明　細　書

発明の名称 ： エッチング方法及びプラズマ処理システム

技術分野

[0001]　本開示の例示的実施形態は、エッチング方法及びプラズマ処理システムに関する。

背景技術

[0002]　特許文献１には、エッチング後の形状が異方性の形状であり、シリコン酸化膜に対して選択的な、エッチング方法に係る技術が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開平７－０２９８７５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、エッチングの加工性を向上させる技術を提供する。

課題を解決するための手段

[0005]　本開示の一つの例示的実施形態において、（ａ）基板を基板支持部上に準備する工程であって、前記基板は、下地膜と、前記下地膜上のシリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から選択される少なくとも１種を含むエッチング対象膜と、前記エッチング対象膜上のマスクと、を備え、前記マスクは、前記エッチング対象膜を露出する少なくとも１つの開口を備える、工程と、（ｂ）Cl_2ガスを含む第１の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をエッチングする工程と、（ｃ）ＨＣｌガスを含む第２の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をさらにエッチングする工程と、を含む、エッチング方法が提供される。

発明の効果

[0006]　本開示の一つの例示的実施形態によれば、エッチングの加工性を向上させ

る技術を提供することができる。

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]誘導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]本エッチング方法の一例を示すフローチャートである。

[図4]工程ＳＴ１で準備される基板Ｗの断面構造の一例を示す図である。

[図5]工程ＳＴ２を実行した後における基板Ｗの断面構造の一例を示す図である。

[図6]工程ＳＴ３を実行した後における基板Ｗの断面構造の一例を示す図である。

[図7]本エッチング方法の他の一例を示すフローチャートである。

[図8]工程ＳＴ２を実行した後における基板Ｗの断面構造において、フッティング幅及びボトム角の測定例を説明する図である。

発明を実施するための形態

[0008] 以下、本開示の各実施形態について説明する。

[0009] 一つの例示的実施形態において、（ａ）基板を基板支持部上に準備する工程であって、前記基板は、下地膜と、前記下地膜上のシリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から選択される少なくとも１種を含むエッチング対象膜と、前記エッチング対象膜上のマスクと、を備え、前記マスクは、前記エッチング対象膜を露出する少なくとも１つの開口を備える、工程と、（ｂ）Cl_2ガスを含む第１の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をエッチングする工程と、（ｃ）ＨＣｌガスを含む第２の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をさらにエッチングする工程と、を含む、エッチング方法が提供される。

[0010] 一つの例示的実施形態において、前記（ｂ）は、前記エッチング対象膜に凹部を形成することであって、前記凹部の底部には、フッティングが形成されている、ことを含み、前記（ｃ）は、前記フッティングの少なくとも一部を除去することを含む。

[0011] 一つの例示的実施形態において、前記第１の処理ガスは、ＨＣｌガスを含まないか、前記第２の処理ガスにおけるＨＣｌガスの流量よりも少ない流量でＨＣｌガスを含む。

[0012] 一つの例示的実施形態において、前記第２の処理ガスは、Cl_2ガスを含まないか、前記第１の処理ガスにおけるCl_2ガスの流量よりも少ない流量でCl_2ガスを含む。

[0013] 一つの例示的実施形態において、前記（ｃ）は、前記（ｂ）のエッチングにより前記エッチング対象膜に形成された凹部をさらに水平方向にエッチングすることを含む。

[0014] 一つの例示的実施形態において、前記（ｃ）の終了時における前記凹部の底部の幅は、前記（ｂ）の終了時における前記凹部の底部の幅よりも大きい。

[0015] 一つの例示的実施形態において、前記（ｃ）において、前記凹部の底部の水平方向のエッチング量は、前記凹部の底部以外の水平方向のエッチング量よりも大きい。

[0016] 一つの例示的実施形態において、前記（ｂ）において、前記下地膜の少なくとも一部が露出した後で、又は、前記下地膜の少なくとも一部が露出する直前で、前記（ｃ）に切り替える。

[0017] 一つの例示的実施形態において、前記（ｂ）と前記（ｃ）とを交互に繰り返す。

[0018] 一つの例示的実施形態において、前記（ｂ）と前記（ｃ）とを同時に実行する。

[0019] 一つの例示的実施形態において、前記第１の処理ガス及び前記第２の処理ガスの少なくとも一方は、酸素含有ガスをさらに含む。

[0020] 一つの例示的実施形態において、前記酸素含有ガスは、O_2、ＣＯ、CO_2、SO_2及びＣＯＳからなる群から選択される少なくとも１種のガスを含む。

[0021] 一つの例示的実施形態において、前記（ｃ）における前記基板又は基板支持部の温度は、前記（ｂ）における前記基板又は基板支持部の温度よりも高

い。

[0022] 一つの例示的実施形態において、前記（ｂ）及び前記（ｃ）において、前記基板支持部にバイアス信号を供給し、前記（ｃ）における前記バイアス信号のレベルは、前記（ｂ）における前記バイアス信号のレベルよりも高い。

[0023] 一つの例示的実施形態において、前記第１の処理ガス及び第２の処理ガスの少なくとも一方は、貴ガスをさらに含む。

[0024] 一つの例示的実施形態において、前記貴ガスは、Ａｒ及びＨｅからなる群から選択される少なくとも１種を含む。

[0025] 一つの例示的実施形態において、前記第１の処理ガス及び第２の処理ガスの少なくとも一方は、臭素含有ガス及びフッ素含有ガスからなる群から選択される少なくとも１種をさらに含む。

