明　細　書

発明の名称 ：

プラズマ処理装置、電源システム、及びプラズマ処理方法

技術分野

[0001]　本開示の例示的実施形態は、プラズマ処理装置、電源システム、及びプラズマ処理方法に関するものである。

背景技術

[0002]　プラズマ処理装置が基板に対するプラズマ処理において用いられている。特許文献１に記載されたプラズマ処理装置は、チャンバ及び基板保持電極を備える。基板保持電極は、チャンバ内に設けられている。基板保持電極は、その主面上に載置された基板を保持する。特許文献１に記載されたプラズマ処理装置は、高周波発生装置及びＤＣ負パルス発生装置を更に備えている。高周波発生装置は、基板保持電極に対して高周波電圧を印加する。また、高周波電圧のオンとオフが交互に切り替えられる。高周波電圧のオンとオフのタイミングに応じてＤＣ負パルス発生装置から基板保持電極にＤＣ負パルス電圧が印加される。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開２００９－１８７９７５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、エッチレートの低下を抑制する技術を提供する。

課題を解決するための手段

[0005]　一つの例示的実施形態において、プラズマ処理装置が開示される。プラズマ処理装置は、チャンバ、該チャンバ内の基板支持部、高周波電源、バイアス電源、及び制御部を備える。高周波電源は、チャンバ内のガスからプラズ

マを生成するためにソース高周波電力を供給するように構成されている。バイアス電源は、基板支持部上の基板にプラズマからイオンを引き込むために基板支持部に電気バイアスを供給するように構成されている。制御部は、プラズマ処理期間において、ソース高周波電力及び電気バイアスを連続的且つ同時に供給し、ソース高周波電力のパワーレベルを３ｋW以下、電気バイアスの波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数を４００ｋＨｚ未満、電気バイアスの電圧振幅を３ｋＶ以上に設定するよう、高周波電源及びバイアス電源を制御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、エッチレートの低下を抑制する技術が提供される。

図面の簡単な説明

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

[図2]容量結合型のプラズマ処理装置の構成例を説明するための図である。

[図3]一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理装置を示す図である。

[図4]電気バイアスの波形の例を示す図である。

[図5]図５の（ａ）はソース高周波電力の一例のタイミングチャートであり、図５の（ｂ）は電気バイアスの一例のタイミングチャートである。

[図6]チャンバ内のプラズマとシースの例を示す図である。

[図7]一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理方法を示す図である。

[図8]第１の実験の結果を示す図である。

[図9]第２の実験の結果を示す図である。

[図10]別の例示的実施形態に係るプラズマ処理装置を示す図である。

[図11]本明細書に記載の動作をコンピュータ上で実施する処理回路のブロック図である。

発明を実施するための形態

[0008] 以下、図面を参照して種々の例示的実施形態について詳細に説明する。なお、各図面において同一又は相当の部分に対しては同一の符号を附すことと

する。

[0009] 図１は、プラズマ処理システムの構成例を説明するための図である。一実施形態において、プラズマ処理システムは、プラズマ処理装置１及び制御部２を含む。プラズマ処理システムは、基板処理システムの一例であり、プラズマ処理装置１は、基板処理装置の一例である。プラズマ処理装置１は、プラズマ処理チャンバ１０、基板支持部１１及びプラズマ生成部１２を含む。プラズマ処理チャンバ１０は、プラズマ処理空間を有する。また、プラズマ処理チャンバ１０は、少なくとも１つの処理ガスをプラズマ処理空間に供給するための少なくとも１つのガス供給口と、プラズマ処理空間からガスを排出するための少なくとも１つのガス排出口とを有する。ガス供給口は、後述するガス供給部２０に接続され、ガス排出口は、後述する排気システム４０に接続される。基板支持部１１は、プラズマ処理空間内に配置され、基板を支持するための基板支持面を有する。

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

内の周波数を有する。

[0011] 制御部２は、本開示において述べられる種々の工程をプラズマ処理装置１に実行させるコンピュータ実行可能な命令を処理する。制御部２は、ここで述べられる種々の工程を実行するようにプラズマ処理装置１の各要素を制御するように構成され得る。一実施形態において、制御部２の一部又は全てがプラズマ処理装置１に含まれてもよい。制御部２は、処理部２ａ１、記憶部２ａ２及び通信インターフェース２ａ３を含んでもよい。制御部２は、例えばコンピュータ２ａにより実現される。処理部２ａ１は、記憶部２ａ２からプログラムを読み出し、読み出されたプログラムを実行することにより種々の制御動作を行うように構成され得る。このプログラムは、予め記憶部２ａ２に格納されていてもよく、必要なときに、媒体を介して取得されてもよい。取得されたプログラムは、記憶部２ａ２に格納され、処理部２ａ１によって記憶部２ａ２から読み出されて実行される。媒体は、コンピュータ２ａに読み取り可能な種々の記憶媒体であってもよく、通信インターフェース２ａ３に接続されている通信回線であってもよい。処理部２ａ１は、ＣＰＵ（Ｃｅｎｔｒａｌ　Ｐｒｏｃｅｓｓｉｎｇ　Ｕｎｉｔ）であってもよい。記憶部２ａ２は、ＲＡＭ（Ｒａｎｄｏｍ　Ａｃｃｅｓｓ　Ｍｅｍｏｒｙ）、ＲＯＭ（Ｒｅａｄ　Ｏｎｌｙ　Ｍｅｍｏｒｙ）、ＨＤＤ（Ｈａｒｄ　Ｄｉｓｋ　Ｄｒｉｖｅ）、ＳＳＤ（Ｓｏｌｉｄ　Ｓｔａｔｅ　Ｄｒｉｖｅ）、又はこれらの組み合わせを含んでもよい。通信インターフェース２ａ３は、ＬＡＮ（Ｌｏｃａｌ　Ａｒｅａ　Ｎｅｔｗｏｒｋ）等の通信回線を介してプラズマ処理装置１との間で通信してもよい。

[0012] 以下に、プラズマ処理装置１の一例としての容量結合型のプラズマ処理装置の構成例について説明する。図２は、容量結合型のプラズマ処理装置の構成例を説明するための図である。

[0013] 容量結合型のプラズマ処理装置１は、プラズマ処理チャンバ１０、ガス供給部２０、電源３０及び排気システム４０を含む。また、プラズマ処理装置１は、基板支持部１１及びガス導入部を含む。ガス導入部は、少なくとも１

つの処理ガスをプラズマ処理チャンバ１０内に導入するように構成される。ガス導入部は、シャワーヘッド１３を含む。基板支持部１１は、プラズマ処理チャンバ１０内に配置される。シャワーヘッド１３は、基板支持部１１の上方に配置される。一実施形態において、シャワーヘッド１３は、プラズマ処理チャンバ１０の天部（ｃｅｉｌｉｎｇ）の少なくとも一部を構成する。プラズマ処理チャンバ１０は、シャワーヘッド１３、プラズマ処理チャンバ１０の側壁１０ａ及び基板支持部１１により規定されたプラズマ処理空間１０ｓを有する。プラズマ処理チャンバ１０は接地される。シャワーヘッド１３及び基板支持部１１は、プラズマ処理チャンバ１０の筐体とは電気的に絶縁される。

[0014] 基板支持部１１は、本体部１１１及びリングアセンブリ１１２を含む。本体部１１１は、基板Ｗを支持するための中央領域１１１ａと、リングアセンブリ１１２を支持するための環状領域１１１ｂとを有する。ウェハは基板Ｗの一例である。本体部１１１の環状領域１１１ｂは、平面視で本体部１１１の中央領域１１１ａを囲んでいる。基板Ｗは、本体部１１１の中央領域１１１ａ上に配置され、リングアセンブリ１１２は、本体部１１１の中央領域１１１ａ上の基板Ｗを囲むように本体部１１１の環状領域１１１ｂ上に配置される。従って、中央領域１１１ａは、基板Ｗを支持するための基板支持面とも呼ばれ、環状領域１１１ｂは、リングアセンブリ１１２を支持するためのリング支持面とも呼ばれる。

