

明 細 書

発明の名称：エッチング方法及びプラズマ処理装置

技術分野

[0001] 本開示の例示的实施形態は、エッチング方法及びプラズマ処理装置に関するものである。

背景技術

[0002] 電子デバイスの製造においては、膜に凹部を形成するために、膜に対してプラズマエッチングが行われることがある。このような凹部の形成のために、エッチング対象膜上にはマスクが形成される。マスクとしては、レジストマスクが知られている。レジストマスクは、エッチング対象膜のプラズマエッチング中に消耗する。そこで、ハードマスクが用いられてきた。ハードマスクとしては、特許文献1に記載されているように、タングステンシリサイド（WSi）から形成されたハードマスクが知られている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開2007-294836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、形状異常を抑制しながら膜をエッチング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、エッチング方法は、（a）基板を提供する工程であって、前記基板は、第1膜と、前記第1膜上に開口を有する第2膜とを備え、前記第1膜は金属元素及び非金属元素を含む、工程と、（b）前記開口に対応して前記第1膜に形成される凹部の側壁上に保護膜を形成する工程と、（c）前記（b）と同時又は前記（b）の後に、ハロゲン含有ガスを含む処理ガスから生成されるプラズマにより、前記開口を介して前記第1膜をエッチングする工程と、を含む。

発明の効果

[0006] 一つの例示的实施形態によれば、形状異常を抑制しながら膜をエッチングする技術が提供される。

図面の簡単な説明

[0007] [図1]図1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。

[図2]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。

[図3]図3は、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法のフローチャートである。

[図4]図4は、図3の方法が適用され得る一例の基板の断面図である。

[図5]図5は、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法の一工程を示す断面図である。

[図6]図6は、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法の一工程を示す断面図である。

[図7]図7は、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法の一工程を示す断面図である。

[図8]図8は、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法の一工程を示す断面図である。

[図9]図9は、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法の一工程を示す断面図である。

[図10]図10は、ソース電力及びバイアス電力の時間変化を示すタイミングチャートの一例である。

[図11]図11は、ソース電力及びバイアス電力の時間変化を示すタイミングチャートの一例である。

[図12]図12は、ソース電力及びバイアス電力の時間変化を示すタイミングチャートの一例である。

[図13]図13は、ソース電力及びバイアス電力の時間変化を示すタイミング

チャートの一例である。

[図14]図14は、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法のフローチャートである。

[図15]図15は、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法の一工程を示す断面図である。

[図16]図16は、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法の一工程を示す断面図である。

[図17]図17は、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法の一工程を示す断面図である。

[図18]図18は、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法の一工程を示す断面図である。

[図19]図19は、一つの例示的实施形態に係る基板処理システムを示す図である。

[図20]図20は、疎密パターンを有する第2膜を含む一例の基板の断面図である。

[図21]図21は、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法のフローチャートである。

[図22]図22は、ソース電力及びガス量の時間変化を示すタイミングチャートの一例である。

[図23]図23は、ソース電力及びガス量の時間変化を示すタイミングチャートの一例である。

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。

[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、100 kHz ~ 10 GHz 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、100 kHz ~ 150 MHz 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 2 a 1、記憶部 2 a 2 及び通信インターフェース 2 a 3 を含んでもよい。制御部 2 は、例えばコンピュータ 2 a により実現される。処理部 2 a 1 は、記憶部 2 a 2 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 2 a 2 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 2 a 2 に格納され、処理部 2 a 1 によって記憶部 2 a 2 から読み出されて実行される。媒体は、コンピュータ 2 a 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 2 a 3 に接続されている通信回線であってもよい。処理部 2 a 1 は、CPU (Central Processing Unit) であってもよい。記憶部 2 a 2 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 2 a 3 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 1 0、ガス供給部 2 0、電源 3 0 及び排気システム 4 0 を含む。また、プラズマ処理装置 1 は、基板支持部 1 1 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 1 0 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 1 3 を含む。基板支持部 1 1 は、プラズマ処理チャンバ 1 0 内に配置される。シャワーヘッド 1 3 は、基板支持部 1 1 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 1 3 は、プラズマ

処理チャンバ10の天部（c e i l i n g）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の筐体とは電氣的に絶縁される。

[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RF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] 図3は、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法のフローチャートである。図3に示されるエッチング方法MT1（以下、「方法MT1」という）は、上記実施形態のプラズマ処理装置1により実行され得る。方法MT1は、基板Wに適用され得る。

[0027] 図4は、図3の方法が適用され得る一例の基板の断面図である。図4に示されるように、一実施形態において、基板Wは、第1膜F1と、第1膜F1上の第2膜F2とを備える。基板Wは、第1膜F1の下に第3膜F3を更に備えてもよい。基板Wは、第3膜F3の下に下地領域URを更に備えてもよい。

[0028] 第1膜F1は金属元素及び非金属元素を含む。第1膜F1は、金属元素として、タングステン、チタン、モリブデン、ハフニウム、ジルコニウム及びルテニウムからなる群より選ばれる少なくとも1つの遷移金属元素を含んでもよい。第1膜F1は、非金属元素として、シリコン、炭素、窒素、酸素、水素、ホウ素及びリンのうち少なくとも1つを含んでもよい。第1膜F1は、タングステンシリサイド (W_xSi_y)、タングステンシリコンナイトライド ($W_xSi_yN_z$)、タングステンシリコンボロン ($W_xSi_yB_z$) 及びタングステンシリコンカーボン ($W_xSi_yC_z$) からなる群より選ばれる少なくとも

も1つのタングステン化合物を含んでもよい。組成比 x 、 y 及び z のそれぞれは0より大きい実数であってもよい。第1膜F1はハードマスクを形成するための膜であってもよい。

[0029] 第2膜F2は開口OPを有する。第2膜F2は複数の開口OPを有してもよい。開口OPは、ホールパターンを有してもよいし、ラインパターンを有してもよい。開口OPの寸法(CD)は30nm以下であってもよい。第2膜F2はマスクであってもよい。第2膜F2は、シリコン含有膜であってもよいし、シリコン酸化膜であってもよい。第2膜F2はレジストマスクであってもよい。第2膜F2は、錫を含むフォトレジストマスクであってもよい。第2膜F2はEUV露光用のレジストマスクであってもよい。第2膜F2は、疎密パターンを有してもよい(図20参照)。第2膜F2は、第1ピッチPT1で配列され第1寸法CD1を有する複数の第1開口OPと、第2ピッチPT2で配列され第2寸法CD2を有する複数の第2開口OPとを有してもよい。第2ピッチPT2は第1ピッチPT1と異なっている。第2寸法CD2は第1寸法CD1と異なっている。ここでいう「寸法」とは、開口が円形の場合には円の直径(差し渡し径)を意味し、開口が楕円形の場合には楕円の長径及び短径のうち少なくともいずれか一方を意味する。開口が楕円形の場合には、第1寸法CD1と第2寸法CD2との比較は、長径同士又は短径同士の比較によって行われる。

[0030] 第2膜F2は、パターン反転により形成されてもよい。例えば、第1膜F1上に第4膜を形成し、フォトリソグラフィー及びエッチングにより第4膜をパターンニングする。その後、パターンニングされた第4膜上に第5膜を形成し、第5膜により第4膜の開口を充填する。その後、リフトオフにより、パターンニングされた第4膜を除去することにより、残存した第5膜が第2膜F2となる。パターン反転技術は、例えば2021年10月25日に出願された日本特許出願(特願2021-173638号)に記載される。特願2021-173638号の全体は、参照によりここに取り込まれる。

[0031] 第3膜F3は、シリコン含有膜であってもよいし、窒化膜であってもよい

。シリコン含有膜は、シリコン窒化膜（SiN膜）であってもよいし、シリコン炭窒化膜（SiCN膜）であってもよい。第3膜F3はエッチングストップ層であってもよい。

[0032] 下地領域URは、例えばDRAM又は3D-NAND等のメモリデバイスのための少なくとも1つの膜を含んでもよい。

[0033] 以下、方法MT1について、方法MT1が上記実施形態のプラズマ処理装置1を用いて基板Wに適用される場合を例にとって、図3～図13を参照しながら説明する。図5～図9のそれぞれは、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法の一工程を示す断面図である。プラズマ処理装置1が用いられる場合には、制御部2によるプラズマ処理装置1の各部の制御により、プラズマ処理装置1において方法MT1が実行され得る。方法MT1では、図2に示されるように、プラズマ処理チャンバ10内に配置された基板支持部11上の基板Wを処理する。

[0034] 図3に示されるように、方法MT1は、工程ST1～工程ST5を含み得る。工程ST1～工程ST5は順に実行され得る。工程ST1～工程ST5はin-situで行われてもよい。方法MT1は、工程ST1、工程ST2及び工程ST5のうち少なくとも1つを含まなくてもよい。工程ST1は、工程ST4又は工程ST5の後に行われてもよい。

[0035] (工程ST1)

工程ST1では、プラズマ処理チャンバ10をクリーニングする。工程ST1においてクリーニングガスが用いられてもよい。クリーニングガスは、フッ素、塩素又は酸素を含有してもよい。

[0036] (工程ST2)

工程ST2では、プラズマ処理チャンバ10の内壁をプリコートする。工程ST2においてプリコートガスが用いられてもよい。プリコートガスは、四塩化ケイ素（SiCl₄）ガス及びアミノシラン系ガスのうち少なくとも1つを含んでもよい。

[0037] (工程ST3)

工程ST3では、図4に示される基板Wを提供する。基板Wは、プラズマ処理チャンバ10内に提供され得る。基板Wは、プラズマ処理チャンバ10内において基板支持部11により支持され得る。下地領域URは、基板支持部11と第3膜F3との間に配置され得る。

[0038] (工程ST4)

工程ST4では、図5～図7に示されるように、開口OPを介して第1膜F1をエッチングする。工程ST4は、工程ST41、工程ST42及び工程ST43を含んでもよい。工程ST42は、工程ST41の後に行われてもよいし、工程ST41の前に行われてもよい。工程ST43は工程ST41及び工程ST42の後に行われ得る。

[0039] (工程ST41)

工程ST41では、図5に示されるように、ハロゲン含有ガスを含む第1処理ガスから生成される第1プラズマPL1により、開口OPを介して第1膜F1をエッチングする。その結果、開口OPに対応する凹部RSが第1膜F1に形成される。第1プラズマPL1は、高周波電力(第1高周波電力)を供給することによって生成され得る。高周波電力は、連続波であってもよいし、パルスであってもよい。高周波電力は、ソース電力であってもよい。

[0040] 工程ST41において、基板支持部11にバイアス電力(第1バイアス電力)が供給されてもよい。バイアス電力は、連続波であってもよいし、パルスであってもよい。

