギーB Eは、複数の波形周期C Yの各々においてバイアス電極に与えられる電圧のパルスを含んでいてもよい。バイアスエネルギーB Eとして用いられる電圧のパルスは、図5に示す例のように負の電圧のパルスであってもよく、他の電圧のパルスであってもよい。バイアスエネルギーB Eとして用いられる電圧のパルスは、三角波、矩形波といった波形を有することができる。電圧のパルスは、他の如何なるパルス波形を有していてもよい。バイアスエネルギーB Eとして電圧のパルスが用いられる場合には、図2に示す整合器3 2 mの代わりに、ソース高周波電力R Fを遮断するフィルタが、バイアス電源3 2とバイアス電極との間で接続されていてもよい。

[0043] バイアス電源3 2は、高周波電源3 1と同期されている。このために用いられる同期信号は、バイアス電源3 2から高周波電源3 1に与えられてもよい。或いは、同期信号は、高周波電源3 1からバイアス電源3 2に与えられてもよい。或いは、同期信号は、制御部3 0 cのような別の装置から高周波

電源 3 1 及びバイアス電源 3 2 に与えられてもよい。

[0044] 制御部 3 0 c は、高周波電源 3 1 を制御するように構成されている。制御部 3 0 c は、CPU といったプロセッサから構成され得る。制御部 3 0 c は、整合器 3 1 m の一部であってもよく、高周波電源 3 1 の一部であってもよく、整合器 3 1 m 及び高周波電源 3 1 から分離された制御部であってもよい。或いは、制御部 2 が、制御部 3 0 c を兼ねていてもよい。

[0045] 制御部 3 0 c は、複数の波形周期 CY の各々の中の複数の位相期間 SP の各々におけるソース高周波電力 RF のソース周波数を設定するように構成されている。図 3 及び図 4 に示す例では、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。複数の波形周期 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。即ち、位相期間 SP (n) は、複数の波形周期 CY の各々の中の任意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。以下では、制御部 3 0 c がソース周波数を設定する実施形態について説明する。しかしながら、制御部 3 0 c が高周波電源 3 1 の一部である場合には、高周波電源 3 1 がソース周波数を設定し得る。

[0046] 制御部 3 0 c は、ソース周波数の設定のために以下に説明するフィードバックを行う。フィードバックにおいて、制御部 3 0 c は、位相期間 SP (m, n) におけるソース高周波電力 RF のソース周波数を、ソース高周波電力 RF の反射の度合いの変化に応じて調整する。ソース高周波電力 RF の反射の度合いは、一例では、センサ 3 1 s から出力されるソース高周波電力 RF の反射波のパワーレベル Pr で表される。反射の度合いの変化は、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

S P (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特定される。

- [0047] 二つの以上の波形周期 C Y それぞれにおける位相期間 S P (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、ソース周波数の変更（周波数シフト）とソース高周波電力の反射の度合いの変化との関係を特定することが可能である。したがって、プラズマ処理装置 1 によれば、反射の度合いの変化に応じて、位相期間 S P (m, n) において用いられるソース周波数を、反射の度合いを低減するように調整することが可能である。また、プラズマ処理装置 1 によれば、バイアスエネルギー B E が基板支持部 11 のバイアス電極に与えられる複数の波形周期 C Y の各々において、高速に反射の度合いを低減することが可能である。
- [0048] 一実施形態において、波形周期 C Y (m) の前の二つ以上の波形周期 C Y は、波形周期 C Y (m - M₁) 及び波形周期 C Y (m - M₂) を含む。ここで、M₁ 及び M₂ は、M₁ > M₂ を満たす自然数である。
- [0049] 一実施形態においては、波形周期 C Y (m - M₁) は、波形周期 C Y (m - 2Q) であり、波形周期 C Y (m - M₂) は、波形周期 C Y (m - Q) である。図 3 に示す例では、「Q」及び「M₂」は「1」であり、「2Q」及び「M₁」は「2」である。「Q」は、2 以上の整数であってもよい。
- [0050] フィードバックにおいて、制御部 30c は、ソース周波数 f (m - M₂, n) に、ソース周波数 f (m - M₁, n) 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 S P (m, n) で用いられるソース高周波電力 R F のソース周波数を表す。f (m, n) は、 $f (m, n) = f (m - M_2, n) + \Delta (m, n)$ 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。
- [0051] なお、図 3 及び図 4 において、波形周期 C Y (m - M₁) における複数の位

相期間 $S P$ のそれぞれにおけるソース周波数は、互いに同一であり、 f_0 であるが、互いに異なってもよい。また、図 3 及び図 4 において、波形周期 $C Y (m - M_2)$ における複数の位相期間 $S P$ のそれぞれにおけるソース周波数は、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。

[0052] フィードバックにおいて、一方の周波数シフトにより得られたソース周波数 $f (m - M_2, n)$ を用いることにより反射の度合いが低下した場合には、制御部 30c は、ソース周波数 $f (m, n)$ を、ソース周波数 $f (m - M_2, n)$ 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。例えば、一方の周波数シフトによりパワーレベル $P_r (m - M_2, n)$ がパワーレベル $P_r (m - M_1, n)$ から減少した場合には、制御部 30c は、ソース周波数 $f (m, n)$ を、ソース周波数 $f (m - M_2, n)$ 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、 $P_r (m, n)$ は、位相期間 $S P (m, n)$ におけるソース高周波電力 $R F$ の反射波のパワーレベル P_r を表している。

[0053] 一実施形態において、位相期間 $S P (m, n)$ における一方の周波数シフトの量 $\Delta (m, n)$ は、位相期間 $S P (m - M_2, n)$ における一方の周波数シフトの量 $\Delta (m - M_2, n)$ と同一であってもよい。即ち、周波数シフトの量 $\Delta (m, n)$ の絶対値は、周波数シフトの量 $\Delta (m - M_2, n)$ の絶対値と同一であってもよい。或いは、周波数シフトの量 $\Delta (m, n)$ の絶対値は、周波数シフトの量 $\Delta (m - M_2, n)$ の絶対値よりも大きくてもよい。或いは、周波数シフトの量 $\Delta (m, n)$ の絶対値は、位相期間 $S P (m - M_2, n)$ における反射の度合い（例えば、反射波のパワーレベル $P_r (m - Q, n)$ ）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 $\Delta (m, n)$ の絶対値は、反射の度合い（例えば、反射波のパワーレベル $P_r (m - Q, n)$ ）の関数により決定されてもよい。

[0054] フィードバックにおいては、一方の周波数シフトによって得られたソース周波数 $f (m - M_2, n)$ を用いることにより反射の度合いが増大する場合が