[0015] 一実施形態において、本体部１１１は、基台１１１０及び静電チャック１１１１を含む。基台１１１０は、導電性部材を含む。基台１１１０の導電性部材は下部電極として機能し得る。静電チャック１１１１は、基台１１１０の上に配置される。静電チャック１１１１は、セラミック部材１１１１ａとセラミック部材１１１１ａ内に配置される静電電極１１１１ｂとを含む。セラミック部材１１１１ａは、中央領域１１１ａを有する。一実施形態において、セラミック部材１１１１ａは、環状領域１１１ｂも有する。なお、環状静電チャックや環状絶縁部材のような、静電チャック１１１１を囲む他の部

材が環状領域１１１ｂを有してもよい。この場合、リングアセンブリ１１２は、環状静電チャック又は環状絶縁部材の上に配置されてもよく、静電チャック１１１１と環状絶縁部材の両方の上に配置されてもよい。また、後述するＲＦ電源３１及び／又はＤＣ電源３２に結合される少なくとも１つのＲＦ／ＤＣ電極がセラミック部材１１１１ａ内に配置されてもよい。この場合、少なくとも１つのＲＦ／ＤＣ電極が下部電極として機能する。後述するバイアスＲＦ信号及び／又はＤＣ信号が少なくとも１つのＲＦ／ＤＣ電極に供給される場合、ＲＦ／ＤＣ電極はバイアス電極とも呼ばれる。なお、基台１１１０の導電性部材と少なくとも１つのＲＦ／ＤＣ電極とが複数の下部電極として機能してもよい。また、静電電極１１１１ｂが下部電極として機能してもよい。従って、基板支持部１１は、少なくとも１つの下部電極を含む。

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

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

[0018] シャワーヘッド１３は、ガス供給部２０からの少なくとも１つの処理ガスをプラズマ処理空間１０ｓ内に導入するように構成される。シャワーヘッド１３は、少なくとも１つのガス供給口１３ａ、少なくとも１つのガス拡散室１３ｂ、及び複数のガス導入口１３ｃを有する。ガス供給口１３ａに供給さ

れた処理ガスは、ガス拡散室１３ｂを通過して複数のガス導入口１３ｃからプラズマ処理空間１０ｓ内に導入される。また、シャワーヘッド１３は、少なくとも１つの上部電極を含む。なお、ガス導入部は、シャワーヘッド１３に加えて、側壁１０ａに形成された１又は複数の開口部に取り付けられる１又は複数のサイドガス注入部（ＳＧＩ：Ｓｉｄｅ　Ｇａｓ　Ｉｎｊｅｃｔｏｒ）を含んでもよい。

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

[0020] 電源３０は、少なくとも１つのインピーダンス整合回路を介してプラズマ処理チャンバ１０に結合されるＲＦ電源３１を含む。ＲＦ電源３１は、少なくとも１つのＲＦ信号（ＲＦ電力）を少なくとも１つの下部電極及び／又は少なくとも１つの上部電極に供給するように構成される。これにより、プラズマ処理空間１０ｓに供給された少なくとも１つの処理ガスからプラズマが形成される。従って、ＲＦ電源３１は、プラズマ生成部１２の少なくとも一部として機能し得る。また、バイアスＲＦ信号を少なくとも１つの下部電極に供給することにより、基板Ｗにバイアス電位が発生し、形成されたプラズマ中のイオン成分を基板Ｗに引き込むことができる。

[0021] 一実施形態において、ＲＦ電源３１は、第１のＲＦ生成部３１ａ及び第２のＲＦ生成部３１ｂを含む。第１のＲＦ生成部３１ａは、少なくとも１つのインピーダンス整合回路を介して少なくとも１つの下部電極及び／又は少なくとも１つの上部電極に結合され、プラズマ生成用のソースＲＦ信号（ソースＲＦ電力）を生成するように構成される。一実施形態において、ソースＲ

Ｆ信号は、１０ＭＨｚ～１５０ＭＨｚの範囲内の周波数を有する。一実施形態において、第１のＲＦ生成部３１ａは、異なる周波数を有する複数のソースＲＦ信号を生成するように構成されてもよい。生成された１又は複数のソースＲＦ信号は、少なくとも１つの下部電極及び／又は少なくとも１つの上部電極に供給される。

[0022] 第２のＲＦ生成部３１ｂは、少なくとも１つのインピーダンス整合回路を介して少なくとも１つの下部電極に結合され、バイアスＲＦ信号（バイアスＲＦ電力）を生成するように構成される。バイアスＲＦ信号の周波数は、ソースＲＦ信号の周波数と同じであっても異なっていてもよい。一実施形態において、バイアスＲＦ信号は、ソースＲＦ信号の周波数よりも低い周波数を有する。一実施形態において、バイアスＲＦ信号は、１００ｋＨｚ～６０ＭＨｚの範囲内の周波数を有する。一実施形態において、第２のＲＦ生成部３１ｂは、異なる周波数を有する複数のバイアスＲＦ信号を生成するように構成されてもよい。生成された１又は複数のバイアスＲＦ信号は、少なくとも１つの下部電極に供給される。また、種々の実施形態において、ソースＲＦ信号及びバイアスＲＦ信号のうち少なくとも１つがパルス化されてもよい。

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

[0024] 種々の実施形態において、第１及び第２のＤＣ信号がパルス化されてもよい。この場合、電圧パルスのシーケンスが少なくとも１つの下部電極及び／又は少なくとも１つの上部電極に印加される。電圧パルスは、矩形、台形、三角形又はこれらの組み合わせのパルス波形を有してもよい。一実施形態に

おいて、ＤＣ信号から電圧パルスのシーケンスを生成するための波形生成部が第１のＤＣ生成部３２ａと少なくとも１つの下部電極との間に接続される。従って、第１のＤＣ生成部３２ａ及び波形生成部は、電圧パルス生成部を構成する。第２のＤＣ生成部３２ｂ及び波形生成部が電圧パルス生成部を構成する場合、電圧パルス生成部は、少なくとも１つの上部電極に接続される。電圧パルスは、正の極性を有してもよく、負の極性を有してもよい。また、電圧パルスのシーケンスは、１周期内に１又は複数の正極性電圧パルスと１又は複数の負極性電圧パルスとを含んでもよい。なお、第１及び第２のＤＣ生成部３２ａ，３２ｂは、ＲＦ電源３１に加えて設けられてもよく、第１のＤＣ生成部３２ａが第２のＲＦ生成部３１ｂに代えて設けられてもよい。

[0025] 排気システム４０は、例えばプラズマ処理チャンバ１０の底部に設けられたガス排出口１０ｅに接続され得る。排気システム４０は、圧力調整弁及び真空ポンプを含んでもよい。圧力調整弁によって、プラズマ処理空間１０ｓ内の圧力が調整される。真空ポンプは、ターボ分子ポンプ、ドライポンプ又はこれらの組み合わせを含んでもよい。

[0026] 以下、図３を参照する。図３は、一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理装置を示す図である。図３に示すように、プラズマ処理装置１は、高周波電源４１及びバイアス電源４２を備えている。高周波電源４１及びバイアス電源４２は、電源システム３０Ｓを構成する。電源システム３０Ｓは、制御部２を更に含んでいてもよい。或いは、電源システム３０Ｓは、以下に説明する制御部２による高周波電源４１及びバイアス電源４２の制御と同じ制御を行い得る制御部２以外の制御部を、制御部２に代えて含んでいてもよい。或いは、電源システム３０Ｓは、制御部を含んでいなくてもよく、高周波電源４１及びバイアス電源４２が以下に説明するそれぞれのオペレーションを行うように構成されていてもよい。