[0041] 工程ST41において、第1プラズマPL1は第1圧力下で生成されてもよい。第1圧力は、30mTorr(4Pa)以下であってもよい。

[0042] 工程ST41において、基板支持部11の温度は、60℃以上であってもよいし、100℃以上であってもよい。

[0043] ハロゲン含有ガスは、塩素含有ガスを含んでもよいし、フッ素含有ガスを含んでもよい。塩素含有ガスの例は、塩素ガスを含む。フッ素含有ガスの例は、CF₄ガス及びNF₃ガスを含む。第1処理ガスは不活性ガスを更に含んでもよい。不活性ガスの例は、貴ガス及び窒素ガスを含む。

[0044] 工程ST41は、堆積工程とエッチング工程とを含んでもよい。堆積工程及びエッチング工程は、時間ごとに条件を変えることによって、分離されてもよい。堆積工程及びエッチング工程は、ソース電力及びバイアス電力を調整することによって、分離されてもよい。堆積工程及びエッチング工程は、ソース電力のパルスの位相とバイアス電力のパルスの位相とをずらすことによって、分離されてもよい。

[0045] (工程ST42)

工程ST42では、図6に示されるように、工程ST41により形成される凹部RSの側壁RSaを、第2処理ガスから生成される第2プラズマPL2により改質する。その結果、凹部RSの側壁RSaに改質領域MRが形成される。第2処理ガスは第1処理ガスと異なる。第2処理ガスは酸素含有ガスを含んでもよい。酸素含有ガスの例は酸素ガスを含む。第2処理ガスは不活性ガスを更に含んでもよい。不活性ガスの例は、貴ガス及び窒素ガスを含む。改質領域MRは、第1膜F1に含まれる金属元素の酸化物を含んでもよいし、第1膜F1に含まれる非金属元素の酸化物を含んでもよい。第2プラズマPL2により、凹部RSの底部RSbが改質されてもよい。

[0046] 工程ST42において、プラズマ処理チャンバ10内の圧力は50mTorr (6.7Pa) 以上であってもよい。

[0047] 工程ST42において、基板支持部11の温度は、60℃以上であってもよいし、100℃以上であってもよい。

[0048] (工程ST43)

工程ST43では、工程ST41と工程ST42とを繰り返す。凹部RSの側壁RSaの改質領域MRは、その後の工程ST41において、側壁RSaのエッチングを抑制する。凹部RSの底部RSbに形成された改質領域MRは、その後の工程ST41のエッチングにより除去される。工程ST43は、図7に示されるように、凹部RSの底部RSbが第3膜F3に到達するまで行われてもよい。

[0049] (工程ST5)

工程ST5では、図8及び図9に示されるように、第1膜F1を更にエッチングする。工程ST5は、凹部RSの底部RSbが第3膜F3に到達した状態で開始されてもよい。工程ST5はオーバーエッチング工程であってもよい。工程ST5は、工程ST51、工程ST52及び工程ST53を含んでもよい。工程ST5は、工程ST52及び工程ST53のうち少なくとも1つを含まなくてもよい。工程ST52は、工程ST51の後に行われてもよいし、工程ST51の前に行われてもよい。工程ST53は工程ST51及び工程ST52の後に行われ得る。

[0050] (工程ST51)

工程ST51では、図8に示されるように、ハロゲン含有ガスを含む第3処理ガスから生成される第3プラズマPL3により、開口OPを介して第1膜F1をエッチングする。第1膜F1は横方向にエッチングされ得る。工程ST51では、第3プラズマPL3により、第3膜F3がエッチングされてもよい。第1膜F1と第3膜F3との界面に隣接する第1膜F1の下部において、第3プラズマPL3により形成される凹部RSの寸法は、第3プラズマPL3に代えて第1プラズマPL1が用いられる場合に形成される凹部の寸法より小さくてもよい。第3プラズマPL3による第3膜F3のエッチングレートは、第3プラズマPL3による第1膜F1のエッチングレートより小さくてもよいし、第1プラズマPL1による第3膜F3のエッチングレートより大きくてもよい。凹部の寸法とは、凹部の深さ方向に垂直な方向の長さを意味する。あるいは、凹部の寸法とは、凹部の差し渡し径を意味する。

[0051] 第3プラズマPL3は、高周波電力（第2高周波電力）を供給することによって生成され得る。高周波電力は、連続波であってもよいし、パルスであってもよい。高周波電力はソース電力であってもよい。電力がパルスである場合、電力の単位時間当たりのエネルギーは、パルスの平均値である。例えば、パルスのオン状態の電力が100W、パルスのオフ状態の電力が0W、デューティー比が50%の場合、パルスの平均値は50Wである。

[0052] 工程ST51において、基板支持部11にバイアス電力（第2バイアス電

力)が供給されてもよい。バイアス電力は、連続波であってもよいし、パルスであってもよい。工程ST51における第2バイアス電力の単位時間当たりのエネルギーは、工程ST41における第1バイアス電力の単位時間当たりのエネルギーより大きくてもよい。これにより、工程ST51において、第3プラズマPL3による第3膜F3のエッチングレートが増大する。

[0053] 工程ST41における第1バイアス電力は第1パルスであってもよい。工程ST51における第2バイアス電力は第2パルスであってもよい。第2パルスのデューティー比と振幅との積(実効パワー)は、第1パルスのデューティー比と振幅との積(実効パワー)より大きくてもよい。これにより、第2バイアス電力の単位時間当たりのエネルギーが第1バイアス電力の単位時間当たりのエネルギーよりも大きくなってよい。例えば、第2パルスのデューティー比が第1パルスのデューティー比よりも大きいと、第2バイアス電力の単位時間当たりのエネルギーを大きくできる。例えば、第2パルスの最大値が第1パルスの最大値よりも大きいと、第2バイアス電力の単位時間当たりのエネルギーを大きくできる。

[0054] 第3処理ガスに含まれるガスの種類の例は、第1処理ガスに含まれるガスの種類の例と同じであってもよい。第3処理ガスは、第3プラズマPL3による第3膜F3のエッチングレートを増大させる反応促進ガスを含んでもよい。反応促進ガスは、水素含有ガス及び $C_xH_yF_z$ (x は1以上の整数、 y 及び z は0以上の整数)ガスのうち少なくとも1つを含んでもよい。水素含有ガスは水素ガスであってもよい。 $C_xH_yF_z$ ガスは、フルオロカーボンガスであってもよいし、ハイドロフルオロカーボンガスであってもよいし、ハイドロカーボンガスであってもよい。第3処理ガスは、ハロゲン含有ガスとして反応促進ガスを含んでもよいし、ハロゲン含有ガスに加えて反応促進ガスを含んでもよい。第3処理ガスは、酸素含有ガスを更に含んでもよい。酸素含有ガスの例は酸素ガスを含む。

[0055] 工程ST51において、第3プラズマPL3は第2圧力下で生成されてもよい。工程ST51における第2圧力は、工程ST41における第1圧力よ

り小さくてもよい。これにより、工程ST51において、エッチングの異方性が高まるので、第3プラズマPL3による第3膜F3のエッチングレートが増大する。

[0056] 工程ST51において、基板支持部11の温度を変更することによって、第3プラズマPL3による第3膜F3のエッチングレートを増大させてもよい。

[0057] 工程ST51における第3処理ガスの総流量は、工程ST41における第1処理ガスの総流量より多くしてもよい。これにより、工程ST51におけるガスの滞在時間 (Residence time) を短くすることができる。よって、凹部RSの底部RSb近傍における反応生成物を素早く脱離させることができる。つまり、排気が促されて、反応生成物が凹部RS外に掻き出されやすくなる。形状異常 (ノッチング) に寄与する反応種も凹部RSの底部RSb近傍に溜まらず排出されやすくなる。ガスの総流量を増加させる際には、工程ST41と工程ST51とで圧力を一定としてもよく、工程ST41と工程ST51とで各ガスの流量比を一定としてもよい。

[0058] (工程ST52)

工程ST52では、図9に示されるように、工程ST51により形成される凹部RSの側壁RSaを、第4処理ガスから生成される第4プラズマPL4により改質する。その結果、第1膜F1と第3膜F3との界面に隣接する第1膜F1の下部において、凹部RSの側壁RSaに改質領域MRが形成される。第4処理ガスに含まれるガスの種類の例は、第2処理ガスに含まれるガスの種類の例と同じであってもよい。第4処理ガス中の酸素含有ガスの分圧は、第2処理ガス中の酸素含有ガスの分圧より低くてもよい。

[0059] (工程ST53)

工程ST53では、工程ST51と工程ST52とを繰り返す。凹部RSの側壁RSaの改質領域MRは、その後の工程ST51において、側壁RSaのエッチングを抑制する。工程ST53は、凹部RSの底部RSbにおける寸法(CD)が所望の寸法となるまで行われてもよい。

- [0060] 工程ST4又は工程ST5の後において、凹部RSのアスペクト比は5以上であってもよいし、10以上であってもよい。凹部RSのアスペクト比は、凹部RSの深さをD1、凹部RSの上端における凹部RSの寸法をD2とすると、 $D1/D2$ で表される。
- [0061] 工程ST5の後に、例えば希釈フッ酸（DHF）により凹部RSの側壁RSaの改質領域MRを除去してもよい。
- [0062] 図10～図13は、ソース電力及びバイアス電力の時間変化を示すタイミングチャートの一例である。これらのタイミングチャートは、工程ST41に関連する。ソース電力は、対向電極（上部電極）に与えられる高周波電力HFであってもよい。バイアス電力は、基板支持部11の本体部111中の電極に与えられる高周波電力LFであってもよい。電力のパルスが供給される場合、電力のオンオフの切り替えによりパルスが生成されてもよいし、電力値の大小によりパルスが生成されてもよい。
- [0063] 図10に示されるように、工程ST41において、ソース電力のパルスが供給され、バイアス電力の連続波が供給されてもよい。ソース電力は、周期CYで周期的に印加されてもよい。周期CYは、第1期間PA及び第2期間PBを含み得る。第2期間PBは第1期間PAの後の期間である。第1期間PAにおいて、ソース電力は高電力H2に維持され、バイアス電力は高電力H1に維持され得る。本明細書において、ソース電力の値及びバイアス電力の値のそれぞれは、高周波電力の実効値であってもよい。第2期間PBにおいて、ソース電力は低電力L2に維持され、バイアス電力は高電力H1に維持され得る。低電力L2は0Wであってもよい。
- [0064] 図11に示されるように、工程ST41において、ソース電力の連続波が供給され、バイアス電力のパルスが供給されてもよい。バイアス電力は、周期CYで周期的に印加されてもよい。第1期間PAにおいて、バイアス電力は高電力H1に維持され、ソース電力は高電力H2に維持され得る。第2期間PBにおいて、バイアス電力は低電力L1に維持され、ソース電力は高電力H2に維持され得る。低電力L1は0Wであってもよい。