生じ得る。例えば、一方の周波数シフトにより反射波のパワーレベル $P_r(m-M_2, n)$ が反射波のパワーレベル $P_r(m-M_1, n)$ から増加する場合が生じ得る。この場合には、制御部 30c は、ソース周波数 $f(m, n)$ を、ソース周波数 $f(m-M_2, n)$ 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、波形周期 $C_Y(m)$ の前の二つ以上の波形周期の各々の位相期間 $SP(n)$ のソース周波数が、その前の波形周期の位相期間 $SP(n)$ のソース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、当該二つ以上の波形周期の位相期間 $SP(n)$ それぞれの反射の度合い（例えば、反射波のパワーレベル P_r ）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、波形周期 $C_Y(m)$ の位相期間 $SP(n)$ のソース周波数に与えられてもよい。例えば、波形周期 $C_Y(m)$ の位相期間 $SP(n)$ のソース周波数は、当該二つ以上の波形周期のうち最も早い波形周期のソース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。

[0055] また、フィードバックにおいては、一方の周波数シフトにより得られたソース周波数 $f(m, n)$ を用いた場合に、反射の度合いが増大する場合が生じ得る。例えば、一方の周波数シフトにより反射波のパワーレベル $P_r(m, n)$ が反射波のパワーレベル $P_r(m-M_2, n)$ から増加する場合が生じ得る。この場合には、制御部 30c は、波形周期 $C_Y(m+M_3)$ 内の位相期間 $SP(n)$ におけるソース周波数を中間の周波数に設定してもよい。波形周期 $C_Y(m+M_3)$ は、波形周期 $C_Y(m)$ の後の波形周期である。 M_3 は、自然数であり、 $M_3=M_2$ を満たしてもよい。位相期間 $SP(m+M_3, n)$ において設定され得る中間の周波数は、 $f(m-M_2, n)$ と $f(m, n)$ との間の周波数であり、 $f(m-M_2, n)$ と $f(m, n)$ の平均値であってもよい。

[0056] また、フィードバックにおいては、位相期間 $SP(m+M_3, n)$ において中間の周波数を用いた場合の反射の度合い（例えば、パワーレベル P_r ）が所定の閾値よりも大きくなる場合が生じ得る。この場合に、制御部 30c は

、波形周期 $CY(m+M_4)$ 内の位相期間 $SP(n)$ におけるソース周波数を、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。波形周期 $CY(m+M_4)$ は、波形周期 $CY(m+M_3)$ の後の波形周期である。 M_4 は、自然数であり、 $M_4=M_1$ を満たしてもよい。閾値は、予め定められている。他方の周波数シフトの量 $\Delta(m+M_4, n)$ の絶対値は、一方の周波数シフトの量 $\Delta(m, n)$ の絶対値よりも大きい。この場合には、反射の度合い（例えば、反射波のパワーレベル P_r ）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、複数の波形周期 CY の各々における複数の位相期間 SP のそれぞれのための閾値は、互いに同一であってもよく、異なってもよい。

[0057] プラズマ処理装置 1 は、各位相期間における反射の度合いとして、各位相期間における測定値の代表値を用いてもよい。代表値は、各位相期間における測定値の平均値又は最大値であってもよい。また、プラズマ処理装置 1 は、上述した反射波のパワーレベル P_r 、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 P_r の比の値（以下、「反射率」という）、電圧 V と電流 I との間の位相差 θ 、及び高周波電源 31 の負荷側のインピーダンス Z のうち少なくとも一つを測定値として用いてもよい。

[0058] プラズマ処理装置 1 は、上述したセンサ 31s と共に、或いは、センサ 31s に代えて、 V/I センサを備えていてもよい。 V/I センサは、高周波電源 31 と高周波電極との間のソース高周波電力 RF の給電路における電圧 V 及び電流 I を測定する。 V/I センサは、高周波電源 31 と整合器 31m との間で接続されていてもよい。 V/I センサは、整合器 31m と高周波電極との間で接続されていてもよい。例えば、 V/I センサは、整合器 31m からバイアス電極に向けて延びる電氣的パスと整合器 32m からバイアス電極に向けて延びる電氣的パスとの合流点とバイアス電極との間で接続されていてもよい。或いは、 V/I センサは、当該合流点と整合器 31m との間で接続されていてもよい。 V/I センサは、整合器 31m の一部であってもよい。

[0059] 各波形周期 CY の複数の位相期間 SP の各々のためのソース周波数は、高

周波電源 31 の負荷側のインピーダンスを整合ポイントに近づけるように、電圧 V 、電流 I 、及び電圧 V と電流 I との間の位相差 θ に応じて変更されてもよい。また、整合器 31 m の可変インピーダンスが、高周波電源 31 の負荷側のインピーダンスを整合ポイントに近づけるように、電圧 V 、電流 I 、及び位相差 θ に応じて調整されてもよい。なお、ソース高周波電力 R_F の給電路の特性インピーダンスが $50\ \Omega$ である場合には、整合ポイントの実抵抗成分は $50\ \Omega$ であり、位相差 θ は 0° である。

[0060] 以下、図 6 を参照して、一つの例示的实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 6 は、一つの例示的实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 6 に示す方法 MT は、工程 STa 又は工程 STb で開始する。

[0061] 工程 STa では、バイアスエネルギー BE がバイアス電極に供給される。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 R_F が、チャンバ内でプラズマを生成するために高周波電源（例えば高周波電源 31）から供給される。

[0062] 工程 STc では、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 R_F のソース周波数が、設定される。具体的に、工程 STc では、波形周期 $CY(m)$ 内の位相期間 $SP(m, n)$ におけるソース高周波電力 R_F のソース周波数 $f(m, n)$ は、ソース高周波電力 R_F の反射の度合い（例えば、反射波のパワーレベル P_r ）の変化に応じて、調整される。反射の度合い（例えば、反射波のパワーレベル P_r ）の変化は、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、特定される。複数の波形周期 CY の各々の中の複数の位相期間 SP において用いられるソース周波数の調整に関しては、上述した制御部 30c によって行われるソース周波数の調整の説明を参照されたい。

[0063] プラズマ処理装置 1 において、高周波電源 31 は、予め準備された初期周波数セットに含まれる複数の周波数をそれぞれ用いてもよい。初期周波数セ

ットに含まれる複数の周波数は、複数の波形周期CYのうち最初の波形周期CY（１）内の複数の位相期間SPでそれぞれ用いられる。

[0064] 以下、初期周波数セットの決定に関する幾つかの実施形態について説明する。

[0065] 以下、図7を参照する。図7は、バイアスエネルギーとソース高周波電力のソース周波数の更に別の一例のタイミングチャートである。一実施形態において、制御部30cは、バイアスエネルギーBEの複数の基準周期RCYの各々においてバイアスエネルギーBEをバイアス電極に与えるように、バイアス電源32を制御する。複数の基準周期RCYの各々は、上述のバイアス周波数で規定される周期であり、複数の波形周期CYの各々と同じ時間長を有する。即ち、複数の基準周期RCYの各々は、バイアスエネルギーBEの波形周期であり、バイアス周波数の逆数の時間長を有する。図7に示す例では、複数の基準周期RCYの数は、Kであり、基準周期RCY（１）～RCY（K）を含む。複数の基準周期RCYは、複数の波形周期CYの前に出現し、且つ、時間的に順に出現する。上述したように、一実施形態では、複数の波形周期CYの各々は、プラズマ処理装置1において基板Wに対するプロセスが行われているプロセス期間においてバイアス電極に与えられるバイアスエネルギーBEの波形周期である。複数の基準周期RCYの各々は、プロセス期間に対して事前の準備期間において初期周波数セットを決定するためにバイアス電極に与えられるバイアスエネルギーBEの波形周期である。準備期間においては、初期周波数セットは、プロセス期間において行われるプロセスの条件の下で決定され得る。