[0027] 高周波電源４１は、第１のＲＦ生成部３１ａである。高周波電源４１は、ソースＲＦ信号、即ちソース高周波電力ＨＦを発生するように構成されている。ソース高周波電力ＨＦは、ソース周波数を有する。即ち、ソース高周波

電力ＨＦは、その周波数がソース周波数である正弦波状の波形を有する。ソース周波数は、１０ＭＨｚ～１５０ＭＨｚの範囲内の周波数であり得る。

[0028] 高周波電源４１は、整合器４３を介して高周波電極に電気的に接続されており、ソース高周波電力ＨＦを高周波電極に供給するように構成されている。高周波電極は、基板支持部１１内に設けられていてもよい。高周波電極は、基台１１１０の導電性部材又はセラミック部材１１１１ａ内に設けられた少なくとも一つの電極であってもよい。或いは、高周波電極は、上部電極であってもよい。ソース高周波電力ＨＦが高周波電極に供給されると、チャンバ１０内のガスからプラズマが生成される。

[0029] 整合器４３は、可変インピーダンスを有する。整合器４３の可変インピーダンスは、ソース高周波電力ＨＦの負荷からの反射を低減するよう、設定される。整合器４３は、例えば制御部２によって制御され得る。

[0030] バイアス電源４２は、第２のＲＦ生成部３１ｂ又は第１のＤＣ生成部３２ａを含む。バイアス電源４２は、基板支持部１１に電気的に結合されている。バイアス電源４２は、基板支持部１１内のバイアス電極に電気的に接続されており、電気バイアスＥＢをバイアス電極に供給するように構成されている。バイアス電極は、基台１１１０の導電性部材又はセラミック部材１１１１ａ内に設けられた少なくとも一つの電極であってもよい。バイアス電極は、高周波電極と共通であってもよい。電気バイアスＥＢがバイアス電極に供給されると、プラズマからのイオンが基板Ｗに引き付けられる。

[0031] 以下、図３と共に図４を参照する。図４は、電気バイアスの波形の例を示す図である。バイアス電源４２は、波形周期C_w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C_wの繰り返しである複数の波形周期C_wの各々においてバイアス電極に与えられる。波形周期C_w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。電気バイアスＥＢはバイアス周波数を有する。波形周期C_wの時間長は、バイアス周波数の逆数である。バイアス周波数は、１３．５６ＭＨｚ以下又は４

００ｋＨｚ以下であってもよい。

[0032] 電気バイアスＥＢは、バイアスＲＦ信号、即ちバイアス周波数を有するバイアス高周波電力ＬＦであってもよい。即ち、電気バイアスＥＢは、その周波数がバイアス周波数である正弦波状の波形を有していてもよい。この場合には、バイアス電源４２は、整合器４４を介して、バイアス電極に電気的に接続される。整合器４４の可変インピーダンスは、バイアス高周波電力ＬＦの負荷からの反射を低減するよう、設定される。

[0033] 或いは、電気バイアスＥＢは、パルス化された第１のＤＣ信号、即ち電圧パルスＶＰを含んでいてもよい。電圧パルスＶＰは、波形周期C_w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C_wの時間長と同じ長さの時間間隔で周期的にバイアス電極に印加される。電圧パルスＶＰの波形は、矩形波、三角波、又は任意の波形であり得る。電圧パルスＶＰの電圧の極性は、基板Ｗとプラズマとの間に電位差を生じさせてプラズマからのイオンを基板Ｗに引き込むことができるように設定される。電圧パルスＶＰは、基板Ｗの電位が負電位である期間を波形周期C_wが含むようにバイアス電極に印加される。バイアス電極に印加される電圧パルスＶＰは、負電位を有してもよく、正電位を有してもよく、或いは、正の電位と負の電位との間で変化する電位を有していてもよい。電圧パルスＶＰは、負の電圧のパルス又は負の直流電圧のパルスであってもよい。なお、電気バイアスＥＢが電圧パルスＶＰである場合には、プラズマ処理装置１は整合器４４を備えていなくてもよい。

[0034] 以下、図３と共に図５の（ａ）及び図５の（ｂ）を参照する。図５の（ａ）はソース高周波電力の一例のタイミングチャートであり、図５の（ｂ）は電気バイアスの一例のタイミングチャートである。図５の（ａ）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が停止されていることを示している。図５の（ｂ）において、電気バイアスＥＢのＯＮは、電気バイアスＥＢが供給されていることを示しており、電気

バイアスＥＢのＯＦＦは、電気バイアスＥＢが停止されていることを示している。

[0035] 図５の（ａ）に示すように、制御部２は、プラズマ処理期間P_Sにおいて、ソース高周波電力ＨＦ及び電気バイアスＥＢを連続的且つ同時に供給するよう、高周波電源４１及びバイアス電源４２を制御する。なお、図５の（ａ）に示す例において、ソース高周波電力ＨＦ及び電気バイアスＥＢは、１分以上、５分以上、又は１０分以上連続的に供給されてもよい。プラズマ処理期間P_Sにおいて、基板支持部１１上の基板Ｗは、チャンバ１０内で生成されたプラズマを用いて処理され得る。

[0036] 制御部２は、プラズマ処理期間P_Sにおいて、ソース高周波電力ＨＦのパワーレベルを３ｋＷ以下、バイアス周波数を４００ｋＨｚ未満、電気バイアスＥＢの電圧振幅を３ｋＶ以上に設定するよう、高周波電源４１及びバイアス電源４２を制御する。電気バイアスＥＢの電圧振幅は、バイアス電源４２の出力、バイアス電極、又は基板Ｗにおける電気バイアスＥＢの電圧振幅であり得る。電気バイアスＥＢが電圧パルスＶＰを含む場合には、電気バイアスＥＢの電圧振幅は、電圧パルスＶＰの振幅である。電気バイアスＥＢが電圧パルスＶＰを含む場合には、電気バイアスＥＢの電圧振幅は、基準電位に対する電圧パルスＶＰの電圧レベルの絶対値であってもよい。電圧パルスＶＰの基準電位は、波形周期C_W内で電圧パルスＶＰが発生されていない期間の電気バイアスＥＢの電圧レベルであり、例えば０Ｖである。電気バイアスＥＢがバイアス高周波電力ＬＦである場合には、電気バイアスＥＢの電圧振幅は、バイアス高周波電力ＬＦのピークツーピーク電圧（V_{PP}）である。

[0037] プラズマ処理装置１では、プラズマ処理期間P_Sにおいて、比較的低いパワーレベルを有するソース高周波電力ＨＦが用いられる。したがって、プラズマ処理装置１によれば、高周波電源４１の小型化且つ省電力化が可能となる。

[0038] また、プラズマ処理装置１では、４００ｋＨｚ未満のバイアス周波数を有する電気バイアスＥＢが用いられる。４００ｋＨｚ未満のバイアス周波数を

有する電気バイアスＥＢによれば、高周波電源４１の負荷からのソース高周波電力ＨＦの反射が抑制され、ソース高周波電力ＨＦのプラズマへの結合が促進される。

[0039] 以下、図６を参照する。図６は、チャンバ内のプラズマとシースの例を示す図である。図６では、電気バイアスＥＢが負側のピーク電圧を有する場合のプラズマＰＬが実線で示されており、電気バイアスＥＢが正側のピーク電圧を有する場合のプラズマＰＬが破線で示されている。なお、電気バイアスＥＢが電圧パルスＶＰを含む場合には、負側のピーク電圧は、波形周期C_W内で電圧パルスＶＰが出力されている期間の電圧パルスＶＰの電圧である。電気バイアスＥＢが電圧パルスＶＰを含む場合には、正側のピーク電圧は、波形周期C_W内で電圧パルスＶＰが停止されている期間の電気バイアスＥＢの電圧である。電気バイアスＥＢがバイアス高周波電力ＬＦである場合には、負側のピーク電圧は、波形周期C_W内のバイアス高周波電力ＬＦの負側のピーク電圧である。また、電気バイアスＥＢがバイアス高周波電力ＬＦである場合には、正側のピーク電圧は、波形周期C_W内のバイアス高周波電力ＬＦの正側のピーク電圧である。