- [0065] 図12に示されるように、工程ST41において、ソース電力のパルスが供給され、バイアス電力のパルスが供給されてもよい。ソース電力及びバイアス電力は、周期CYで周期的に印加されてもよい。ソース電力のパルスはバイアス電力のパルスと同期されてもよい。第1期間PAにおいて、バイアス電力は高電力H1に維持され、ソース電力は高電力H2に維持され得る。第2期間PBにおいて、バイアス電力は低電力L1に維持され、ソース電力は低電力L2に維持され得る。
- [0066] 図13に示されるように、工程ST41において、ソース電力のパルスが供給され、バイアス電力のパルスが供給されてもよい。ソース電力及びバイアス電力は、周期CYで周期的に印加されてもよい。周期CYは、第1期間PA、第2期間PB及び第3期間PCを含み得る。第3期間PCは第2期間PBの後の期間である。ソース電力のパルスの位相は、バイアス電力のパルスの位相とずれてもよい。第1期間PAにおいて、バイアス電力は低電力L1に維持され、ソース電力は高電力H2に維持され得る。第1期間PAでは、第1プラズマPL1（図5参照）が生成される。第2期間PBにおいて、バイアス電力は低電力L1に維持され、ソース電力は高電力H2に維持され得る。第2期間PBでは、高いエネルギーを有するイオンが凹部RSの底部RSbに衝突する。第3期間PCにおいて、バイアス電力は低電力L1に維持され、ソース電力は低電力L2に維持され得る。第3期間PCでは、エッチングの副生成物が凹部RSから排出される。
- [0067] 上述のプラズマ処理装置1及び方法MT1によれば、高周波電力のパルスにより第1プラズマPL1が生成されるので、ハロゲン含有ガスの過剰な解離が抑制される。そのため、凹部RSの側壁RSAのエッチングが抑制される。よって、凹部RSの側壁RSAの形状異常（ボーイング）を抑制しながら第1膜F1をエッチングできる。したがって、凹部RSの側壁RSAの垂直性及び凹部RSの局所的な寸法均一性が向上する。また、第1膜F1のエッチングレートの面内均一性も向上する。さらに、ハロゲン含有ガスの過剰な解離が抑制されることにより、第2膜F2のエッチング量を低減できる。

よって、第2膜F2に対する第1膜F1のエッチング選択比を向上できる。

[0068] 上述のプラズマ処理装置1及び方法MT1によれば、工程ST5において、第3膜F3のエッチングレートと第1膜F1のエッチングレートとの差を小さくできる。そのため、工程ST5では、第1膜F1と第3膜F3との界面に隣接する第1膜F1の下部において、凹部RSの側壁RSaにおけるサイドエッチングを抑制できる。よって、サイドエッチングに起因するノッチングの発生を抑制できる。したがって、形状異常（ノッチング）を抑制しながら第1膜F1をエッチングできる。

[0069] ノッチングの発生を抑制すると、凹部RSの底部RSbにおける寸法均一性を向上できる。寸法均一性を示す指標として、LCDU（Local CD Uniformity）の値（ 3σ ）が用いられる。LCDUの値の減少は、寸法均一性の向上を意味する。上述のプラズマ処理装置1及び方法MT1によれば、凹部RSのLCDUの値を例えば1.5nm以下と小さくできる。

[0070] 以下、方法MT1の評価のために行った種々の実験について説明する。以下に説明する実験は、本開示を限定するものではない。

[0071] （第1実験）

第1実験では、WSi膜とWSi膜上のマスクとを有する基板を準備した。マスクは、開口を有するシリコン酸化膜である。この基板について、方法MT1の工程ST41～工程ST43を行って、WSi膜をエッチングした。工程ST41では、塩素ガスを含む処理ガスを用いた。工程ST41では、ソース電力（高周波電力HF）のパルスによりプラズマを生成した。パルスのデューティ比は75%である。工程ST42では、酸素ガスを含む処理ガスを用いた。

[0072] （第2実験）

パルスのデューティ比を50%としたこと以外は第1実験と同様にして第2実験を行った。

[0073] （第3実験）

ソース電力のパルスに代えてソース電力の連続波を用いたこと以外は第1実験と同様にして第3実験を行った。

[0074] (実験結果)

基板の断面において、WSi膜に形成された凹部の深さとマスクの残り厚さを測定することによって、マスクに対するWSi膜のエッチング選択比を算出した。第1実験におけるエッチング選択比は2.44であった。第2実験におけるエッチング選択比は2.90であった。第3実験におけるエッチング選択比は2.16であった。よって、ソース電力のパルスを用いることにより、エッチング選択比が向上することが分かる。さらに、パルスのデューティー比を小さくすることによって、エッチング選択比が向上することが分かる。

[0075] (第4実験)

第4実験では、WSi膜とWSi膜上のマスクとを有する基板を準備した。マスクは、複数のホールパターンを有するシリコン酸化膜である。この基板について、方法MT1の工程ST41～工程ST43及び工程ST51を行って、WSi膜をエッチングした。工程ST52及び工程ST53は行わなかった。工程ST41及び工程ST51では、塩素ガスを含む処理ガスを用いた。工程ST42では、酸素ガスを含む処理ガスを用いた。

[0076] (第5実験)

工程ST51の後、工程ST52及び工程ST53を行ったこと以外は第4実験と同様にして第5実験を行った。工程ST52では、酸素ガスを含む処理ガスを用いた。

[0077] (実験結果)

WSi膜に形成された複数の凹部（ホール）の底部における寸法からLCDUの値を算出した。第4実験のLCDUの値は、第5実験のLCDUの値よりも小さかった。よって、オーバーエッチング工程において、凹部RSの側壁RSaを改質しないことにより、凹部RSの底部RSbにおける寸法均一性が向上することが分かる。

[0078] (第6実験)

第6実験では、WSi膜とWSi膜上のマスクとを有する基板を準備した。マスクは、複数のホールパターンを有するシリコン酸化膜である。この基板について、方法MT1の工程ST41～工程ST43及び工程ST51を行って、WSi膜をエッチングした。工程ST52及び工程ST53は行わなかった。工程ST41及び工程ST51では、塩素ガスを含む処理ガスを用いた。工程ST42では、酸素ガスを含む処理ガスを用いた。工程ST51では、バイアス高周波電力のパルスによりプラズマを生成した。

[0079] (第7実験)

工程ST51において、パルスのデューティー比を5%増加させたこと以外は第6実験と同様にして第7実験を行った。

[0080] (第8実験)

工程ST51において、パルスのデューティー比を15%増加させたこと以外は第6実験と同様にして第8実験を行った。

[0081] (第9実験)

工程ST51において、酸素ガスとハイドロフルオロカーボンガスとを含む処理ガスを用いたこと以外は第6実験と同様にして第9実験を行った。

[0082] (実験結果)

WSi膜に形成された複数の凹部（ホール）の底部における寸法からLCDUの値を算出した。第7実験及び第8実験のLCDUの値は、第6実験のLCDUの値よりも小さかった。よって、オーバーエッチング工程のエッチング工程においてバイアス高周波電力のパルスのデューティー比を大きくすることにより、凹部RSの底部RSbにおける寸法均一性が向上することが分かる。

[0083] 第9実験のLCDUの値は、第6実験のLCDUの値よりも小さかった。よって、オーバーエッチング工程のエッチング工程においてハイドロフルオロカーボンガスを含む処理ガスを用いることにより、凹部RSの底部RSbにおける寸法均一性が向上することが分かる。

[0084] 図14は、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法のフローチャートである。図14に示されるエッチング方法MT2（以下、「方法MT2」という）は、上記実施形態のプラズマ処理装置1により実行され得る。方法MT2は、図4の基板Wに適用され得る。

[0085] 以下、方法MT2について、方法MT2が上記実施形態のプラズマ処理装置1を用いて基板Wに適用される場合を例にとって、図14～図18を参照しながら説明する。図15～図18のそれぞれは、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法の一工程を示す断面図である。プラズマ処理装置1が用いられる場合には、制御部2によるプラズマ処理装置1の各部の制御により、プラズマ処理装置1において方法MT2が実行され得る。方法MT2では、図2に示されるように、プラズマ処理チャンバ10内に配置された基板支持部11上の基板Wを処理する。

[0086] 図14に示されるように、方法MT2は、工程ST1～工程ST3及び工程ST6～工程ST7を含み得る。工程ST1～工程ST3及び工程ST6～工程ST7は順に実行され得る。工程ST1～工程ST3及び工程ST6～工程ST7は*in-situ*で行われてもよい。方法MT2は、工程ST1及び工程ST2のうち少なくとも1つを含まなくてもよい。工程ST1は、工程ST7の後に行われてもよい。工程ST1～工程ST3は、方法MT1の工程ST1～工程ST3と同様に行われてもよい。

[0087] （工程ST6）

工程ST6では、図15に示されるように、開口OPに対応して第1膜F1に形成される凹部RSの側壁RSa上に保護膜DP1を形成する。保護膜DP1は、凹部RSの底部RSb上に形成されなくてもよいし、凹部RSの底部RSb上に形成されてもよい。保護膜DP1は、第2膜F2上に形成されてもよい。保護膜DP1は、処理ガスから生成されるプラズマPL5により形成されてもよい。保護膜DP1は、CVDにより形成されてもよい。工程ST6において、圧力の上昇又は温度の調整により、凹部RSの底部RSb上の保護膜DPの厚みに比べて、凹部RSの側壁RSa上の保護膜DP1

の厚みを大きくできる。

- [0088] 工程ST6における処理ガスは、シリコン含有ガス、炭素含有ガス、ホウ素含有ガス、リン含有ガス、金属含有ガス、硫黄含有ガス、臭素含有ガス及びヨウ素含有ガスのうち少なくとも1つを含んでもよい。シリコン含有ガスの例は、 SiCl_4 ガス及び SiF_4 ガスを含む。炭素含有ガスの例は、フルオロカーボンガス、ハイドロフルオロカーボンガス及びハイドロカーボンガスを含む。ホウ素含有ガスの例は、 BCl_3 ガスを含む。リン含有ガスの例は、 PF_x ガスを含む。金属含有ガスの例は、 WF_6 ガス及び TiCl_4 ガスを含む。硫黄含有ガスの例は、 SO_2 ガス及び COS ガスを含む。臭素含有ガスの例は、 HBr ガスを含む。ヨウ素含有ガスの例は、 HI を含む。
- [0089] 工程ST6における第1例の処理ガスは、 HBr ガスを含む。第1例の処理ガスは更に酸素ガスを含んでもよい。この場合、保護膜DP1は、 SiBr_xO_y を含む。
- [0090] 工程ST6における第2例の処理ガスは、 SiCl_4 ガス及び酸素ガスを含む。この場合、保護膜DP1は、 SiO_x を含む。
- [0091] 工程ST6における第3例の処理ガスは、 BCl_3 ガス及び酸素ガスを含む。この場合、保護膜DP1は、 BO_x を含む。
- [0092] 工程ST6における第4例の処理ガスは、 C_4F_8 ガス又は C_4F_6 ガスを含む。この場合、保護膜DP1は、 C_xF_y を含む。
- [0093] 工程ST6における第5例の処理ガスは、 CH_3F ガス又は CH_4 ガスを含む。この場合、保護膜DP1は、 C_xH_y を含む。
- [0094] 工程ST6における第6例の処理ガスは、 COS ガス又は CH_xF_y ガスを含む。
- [0095] 凹部RSは、工程ST6と同時に又は工程ST6の前に行われるエッチングにより形成され得る。その場合、エッチングは工程ST7のエッチングと同様の行われてもよい。
- [0096] (工程ST7)
- 工程ST7では、図16に示されるように、ハロゲン含有ガスを含む処理