[0066] 制御部30cは、複数の基準周期RCYの各々において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RFを発生するよう、高周波電源31を制御する。複数の波形周期CYにおいては、基板Wが基板支持部11上で載置された状態で、プラズマが生成され得る。複数の基準周期RCYにおいては、基板Wは、基板支持部11上に載置されていてもよく、載置されていなくてもよい。

[0067] 図7に示すように、複数の基準周期RCY及び複数の波形周期CYの各々は、複数の位相期間SPを含む。即ち、複数の基準周期RCY及び複数の波形周期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。複数の基準周期RCY及び複数の波形周期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、複数の基準周期RCY及び複数の波形周期CYの各々の位相期間SP(1)～SP(N)のうち、n番目の位相期間を表す。

[0068] 制御部30cは、複数の基準周期RCYの同一の位相期間SP(n)において用いるソース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の各々においてソース高周波電力RFの反射の度合い（例えば、反射波のパワーレベルPr）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それぞれのためのソース高周波電力の複数の適正周波数を決定する。図3に示す例では、基準周期RCY(1)～RCY(K)の各々におけるソース周波数は、一定の周波数に設定され、基準周期RCY(1)～RCY(K)のうち他の基準周期におけるソース高周波電力RFのソース周波数とは異なる周波数に設定される。そして、基準周期RCY(1)～RCY(K)それぞれの位相期間SP(1)～SP(N)の反射の度合い（例えば、パワーレベルPr）が決定される。そして、取得された反射の度合いから、位相期間SP(1)～SP(N)のそれぞれにおける反射の度合いを最小化する位相期間SP(1)～SP(N)それぞれのためのソース高周波電力RFの適正周波数が、選択される。位相期間SP(1)～SP(N)それぞれのための複数の適正周波数は、初期周波数セットの複数の周波数として、プラズマ処理装置1の記憶部に記憶される。

[0069] プラズマ処理装置1では、複数の位相期間SPにおいて反射の度合いを抑制するためのソース高周波電力RFの複数の適正周波数が求められる。した

がって、プラズマ処理装置 1 によれば、バイアスエネルギー B E がバイアス電極に与えられる複数の波形周期 C Y の各々において、ソース高周波電力の反射の度合いを低減することが可能である。

[0070] 一実施形態において、制御部 3 0 c は、複数の基準周期 R C Y の後に、複数の波形周期 C Y のうちの少なくとも一つの波形周期内の複数の位相期間 S P のそれぞれのソース周波数として、初期周波数セットの複数の周波数、即ち上述の複数の適正周波数を用いるよう、高周波電源 3 1 を制御してもよい。即ち、制御部 3 0 c は、複数の波形周期 C Y のうち少なくとも一つの波形周期内の位相期間 S P (n) においては、複数の適正周波数のうち位相期間 S P (n) 用の適正周波数を用いるよう、高周波電源 3 1 を制御し得る。複数の適正周波数は、全ての波形周期 C Y の内の各々において複数の位相期間 S P それぞれのためのソース周波数として用いられてもよい。

[0071] 複数の適正周波数、即ち初期周波数セットの複数の周波数は、複数の波形周期 C Y のうち最初の波形周期 C Y (1) 内の複数の位相期間 S P でそれぞれ用いられてもよい。そして、複数の波形周期 C Y においては、上述したフィードバックが行われてもよい。

[0072] 以下、図 8 を参照して、一つの例示的实施形態に係るソース高周波電力のソース周波数を決定する方法について説明する。図 8 は、一つの例示的实施形態に係るソース高周波電力のソース周波数を決定する方法の流れ図である。図 8 に示す方法 M T A は、工程 S T A a 又は工程 S T A b で開始する。

[0073] 工程 S T A a では、バイアスエネルギー B E が複数の基準周期 R C Y の各々においてバイアス電極に供給される。工程 S T A b は、工程 S T A a と並列して行われる。工程 S T A b では、ソース高周波電力 R F が、複数の基準周期 R C Y の各々において、チャンバ内でプラズマを生成するために高周波電源（例えば高周波電源 3 1 ）から供給される。工程 S T A b では、複数の基準周期 R C Y の同一の位相期間 S P (n) において用いられるソース周波数が、互いに異なる複数の周波数にそれぞれ設定される。

[0074] 工程 S T A c では、複数の位相期間 S P それぞれのためのソース高周波電

力 R F の複数の適正周波数が決定される。具体的に、工程 S T A c では、複数の基準周期 R C Y の同一の位相期間 S P (n) において用いられたソース周波数のうち、ソース高周波電力 R F の反射の度合い（例えば、反射波のパワーレベル）を最小化する適正周波数が選択される。

[0075] 方法 M T は、工程 S T A d 及び A e を更に含んでもよい。工程 S T A d では、複数の基準周期 R C Y の後の複数の波形周期 C Y の各々においてバイアスエネルギーがバイアス電極に与えられる。工程 S T A e は、工程 S T A d と少なくとも部分的に並行して行われる。工程 S T A e では、ソース高周波電力 R F が、複数の波形周期 C Y の各々においてチャンバ内でプラズマを生成するために高周波電源（例えば高周波電源 3 1）から供給される。ソース高周波電力 R F のソース周波数は、複数の波形周期 C Y のうち少なくとも一つ又は全ての各々の中の複数の位相期間 S P において、初期周波数セットの複数の周波数、即ち複数の適正周波数にそれぞれ設定される。

[0076] なお、方法 M T A においては、複数の適正周波数、即ち初期周波数セットの複数の周波数は、複数の波形周期 C Y のうち最初の波形周期 C Y (1) 内の複数の位相期間 S P でそれぞれ用いられてもよい。そして、複数の波形周期 C Y においては、上述したフィードバックが行われてもよい。

[0077] 以下、図 9 及び図 1 0 を参照する。図 9 及び図 1 0 の各々は、バイアスエネルギーとソース高周波電力のソース周波数の更に別の一例のタイミングチャートである。一実施形態において、制御部 3 0 c は、バイアスエネルギー B E の基準周期 R C Y においてチャンバ内でプラズマを生成するために、複数の周波数成分を有するソース高周波電力 R F を発生するよう、高周波電源 3 1 を制御する。基準周期 R C Y は、複数の波形周期 C Y の前の波形周期である。一実施形態では、基準周期 R C Y は、上述のプロセス期間に対して事前の準備期間において初期周波数セットを決定するためにバイアス電極に与えられるバイアスエネルギー B E の波形周期である。準備期間においては、初期周波数セットは、プロセス期間において行われるプロセスの条件の下で決定され得る。基準周期 R C Y は、上述のバイアス周波数で規定される周期