[0040] 図６に示すように、電気バイアスＥＢが相対的に正側のピーク電圧を有する場合には、プラズマＰＬと基板Ｗとの間のシースＳＢ（プラズマシース）の厚さは小さく、シース電圧も小さい。一方、電気バイアスＥＢが負側のピーク電圧を有する場合には、プラズマＰＬと基板Ｗとの間のシースＳＡ（プラズマシース）の厚さは大きく、シース電圧も大きい。電気バイアスＥＢの電圧が正側のピーク電圧から負側のピーク電圧に切り替わると、即ち、プラズマＰＬと基板Ｗとの間のシース電圧（電位差）が最小から最大に切り替わると、シースＳＡの領域のうちシースＳＢの領域を除く領域ＶＲに存在していたプラズマＰＬ中のイオンの多くが、比較的大きなシース電圧によって加速されて、基板Ｗに引き込まれる。プラズマ処理装置１では、上述したように、プラズマ処理期間P_Sにおいて電気バイアスＥＢの電圧振幅が３ｋＶ以上に設定されるので、プラズマ処理期間P_Sにおける領域ＶＲの厚さを大きくす

ることができる。したがって、プラズマ処理装置１によれば、プラズマＰＬの密度が小さくても、高いエネルギーを有する多量のイオンを基板Ｗに引き込むことができる。故に、プラズマ処理装置１によれば、エッチレートの低下を抑制することが可能となる。また、プラズマ処理装置１では、低いパワーレベルのソース高周波電力が用いられてもよく、低いパワーレベルのソース高周波電力が用いられてもエッチレートの低下を抑制することが可能となる。

[0041] 一実施形態において、制御部２は、プラズマ処理期間P_Sにおける時間経過につれてプラズマ処理装置１の一つ以上の制御パラメータを変更してもよい。一つ以上の制御パラメータは、電気バイアスＥＢの電圧振幅、バイアス周波数、波形周期C_Wにおける電圧パルスＶＰのデューティ比（ＯＮデューティ）、チャンバ１０内の圧力、ソース高周波電力ＨＦのパワーレベル、ソース高周波電力ＨＦの周波数、及び基板支持部１１の温度からなる群から選択される少なくとも一つの制御パラメータを含む。

[0042] 一実施形態において、制御部２は、プラズマ処理期間P_Sにおける時間経過につれて電気バイアスＥＢの電圧振幅を増加させるよう、バイアス電源４２を制御してもよい。この場合には、プラズマ処理期間P_Sにおける時間経過につれてイオンエネルギーを増加させることが可能となる。その結果、基板Ｗの高アスペクトの凹部の底にイオンを供給することが可能となる。

[0043] 一実施形態において、制御部２は、プラズマ処理期間P_Sにおける時間経過につれてバイアス周波数を変更するよう、バイアス電源４２を制御してもよい。プラズマ処理期間P_Sにおける時間経過につれてバイアス周波数が低下される場合には、基板Ｗの凹部の底に電子が供給される時間が、プラズマ処理期間P_Sにおける時間経過につれて増加する。その結果、基板Ｗの帯電が緩和又は解消されて、基板Ｗの高アスペクトの凹部の底へのイオンの供給が促進される。プラズマ処理期間P_Sにおける時間経過につれてバイアス周波数が増加される場合には、基板Ｗの帯電により、基板Ｗの凹部の底に低いエネルギーを有するイオンが供給されることが抑制される。また、イオンの入射回数

が増加するので、エッチングレートが高くなる。

[0044] 一実施形態において、制御部２は、プラズマ処理期間P_Sにおける時間経過につれて波形周期C_Wにおける電圧パルスＶＰのデューティ比を低下させるよう、バイアス電源４２を制御してもよい。この場合には、基板Wの凹部の底に電子が供給される時間がプラズマ処理期間P_Sにおける時間経過につれて増加する。その結果、基板Wの帯電が緩和又は解消されて、基板Wの高アスペクトの凹部の底へのイオンの供給が促進される。

[0045] 一実施形態において、制御部２は、プラズマ処理期間P_Sにおける時間経過につれてチャンバ１０内の圧力を低下させるよう、排気システム４０を制御してもよい。この場合には、イオン及び／又はラジカル等の活性種の平均自由行程がプラズマ処理期間P_Sにおける時間経過につれて大きくなるので、基板Wの高アスペクトの凹部の底への活性種の供給が促進される。

[0046] 一実施形態において、制御部２は、プラズマ処理期間P_Sにおける時間経過につれてソース高周波電力ＨＦのパワーレベルを変更するよう、高周波電源４１を制御してもよい。ソース高周波電力ＨＦのパワーレベルは、基板Wの凹部の底におけるイオンとラジカルのバランスに応じて、増加又は減少され得る。

[0047] 一実施形態において、制御部２は、プラズマ処理期間P_Sにおける時間経過に応じてソース高周波電力ＨＦの周波数を変更するよう、高周波電源４１を制御してもよい。ソース高周波電力ＨＦの周波数は、高周波電源４１の負荷からのソース高周波電力ＨＦの反射を抑制するように変更され得る。

[0048] 一実施形態において、制御部２は、プラズマ処理期間P_Sにおける時間経過につれて基板支持部１１の温度を低下させるように、温調機構を制御してもよい。温調機構は、上述した温調モジュールであり得る。温調機構は、例えば、流路１１１０ａに供給される伝熱流体の温度を制御する。この場合には、基板Wの凹部の底を画成する面へのラジカルの吸着係数がプラズマ処理期間P_Sにおける時間経過につれて増加する。

[0049] なお、上述の実施形態では、制御部２は、プラズマ処理装置１の一つ以上

の制御パラメータをプラズマ処理期間ＰＳにおける時間経過につれて変更している。これに代えて、制御部２は、基板Ｗにエッチングによって形成される凹部の深さの増加又は当該凹部のアスペクト比の増加につれて、プラズマ処理装置１の一つ以上の制御パラメータを変更してもよい。或いは、制御部２は、センサによって測定されるエッチングの副生成物の量に応じて、プラズマ処理装置１の一つ以上の制御パラメータを変更してもよい。センサは、例えば、副生成物の発光又は光吸収を分析する光学分析器又は四重極質量分析器であってもよい。或いは、制御部２は、プラズマ処理装置１の一つ以上の制御パラメータを、プラズマ処理期間ＰＳにおける時間経過、凹部の深さ、凹部のアスペクト比、及びセンサによって測定されるエッチングの副生成物の量のうち一つ以上からの演算結果に応じて、変更してもよい。

[0050] 以下、図７を参照して、一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理方法について説明する。図７は、一つの例示的実施形態に係るプラズマ処理方法を示す図である。図７に示すプラズマ処理方法（以下、「方法ＭＴ」という）において、プラズマ処理装置１の各部は制御部２によって制御され得る。方法ＭＴは、工程ＳＴａ及び工程ＳＴｂを含む。方法ＭＴは、工程ＳＴｐを更に含んでいてもよい。

[0051] 工程ＳＴｐでは、チャンバ１０内に基板Ｗが準備される。基板Ｗは基板支持部１１上に載置される。工程ＳＴａ及び工程ＳＴｂは、基板支持部１１上に基板Ｗが載置されている状態で行われ得る。