ガスから生成されるプラズマ P L 6 により、開口 O P を介して第 1 膜 F 1 をエッチングする。工程 S T 7 は、工程 S T 6 と同時に行われてもよい。工程 S T 7 が行われるプラズマ処理チャンバは、工程 S T 6 が行われるプラズマ処理チャンバと同じであってもよいし、異なってもよい。

[0097] 工程 S T 7 は、工程 S T 7 1、工程 S T 7 2 及び工程 S T 7 3 を含んでもよい。工程 S T 7 は、工程 S T 7 2 及び工程 S T 7 3 のうち少なくとも 1 つを含まなくてもよい。工程 S T 7 2 は、工程 S T 7 1 の後に行われてもよいし、工程 S T 7 1 の前に行われてもよい。工程 S T 7 3 は工程 S T 7 1 及び工程 S T 7 2 の後に行われ得る。工程 S T 6 は、工程 S T 7 1 と工程 S T 7 2 との間に行われてもよいし、工程 S T 7 2 と工程 S T 7 3 との間に行われてもよい。工程 S T 6 は、工程 S T 7 1 と同時に行われてもよいし、工程 S T 7 2 と同時に行われてもよい。

[0098] (工程 S T 7 1)

工程 S T 7 1 では、図 1 6 に示されるように、プラズマ P L 6 により、開口 O P を介して第 1 膜 F 1 をエッチングする。その結果、凹部 R S の底部 R S b がエッチングされるので、凹部 R S が深くなる。工程 S T 7 1 は、方法 M T 1 の工程 S T 4 1 と同様に行われてもよい。

[0099] (工程 S T 7 2)

工程 S T 7 2 は、方法 M T 1 の工程 S T 4 2 と同様に行われてもよい。

[0100] (工程 S T 7 3)

工程 S T 7 3 では、工程 S T 7 1 と工程 S T 7 2 とを繰り返す。

[0101] 工程 S T 7 の後において、保護膜 D P 1 の厚みは、凹部 R S の寸法の 2 5 % 以下であってもよい。例えば、凹部 R S の寸法が 2 0 n m である場合、保護膜 D P 1 の厚みは 5 n m 以下であってもよい。凹部 R S の寸法は、凹部 R S の上端における寸法である。

[0102] 工程 S T 7 の後に、例えば希釈フッ酸 (D H F) により保護膜 D P 1 を除去してもよい。

[0103] 上述のプラズマ処理装置 1 及び方法 M T 2 によれば、工程 S T 7 において

、第1膜F1の凹部RSの側壁RSa上の保護膜DP1により、側壁RSaのエッチングが抑制される。よって、形状異常（ボーイング）を抑制しながら第1膜F1をエッチングできる。さらに、凹部RSの底部RSbにおけるLCDUの値も低減できる。また、第2膜F2上の保護膜DP1により、第2膜F2のエッチングが抑制される。よって、第2膜F2に対する第1膜F1のエッチング選択比を向上できる。

[0104] 図14に示されるように、方法MT2において、工程ST6は、工程ST61、工程ST62及び工程ST63を含んでもよい。工程ST61、工程ST62及び工程ST63は順に行われ得る。工程ST6は工程ST63を含まなくてもよい。

[0105] 工程ST61では、図17に示されるように、凹部RSの側壁RSa上に前駆体層ABを形成する。前駆体層ABは吸着層であってもよい。工程ST61において、前駆体層ABを形成するための前駆体ガスからプラズマPL7が生成されてもよい。プラズマPL7を生成せずに、基板Wを前駆体ガスに晒すことによって前駆体層ABを形成してもよい。前駆体ガスの例はアミノシラン系ガスを含む。プラズマPL7中の化学種が前駆体層ABを形成してもよい。前駆体層ABは、凹部RSの底部RSb上に形成されなくてもよいし、凹部RSの底部RSb上に形成されてもよい。前駆体層ABは、第2膜F2上に形成されてもよい。

[0106] 工程ST62では、図18に示されるように、前駆体層ABを改質してもよい。前駆体層ABが改質されることにより、保護膜DP2が形成される。工程ST62において、前駆体層ABを改質するための改質ガスを含む処理ガスからプラズマPL8が生成されてもよい。改質ガスは酸素含有ガスを含んでもよい。処理ガスは、不活性ガスを更に含んでもよい。プラズマPL8中の化学種が前駆体層ABを改質してもよい。工程ST62において用いられる化学種は、工程ST7におけるプラズマPL6中のエッチャントと同じであってもよいし、異なってもよい。工程ST62は、工程ST7と同時にも行われてもよいし、工程ST7の前に行われてもよい。

- [0107] 工程ST63では、前駆体層ABを形成する工程と前駆体層ABを改質する工程とを繰り返す。
- [0108] 工程ST62において前駆体層ABを改質するための改質ガスが供給されるガス導入口13c（図2参照）は、工程ST61において前駆体層ABを形成するための前駆体ガスが供給されるガス導入口13cと異なってもよい。これにより、ガス導入口13c付近における保護膜DP2の堆積によるガス導入口13cの閉塞を抑制できる。
- [0109] 工程ST61において前駆体ガスを供給する期間、工程ST62において改質ガスを供給する期間及び工程ST7において処理ガスを供給する期間のうち少なくとも1つは、凹部RSの深さ又はスペックに応じて変更されてもよい。工程ST61において前駆体ガスを供給する期間、工程ST62において改質ガスを供給する期間及び工程ST7において処理ガスを供給する期間のうち少なくとも1つは、凹部RSが深くなるに連れて長くなってもよい。例えば、凹部RSが深くなると、前駆体ガスが凹部RSの底部RSbまで到達し難くなる。凹部RSが深くなるに連れて、工程ST61において前駆体ガスを供給する期間を長くすることによって、前駆体ガスが凹部RSの底部RSbまで到達し易くなる。
- [0110] 上述のように、ALDにより保護膜DP2が形成されてもよい。工程ST62において、プラズマPL8中の化学種（例えば酸素ラジカル）は前駆体層ABの表面に吸着し易い。そのため、凹部RSの側壁RSaにおいてプラズマPL8中の化学種の吸着確率が上がる一方、凹部RSの底部RSbにおいてプラズマPL8中の化学種の吸着確率は下がる。よって、保護膜DP2は、側壁RSaにおいて形成され易いが、底部RSbにおいて形成され難い。したがって、工程ST7において、側壁RSaがエッチングされ難く、底部RSbはエッチングされ易くなる。
- [0111] さらに、保護膜DP2は比較的薄いので、凹部RSの側壁RSaの上端において、保護膜DP2による閉塞が起こり難い。
- [0112] 工程ST62が工程ST7と同時に行われる場合、凹部RSの底部RSb

に保護膜D P 2 が形成されてもエッチングにより除去される。一方、凹部R S の側壁R S a には保護膜D P 2 が形成される。

[0113] 以下、方法M T 2 の評価のために行った種々の実験について説明する。以下に説明する実験は、本開示を限定するものではない。

[0114] (第10実験)

第10実験では、W S i 膜とW S i 膜上のマスクとを有する基板を準備した。マスクは、開口を有するシリコン酸化膜である。この基板について、方法M T 2 の工程S T 6 ~工程S T 7 を行って、W S i 膜をエッチングした。工程S T 7 1 は工程S T 6 と同時に行われた。工程S T 6 及び工程S T 7 1 では、塩素ガス及びS i C l₄ ガスを含む処理ガスを用いた。工程S T 7 2 では、酸素ガスを含む処理ガスを用いた。

[0115] (第11実験)

工程S T 6 及び工程S T 7 1 において処理ガスがS i C l₄ ガスを含まないこと以外は第10実験と同様にして第11実験を行った。

[0116] (第12実験)

工程S T 6 及び工程S T 7 1 において処理ガスが酸素ガスを更に含むこと以外は第10実験と同様にして第12実験を行った。

[0117] (第13実験)

工程S T 6 及び工程S T 7 1 において処理ガスがS i C l₄ ガスを含まないこと以外は第12実験と同様にして第13実験を行った。

[0118] (実験結果)

基板の断面において、W S i 膜に形成された凹部の深さとマスクの残り厚さを測定することによって、マスクに対するW S i 膜のエッチング選択比を算出した。第10実験におけるエッチング選択比は4.43であった。第11実験におけるエッチング選択比は2.37であった。第12実験におけるエッチング選択比は5.22であった。第13実験におけるエッチング選択比は3.76であった。よって、工程S T 6 において、S i C l₄ ガスによるシリコン酸化膜がマスク上に形成されることにより、エッチング選択比が向

上することが分かる。

[0119] (第14実験)

第14実験では、WSi膜とWSi膜上のマスクとを有する基板を準備した。マスクは、複数のホールパターンを有するシリコン酸化膜である。この基板について、方法MT2の工程ST6～工程ST7を行って、WSi膜をエッチングした。工程ST71は工程ST6と同時に行われた。工程ST6及び工程ST71では、塩素ガス、NF₃ガス、酸素ガス及びSiCl₄ガスを含む処理ガスを用いた。工程ST72では、酸素ガスを含む処理ガスを用いた。

[0120] (第15実験)

工程ST6及び工程ST71において、塩素ガス、ヘリウムガス及びCF₄ガスを含む処理ガスを用いたこと以外は第14実験と同様にして第15実験を行った。処理ガスはSiCl₄ガスを含まない。

[0121] (実験結果)

WSi膜に形成された複数の凹部（ホール）の底部における寸法からLCDUの値を算出した。第14実験のLCDUの値は1.5nmであった。第15実験のLCDUの値は2.1nmであった。よって、SiCl₄ガスによるシリコン酸化膜が凹部の側壁上に形成されることにより、凹部の寸法均一性が向上することが分かる。

[0122] (第16実験)

第16実験では、Si膜とSi膜上のマスクとを有する基板を準備した。マスクは、開口を有するシリコン酸化膜である。この基板について、方法MT2の工程ST6～工程ST7を行って、Si膜をエッチングした。工程ST63、工程ST72及び工程ST73は行われなかった。工程ST71は工程ST62と同時に行われた。工程ST61では、アミノシラン系ガスを用いて、開口に対応してSi膜に形成された凹部に前駆体層を形成した。工程ST61においてプラズマは生成されなかった。工程ST62及び工程ST71では、HBrガス及び酸素ガスを含む処理ガスを用いて、前駆体層の