であり、複数の波形周期 CY の各々と同じ時間長を有する。即ち、基準周期 RCY は、バイアスエネルギー BE の波形周期であり、バイアス周波数の逆数の時間長を有する。バイアスエネルギー BE は、複数の波形周期 CY の各々の場合と同様に、基準周期 RCY においてもバイアス電極に与えられる。複数の波形周期 CY においては、基板 W が基板支持部 11 上で載置された状態で、プラズマが生成され得る。基準周期 RCY においては、基板 W は、基板支持部 11 上に載置されていてもよく、載置されていなくてもよい。

[0078] 図11は、ソース高周波電力のパワースペクトルの一例を示す図である。

図11において、横軸は周波数を示しており、縦軸はソース高周波電力の複数の周波数成分の規格化されたパワーレベルを示している。基準周期 RCY において用いられるソース高周波電力 RF は、基本周波数 f_0 を有する周波数成分及び基本周波数 f_0 とは異なる周波数をそれぞれ有する複数の周波数成分を含んでいる。複数の周波数成分の各々のパワーレベルは、基本周波数 f_0 を有する周波数成分のパワーレベルよりも低くてもよい。一実施形態において、複数の周波数成分の各々のパワーレベルは、基本周波数 f_0 を有する周波数成分のパワーレベルの $1/10$ 以下であってもよい。一実施形態において、基本周波数 f_0 は、複数の周波数成分それぞれの複数の周波数のうち中心の周波数であってもよい。複数の周波数成分それぞれの複数の周波数の間隔は、一定であってもよく、異なってもよい。一実施形態において、複数の周波数成分それぞれの複数の周波数の間隔は、後述する周波数シフトの量よりも小さい。

[0079] 図9及び図10に示すように、基準周期 RCY 及び複数の波形周期 CY の各々は、複数の位相期間 SP を含む。即ち、基準周期 RCY 及び複数の波形周期 CY の各々は、 N 個の位相期間 $SP(1) \sim SP(N)$ に分割されている。 N は、2以上の整数である。基準周期 RCY 及び複数の波形周期 CY の各々は、 N 個の位相期間 $SP(1) \sim SP(N)$ に等分割されていてもよい。以下の説明においては、位相期間 $SP(n)$ は、基準周期 RCY 及び複数の波形周期 CY の各々の位相期間 $SP(1) \sim SP(N)$ のうち、 n 番目の

位相期間を表す。

- [0080] 制御部30cは、基準周期RCY内の複数の位相期間SP(1)～SP(n)の各々における複数の周波数成分の進行波のパワーレベルPfそれぞれに対する複数の周波数成分の反射波のパワーレベルPrの比である複数の比を求める。制御部30cは、センサ31sによって出力された反射波に対するスペクトル解析により、複数の周波数成分それぞれの反射波のパワーレベルPrを求めることができる。一例では、スペクトル解析は、高速フーリエ変換又は離散フーリエ変換を用いて行われ得る。制御部30cは、複数の比のうちの最小の比を求める。制御部30cは、複数の位相期間SPの各々において複数の周波数成分のうち最小の比をもたらす周波数成分の周波数である適正周波数を特定することにより、複数の位相期間SPそれぞれのためのソース高周波電力RFの複数の適正周波数を決定する。位相期間SP(1)～SP(N)それぞれのための複数の適正周波数は、初期周波数セットの複数の周波数として、プラズマ処理装置1の記憶部に記憶される。
- [0081] プラズマ処理装置1によれば、複数の周波数成分を有するソース高周波電力RFを基準周期RCY内で用いることにより、複数の位相期間SPにおいて反射の度合いを低減するために用いるソース高周波電力RFの複数の適正周波数を、短時間で決定することができる。したがって、バイアスエネルギーBEがバイアス電極に与えられる複数の波形周期の各々において、ソース高周波電力RFの反射の度合いを低減することが可能となる。
- [0082] 一実施形態では、複数の適正周波数、即ち初期周波数セットの複数の周波数は、複数の波形周期CYのうち最初の波形周期CY(1)内の複数の位相期間SPでそれぞれ用いられてもよい。そして、複数の波形周期CYにおいては、上述したフィードバックが行われてもよい。
- [0083] かかるプラズマ処理装置1は、上述の周波数シフトを用いることにより、反射の度合いを低減するように、複数の波形周期CYの各々の中の複数の位相期間SPの各々において用いるソース周波数を微調することが可能である。

- [0084] 以下、図 1 2 を参照して、一つの例示的实施形態に係るソース高周波電力のソース周波数を決定する方法について説明する。図 1 2 は、別の例示的实施形態に係るソース高周波電力のソース周波数を決定する方法の流れ図である。図 1 2 に示す方法 M T B は、工程 S T B a 又は工程 S T B b で開始する。
- [0085] 工程 S T B a では、バイアスエネルギー B E が基準周期 R C Y においてバイアス電極に供給される。工程 S T B b は、工程 S T B a と並列して行われる。工程 S T B b では、ソース高周波電力 R F が、基準周期 R C Y において、チャンバ内でプラズマを生成するために高周波電源（例えば高周波電源 3 1）から供給される。基準周期 R C Y において供給されるソース高周波電力 R F は、上述したように複数の周波数成分を含む。
- [0086] 工程 S T B c では、上述した複数の比が求められる。複数の比は、上述したように、基準周期 R C Y 内の複数の位相期間 S P の各々における複数の周波数成分の進行波のパワーレベルそれぞれに対する複数の周波数成分の反射波のパワーレベルの比である。工程 S T B d では、複数の比のうち最小の比が求められる。最小の比は、基準周期 R C Y 内の複数の位相期間 S P の各々について求められる。
- [0087] 工程 S T B e では、上述したように複数の位相期間 S P (1) ~ S P (N) それぞれのためのソース高周波電力 R F の複数の適正周波数が決定される。複数の適正周波数は、複数の位相期間 S P (1) ~ S P (N) の各々において複数の周波数成分のうち最小の比をもたらす周波数成分の周波数を特定することにより、決定される。
- [0088] 方法 M T B は、工程 S T B f、工程 S T B g、及び工程 S T B h を更に含んでもよい。工程 S T B f では、基準周期 R C Y の後の複数の波形周期 C Y の各々においてバイアスエネルギーがバイアス電極に与えられる。工程 S T B g は、工程 S T B f と並行して行われる。工程 S T B g では、ソース高周波電力 R F が、チャンバ内でプラズマを生成するために高周波電源（例えば高周波電源 3 1）から供給される。工程 S T B g では、複数の波形周期

C Yのうちの少なくとも一つの波形周期内の複数の位相期間S Pのそれぞれのソース高周波電力R Fのソース周波数として、初期周波数セットの複数の周波数、即ち複数の適正周波数が用いられる。少なくとも一つの波形周期は、複数の波形周期C Yのうち最初の波形周期C Y（1）であり得る。

[0089] 工程S T B hでは、複数の波形周期C Yのうち上記の少なくとも一つの波形周期の後の波形周期内の複数の位相期間S Pの各々においてソース周波数が設定される。即ち、工程S T B hでは、上述のフィードバックが行われる。