[0052] 工程ＳＴａでは、プラズマ処理期間P_Sにおいてチャンバ１０内でガスからプラズマを生成するために、ソース高周波電力ＨＦが高周波電源４１から高周波電極に供給される。工程ＳＴｂは、工程ＳＴａと同時に行われる。工程ＳＴｂでは、プラズマ処理期間P_Sにおいて基板Ｗにプラズマからイオンを引き込むために、電気バイアスＥＢが、ソース高周波電力ＨＦの供給と同時且つ連続的に基板支持部１１に供給される。

[0053] プラズマ処理期間P_Sにおいて、ソース高周波電力ＨＦのパワーレベルが３ｋＷ以下に設定され、電気バイアスＥＢのバイアス周波数が４００ｋＨｚ未

満に設定され、電気バイアスＥＢの電圧振幅が３ｋＶ以上に設定される。なお、プラズマ処理期間P_Sにおいて、上述したように、一つ以上の制御パラメータが変更されてもよい。

[0054] 方法ＭＴにおいては、基板Ｗのシリコン含有膜がエッチングされてもよい。シリコン含有膜は、シリコン酸化膜、シリコン窒化膜、及び多結晶シリコン膜を含む群から選択される少なくとも一つを含む単層膜又は該群から選択される二つ以上の膜を含む多層膜であってもよい。この場合において、工程ＳＴａでプラズマを生成するために用いられるガスは、フッ化水素ガスを含んでいてもよい。また、このガスは、リン含有ガスを更に含んでいてもよい。また、このガスは、酸素含有ガス及び／又は希ガスを更に含んでいてもよい。

[0055] 以下、プラズマ処理装置１の評価のために行った実験について説明する。

[0056] （第１の実験）

[0057] 第１の実験では、ソース高周波電力ＨＦのパワーレベルを変更しつつ、チャンバ１０内のプラズマの発光をカメラにて観察することにより、領域ＶＲの厚さΔＴを測定した。なお、第１の実験では、電気バイアスＥＢとして電圧パルスＶＰを用いた。電気バイアスＥＢのバイアス周波数、電圧パルスＶＰの振幅、電圧パルスＶＰのデューティ比はそれぞれ、４００ｋＨｚ、－５ｋＶ、２０％であった。図８は、第１の実験の結果を示す図である。図８において、横軸はソース高周波電力ＨＦのパワーレベルを示しており、縦軸は厚さΔＴを示している。図８に示すように、第１の実験によれば、ソース高周波電力ＨＦのパワーレベルが３ｋＷ以下である場合に、厚さΔＴが大きくなることが確認された。

[0058] （第２の実験）

[0059] 第２の実験では、電気バイアスＥＢの電圧パルスＶＰの振幅を変更しつつ、チャンバ１０内のプラズマの発光をカメラにて観察することにより、領域ＶＲの厚さΔＴを測定した。なお、第２の実験では、電気バイアスＥＢのバイアス周波数、電圧パルスＶＰのデューティ比、ソース高周波電力ＨＦのパ

ワーレベルはそれぞれ、４００ｋＨｚ、２０％、１ｋＷであった。図９は、第２の実験の結果を示す図である。図９において、横軸は電圧パルスＶＰの振幅を示しており、縦軸は厚さΔＴを示している。図９に示すように、第２の実験によれば、電圧パルスＶＰの振幅が２ｋＶより大きい場合に、厚さΔＴが大きくなることが確認された。また、電圧パルスＶＰの振幅が３ｋＶより大きい場合に、厚さΔＴが顕著に大きくなることが確認された。

[0060] （第３の実験）

[0061] 第３の実験では、ＯＮ時間長が同じ三種の電圧パルスＶＰを電気バイアスＥＢとして用い、プラズマ処理期間P_Sにおけるソース高周波電力ＨＦの反射率を測定した。反射率は、ソース高周波電力ＨＦの進行波のパワーレベルに対するソース高周波電力ＨＦの反射波のパワーレベルの割合である。三種の電圧パルスＶＰのうち第１の電圧パルスのバイアス周波数、デューティ比それぞれは、４００ｋＨｚ、２０％であった。三種の電圧パルスＶＰのうち第２の電圧パルスのバイアス周波数、デューティ比はそれぞれ、２００ｋＨｚ、１０％であった。三種の電圧パルスＶＰのうち第３の電圧パルスのバイアス周波数、デューティ比はそれぞれ、１００ｋＨｚ、５％であった。第３の実験において、ソース高周波電力ＨＦのパワーレベルは、０．６ｋＷであった。第３の実験の結果、第１～第３の電圧パルスを用いた場合の反射率はそれぞれ、３４．４％、２３．４％、１５．６％であった。第３の実験によれば、４００ｋＨｚ未満のバイアス周波数の電気バイアスＥＢを用いることにより、反射率を大きく低減することが可能であることが確認された。

[0062] 以下、図１０を参照する。図１０は、別の例示的実施形態に係るプラズマ処理装置１Ａを示す図である。以下、プラズマ処理装置１Ａについて、プラズマ処理装置１に対する相違点の観点から説明する。

[0063] 図１０に示すように、プラズマ処理装置１Ａにおいて、高周波電源４１は、整合器４３を介して基板支持部１１の基台１１１０に電気的に接続されている。

[0064] 基板支持部１１は、第１の領域Ｒ１及び第２の領域Ｒ２を含んでいる。図

１０において、第１の領域Ｒ１及び第２の領域Ｒ２の境界は、破線で示されている。第１の領域Ｒ１は、軸線ＡＸに交差する領域であり、略円盤形状を有する。軸線ＡＸは、基板支持部１１の中心軸線であり、チャンバ１０の中心軸線に一致し得る。第１の領域Ｒ１は、その上面として、上述の基板支持面１１１ａを含む。第２の領域Ｒ２は、第１の領域Ｒ１を囲むように延在している。基板Ｗは、基板支持面１１１ａ上に載置され、第１の領域Ｒ１上で支持される。第２の領域Ｒ２は、軸線ＡＸの周りの環状の領域である。第２の領域Ｒ２は、その上面として、上述のリング支持面１１１ｂを含む。リングアセンブリ１１２に含まれるエッジリングＥＲは、リング支持面１１１ｂ上に載置され、第２の領域Ｒ２上で支持される。基板Ｗは、エッジリングＥＲによって囲まれた領域内に配置される。

[0065] 基板支持部１１は、バイアス電極として、第１の電極ＢＥ１及び第２の電極ＢＥ２を含む。第１の電極ＢＥ１は、基板支持面１１１ａの下方で延在しており、第１の領域Ｒ１内に配置されている。第１の電極ＢＥ１は、導電性材料から形成された膜であってもよい。第１の電極ＢＥ１は、略円形の平面形状を有していてもよい。第１の電極ＢＥ１は、その中心が軸線ＡＸ上に位置するように配置され得る。

[0066] 第２の電極ＢＥ２は、リング支持面１１１ｂの下方で延在しており、第２の領域Ｒ２内で延在している。第２の電極ＢＥ２は、導電性材料から形成された膜であってもよい。第２の電極ＢＥ２は、略環状の平面形状を有していてもよい。第２の電極ＢＥ２は、その中心が軸線ＡＸ上に位置するように配置され得る。

[0067] 図１０に示すように、静電チャック１１１１は、誘電体部１１１１ｄを含んでいてもよい。誘電体部１１１１ｄは、上述のセラミック部材１１１１ａであり得る。誘電体部１１１１ｄの中央部分は、第１の領域Ｒ１を構成していてもよく、その上面として、基板支持面１１１ａを有していてもよい。誘電体部１１１１ｄの周縁部分は、第２の領域Ｒ２を構成していてもよく、その上面として、リング支持面１１１ｂを有していてもよい。