改質及びS i 膜のエッチングを同時に行った。H B r ガスはS i 膜のエッチングに寄与する。酸素ガスは前駆体層の改質に寄与する。これにより、マスクの表面及び凹部の側壁上にシリコン酸化膜が形成された。

[0123] (第 1 7 実験)

工程S T 6を行わなかったこと以外は第 1 6 実験と同様にして第 1 7 実験を行った。

[0124] (実験結果)

基板の断面において、ボーイングが観察される位置における凹部の寸法（ボーイング寸法）を測定した。第 1 6 実験においてボーイング寸法は 1 4 . 9 n m であった。第 1 7 実験においてボーイング寸法は 1 6 . 3 n m であった。よって、前駆体層を形成する場合、ボーイングを抑制できることが分かる。

[0125] また、第 1 6 実験において、S i 膜に対するマスクのエッチング選択比は 6 . 9 であった。第 1 7 実験において、S i 膜に対するマスクのエッチング選択比は 4 . 9 n m であった。よって、前駆体層を形成する場合、エッチング選択比を向上できることが分かる。

[0126] さらに、希釈フッ酸を用いて、凹部の側壁上に形成されたシリコン酸化膜を除去した。除去前後の凹部の寸法を測定することにより、シリコン酸化膜の厚みを算出した。第 1 6 実験において、シリコン酸化膜の厚みは 4 . 6 であった。第 1 7 実験において、シリコン酸化膜の厚みは 6 . 8 n m であった。よって、前駆体層を形成する場合、シリコン酸化膜の厚みを低減できることが分かる。シリコン酸化膜の厚みを低減できると、凹部の上端における閉塞を抑制できる。

[0127] (第 1 8 実験)

工程S T 6 2 及び工程S T 7 1 において、処理ガスの全流量に対する酸素ガスの流量の比を大きくしたこと以外は第 1 6 実験と同様にして第 1 8 実験を行った。

[0128] (第 1 9 実験)

工程 S T 6 2 及び工程 S T 7 1 において、処理ガスの全流量に対する酸素ガスの流量の比を大きくしたこと以外は第 1 7 実験と同様にして第 1 9 実験を行った。

[0129] (実験結果)

第 1 8 実験における S i 膜のエッチングレートは、第 1 6 実験における S i 膜のエッチングレートと同等であった。第 1 9 実験における S i 膜のエッチングレートは、第 1 7 実験における S i 膜のエッチングレートよりも小さかった。よって、前駆体層を形成しない場合、酸素ガスの流量の比を大きくすると、S i 膜のエッチングレートが低下することが分かる。一方、前駆体層を形成する場合、酸素ガスの流量の比を大きくしても、S i 膜のエッチングレートは低下しないことが分かる。

[0130] 第 1 6 実験～第 1 9 実験の結果は W S i 膜のエッチングにも適用され得る。

[0131] 図 1 9 は、一つの例示的实施形態に係る基板処理システムを示す図である。図 1 9 に示す基板処理システム P S は、方法 M T 1 又は方法 M T 2 において用いられ得る。基板処理システム P S は、ロードポート 1 0 2 a ～ 1 0 2 d、容器 4 a ～ 4 d、ロードモジュール L M、アライナ A N、ロードロックモジュール L L 1、L L 2、プロセスモジュール P M 1 ～ P M 6、搬送モジュール T M、及び制御部 2 を備えている。なお、基板処理システム P S におけるロードポートの個数、容器の個数、ロードロックモジュールの個数は一つ以上の任意の個数であり得る。また、基板処理システム P S におけるプロセスモジュールの個数は、一つ以上の任意の個数であり得る。

[0132] ロードポート 1 0 2 a ～ 1 0 2 d は、ロードモジュール L M の一縁に沿って配列されている。容器 4 a ～ 4 d はそれぞれ、ロードポート 1 0 2 a ～ 1 0 2 d 上に搭載されている。容器 4 a ～ 4 d の各々は、例えば、F O U P (F r o n t O p e n i n g U n i f i e d P o d) と称される容器である。容器 4 a ～ 4 d の各々は、その内部に基板 W を収容するように構成されている。

- [0133] ロードモジュールLMは、チャンバを有する。ロードモジュールLMのチャンバ内の圧力は、大気圧に設定される。ロードモジュールLMは、搬送装置TU1を有する。搬送装置TU1は、例えば搬送ロボットであり、制御部2によって制御される。搬送装置TU1は、ロードモジュールLMのチャンバを介して基板Wを搬送するように構成されている。搬送装置TU1は、容器4a～4dの各々とアライナANとの間、アライナANとロードロックモジュールLL1、LL2の各々との間、ロードロックモジュールLL1、LL2の各々と容器4a～4dの各々との間で、基板Wを搬送し得る。アライナANは、ロードモジュールLMに接続されている。アライナANは、基板Wの位置の調整（位置の較正）を行うように構成されている。
- [0134] ロードロックモジュールLL1及びロードロックモジュールLL2の各々は、ロードモジュールLMと搬送モジュールTMとの間に設けられている。ロードロックモジュールLL1及びロードロックモジュールLL2の各々は、予備減圧室を提供している。
- [0135] 搬送モジュールTMは、ロードロックモジュールLL1及びロードロックモジュールLL2の各々にゲートバルブを介して接続されている。搬送モジュールTMは、その内部空間が減圧可能に構成された搬送チャンバTCを有している。搬送モジュールTMは、搬送装置TU2を有している。搬送装置TU2は、例えば搬送ロボットであり、制御部2によって制御される。搬送装置TU2は、搬送チャンバTCを介して基板Wを搬送するように構成されている。搬送装置TU2は、ロードロックモジュールLL1、LL2の各々とプロセスモジュールPM1～PM6の各々との間、及び、プロセスモジュールPM1～PM6のうち任意の二つのプロセスモジュールの間において、基板Wを搬送し得る。
- [0136] プロセスモジュールPM1～PM6の各々は、専用の基板処理を行うように構成された装置である。プロセスモジュールPM1～PM6のうち一つのプロセスモジュールは、方法MT1又は方法MT2において用いられるプラズマ処理装置1であってもよい。

[0137] プロセスモジュールPM1～PM6のうち一つのプロセスモジュールにおいて方法MT2の工程ST6を行い、プロセスモジュールPM1～PM6のうち別の一つのプロセスモジュールにおいて方法MT2の工程ST7を行ってもよい。

[0138] 図21は、一つの例示的实施形態に係るエッチング方法のフローチャートである。図21に示されるエッチング方法MT3（以下、「方法MT3」という）は、上記実施形態のプラズマ処理装置1により実行され得る。方法MT3は、図19の基板処理システムPSにより実行されてもよい。方法MT3は、図4の基板Wに適用され得る。

[0139] 以下、方法MT3について、方法MT3が上記実施形態のプラズマ処理装置1を用いて基板Wに適用される場合を例にとり、図5～図7及び図21～図23を参照しながら説明する。図22及び図23のそれぞれは、ソース電力及びガス量の時間変化を示すタイミングチャートの一例である。プラズマ処理装置1が用いられる場合には、制御部2によるプラズマ処理装置1の各部の制御により、プラズマ処理装置1において方法MT3が実行され得る。方法MT3では、図2に示されるように、プラズマ処理チャンバ10内に配置された基板支持部11上の基板Wを処理する。

[0140] 図21に示されるように、方法MT3は、工程ST3及び工程ST4aを含み得る。工程ST3及び工程ST4aは順に実行され得る。工程ST3の前に、方法MT1の工程ST1及び工程ST2のうち少なくとも1つが行われてもよい。工程ST4aの後に、方法MT1の工程ST5が行われてもよい。工程ST3は、方法MT1の工程ST3と同様に行われてもよい。

[0141] （工程ST4a）

工程ST4aでは、図5～図7に示されるように、開口OPを介して第1膜F1をエッチングする。工程ST4aは、工程ST41、工程ST41a、工程ST42及び工程ST43を含んでもよい。工程ST41、工程ST41a、工程ST42及び工程ST43は順に実行され得る。工程ST4aは、工程ST41a及び工程ST43のうち少なくとも1つを含まなくても

よい。工程ST41及び工程ST42は、方法MT1の工程ST41及び工程ST42と同様に行われてもよい。

[0142] (工程ST41a)

工程ST41aでは、プラズマ処理チャンバ10の内部空間をパージする。工程ST41aにおいて、パージガスがプラズマ処理チャンバ10内に供給されてもよいし、プラズマ処理チャンバ10の内部空間が減圧されてもよい。プラズマ処理チャンバ10の内部空間をパージすることにより、プラズマ処理チャンバ10内に残留する第1処理ガスが排出される。よって、工程ST41aの開始から時間の経過と共に、プラズマ処理チャンバ10内の第1処理ガスの量が徐々に減少する。

[0143] (工程ST43)

工程ST43では、工程ST41、工程ST41a及び工程ST42を繰り返す。方法MT3が工程ST41aを含まない場合、工程ST41及び工程ST42が繰り返される。

[0144] 方法MT3が工程ST41aを含む場合、工程ST41aにおいて、プラズマ処理チャンバ10内に残留する第1処理ガスが排出される。工程ST41aでは、工程ST41において生成された第1プラズマPL1中のハロゲン活性種も排出される。その結果、工程ST42において、第2プラズマPL2中にハロゲン活性種が混入し難い。よって、工程ST42において、ハロゲン活性種に起因する凹部RSの側壁RSaのエッチングが抑制される。ハロゲン活性種の例は、塩素ラジカル、フッ素ラジカル、塩素イオン及びフッ素イオンを含む。ハロゲン活性種は、第2プラズマPL2中の酸素ラジカル及び第1膜F1に含まれる金属元素（例えばタングステン）と反応して、金属ハロゲン酸化物（例えば $WO F_x$ 又は $WO Cl_x$ ）を生成し得る。金属ハロゲン酸化物は高い揮発性を有するので、凹部RSの側壁RSaのエッチングを促進し得る。

[0145] あるいは、方法MT3の工程ST42の初期において、第2プラズマPL2を生成するためのソース電力の実効値を連続的又は段階的に増加させても

よい。これにより、工程ST42の初期において、プラズマ密度を連続的又は段階的に増加させることができる。この場合、工程ST42の初期におけるプラズマ密度が低いので、工程ST42の初期において第2プラズマPL2中にハロゲン活性種が混入しても、金属ハロゲン酸化物の生成反応が進み難い。よって、工程ST41aの時間（パージ時間）を短くできるので、スループットが向上する。工程ST41aの時間はゼロであってもよい。すなわち、方法MT3は工程ST41aを含まなくてもよい。

[0146] 図22及び図23は、ソース電力及びガス量の時間変化を示すタイミングチャートの一例である。これらのタイミングチャートは、工程ST4aに関連する。タイミングチャートの縦軸は、ソース電力の実効値又はプラズマ処理チャンバ10内のガス量を示す。