[0090] なお、プラズマ処理装置1は、複数のプロセスの各々の条件の下で上述した初期周波数セットを作成することにより、複数のプロセスにそれぞれ対応した複数の初期周波数セットを作成してもよい。プラズマ処理装置1は、複数のプロセスそれぞれの識別情報に対応付けて複数の初期周波数セットをその記憶部に記憶してもよい。プラズマ処理装置1は、実行するプロセスに対応する初期周波数セットを複数の初期周波数セットから選択して、選択した初期周波数セットを上述したように用いてもよい。

[0091] 一実施形態において、プラズマ処理装置1は、複数のプロセスのうち実行するプロセスに応じた最適設定を、予め準備された複数の最適設定から選択して、選択した最適設定を用いてもよい。複数の最適設定の各々は、整合器31mの最適整合器設定及び初期周波数セットを含む。なお、複数の最適設定はそれぞれ、複数のプロセスの識別情報に対応付けてプラズマ処理装置1の記憶部に記憶されていてもよい。

[0092] 図13は、整合器の構成の一例を示す図である。図13に示すように、整合器31m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を含んでもよい。第1の可変コンデンサ331は、ノード333とグラウ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R F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 C_1 及び第 2 の可変コンデンサ 332 のキャパシタンス C_2 は、例えば制御部 2 又は制御部 30c によって制御され得る。整合器 31m の最適設定は、第 1 の可変コンデンサ 331 及び第 2 の可変コンデンサ 332 それぞれの可変値を含む。第 1 の可変コンデンサ 331 の可変値は、キャパシタンス C_1 又はキャパシタンス C_1 を決定するポジションである。第 2 の可変コンデンサ 332 の可変値は、例えば、キャパシタンス C_2 又はキャパシタンス C_2 を決定するポジションである。

[0093] 一実施形態において、整合器 31m は、予め準備された複数の最適整合器設定のうち、プラズマ処理装置 1 において行われるプロセスに応じた最適整合器設定を用いて、最初の波形周期 $CY(1)$ における第 1 の可変コンデンサ 331 及び第 2 の可変コンデンサ 332 それぞれの可変値を設定する。最適整合器設定は、上述のように選択された最適設定に含まれている。また、高周波電源 31 は、最初の波形周期 $CY(1)$ 内の複数の位相期間 SP において予め準備された複数の初期周波数セットのうちプラズマ処理装置 1 において行われる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をそれぞれ用いてもよい。初期周波数セットは、上述のように選択された最適設定に含まれている。

[0094] 一実施形態において、上述のプロセス期間は、複数の波形周期 CY の前又は直前に着火期間を含んでもよい。着火期間においては、バイアスエネルギー BE が周期的にバイアス電極に供給され、固定されたソース周波数を有するソース高周波電力 RF が高周波電極に供給される。着火期間におけるソース周波数は、プラズマの着火に適した周波数として事前に決定されている。着火期間においては、第 1 の可変コンデンサ 331 及び第 2 の可変コンデンサ 332 それぞれの可変値は、それらの初期値から最適整合器設定に近づけられる。

[0095] 以下、図 14 を参照しつつ、最適設定の決定に関する幾つかの実施形態について説明する。図 14 は、一つの例示的实施形態に係る最適設定を決定する方法の流れ図である。図 14 に示す方法 MTC は、新たなプロセスのレシ

ピがプラズマ処理装置 1 の記憶部に登録される度に、行われる。

- [0096] 方法 M T C の工程 S T C a において、制御部 3 0 c は、プロセスの条件の下で、第 1 の可変コンデンサ 3 3 1 及び第 2 の可変コンデンサ 3 3 2 の複数の整合器設定を順に用いつつ、複数の暫定設定を生成する。工程 S T C a は、工程 S T C a 1 及び工程 S T C a 2 を含む。
- [0097] 工程 S T C a 1 では、第 1 の可変コンデンサ 3 3 1 及び第 2 の可変コンデンサ 3 3 2 それぞれの可変値が、複数の整合器設定のうち未使用の整合器設定に含まれるそれぞれの値に設定される。なお、方法 M T C においては、複数の整合器設定において、第 1 の可変コンデンサ 3 3 1 及び第 2 の可変コンデンサ 3 3 2 の各々の可変値は離散的に設定される。方法 M T C における第 1 の可変コンデンサ 3 3 1 及び第 2 の可変コンデンサ 3 3 2 の各々の可変値の離散幅は、プロセスのレシピにおいて指定されてもよい。
- [0098] 工程 S T C a 2 では、複数の暫定周波数を含む暫定周波数セットが決定される。一実施形態においては、制御部 3 0 c は、方法 M T A の工程 S T A a ～工程 S T A c を行うことにより得られる複数の適正周波数を、複数の暫定周波数として含む暫定周波数セットを生成してもよい。或いは、工程 S T C a 2 では、方法 M T B の工程 S T B a ～工程 S T e を行うことにより得られる複数の適正周波数を、複数の暫定周波数として含む暫定周波数セットを生成する。制御部 3 0 c は、生成した暫定的周波数セットと現在の整合器設定を含む暫定設定を生成する。
- [0099] 制御部 3 0 c は、工程 S T C J において、停止条件が満たされているか否かを判定する。停止条件は、複数の整合器設定のうち未使用の整合器設定がない場合に満たされる。複数の整合器設定のうち未使用の整合器設定がある場合には、制御部 3 0 c は、工程 S T C a 1 に戻って、未使用の整合器設定を用いる。そして、制御部 3 0 c は、工程 S T C a 2 を実行する。
- [0100] 工程 S T C J において停止条件が満たされていると判定されると、複数の暫定設定が得られる。そして、制御部 3 0 c は、工程 S T C b において、複数の暫定設定のうち波形周期におけるソース高周波電力 R F の反射の度合い

を最小化する暫定設定を特定する。反射の度合いとしては、波形周期における平均値（例えば、反射波のパワーレベル P_r の平均値）が用いられ得る。制御部30cは、特定した暫定設定に含まれる整合器設定及び暫定周波数セットを、上記プロセスに応じた最適整合器設定及び初期周波数セットとして、プラズマ処理装置1の記憶部に記憶する。即ち、制御部30cは、特定した暫定設定に含まれる整合器設定及び暫定周波数セットを、上記プロセスに応じた最適整合器設定及び初期周波数セットを含む最適設定として、プラズマ処理装置1の記憶部に記憶する。

[0101] 以上、種々の例示的实施形態について説明してきたが、上述した例示的实施形態に限定されることなく、様々な追加、省略、置換、及び変更がなされてもよい。また、異なる実施形態における要素を組み合わせることで他の実施形態を形成することが可能である。

[0102] 上述したように、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、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RF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、調整される。

[0103] また、位相期間SP(m, n)におけるソース高周波電力RFのソース周波数は、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得られる二つ以上の反射の度合い（例えば、パワーレベル P_r ）から、反射の度合いを最小化する周波数として求められてもよい。反射の度合いを最小化する周波数は、当該互いに異なる周波数のそれぞれと対応の反射の度合いとを用いた最小自乗化法により求められてもよい。