[0068] 静電チャック１１１１は、静電電極１１１１ｂの一部として、チャック電極ＣＥ１を含んでいてもよい。チャック電極ＣＥ１は、誘電体部１１１１ｄ内且つ第１の領域Ｒ１内に配置される。チャック電極ＣＥ１は、導電性材料から形成された膜であってもよい。チャック電極ＣＥ１は、略円形の平面形状を有していてもよい。チャック電極ＣＥ１は、その中心が軸線ＡＸ上に位置するように配置され得る。チャック電極ＣＥ１は、基板支持面１１１ａと第１の電極ＢＥ１との間で延在し得る。

[0069] また、静電チャック１１１１は、静電電極１１１１ｂの別の一部として、チャック電極ＣＥ２及びＣＥ３を含んでいてもよい。チャック電極ＣＥ２及びＣＥ３の各々は、誘電体部１１１１ｄ内且つ第２の領域Ｒ２内に配置される。チャック電極ＣＥ２及びＣＥ３の各々は、導電性材料から形成された膜であってもよい。チャック電極ＣＥ２及びＣＥ３の各々は、軸線ＡＸの周りで周方向に延びていてもよく、略環状の平面形状を有していてもよい。チャック電極ＣＥ２は、チャック電極ＣＥ３に対して内側に配置されている。即ち、チャック電極ＣＥ２と軸線ＡＸとの間の径方向の距離は、チャック電極ＣＥ３と軸線ＡＸとの間の径方向の距離よりも小さい。また、チャック電極ＣＥ２及びＣＥ３の各々は、リング支持面１１１ｂと第２の電極ＢＥ２との間で延在し得る。

[0070] プラズマ処理装置１Ａは、直流電源５１ｐを更に含んでいてもよい。直流電源５１ｐは、スイッチ５１ｓを介してチャック電極ＣＥ１に電気的に接続されている。直流電源５１ｐとチャック電極ＣＥ１との間には、フィルタ５１ｆが更に接続されていてもよい。フィルタ５１ｆは、ソース高周波電力ＨＦのようなＲＦ信号を遮断するか、減衰させるように構成されたローパスフィルタである。直流電源５１ｐからの電圧がチャック電極ＣＥ１に印加されると、静電チャック１１１１と基板Ｗとの間で静電引力が発生する。基板Ｗは、発生した静電引力により、第１の領域Ｒ１に引き付けられて第１の領域Ｒ１によって保持される。

[0071] プラズマ処理装置１Ａは、直流電源５２ｐ及び５３ｐを更に含んでいても

よい。直流電源５２ｐは、スイッチ５２ｓを介してチャック電極ＣＥ２に電気的に接続されている。直流電源５２ｐとチャック電極ＣＥ２との間には、フィルタ５２ｆが更に接続されていてもよい。フィルタ５２ｆは、ソース高周波電力ＨＦのようなＲＦ信号を遮断するか、減衰させるように構成されたローパスフィルタである。直流電源５３ｐは、スイッチ５３ｓを介してチャック電極ＣＥ３に電気的に接続されている。直流電源５３ｐとチャック電極ＣＥ３との間には、フィルタ５３ｆが更に接続されていてもよい。フィルタ５３ｆは、ソース高周波電力ＨＦのようなＲＦ信号を遮断するか、減衰させるように構成されたローパスフィルタである。直流電源５２ｐ、５３ｐからの電圧がチャック電極ＣＥ２、ＣＥ３に印加されると、静電チャック１１１１とエッジリングＥＲとの間で静電引力が発生する。エッジリングＥＲは、発生した静電引力により、第２の領域Ｒ２に引き付けられて第２の領域Ｒ２によって保持される。なお、チャック電極ＣＥ２とチャック電極ＣＥ３には、それらの間に電位差が生じるように電圧が印加され得る。即ち、第２の領域Ｒ２は、双極型の静電チャックを構成していてもよい。

[0072] プラズマ処理装置１Ａにおいて、バイアス電源４２は、第１の電極ＢＥ１及び第２の電極ＢＥ２の双方に電気バイアスＥＢを供給するように構成されている。バイアス電源４２は、第１の電極ＢＥ１及び第２の電極ＢＥ２の双方に電気バイアスＥＢを分配するように構成された単一の電源であってもよい。バイアス電源４２は、第１の電極ＢＥ１に電気的に接続された第１の電源４２１と第２の電極ＢＥ２に電気的に接続された第２の電源４２２を含んでいてもよい。第１の電源４２１は、第１の電極ＢＥ１に電気バイアスＥＢを供給し、第２の電源４２２は、第２の電極ＢＥ２に電気バイアスＥＢを供給する。

[0073] プラズマ処理装置１Ａにおいて、制御部２は、エッジリングＥＲの消耗量の増加につれて、第１の電極ＢＥ１に供給される電気バイアスＥＢのレベルに対して第２の電極ＢＥ２に供給される電気バイアスＥＢのレベルを増加させるよう、バイアス電源４２を制御してもよい。電気バイアスＥＢが電圧パ

ルスＶＰを含む場合には、電気バイアスＥＢのレベルは電圧パルスＶＰの振幅である。電気バイアスＥＢがバイアス高周波電力ＬＦである場合には、電気バイアスＥＢのレベルはバイアス高周波電力ＬＦのパワーレベルである。プラズマ処理装置１Ａによれば、第１の電極ＢＥ１に供給される電気バイアスＥＢのレベルに対して第２の電極ＢＥ２に供給される電気バイアスＥＢのレベルを調整することにより、基板Ｗ上のシースの上端位置とエッジリングＥＲ上のシースの上端位置との差を低減することが可能となる。その結果、基板Ｗのエッジに対するイオンの進行方向を垂直な方向に補正することが可能となる。

[0074] なお、シースの厚さは、プラズマの密度の１／２乗に反比例する。プラズマ処理期間P_Sではソース高周波電力ＨＦが連続的に供給されるので、プラズマの密度の変動は小さい。したがって、第１の電極ＢＥ１及び第２の電極ＢＥ２に個別にレベル調整された電気バイアスＥＢを連続的に供給することにより、基板Ｗ上のシースの上端位置とエッジリングＥＲ上のシースの上端位置との差を低減することが可能となる。

[0075] 以下、制御部２及び／又は電源システム３０Ｓの制御部のようなプラズマ処理装置１及び１Ａにおける一つ以上の処理回路として用いられ得る処理回路の例について説明する。図１１は、本明細書に記載の動作をコンピュータ上で実施する処理回路のブロック図である。図１１は、任意のコンピュータ上の制御処理を制御するために使用され得る処理回路１３０を図示している。フローチャートにおける記述又はブロックは、処理の特定の論理機能又はステップを実施するための一つ以上の実行可能な命令を含むモジュール、セグメント、又はコードの一部を表すものである。当業者によって理解されるように、関連する機能に応じて、略同時、又は逆の順序等、図示又は記載の順序とは異なる順序で実行可能な機能を有する別の実施例が、本開示の例示的実施形態の範囲内に含まれる。本明細書に記載の様々な要素、特徴、及び処理は互いに独立に使用されてもよく、様々な方法で組み合わせられてもよい。考えられ得るあらゆる組合せ及び部分的な組合せが、本開示の範囲に含

まれ得る。

[0076] 図１１では、処理回路１３０は、上述／後述の一つ以上の制御処理を実施するＣＰＵ１２００を含む。処理データ及び命令は、メモリ１２０２に格納されてもよい。これらの処理データ及び命令は、ハードディスクドライブ（ＨＤＤ:Hard Disk Drive）や可搬記憶媒体等の記憶媒体ディスク１２０４に格納されても、遠隔で格納されてもよい。更に、特許請求の範囲に記載する本開示は、本発明による処理の命令が格納されるコンピュータ可読媒体の形態によって限定されるものではない。例えば、これらの命令は、ＣＤ、ＤＶＤ、フラッシュメモリ、ＲＡＭ、ＲＯＭ、ＰＲＯＭ、ＥＰＲＯＭ、ＥＥＰＲＯＭ、ハードディスク、又は処理回路１３０が通信するサーバ及び／又はコンピュータ等の任意の他の情報処理装置に格納されてもよい。