[0147] 図22に示されるように、工程ST41、工程ST41a及び工程ST42を含むサイクルが周期CY1で周期的に繰り返されてもよい。周期CY1は、第1期間PA1、第2期間PB1及び第3期間PC1を含み得る。第1期間PA1、第2期間PB1及び第3期間PC1は、工程ST41、工程ST41a及び工程ST42にそれぞれ対応する。第2期間PB1は第1期間PA1の後の期間である。第3期間PC1は第2期間PB1の後の期間である。

[0148] 第1期間PA1において、第1プラズマPL1を生成するためのソース電力の実効値は高電力H2に維持され得る。ソース電力の周波数の例は、40MHz、60MHz及び100MHzを含む。第1期間PA1において、バイアス電力が基板支持部11に供給されてもよい。バイアス電力は高周波電力であってもよい。バイアス電力の周波数の例は、400kHz及び3.2MHzを含む。基板支持部11に供給される電気バイアスは、直流電圧パルスであってもよい。第1期間PA1の開始時に第1処理ガスの供給が開始され、第1期間PA1の終了時に第1処理ガスの供給が停止される。その結果、プラズマ処理チャンバ10内の第1処理ガスの量は、第1期間PA1の開始から増加してガス量GV1に到達する。その後、第1処理ガスの量は、ガ

ス量GV1に維持される。第1期間PA1において、第2処理ガスは供給されない。

[0149] 第2期間PB1において、ソース電力の実効値は低電力L2に維持され得る。第2期間PB1において、バイアス電力は基板支持部11に供給されなくてもよい。第2期間PB1において、第1処理ガスは供給されない。そのため、第2期間PB1の開始から時間の経過と共に、プラズマ処理チャンバ10内に残留する第1処理ガスの量は連続的に減少する。第2期間PB1の終了時において、プラズマ処理チャンバ10内の第1処理ガスの量は0であってもよい。第2期間PB1において、第2処理ガスは供給されない。

[0150] 第3期間PC1において、第2プラズマPL2を生成するためのソース電力の実効値は高電力H2に維持され得る。第3期間PC1における高電力H2は、第1期間PA1における高電力H2と異なってもよい。第3期間PC1において、バイアス電力は基板支持部11に供給されなくてもよい。第3期間PC1において、第1処理ガスは供給されない。第3期間PC1の開始時に第2処理ガスの供給が開始され、第3期間PC1の終了時に第2処理ガスの供給が停止される。その結果、プラズマ処理チャンバ10内の第2処理ガスの量は、第3期間PC1の開始から増加してガス量GV2に到達する。その後、第2処理ガスの量は、ガス量GV2に維持される。第3期間PC1後の第1期間PA1において第2処理ガスは供給されないので、第1期間PA1の開始から時間の経過と共に、プラズマ処理チャンバ10内に残留する第2処理ガスの量は連続的に減少する。第3期間PC1後の第1期間PA1の終了時において、プラズマ処理チャンバ10内の第2処理ガスの量は0であってもよい。

[0151] 図23に示されるように、工程ST41、工程ST41a及び工程ST42を含むサイクルが周期CY2で周期的に繰り返されてもよい。周期CY2は、第1期間PA2、第2期間PB2及び第3期間PC2を含み得る。第1期間PA2、第2期間PB2及び第3期間PC2は、工程ST41、工程ST41a及び工程ST42にそれぞれ対応する。第2期間PB2は第1期間

P A 2 の後の期間である。第 3 期間 P C 2 は第 2 期間 P B 2 の後の期間である。周期 C Y 2 は第 2 期間 P B 2 を含まなくてもよい。

[0152] 第 1 期間 P A 2 では、周期 C Y 1 の第 1 期間 P A 1 と同じ処理が行われ得る。第 2 期間 P B 2 では、周期 C Y 1 の第 2 期間 P B 1 と同じ処理が行われ得る。ただし、第 2 期間 P B 2 の終了時において、プラズマ処理チャンバ 10 内の第 1 処理ガスの量は 0 より大きくてもよい。

[0153] 第 3 期間 P C 2 の初期において、第 2 プラズマ P L 2 を生成するためのソース電力の実効値は段階的に増加する。ソース電力の実効値は、低電力 L 2 から高電力 H 2 に到達した後、高電力 H 2 に維持され得る。第 3 期間 P C 2 の初期において、ソース電力の実効値は連続的に増加してもよい。第 3 期間 P C 2 における高電力 H 2 は、第 1 期間 P A 2 における高電力 H 2 と異なってもよい。第 3 期間 P C 2 において、バイアス電力は基板支持部 11 に供給されなくてもよい。第 3 期間 P C 2 において、第 1 処理ガスは供給されない。そのため、第 3 期間 P C 2 の開始から時間の経過と共に、プラズマ処理チャンバ 10 内に残留する第 1 処理ガスの量は連続的に減少する。第 3 期間 P C 2 の終了時において、プラズマ処理チャンバ 10 内の第 1 処理ガスの量は 0 であってもよい。第 3 期間 P C 2 の開始時に第 2 処理ガスの供給が開始され、第 3 期間 P C 2 の終了時に第 2 処理ガスの供給が停止される。その結果、プラズマ処理チャンバ 10 内の第 2 処理ガスの量は、第 3 期間 P C 2 の開始から増加してガス量 G V 2 に到達する。その後、第 2 処理ガスの量は、ガス量 G V 2 に維持される。第 3 期間 P C 2 後の第 1 期間 P A 2 において第 2 処理ガスは供給されないので、第 1 期間 P A 2 の開始から時間の経過と共に、プラズマ処理チャンバ 10 内に残留する第 2 処理ガスの量は連続的に減少する。第 3 期間 P C 2 後の第 1 期間 P A 1 の終了時において、プラズマ処理チャンバ 10 内の第 2 処理ガスの量は 0 であってもよい。

[0154] 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。

[0155] 例えば、方法MT 1の各工程と方法MT 2の各工程と方法MT 3の各工程とは任意に組み合わせられてもよい。方法MT 1の工程ST 3と工程ST 4との間において、方法MT 2の工程ST 6が行われてもよい。

[0156] ここで、本開示に含まれる種々の例示的实施形態を、以下の[E 1]～[E 53]に記載する。

[0157] [E 1]

(a) 基板を提供する工程であって、前記基板は、第1膜と、前記第1膜上に開口を有する第2膜とを備え、前記第1膜は金属元素及び非金属元素を含む、工程と、

(b) 前記開口を介して前記第1膜をエッチングする工程と、
を含み、

前記(b)は、

(i) 高周波電力のパルスを供給することによって、ハロゲン含有ガスを含む第1処理ガスから生成される第1プラズマにより、前記開口を介して前記第1膜をエッチングする工程と、

(i i) 前記(i)により形成される凹部の側壁を、第2処理ガスから生成される第2プラズマにより改質する工程と、

(i i i) 前記(i)と前記(i i)とを繰り返す工程と、
を含む、エッチング方法。

[0158] エッチング方法[E 1]によれば、高周波電力のパルスにより第1プラズマが生成されるので、ハロゲン含有ガスの過剰な解離が抑制される。そのため、凹部の側壁のエッチングが抑制される。よって、エッチング方法[E 1]によれば、形状異常を抑制しながら第1膜をエッチングできる。

[0159] [E 2]

前記(i)において、前記基板を支持するための基板支持部に、バイアス電力の連続波が供給される、[E 1]に記載のエッチング方法。

[0160] [E 3]

前記（i）において、前記基板を支持するための基板支持部に、バイアス電力のパルスが供給され、

前記高周波電力の前記パルスと前記バイアス電力の前記パルスとが同期されている、[E 1]に記載のエッチング方法。

[0161] [E 4]

前記（i）において、前記基板を支持するための基板支持部に、バイアス電力のパルスが供給され、

前記高周波電力の前記パルスの位相が前記バイアス電力の前記パルスの位相とずれている、[E 1]に記載のエッチング方法。

[0162] [E 5]

（a）基板を提供する工程であって、前記基板は、第1膜と、前記第1膜上に開口を有する第2膜と、前記第1膜の下第3膜とを備え、前記第1膜は金属元素及び非金属元素を含む、工程と、

（b）前記開口を介して前記第1膜をエッチングする工程と、

（c）前記（b）の後、前記第1膜を更にエッチングする工程と、
を含み、

前記（b）は、

（i）ハロゲン含有ガスを含む第1処理ガスから生成される第1プラズマにより、前記開口を介して前記第1膜をエッチングする工程と、

（ii）前記（i）により形成される凹部の側壁を、第2処理ガスから生成される第2プラズマにより改質する工程と、

（iii）前記（i）と前記（ii）とを繰り返す工程と、
を含み、

前記（c）は、

（iv）ハロゲン含有ガスを含む第3処理ガスから生成される第3プラズマにより、前記開口を介して前記第1膜及び前記第3膜をエッチングする工程を含み、

前記第1膜と前記第3膜との界面に隣接する前記第1膜の下部において、

前記第3プラズマにより形成される前記凹部の寸法は、前記第3プラズマに代えて前記第1プラズマが用いられる場合に形成される凹部の寸法よりも小さい、エッチング方法。

[0163] エッチング方法[E5]によれば、(c)において、凹部の側壁のエッチング(サイドエッチング)を抑制できるので、サイドエッチングに起因するノッチングの発生を抑制できる。よって、エッチング方法[E5]によれば、形状異常を抑制しながら第1膜をエッチングできる。

[0164] [E6]

前記(i)において、前記基板を支持するための基板支持部に、第1バイアス電力が供給され、

前記(iv)において、前記基板を支持するための基板支持部に、第2バイアス電力が供給され、前記第2バイアス電力の単位時間当たりのエネルギーは前記第1バイアス電力の単位時間当たりのエネルギーよりも大きい、[E5]に記載のエッチング方法。

[0165] この場合、(iv)において、第2バイアス電力によって、第3プラズマ中の化学種が基板に向かって引き込まれる。そのため、(iv)における第3膜のエッチングレートが増大する。

[0166] [E7]

前記第1バイアス電力は第1パルスであり、

前記第2バイアス電力は第2パルスであり、

前記第2パルスのデューティ比と振幅との積が、前記第1パルスのデューティ比と振幅との積よりも大きい、[E6]に記載のエッチング方法。

[0167] [E8]

前記第3処理ガスは、前記第3プラズマによる前記第3膜のエッチングレートを増大させる反応促進ガスを含む、[E5]～[E7]のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0168] この場合、(iv)における第3膜のエッチングレートが増大する。

[0169] [E9]

前記反応促進ガスは、水素含有ガス及び $C_xH_yF_z$ （ x は1以上の整数、 y 及び z は0以上の整数）ガスのうち少なくとも1つを含む、[E 8]に記載のエッチング方法。

[0170] [E 1 0]