[0104] また、本開示は、以下の更なる実施形態EA1～EA8、EB1～EB4、及びEC1～EC13を含む。

[0105] [E A 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高周波電力を発生するように構成された高周波電源と、
バイアス周波数で規定される複数の周期の各々においてバイアスエネルギーを前記バイアス電極に与えるように構成されたバイアス電源と、
前記高周波電源の負荷から戻される前記高周波電力の反射波を出力するように構成されたセンサと、
前記高周波電源を制御するように構成された制御部と、
を備え、
前記制御部は、
前記複数の周期の各々の中の複数の位相期間の各々における前記高周波電力の周波数を設定するように構成されており、
前記複数の周期のうち m 番目の周期内の n 番目の位相期間における前記高周波電力の周波数を、前記複数の周期のうち該 m 番目の周期の前の二つ以上の周期それぞれにおける対応の位相期間において互いに異なる前記高周波電力の周波数を用いた場合に前記センサから出力される前記反射波のパワーレベルの変化に応じて、調整するように構成されている、
プラズマ処理装置。

[E A 2]

前記二つ以上の周期は、第 1 の周期と該第 1 の周期の後の第 2 の周期を含み、
前記制御部は、前記第 2 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数に、前記第 1 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数からの減少及び増加のうち一方の周波数シフトを与えることにより前記反射波のパワーレベルが減少した場合に、前記 m 番目の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数

を、前記第2の周期内の前記n番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数に対して前記一方の周波数シフトを有する周波数に設定するように構成されている、実施形態E A 1のプラズマ処理装置。

[E A 3]

前記制御部は、前記m番目の周期内の前記n番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数を、前記第2の周期内の前記n番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数に対して前記一方の周波数シフトを有する前記周波数に設定することにより、前記反射波のパワーレベルが増加した場合には、前記複数の周期のうち前記m番目の周期の後の第3の周期内の前記n番目の位相期間における前記高周波電力の周波数を、前記第2の周期内の前記n番目の位相期間における前記高周波電力の周波数と前記m番目の周期内の前記n番目の位相期間における前記高周波電力の周波数との間の中間の周波数に設定するように構成されている、実施形態E A 2のプラズマ処理装置。

[E A 4]

前記制御部は、前記第3の周期内の前記n番目の位相期間において前記中間の周波数を用いた場合の前記反射波のパワーレベルが閾値よりも大きい場合に、前記複数の周期のうち前記第3の周期の後の第4の周期内の前記n番目の位相期間における前記高周波電力の周波数を、前記一方の周波数シフトの量の絶対値よりも大きい絶対値の量を有する他方の周波数シフトを前記中間の周波数に対して有する周波数に設定するように構成されている、実施形態E A 3のプラズマ処理装置。

[E A 5]

前記m番目の周期内の前記n番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数の前記一方の周波数シフトの量の絶対値は、前記第2の周期内の前記n番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数の前記一方の周波数シフトの量の絶対値よりも大きい、実施形態E A 2のプラズマ処理装置。

[E A 6]

前記二つ以上の周期は、第 1 の周期と該第 1 の周期の後の第 2 の周期を含み、

前記制御部は、前記第 2 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数に、前記第 1 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数からの減少及び増加のうち一方の周波数シフトを与えることにより前記反射波のパワーレベルが増加した場合に、前記 m 番目の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数を、前記第 2 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記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するように構成されている、

実施形態 E A 1 のプラズマ処理装置。

[E A 7]

前記バイアスエネルギーは、前記バイアス周波数を有する高周波電力であるか、前記複数の周期の各々において前記バイアス電極に与えられる電圧のパルスを含む、実施形態 E A 1 ～E A 6 の何れかのプラズマ処理装置。

[E A 8]

高周波電力の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バイアスエネルギーを与える工程であり、該バイアスエネルギーは、バイアス周波数で規定される複数の周期の各々において前記バイアス電極に与えられる、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高周波電力を供給する工程と、

前記高周波電源に対して、前記複数の周期の各々の中の複数の位相期間の各々における前記高周波電力の周波数を設定する工程と、

を含み、

前記複数の周期のうち m 番目の周期内の n 番目の位相期間における前記高周波電力の周波数が、前記複数の周期のうち該 m 番目の周期の前の二つ以上

の周期それぞれにおける対応の位相期間において互いに異なる前記高周波電力の周波数を用いた場合の前記高周波電力の反射波のパワーレベルの変化に応じて、調整される、方法。

[E B 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高周波電力を発生するように構成された高周波電源と、

バイアス周波数で規定される複数の周期の各々においてバイアスエネルギーを前記バイアス電極に与えるように構成されたバイアス電源と、

前記高周波電源の負荷から戻される前記高周波電力の反射波を出力するように構成されたセンサと、

前記バイアス電源及び前記高周波電源を制御するように構成された制御部と、

を備え、

前記制御部は、

各々が複数の位相期間を含み前記バイアス周波数で規定される複数の基準周期の各々において前記バイアスエネルギーを前記バイアス電極に与えるよう、前記バイアス電源を制御し、

前記複数の基準周期の同一の位相期間において用いる前記高周波電力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、前記高周波電源を制御し、

前記複数の周波数のうち、前記複数の位相期間の各々において前記センサから出力される前記反射波のパワーレベルを最小化する適正周波数を選択することにより、前記複数の位相期間それぞれのための前記高周波電力の複数の適正周波数を決定する、

ように構成されている、

プラズマ処理装置。

[E B 2]

前記制御部は、前記複数の基準周期の後に、前記複数の周期のうちの少なくとも一つの周期内の前記複数の位相期間のそれぞれの前記高周波電力の周波数として、前記複数の適正周波数を用いるよう、前記高周波電源を制御する、実施形態E B 1のプラズマ処理装置。

[E B 3]

前記複数の周期において、前記基板支持部の上に基板が載置された状態で、前記基板に対するプラズマ処理が行われる、実施形態E B 2のプラズマ処理装置。

[E B 4]

高周波電力の周波数を決定する方法であって、

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バイアスエネルギーを与える工程であり、該バイアスエネルギーは、各々が複数の位相期間を含みバイアス周波数で規定される複数の基準周期の各々においてバイアス電極に与えられる、該工程と、

前記チャンバ内でプラズマを生成するために前記複数の基準周期において高周波電源から前記高周波電力を供給する工程であり、前記複数の基準周期の同一の位相期間において用いられる前記高周波電力の周波数は、互いに異なる複数の周波数にそれぞれ設定される、該工程と、

前記複数の周波数のうち、前記複数の位相期間の各々において前記高周波電力の反射波のパワーレベルを最小化する適正周波数を選択することにより、前記複数の位相期間それぞれのための前記高周波電力の複数の適正周波数を決定する工程と、

を含む方法。

[E C 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高周波電力を発生するように

構成された高周波電源と、

バイアス周波数で規定される複数の周期の各々においてバイアスエネルギーを前記バイアス電極に与えるように構成されたバイアス電源と、

前記高周波電源の負荷から戻される前記高周波電力の反射波を出力するように構成されたセンサと、

前記高周波電源を制御するように構成された制御部と、
を備え、

前記制御部は、

前記バイアス周波数で規定される基準周期であり前記バイアスエネルギーが前記バイアス電極に与えられる該基準周期において前記チャンバ内でプラズマを生成するために、複数の周波数成分を有する高周波電力を発生するように、前記高周波電源を制御し、