[0077] 更に、特許請求の範囲に記載する本開示は、ユーティリティアプリケーション、バックグラウンドデーモン、オペレーティングシステムの構成要素、又はそれらの組合せとして提供されてもよく、ＣＰＵ１２００及びマイクロソフトウィンドウズ（登録商標）、ＵＮＩＸ（登録商標）、Ｓｏｌａｒｉｓ（登録商標）、ＬＩＮＵＸ（登録商標）、Ａｐｐｌｅ　ＭＡＣ－ＯＳ等の当業者に既知のオペレーティングシステムと連動して実行されてもよい。

[0078] 処理回路１３０を構築するハードウェア要素は、様々な回路要素によって実現することができる。更に、上述の実施形態の各機能は、一つ以上の処理回路を含む回路によって実施することができる。図１１に示すように、処理回路は、特定のプログラムがなされた処理装置、例えば処理装置（ＣＰＵ）１２００を含む。処理回路はまた、特定用途向け回路（ＡＳＩＣ: application specific integrated circuit）や記載の機能を実施するように構成された従来の回路部品等のデバイスを含む。

[0079] 図１１では、処理回路１３０は上述の処理を実施するＣＰＵ１２００を含む。処理回路１３０は、汎用コンピュータ又は特定の専用機であってもよい。一実施形態では、処理装置１２００がプラズマ生成部１２及びガス供給部２０の制御、或いは又は加えて、高周波電源４１及びバイアス電源４２の制

御を行うようにプログラミングされている場合には、処理回路１３０は特定の専用機として機能する。

[0080] 或いは又は更に、ＣＰＵ１２００は、当業者には理解されるように、ＦＰＧＡ、ＡＳＩＣ、ＰＬＤ上で、又は離散した論理回路を用いて実装されてもよい。更に、ＣＰＵ１２００は、上述の本発明の処理の命令を並行して実施するように協働する複数の処理装置として実施してもよい。

[0081] 図１１の処理回路１３０はまた、ネットワーク１２２８とインターフェース接続するためのネットワーク制御器１２０６、例えば米国インテル株式会社のIntel Ethernet PROネットワークインターフェースカード等を含む。ネットワーク１２２８は、理解可能なように、インターネット等のパブリックネットワーク、ＬＡＮやＷＡＮ等のプライベートネットワーク、又はそれらの任意の組合せでよく、また、ＰＳＴＮやＩＳＤＮ等のサブネットワークを含んでもよい。ネットワーク１２２８はまた、イーサネットネットワーク等のような有線でもよく、ＥＤＧＥ、３Ｇ、４Ｇ無線セルラシステムを含むセルラネットワーク等の無線でもよい。無線ネットワークはまた、Wi-Fi、Bluetooth（登録商標）、又は他の任意の既知の無線通信形態でもよい。

[0082] 処理回路１３０は、モニタ等の表示装置１２１０とインターフェース接続するためのグラフィックカードやグラフィックアダプタ等の表示装置制御器１２０８を更に含む。汎用Ｉ／Ｏインターフェース１２１２が、キーボード及び／又はマウス１２１４、並びに表示装置１２１０と一体、又は別体のタッチパネル１２１６とインターフェース接続されている。汎用Ｉ／Ｏインターフェースはまた、プリンタ及びスキャナ等の様々な周辺機器１２１８に接続されている。

[0083] 記憶装置制御器１２２４は、ＩＳＡ、ＥＩＳＡ、ＶＥＳＡ、ＰＣＩ等の通信バス１２２６を介して記憶媒体ディスク１２０４に接続され、処理回路１３０のすべての構成要素が互いに接続されている。表示装置１２１０、キーボード及び／又はマウス１２１４、並びに表示装置制御器１２０８、記憶装置制御器１２２４、ネットワーク制御器１２０６、音声制御器１２２０、及

び汎用Ｉ／Ｏインターフェース１２１２の一般的な特徴及び機能については、本明細書では簡略化のために既知のものとして説明を省略する。

[0084] 本開示で記載する例示的な回路要素は、他の要素と置換え可能であり、本明細書に記載の例と異なる構造を有してもよい。更に、本明細書に記載の特徴を実施するように構成された回路は、複数の回路ユニット（例えば、チップ）で実施されても、又はこれらの特徴が単一のチップセットの回路に組みこまれてもよい。

[0085] 本明細書に記載の機能及び特徴はまた、システム上で分散配置された様々な構成要素によって実行されてもよい。例えば、一つ以上の処理装置がこれらのシステムの機能を実行してもよく、その場合、処理装置はネットワーク内で通信している複数の構成要素にわたって分散して配置される。分散配置された構成要素として、様々なヒューマンインターフェース及び通信装置（表示モニタ、スマートフォン、タブレット、個人情報端末（ＰＤＡ:Personal Digital Assistant）等）に加えて、処理を共有できる一つ以上のクライアント機及びサーバ機が含まれ得る。ネットワークは、ＬＡＮやＷＡＮ等のプライベートネットワークでも、インターネット等のパブリックネットワークでもよい。システムへの入力は、ユーザによる直接入力によって受け付けても、リアルタイムで又はバッチ処理として遠隔に受け付けてもよい。更に、実施例の一部を上述のものと同一ではないモジュール又はハードウェア上で実施してもよい。したがって、他の実施例も特許請求の範囲に含まれる。

[0086] 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。

[0087] 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］～［Ｅ１７］に記載する。

[0088] ［Ｅ１］

チャンバと、

前記チャンバ内の基板支持部と、

前記チャンバ内のガスからプラズマを生成するためにソース高周波電力を供給するように構成された高周波電源と、

前記基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために前記基板支持部に電気バイアスを供給するように構成されたバイアス電源と、

前記高周波電源及び前記バイアス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、プラズマ処理期間において、前記ソース高周波電力及び前記電気バイアスを連続的且つ同時に供給し、前記ソース高周波電力のパワーレベルを３ｋＷ以下、前記電気バイアスの波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数を４００ｋＨｚ未満、前記電気バイアスの電圧振幅を３ｋＶ以上に設定するよう、前記高周波電源及び前記バイアス電源を制御するように構成されている、プラズマ処理装置。

[0089] ［Ｅ２］

前記制御部は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記電圧振幅を増加させるよう、前記バイアス電源を制御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。

[0090] ［Ｅ３］

前記制御部は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記バイアス周波数を変更するよう、前記バイアス電源を制御するように構成されている、Ｅ１又Ｅ２に記載のプラズマ処理装置。

[0091] ［Ｅ４］

前記電気バイアスは、前記波形周期の時間間隔で周期的に供給される電圧パルスであり、前記電圧振幅は、前記電圧パルスの振幅である、Ｅ１～Ｅ３の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0092] ［Ｅ５］

前記制御部は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記波形

周期における前記電圧パルスのデューティ比を低下させるよう、前記バイアス電源を制御するように構成されている、Ｅ４に記載のプラズマ処理装置。

[0093] ［Ｅ６］

前記電気バイアスは、前記バイアス周波数を有するバイアス高周波電力であり、前記電圧振幅は、前記バイアス高周波電力のピークツーピーク電圧である、Ｅ１～Ｅ３の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0094] ［Ｅ７］

前記チャンバ内のガスの排気を行うように構成された排気システムを更に備え、

前記制御部は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記チャンバ内の圧力を低下させるよう、前記排気システムを制御するように構成されている、

Ｅ１～Ｅ６の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0095] ［Ｅ８］

前記制御部は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記ソース高周波電力のパワーレベルを変更するよう、前記高周波電源を制御するように構成されている、Ｅ１～Ｅ７の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0096] ［Ｅ９］