前記(c)は、前記凹部の前記側壁を、第4処理ガスから生成される第4プラズマにより改質する工程を含まない、[E 5]～[E 9]のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0171] この場合、(i v)において、凹部の側壁が過剰に改質されない。

[0172] [E 1 1]

前記(c)は、

(v) 前記凹部の前記側壁を、第4処理ガスから生成される第4プラズマにより改質する工程

を更に含み、

前記(i i)において、前記第2処理ガスが酸素含有ガスを含み、

前記(v)において、前記第4処理ガスが酸素含有ガスを含み、

前記第4処理ガス中の酸素含有ガスの分圧は、前記第2処理ガス中の酸素含有ガスの分圧よりも低い、[E 5]～[E 9]のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0173] この場合、(i v)において、凹部の側壁の過剰な酸化が抑制される。

[0174] [E 1 2]

前記(i)において、前記第1プラズマを生成するための第1高周波電力が供給され、

前記(i v)において、前記第3プラズマを生成するための第2高周波電力が供給され、

前記第2高周波電力の単位時間当たりのエネルギーは、前記第1高周波電力の単位時間当たりのエネルギーよりも小さい、[E 5]～[E 1 1]のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0175] この場合、(i v)において、ハロゲン含有ガスの過剰な解離が抑制され

る。そのため、凹部の側壁のエッチングを抑制できる。

[0176] [E 1 3]

前記 (i) において、前記第 1 プラズマが第 1 圧力下で生成され、
前記 (i v) において、前記第 3 プラズマが第 2 圧力下で生成され、
前記第 2 圧力は、前記第 1 圧力よりも小さい、[E 5] ~ [E 1 2] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0177] この場合、(i v) において、第 3 プラズマ中の化学種が基板に向かって移動する際の異方性が高まる。そのため、凹部の側壁のエッチングが抑制される。

[0178] [E 1 4]

前記第 3 膜は、エッチングストップ層である、[E 5] ~ [E 1 3] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0179] [E 1 5]

前記第 1 膜は、前記金属元素として、タングステン、チタン、モリブデン、ハフニウム、ジルコニウム及びルテニウムからなる群より選ばれる少なくとも 1 つの遷移金属元素を含む、[E 1] ~ [E 1 4] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0180] [E 1 6]

前記第 1 膜は、前記非金属元素として、シリコン、炭素、窒素、酸素、水素、ホウ素及びリンのうち少なくとも 1 つを含む、[E 1] ~ [E 1 5] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0181] [E 1 7]

前記第 1 膜は、タングステンシリサイド、タングステンシリコンナイトライド、タングステンシリコンボロン及びタングステンシリコンカーボンからなる群より選ばれる少なくとも 1 つのタングステン化合物を含む、[E 1 6] に記載のエッチング方法。

[0182] [E 1 8]

前記第 2 膜は、マスクである、[E 1] ~ [E 1 7] のいずれか一項に記

載のエッチング方法。

[0183] [E 1 9]

前記 (i) において、前記基板を支持するための基板支持部の温度が 60℃以上である、[E 1] ~ [E 1 8] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0184] [E 2 0]

前記第 2 膜は、第 1 ピッチで配列され第 1 寸法を有する複数の第 1 開口と、第 2 ピッチで配列され第 2 寸法を有する複数の第 2 開口とを有し、前記第 2 ピッチは前記第 1 ピッチと異なっており、前記第 2 寸法は前記第 1 寸法と異なっている、[E 1] ~ [E 1 9] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0185] [E 2 1]

前記 (i i i) の後において、前記凹部のアスペクト比は 5 以上である、[E 1] ~ [E 2 0] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0186] [E 2 2]

(d) 前記 (a) の前又は前記 (b) の後において、前記第 1 プラズマが生成されるチャンバをクリーニングする工程を更に含む、[E 1] ~ [E 2 1] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0187] [E 2 3]

(e) 前記 (a) の前において、前記第 1 プラズマが生成されるチャンバの内壁をプリコートする工程を更に含む、[E 1] ~ [E 2 2] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0188] [E 2 4]

前記 (a) ~ (b) は *in-situ* で行われる、[E 1] ~ [E 2 3] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0189] [E 2 5]

チャンバと、

前記チャンバ内において基板を支持するための基板支持部であり、前記基

板は、第1膜と、前記第1膜上に開口を有する第2膜とを備え、前記第1膜は金属元素及び非金属元素を含む、基板支持部と、

第1処理ガス及び第2処理ガスを前記チャンバ内に供給するように構成されたガス供給部であり、前記第1処理ガスはハロゲン含有ガスを含む、ガス供給部と、

前記チャンバ内で前記第1処理ガスから第1プラズマを生成し、前記チャンバ内で前記第2処理ガスから第2プラズマを生成するように構成されたプラズマ生成部と、

制御部と、

を備え、

前記制御部は、

(i) 高周波電力のパルスを供給することによって、前記第1プラズマにより、前記開口を介して前記第1膜をエッチングし、

(ii) 前記(i)により形成される凹部の側壁を、前記第2プラズマにより改質し、

(iii) 前記(i)と前記(ii)とを繰り返すように、前記ガス供給部及び前記プラズマ生成部を制御するように構成される、プラズマ処理装置。

[0190] [E 2 6]

チャンバと、

前記チャンバ内において基板を支持するための基板支持部であり、前記基板は、第1膜と、前記第1膜上に開口を有する第2膜と、前記第1膜の下第3膜とを備え、前記第1膜は金属元素及び非金属元素を含む、基板支持部と、

第1処理ガス、第2処理ガス及び第3処理ガスを前記チャンバ内に供給するように構成されたガス供給部であり、前記第1処理ガスはハロゲン含有ガスを含み、前記第3処理ガスはハロゲン含有ガスを含む、ガス供給部と、

前記チャンバ内で前記第1処理ガスから第1プラズマを生成し、前記チャ

ンバ内で前記第2処理ガスから第2プラズマを生成し、前記チャンバ内で前記第3処理ガスから第3プラズマを生成するように構成されたプラズマ生成部と、

制御部と、

を備え、

前記制御部は、

(i) 前記第1プラズマにより、前記開口を介して前記第1膜をエッチングし、

(ii) 前記(i)により形成される凹部の側壁を、前記第2プラズマにより改質し、

(iii) 前記(i)と前記(ii)とを繰り返す、

(iv) 前記(iii)の後、前記第3プラズマにより、前記開口を介して前記第1膜及び前記第3膜をエッチングするように、前記ガス供給部及び前記プラズマ生成部を制御するように構成され、

前記制御部は、

前記第1膜と前記第3膜との界面に隣接する前記第1膜の下部において、前記第3プラズマにより形成される前記凹部の寸法が、前記第3プラズマに代えて前記第1プラズマが用いられる場合に形成される凹部の寸法よりも小さくなるように、前記ガス供給部及び前記プラズマ生成部を制御するように構成される、プラズマ処理装置。

[0191] [E 2 7]

前記基板は、前記第1膜の下の第3膜を更に備え、

前記エッチング方法は、

(c) 前記(b)の後、前記第1膜を更にエッチングする工程を更に含み、

前記(c)は、

(iv) ハロゲン含有ガスを含む第3処理ガスから生成される第3プラズマにより、前記開口を介して前記第1膜及び前記第3膜をエッチングする工

程を含み、

前記第1膜と前記第3膜との界面に隣接する前記第1膜の下部において、前記第3プラズマにより形成される前記凹部の寸法は、前記第3プラズマに代えて前記第1プラズマが用いられる場合に形成される凹部の寸法よりも小さい、[E 1] ~ [E 2 4] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0192] [E 2 8]

前記エッチング方法は、(f) 前記開口に対応して前記第1膜に形成される凹部の側壁上に保護膜を形成する工程を更に含み、

前記(b)は、前記(f)と同時に又は前記(f)の後に行われる、[E 1] ~ [E 2 4] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0193] [E 2 9]

(a) 基板を提供する工程であって、前記基板は、第1膜と、前記第1膜上に開口を有する第2膜とを備え、前記第1膜は金属元素及び非金属元素を含む、工程と、

(b) 前記開口に対応して前記第1膜に形成される凹部の側壁上に保護膜を形成する工程と、

(c) 前記(b)と同時に又は前記(b)の後に、ハロゲン含有ガスを含む処理ガスから生成されるプラズマにより、前記開口を介して前記第1膜をエッチングする工程と、

を含む、エッチング方法。

[0194] エッチング方法[E 2 9]によれば、(c)において、保護膜により、第1膜の凹部の側壁のエッチングが抑制される。よって、エッチング方法[E 2 9]によれば、形状異常を抑制しながら第1膜をエッチングできる。

[0195] [E 3 0]

前記(b)は、

(i) 前記凹部の前記側壁上に前駆体層を形成する工程と、

(ii) 前記前駆体層を改質する工程と、

を含む、[E 2 9]に記載のエッチング方法。

[0196] [E 3 1]

前記 (i) において、プラズマが生成される、[E 3 0] に記載のエッチング方法。

[0197] [E 3 2]

前記 (c) は前記 (i i) と同時に行われる、[E 3 0] 又は [E 3 1] に記載のエッチング方法。

[0198] [E 3 3]

前記 (c) は前記 (i i) の後に行われる、[E 3 0] 又は [E 3 1] に記載のエッチング方法。

[0199] [E 3 4]

前記 (i i) において用いられる化学種は、前記 (c) における前記プラズマ中のエッチャントと同じである、[E 3 0] ~ [E 3 3] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0200] [E 3 5]

前記 (i i) において用いられる化学種は、前記 (c) における前記プラズマ中のエッチャントと異なる、[E 3 0] ~ [E 3 3] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0201] [E 3 6]

前記 (b) において、前記前駆体層を改質するための改質ガスが供給されるガス導入口は、前記前駆体層を形成するための前駆体ガスが供給されるガス導入口と異なる、[E 3 0] ~ [E 3 5] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0202] [E 3 7]

前記 (c) が行われるチャンバは、前記 (b) が行われるチャンバと異なる、[E 2 9] ~ [E 3 6] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0203] [E 3 8]

前記 (c) の後において、前記保護膜の厚みは、前記凹部の寸法の 2 5 % 以下である、[E 2 9] ~ [E 3 7] のいずれか一項に記載のエッチング方

法。

[0204] [E 3 9]

前記第1膜は、前記金属元素として、タングステン、チタン及びモリブデンのうち少なくとも1つを含む、[E 2 9]～[E 3 8]のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0205] [E 4 0]

前記第1膜は、前記非金属元素として、シリコン、炭素、窒素、酸素及び水素のうち少なくとも1つを含む、[E 2 9]～[E 3 9]のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0206] [E 4 1]

前記第1膜は、タングステンシリサイドを含む、[E 4 0]に記載のエッチング方法。

[0207] [E 4 2]

前記(c)において、前記基板を支持するための基板支持部の温度が60℃以上である、[E 2 9]～[E 4 1]のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0208] [E 4 3]