前記基準周期内の複数の位相期間の各々における前記複数の周波数成分の進行波のパワーレベルそれぞれに対する前記複数の周波数成分の反射波のパワーレベルの比である複数の比を求めて、該複数の比のうちの最小の比を求め、

前記複数の位相期間の各々において前記複数の周波数成分のうち前記最小の比をもたらす周波数成分の周波数を特定することにより、前記複数の位相期間それぞれのための前記高周波電力の複数の適正周波数を決定する、

ように構成されている、
プラズマ処理装置。

[E C 2]

前記複数の周波数成分は、基本周波数を有する成分と該基本周波数とは異なる周波数をそれぞれ有する複数の成分を含み、

前記複数の成分の各々のパワーレベルは、前記基本周波数を有する前記成分のパワーレベルよりも低い、実施形態 E C 1 のプラズマ処理装置。

[E C 3]

前記複数の成分の各々のパワーレベルは、前記基本周波数を有する前記成

分のパワーレベルの $1/10$ 以下である、実施形態 E C 2 のプラズマ処理装置。

[E C 4]

前記基本周波数は、前記複数の周波数成分それぞれの複数の周波数のうち中心の周波数である、実施形態 E C 2 又は E C 3 のプラズマ処理装置。

[E C 5]

前記制御部は、前記複数の周期のうちの少なくとも一つの周期内の前記複数の位相期間のそれぞれの前記高周波電力の周波数として、前記複数の適正周波数を用いるよう、前記高周波電源を制御する、実施形態 E C 1 ～ E C 4 の何れかのプラズマ処理装置。

[E C 6]

前記制御部は、前記複数の周期のうち前記少なくとも一つの周期の後の m 番目の周期内の n 番目の位相期間における前記高周波電力の周波数を、前記複数の周期のうち該 m 番目の周期の前の二つ以上の周期それぞれにおける対応の位相期間において互いに異なる前記高周波電力の周波数を用いた場合に前記センサから出力される前記反射波のパワーレベルの変化に応じて、調整するように構成されている、実施形態 E C 1 のプラズマ処理装置。

[E C 7]

前記二つ以上の周期は、第 1 の周期と該第 1 の周期の後の第 2 の周期を含み、

前記制御部は、前記第 2 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数に、前記第 1 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数からの減少及び増加のうち一方の周波数シフトを与えることにより前記反射波のパワーレベルが減少した場合に、前記 m 番目の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数を、前記第 2 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数に対して前記一方の周波数シフトを有する周波数に設定するように構成されている、実施形態 E C 6 のプラズマ処理装置。

[E C 8]

前記制御部は、前記 m 番目の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数を、前記第 2 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数に対して前記一方の周波数シフトを有する前記周波数に設定することにより、前記反射波のパワーレベルが増加した場合には、前記複数の周期のうち前記 m 番目の周期の後の第 3 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の周波数を、前記第 2 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の周波数と前記 m 番目の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の周波数との間の中間の周波数に設定するように構成されている、
実施形態 E C 7 のプラズマ処理装置。

[E C 9]

前記制御部は、前記第 3 の周期内の前記 n 番目の位相期間において前記中間の周波数を用いた場合の前記反射波のパワーレベルが閾値よりも大きい場合に、前記複数の周期のうち前記第 3 の周期の後の第 4 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の周波数を、前記一方の周波数シフトの量の絶対値よりも大きい絶対値の量を有する他方の周波数シフトを前記中間の周波数に対して有する周波数に設定するように構成されている、実施形態 E C 8 のプラズマ処理装置。

[E C 1 0]

前記 m 番目の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数の前記一方の周波数シフトの量の絶対値は、前記第 2 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数の前記一方の周波数シフトの量の絶対値よりも大きい、実施形態 E C 7 のプラズマ処理装置。

[E C 1 1]

前記二つ以上の周期は、第 1 の周期と該第 1 の周期の後の第 2 の周期を含み、

前記制御部は、前記第 2 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高

周波電力の前記周波数に、前記第 1 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数からの減少及び増加のうち一方の周波数シフトを与えることにより前記反射波のパワーレベルが増加した場合に、前記 m 番目の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記周波数を、前記第 2 の周期内の前記 n 番目の位相期間における前記高周波電力の前記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するように構成されている、

実施形態 E C 6 のプラズマ処理装置。

[E C 1 2]

前記バイアスエネルギーは、前記バイアス周波数を有する高周波電力であるか、前記複数の周期の各々において前記バイアス電極に与えられる負の電圧のパルスを含む、実施形態 E C 1 ～ E C 1 1 の何れかのプラズマ処理装置。

[E C 1 3]

高周波電力の周波数を決定する方法であって、

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バイアスエネルギーを与える工程であり、該バイアスエネルギーは、バイアス周波数で規定される基準周期において前記バイアス電極に与えられる、該工程と、

前記チャンバ内でプラズマを生成するために前記基準周期において高周波電源から前記高周波電力を供給する工程であり、前記高周波電力は複数の周波数成分を含む、該工程と、

前記基準周期内の複数の位相期間の各々における前記複数の周波数成分の進行波のパワーレベルそれぞれに対する前記複数の周波数成分の反射波のパワーレベルの比である複数の比を求める工程と、

前記複数の比のうち最小の比を求める工程と、

前記複数の位相期間の各々において前記複数の周波数成分のうち前記最小の比をもたらす周波数成分の周波数を特定することにより、前記複数の位相

期間それぞれのための前記高周波電力の複数の適正周波数を決定する工程と、
を含む方法。

[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…プラズマ処理チャンバ、11…基板支持部、31…高周波電源、32…バイアス電源、31s…センサ、30c…制御部。

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、
波形周期を有するバイアスエネルギーを前記バイアス電極に周期的に与え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、
前記バイアスエネルギーの複数の波形周期の各々の中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設定するように構成されており、
前記複数の波形周期のうち m 番目の波形周期内の n 番目の位相期間における前記ソース周波数を、前記複数の波形周期のうち該 m 番目の波形周期の前の二つ以上の波形周期それぞれにおける n 番目の位相期間において互いに異なる前記ソース周波数を用いた場合の前記ソース高周波電力の反射の度合いの変化に応じて調整するフィードバックを行うように構成されている、
プラズマ処理装置。

[請求項2]