前記基板支持部の温度を調整するように構成された温調機構を更に備え、

前記制御部は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記基板支持部の温度を低下させるよう、前記温調機構を制御するように構成されている、Ｅ１～Ｅ８の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0097] ［Ｅ１０］

プラズマ処理装置のチャンバ内のガスからプラズマを生成するためにソース高周波電力を供給するように構成された高周波電源と、

前記チャンバ内の基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために前記基板支持部に電気バイアスを供給するように構成されたバイアス電源と、

を備え、

前記高周波電源及び前記バイアス電源はそれぞれ、プラズマ処理期間において前記ソース高周波電力及び前記電気バイアスを連続的且つ同時に供給するように構成されており、前記高周波電源は、該プラズマ処理期間において前記ソース高周波電力のパワーレベルを３ｋW以下に設定するように構成されており、前記バイアス電源は、該プラズマ処理期間において、前記電気バイアスの波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数を４００ｋＨｚ未満に、前記電気バイアスの電圧振幅を３ｋＶ以上に設定するように構成されている、電源システム。

[0098] ［Ｅ１１］

前記バイアス電源は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記電圧振幅を増加させるように構成されている、Ｅ１０に記載の電源システム。

[0099] ［Ｅ１２］

前記バイアス電源は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記バイアス周波数を変更するように構成されている、Ｅ１０又はＥ１１に記載の電源システム。

[0100] ［Ｅ１３］

前記電気バイアスは、前記波形周期の時間間隔で周期的に供給される電圧パルスであり、前記電圧振幅は、前記電圧パルスの振幅である、Ｅ１０～Ｅ１２の何れか一項に記載の電源システム。

[0101] ［Ｅ１４］

前記バイアス電源は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記波形周期における前記電圧パルスのデューティ比を低下させるように構成されている、Ｅ１３に記載の電源システム。

[0102] ［Ｅ１５］

前記電気バイアスは、前記バイアス周波数を有するバイアス高周波電力であり、前記電圧振幅は、前記バイアス高周波電力のピークツーピーク電圧で

ある、Ｅ１０～Ｅ１２の何れか一項に記載の電源システム。

[0103] ［Ｅ１６］

前記高周波電源は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記ソース高周波電力のパワーレベルを変更するように構成されている、Ｅ１０～Ｅ１５の何れか一項に記載の電源システム。

[0104] ［Ｅ１７］

（ａ）プラズマ処理期間においてプラズマ処理装置のチャンバ内でガスからプラズマを生成するために、連続的にソース高周波電力を供給する工程と、

（ｂ）前記プラズマ処理期間において前記チャンバ内の基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために、前記（ａ）における前記ソース高周波電力の供給と同時且つ連続的に前記基板支持部に電気バイアスを供給する工程と、

を含み、

前記プラズマ処理期間において、前記ソース高周波電力のパワーレベルが３ｋＷ以下に設定され、前記電気バイアスの波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数が４００ｋＨｚ未満に設定され、前記電気バイアスの電圧振幅が３ｋＶ以上に設定される、

プラズマ処理方法。

[0105] 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

[0106] １…プラズマ処理装置、２…制御部、１０…チャンバ、１１…基板支持部、４１…高周波電源、４２…バイアス電源。

請求の範囲

[請求項1] チャンバと、

前記チャンバ内の基板支持部と、

前記チャンバ内のガスからプラズマを生成するためにソース高周波電力を供給するように構成された高周波電源と、

前記基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために前記基板支持部に電気バイアスを供給するように構成されたバイアス電源と、

前記高周波電源及び前記バイアス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、プラズマ処理期間において、前記ソース高周波電力及び前記電気バイアスを連続的且つ同時に供給し、前記ソース高周波電力のパワーレベルを３ｋW以下、前記電気バイアスの波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数を４００ｋＨｚ未満、前記電気バイアスの電圧振幅を３ｋＶ以上に設定するよう、前記高周波電源及び前記バイアス電源を制御するように構成されている、プラズマ処理装置。

[請求項2] 前記制御部は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記電圧振幅を増加させるよう、前記バイアス電源を制御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] 前記制御部は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記バイアス周波数を変更するよう、前記バイアス電源を制御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4] 前記電気バイアスは、前記波形周期の時間間隔で周期的に供給される電圧パルスであり、前記電圧振幅は、前記電圧パルスの振幅である、請求項１～３の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項5] 前記制御部は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前

記波形周期における前記電圧パルスのデューティ比を低下させるよう、前記バイアス電源を制御するように構成されている、請求項４に記載のプラズマ処理装置。

[請求項6] 前記電気バイアスは、前記バイアス周波数を有するバイアス高周波電力であり、前記電圧振幅は、前記バイアス高周波電力のピークツーピーク電圧である、請求項１～３の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項7] 前記チャンバ内のガスの排気を行うように構成された排気システムを更に備え、

前記制御部は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記チャンバ内の圧力を低下させるよう、前記排気システムを制御するように構成されている、

請求項１～３の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項8] 前記制御部は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記ソース高周波電力のパワーレベルを変更するよう、前記高周波電源を制御するように構成されている、請求項１～３の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項9] 前記基板支持部の温度を調整するように構成された温調機構を更に備え、

前記制御部は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記基板支持部の温度を低下させるよう、前記温調機構を制御するように構成されている、請求項１～３の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項10] プラズマ処理装置のチャンバ内のガスからプラズマを生成するためにソース高周波電力を供給するように構成された高周波電源と、

前記チャンバ内の基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために前記基板支持部に電気バイアスを供給するように構成されたバイアス電源と、

を備え、

前記高周波電源及び前記バイアス電源はそれぞれ、プラズマ処理期間において前記ソース高周波電力及び前記電気バイアスを連続的且つ同時に供給するように構成されており、前記高周波電源は、該プラズマ処理期間において前記ソース高周波電力のパワーレベルを３ｋＷ以下に設定するように構成されており、前記バイアス電源は、該プラズマ処理期間において、前記電気バイアスの波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数を４００ｋＨｚ未満に、前記電気バイアスの電圧振幅を３ｋＶ以上に設定するように構成されている、電源システム。

[請求項11] 前記バイアス電源は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記電圧振幅を増加させるように構成されている、請求項１０に記載の電源システム。

[請求項12] 前記バイアス電源は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記バイアス周波数を変更するように構成されている、請求項１０に記載の電源システム。

[請求項13] 前記電気バイアスは、前記波形周期の時間間隔で周期的に供給される電圧パルスであり、前記電圧振幅は、前記電圧パルスの振幅である、請求項１０～１２の何れか一項に記載の電源システム。

[請求項14] 前記バイアス電源は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記波形周期における前記電圧パルスのデューティ比を低下させるように構成されている、請求項１３に記載の電源システム。

[請求項15] 前記電気バイアスは、前記バイアス周波数を有するバイアス高周波電力であり、前記電圧振幅は、前記バイアス高周波電力のピークツーピーク電圧である、請求項１０～１２の何れか一項に記載の電源システム。

[請求項16] 前記高周波電源は、前記プラズマ処理期間における時間経過につれて前記ソース高周波電力のパワーレベルを変更するように構成されている、請求項１０～１２の何れか一項に記載の電源システム。

[請求項17] （ａ）プラズマ処理期間においてプラズマ処理装置のチャンバ内でガスからプラズマを生成するために、連続的にソース高周波電力を供給する工程と、

（ｂ）前記プラズマ処理期間において前記チャンバ内の基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために、前記（ａ）における前記ソース高周波電力の供給と同時且つ連続的に前記基板支持部に電気バイアスを供給する工程と、

を含み、

前記プラズマ処理期間において、前記ソース高周波電力のパワーレベルが３ｋＷ以下に設定され、前記電気バイアスの波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数が４００ｋＨｚ未満に設定され、前記電気バイアスの電圧振幅が３ｋＶ以上に設定される、

プラズマ処理方法。