前記第2膜は、第1ピッチで配列され第1寸法を有する複数の第1開口と、第2ピッチで配列され第2寸法を有する複数の第2開口とを有し、前記第2ピッチは前記第1ピッチと異っており、前記第2寸法は前記第1寸法と異なっている、[E 2 9]～[E 4 2]のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0209] [E 4 4]

前記(c)の後において、前記凹部のアスペクト比は5以上である、[E 2 9]～[E 4 3]のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0210] [E 4 5]

(d) 前記(a)の前又は前記(c)の後において、前記プラズマが生成されるチャンバをクリーニングする工程を更に含む、[E 2 9]～[E 4 4]

】のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0211] [E 4 6]

(e) 前記 (a) の前において、前記プラズマが生成されるチャンバの内壁をプリコートする工程を更に含む、[E 2 9] ～ [E 4 5] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0212] [E 4 7]

前記 (a) ～ (c) は *in-situ* で行われる、[E 2 9] ～ [E 4 6] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0213] [E 4 8]

チャンバと、

前記チャンバ内において基板を支持するための基板支持部であり、前記基板は、第 1 膜と、前記第 1 膜上に開口を有する第 2 膜とを備え、前記第 1 膜は金属元素及び非金属元素を含む、基板支持部と、

処理ガスを前記チャンバ内に供給するように構成されたガス供給部であり、前記処理ガスはハロゲン含有ガスを含む、ガス供給部と、

前記チャンバ内で前記処理ガスからプラズマを生成するように構成されたプラズマ生成部と、

制御部と、

を備え、

前記制御部は、

前記開口に対応して前記第 1 膜に形成される凹部の側壁上に保護膜を形成し、

前記保護膜の形成と同時又は前記保護膜の形成後に、前記プラズマにより、前記開口を介して前記第 1 膜をエッチングするように、前記ガス供給部及び前記プラズマ生成部を制御するように構成される、プラズマ処理装置。

[0214] [E 4 9]

前記第 2 膜は、マスクである、[E 3 9] ～ [E 4 7] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0215] [E 5 0]

前記 (i) において前駆体ガスを供給する期間、前記 (i i) において改質ガスを供給する期間及び (c) において前記処理ガスを供給する期間のうち少なくとも 1 つは、前記凹部の深さに応じて変更される、[E 3 0] ~ [E 3 6] 及び [E 3 0] を引用する [E 3 7] ~ [E 4 7] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0216] [E 5 0]

前記第 3 処理ガスの総流量は、前記第 1 処理ガスの総流量よりも多い、[E 5] ~ [E 1 3] のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[0217] [E 5 1]

(a) チャンバ内に基板を提供する工程であって、前記基板は、第 1 膜と、前記第 1 膜上に開口を有する第 2 膜とを備え、前記第 1 膜は金属元素及び非金属元素を含む、工程と、

(b) 前記開口を介して前記第 1 膜をエッチングする工程と、
を含み、

前記 (b) は、

(b 1) ハロゲン含有ガスを含む第 1 処理ガスから生成される第 1 プラズマにより、前記第 1 膜に凹部を形成する工程と、

(b 2) 前記チャンバの内部空間をパージする工程と、

(b 3) 第 2 処理ガスから生成される第 2 プラズマにより、前記凹部の側壁を改質する工程と、

を含む、エッチング方法。

[0218] [E 5 2]

(a) チャンバ内に基板を提供する工程であって、前記基板は、第 1 膜と、前記第 1 膜上に開口を有する第 2 膜とを備え、前記第 1 膜は金属元素及び非金属元素を含む、工程と、

(b) 前記開口を介して前記第 1 膜をエッチングする工程と、
を含み、

前記（b）は、

（b 1）ハロゲン含有ガスを含む第 1 処理ガスから生成される第 1 プラズマにより、前記第 1 膜に凹部を形成する工程と、

（b 2）第 2 処理ガスから生成される第 2 プラズマにより、前記凹部の側壁を改質する工程と、

を含み、

前記（b 2）の初期において、前記第 2 プラズマを生成するための高周波電力の実効値を連続的又は段階的に増加させる、エッチング方法。

[0219] [E 5 3]

前記（b）は、

（b 3）前記（b 1）と前記（b 2）との間に、前記チャンバの内部空間をパージする工程を更に含む、[E 5 2]に記載のエッチング方法。

[0220] 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

[0221] 1…プラズマ処理装置、2…制御部、10…プラズマ処理チャンバ、11…基板支持部、12…プラズマ生成部、20…ガス供給部、DP1, DP2…保護膜、F1…第1膜、F2…第2膜、OP…開口、PL6…プラズマ、RS…凹部、RSa…側壁、W…基板。

請求の範囲

- [請求項1] (a) 基板を提供する工程であって、前記基板は、第1膜と、前記第1膜上に開口を有する第2膜とを備え、前記第1膜は金属元素及び非金属元素を含む、工程と、
- (b) 前記開口に対応して前記第1膜に形成される凹部の側壁上に保護膜を形成する工程と、
- (c) 前記(b)と同時又は前記(b)の後に、ハロゲン含有ガスを含む処理ガスから生成されるプラズマにより、前記開口を介して前記第1膜をエッチングする工程と、
- を含む、エッチング方法。
- [請求項2] 前記(b)は、
- (i) 前記凹部の前記側壁上に前駆体層を形成する工程と、
- (ii) 前記前駆体層を改質する工程と、
- を含む、請求項1に記載のエッチング方法。
- [請求項3] 前記(i)において、プラズマが生成される、請求項2に記載のエッチング方法。
- [請求項4] 前記(c)は前記(ii)と同時に行われる、請求項2又は3に記載のエッチング方法。
- [請求項5] 前記(c)は前記(ii)の後に行われる、請求項2又は3に記載のエッチング方法。
- [請求項6] 前記(ii)において用いられる化学種は、前記(c)における前記プラズマ中のエッチャントと同じである、請求項2又は3に記載のエッチング方法。
- [請求項7] 前記(ii)において用いられる化学種は、前記(c)における前記プラズマ中のエッチャントと異なる、請求項2又は3に記載のエッチング方法。
- [請求項8] 前記(b)において、前記前駆体層を改質するための改質ガスが供給されるガス導入口は、前記前駆体層を形成するための前駆体ガスが

供給されるガス導入口と異なる、請求項2又は3に記載のエッチング方法。

[請求項9] 前記(c)が行われるチャンバは、前記(b)が行われるチャンバと異なる、請求項1～3のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[請求項10] 前記(c)の後において、前記保護膜の厚みは、前記凹部の寸法の25%以下である、請求項1～3のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[請求項11] 前記第1膜は、前記金属元素として、タングステン、チタン、モリブデン、ハフニウム、ジルコニウム及びルテニウムからなる群より選ばれる少なくとも1つの遷移金属元素を含む、請求項1～3のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[請求項12] 前記第1膜は、前記非金属元素として、シリコン、炭素、窒素、酸素、水素、ホウ素及びリンのうち少なくとも1つを含む、請求項1～3のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[請求項13] 前記第1膜は、タングステンシリサイド、タングステンシリコンナイトライド、タングステンシリコンボロン及びタングステンシリコンカーボンからなる群より選ばれる少なくとも1つのタングステン化合物を含む、請求項12に記載のエッチング方法。

[請求項14] 前記(c)において、前記基板を支持するための基板支持部の温度が60℃以上である、請求項1～3のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[請求項15] 前記第2膜は、第1ピッチで配列され第1寸法を有する複数の第1開口と、第2ピッチで配列され第2寸法を有する複数の第2開口とを有し、前記第2ピッチは前記第1ピッチと異なり、前記第2寸法は前記第1寸法と異なっている、請求項1～3のいずれか一項に記載のエッチング方法。

[請求項16] 前記(c)の後において、前記凹部のアスペクト比は5以上である、請求項1～3のいずれか一項に記載のエッチング方法。

- [請求項17] (d) 前記 (a) の前又は前記 (c) の後において、前記プラズマが生成されるチャンバをクリーニングする工程を更に含む、請求項 1 ～ 3 のいずれか一項に記載のエッチング方法。
- [請求項18] (e) 前記 (a) の前において、前記プラズマが生成されるチャンバの内壁をプリコートする工程を更に含む、請求項 1 ～ 3 のいずれか一項に記載のエッチング方法。
- [請求項19] 前記 (a) ～ (c) は *in-situ* で行われる、請求項 1 ～ 3 のいずれか一項に記載のエッチング方法。
- [請求項20] チャンバと、
前記チャンバ内において基板を支持するための基板支持部であり、
前記基板は、第 1 膜と、前記第 1 膜上に開口を有する第 2 膜とを備え、
前記第 1 膜は金属元素及び非金属元素を含む、基板支持部と、
処理ガスを前記チャンバ内に供給するように構成されたガス供給部であり、前記処理ガスはハロゲン含有ガスを含む、ガス供給部と、
前記チャンバ内で前記処理ガスからプラズマを生成するように構成されたプラズマ生成部と、
制御部と、
を備え、
前記制御部は、
前記開口に対応して前記第 1 膜に形成される凹部の側壁上に保護膜を形成し、
前記保護膜の形成と同時又は前記保護膜の形成後に、前記プラズマにより、前記開口を介して前記第 1 膜をエッチングするように、前記ガス供給部及び前記プラズマ生成部を制御するように構成される、プラズマ処理装置。
- [請求項21] (a) チャンバ内に基板を提供する工程であって、前記基板は、第 1 膜と、前記第 1 膜上に開口を有する第 2 膜とを備え、前記第 1 膜は金属元素及び非金属元素を含む、工程と、

(b) 前記開口を介して前記第1膜をエッチングする工程と、
を含み、

前記(b)は、

(b1) ハロゲン含有ガスを含む第1処理ガスから生成される第1
プラズマにより、前記第1膜に凹部を形成する工程と、

(b2) 前記チャンバの内部空間をパージする工程と、

(b3) 第2処理ガスから生成される第2プラズマにより、前記凹
部の側壁を改質する工程と、
を含む、エッチング方法。

[請求項22]

(a) チャンバ内に基板を提供する工程であって、前記基板は、第
1膜と、前記第1膜上に開口を有する第2膜とを備え、前記第1膜は
金属元素及び非金属元素を含む、工程と、

(b) 前記開口を介して前記第1膜をエッチングする工程と、
を含み、

前記(b)は、

(b1) ハロゲン含有ガスを含む第1処理ガスから生成される第1
プラズマにより、前記第1膜に凹部を形成する工程と、

(b2) 第2処理ガスから生成される第2プラズマにより、前記凹
部の側壁を改質する工程と、
を含み、

前記(b2)の初期において、前記第2プラズマを生成するための
高周波電力の実効値を連続的又は段階的に増加させる、エッチング方
法。

[請求項23]

前記(b)は、

(b3) 前記(b1)と前記(b2)との間に、前記チャンバの内
部空間をパージする工程を更に含む、請求項22に記載のエッチング
方法。