前記二つ以上の波形周期は、 $(m - M_1)$ 番目の波形周期と $(m - M_2)$ 番目の波形周期を含み、ここで、 M_1 及び M_2 は、 $M_1 > M_2$ を満たす自然数であり、
前記フィードバックは、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ソース周波数に、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ソース周波数からの減少及び増加のうち一方の周波数シフトを与えることにより前記反射の度合いが低下した場合に、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、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対して前記一方の周波数シフトを有する周波数に設定することを含み、請求項 1 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項3] 前記フィードバックは、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、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対して前記一方の周波数シフトを有する前記周波数に設定することにより、前記反射の度合いが増大した場合には、前記複数の波形周期のうち $(m + M_3)$ 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、前記 $(m - M_2)$ 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と前記 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との間の中間の周波数に設定することを更に含み、ここで、 M_3 は自然数である、請求項 2 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項4] 前記フィードバックは、前記 $(m + M_3)$ 番目の波形周期内の前記 n 番目の位相期間において前記中間の周波数を用いた場合の前記反射の度合いが閾値よりも大きい場合に、前記複数の波形周期のうち $(m + M_4)$ 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、前記一方の周波数シフトの量の絶対値よりも大きい絶対値の量を有する他方の周波数シフトを前記中間の周波数に対して有する周波数に設定することを更に含み、ここで、 M_4 は、 $M_4 > M_3$ を満たす自然数である、請求項 3 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項5] 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の前記一方の周波数シフトの量の絶対値は、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ソース周波数の前記一方の周波数シフトの量の絶対値よりも大きい、請求項 2 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項6] 前記二つ以上の波形周期は、 $(m - M_1)$ 番目の波形周期と $(m -$

M_2) 番目の波形周期を含み、ここで、 M_1 及び M_2 は、 $M_1 > M_2$ を満たす自然数であり、

前記フィードバックは、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ソース周波数に、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ソース周波数からの減少及び増加のうち一方の周波数シフトを与えることにより前記反射の度合いが増大した場合に、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、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対して他方の周波数シフトを有する周波数に設定することを含む、請求項 1 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項7] 前記バイアスエネルギーは、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、該バイアス周波数の逆数である時間長を各々が有する前記複数の波形周期の各々において前記バイアス電極に与えられる電圧のパルスを含む、請求項 1 ～ 6 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項8] 前記高周波電源は、前記複数の波形周期のうち最初の波形周期内の前記複数の位相期間において予め準備された初期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ように構成されている、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] 制御部を更に備え、
前記制御部は、
各々が前記波形周期である複数の基準周期の同一の位相期間において用いる前記ソース周波数を互いに異なる複数の周波数にそれぞれ設定し、

前記複数の周波数のうち、前記複数の位相期間の各々において前記反射の度合いを最小化する適正周波数を選択することにより、前記複数の位相期間それぞれのための複数の適正周波数を決定して、該複

数の適正周波数を前記初期周波数セットの前記複数の周波数として該プラズマ処理装置の記憶部に記憶する、

ように構成されている、請求項8に記載のプラズマ処理装置。

[請求項10]

制御部を更に備え、

前記制御部は、

前記波形周期である基準周期において前記チャンバ内でプラズマを生成するために、複数の周波数成分を有するソース高周波電力を前記高周波電源に発生させ、

前記基準周期内の前記複数の位相期間の各々における前記複数の周波数成分の進行波のパワーレベルそれぞれに対する前記複数の周波数成分の反射波のパワーレベルの比である複数の比を求めて、該複数の比のうちの最小の比を求め、

前記複数の位相期間の各々において前記複数の周波数成分のうち前記最小の比をもたらす周波数成分の周波数を特定することにより、前記複数の位相期間それぞれのための複数の適正周波数を決定して、該複数の適正周波数を前記初期周波数セットの前記複数の周波数として該プラズマ処理装置の記憶部に記憶する、

ように構成されている、請求項8に記載のプラズマ処理装置。

[請求項11]

整合器を更に備え、

前記整合器は、

前記高周波電源と前記ソース高周波電力が供給される高周波電極とを互いに接続する給電路上のノードとグラウンドとの間で接続された第1の可変コンデンサと、

前記ノードと前記高周波電極との間で接続された第2の可変コンデンサを含み、

前記整合器は、前記複数の波形周期のうち最初の波形周期において、予め準備された前記第1の可変コンデンサ及び前記第2の可変コンデンサの複数の最適整合器設定のうち、該プラズマ処理装置において

行われるプロセスに応じた最適整合器設定を用いるように構成されており、

前記高周波電源は、前記最初の波形周期内の前記複数の位相期間において予め準備された複数の初期周波数セットのうち該プラズマ処理装置において行われる前記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をそれぞれ用いるように構成されている、

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12]

制御部を更に備え、

前記制御部は、

前記プロセスの条件の下、前記第 1 の可変コンデンサ及び前記第 2 の可変コンデンサの複数の整合器設定を順に用いつつ、

各々が前記波形周期である複数の基準周期の同一の位相期間において用いる前記ソース周波数を互いに異なる複数の周波数にそれぞれ設定し、

前記複数の周波数のうち、前記複数の位相期間の各々において前記反射の度合いを最小化する暫定周波数を選択する、

ことにより、前記複数の位相期間それぞれのための複数の暫定周波数を含む暫定周波数セットと前記複数の整合器設定のうち対応の整合器設定を各々が含む複数の暫定設定を生成し、

前記複数の暫定設定のうち、前記反射の度合いを最小化する暫定設定に含まれる前記整合器設定及び前記暫定周波数セットを、前記プロセスに応じた前記最適整合器設定及び前記初期周波数セットとして、該プラズマ処理装置の記憶部に記憶する、

ように構成されている、請求項 11 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項13]

制御部を更に備え、

前記制御部は、

前記プロセスの条件の下、前記第 1 の可変コンデンサ及び前記第 2 の可変コンデンサの複数の整合器設定を順に用いつつ、

前記波形周期である基準周期において前記チャンバ内でプラズマを生成するために、複数の周波数成分を有するソース高周波電力を前記高周波電源に発生させ、

前記基準周期内の前記複数の位相期間の各々における前記複数の周波数成分の進行波のパワーレベルそれぞれに対する前記複数の周波数成分の反射波のパワーレベルの比である複数の比を求めて、該複数の比のうちの最小の比を求め、

前記複数の位相期間の各々において前記複数の周波数成分のうち前記最小の比をもたらす周波数成分の周波数を特定することによって、前記複数の位相期間それぞれのための複数の暫定周波数を決定する、

ことにより、前記複数の位相期間それぞれのための複数の暫定周波数を含む暫定周波数セットと前記複数の整合器設定のうち対応の整合器設定を各々が含む複数の暫定設定を生成し、

前記複数の暫定設定のうち、前記反射の度合いを最小化する暫定設定に含まれる前記整合器設定及び前記暫定周波数セットを、前記プロセスに応じた前記最適整合器設定及び前記初期周波数セットとして、該プラズマ処理装置の記憶部に記憶する、

ように構成されている、請求項 11 に記載のプラズマ処理装置。

[請求項14]

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バイアスエネルギーを与える工程であり、該バイアスエネルギーは、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、

前記バイアスエネルギーの複数の波形周期の各々の中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設定する

工程と、

を含み、

前記複数の波形周期のうち m 番目の波形周期内の n 番目の位相期間における前記ソース周波数が、前記複数の波形周期のうち該 m 番目の波形周期の前の二つ以上の波形周期それぞれにおける n 番目の位相期間において互いに異なる前記ソース周波数を用いた場合の前記ソース高周波電力の反射の度合いの変化に応じて、調整される、方法。