[0026] 一つの例示的実施形態において、（ａ）基板を基板支持部上に準備する工程であって、前記基板は、下地膜と、前記下地膜上のシリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から選択される少なくとも１種を含むエッチング対象膜と、前記エッチング対象膜上のマスクと、を備え、前記マスクは前記エッチング対象膜を露出する少なくとも１つの開口を備える、工程と、（ｂ）ＨＣｌガス以外の塩素含有ガスを含む第１の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をエッチングする工程と、（ｃ）ＨＣｌガスを含む第２の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をさらにエッチングする工程と、を含む、エッチング方法が提供される。

[0027] 一つの例示的実施形態において、（ａ）基板を基板支持部上に準備する工程であって、前記基板は、下地膜と、前記下地膜上のシリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から選択される少なくとも１種を含むエッチング対象膜と、を備え、前記エッチング対象膜は凹部を含み、前記凹部の底部には、フッティングが形成されている、工程と、（ｂ）ＨＣｌガスを含む処理ガスから生成したプラズマにより、前記フッティングの少なくとも一部を除去する工程と、を含む、エッチング方法が提供される。

[0028] 一つの例示的実施形態において、チャンバと、前記チャンバ内に設けられ

た基板支持部と、前記チャンバ内に第１の処理ガス及び第２の処理ガスを供給するためのガス供給部と、前記チャンバ内でプラズマを生成するためのプラズマ生成部と、制御部と、を備え、前記制御部は、前記ガス供給部及び前記プラズマ生成部を用いて、（ａ）基板を前記基板支持部上に準備する制御であって、前記基板は、下地膜と、前記下地膜上のシリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から選択される少なくとも１種を含むエッチング対象膜と、前記エッチング対象膜上のマスクと、を備え、前記マスクは前記エッチング対象膜を露出する少なくとも１つの開口を備える、制御と、（ｂ）Cl_2ガスを含む第１の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をエッチングする制御と、（ｃ）ＨＣｌガスを含む第２の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をさらにエッチングする制御と、を含む制御を実行するように構成される、プラズマ処理システムが提供される。

[0029] 以下、図面を参照して、本開示の各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または同様の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。特に断らない限り、図面に示す位置関係に基づいて上下左右等の位置関係を説明する。図面の寸法比率は実際の比率を示すものではなく、また、実際の比率は図示の比率に限られるものではない。

[0030] ＜プラズマ処理システムの一例＞

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。

[0031] 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。

[0032] 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。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。

[0033] 以下に、プラズマ処理装置１の一例としての誘導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、誘導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。誘導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。プラズマ処理チャンバ１０は、誘電体窓１０１を含む。また、プラズマ処理装置１は、基板支持部１１、ガス導入部及びアンテナ１４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。アンテナ１４は、プラズマ処理チャンバ１０上又はその上方（すなわち誘電体窓１０１上又はその上方）に配置される。プラズマ処理チャンバ１０は、誘電体窓１０１、プラズマ処理チャンバ１０の側壁１０２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。

[0034] 基板支持部１１は、本体部１１１及びリングアセンブリ１１２を含む。本体部１１１は、基板Ｗを支持するための中央領域１１１ａと、リングアセンブリ１１２を支持するための環状領域１１１ｂとを有する。ウェハは基板Ｗの一例である。本体部１１１の環状領域１１１ｂは、平面視で本体部１１１

の中央領域１１１ａを囲んでいる。基板Wは、本体部１１１の中央領域１１１ａ上に配置され、リングアセンブリ１１２は、本体部１１１の中央領域１１１ａ上の基板Wを囲むように本体部１１１の環状領域１１１ｂ上に配置される。従って、中央領域１１１ａは、基板Wを支持するための基板支持面とも呼ばれ、環状領域１１１ｂは、リングアセンブリ１１２を支持するためのリング支持面とも呼ばれる。

[0035] 一実施形態において、本体部１１１は、基台１１１０及び静電チャック１１１１を含む。基台１１１０は、導電性部材を含む。基台１１１０の導電性部材はバイアス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、ＲＦ又はＤＣ電極がセラミック部材１１１１ａ内に配置されてもよく、この場合、ＲＦ又はＤＣ電極がバイアス電極として機能する。なお、基台１１１０の導電性部材とＲＦ又はＤＣ電極との両方が２つのバイアス電極として機能してもよい。

[0036] リングアセンブリ１１２は、１又は複数の環状部材を含む。一実施形態において、１又は複数の環状部材は、１又は複数のエッジリングと少なくとも１つのカバーリングとを含む。エッジリングは、導電性材料又は絶縁材料で形成され、カバーリングは、絶縁材料で形成される。

[0037] また、基板支持部１１は、静電チャック１１１１、リングアセンブリ１１２及び基板のうち少なくとも１つをターゲット温度に調節するように構成される温調モジュールを含んでもよい。温調モジュールは、ヒータ、伝熱媒体

、流路１１１０ａ、又はこれらの組み合わせを含んでもよい。流路１１１０ａには、ブラインやガスのような伝熱流体が流れる。一実施形態において、流路１１１０ａが基台１１１０内に形成され、１又は複数のヒータが静電チャック１１１１のセラミック部材１１１１ａ内に配置される。また、基板支持部１１は、基板Wの裏面と中央領域１１１ａとの間に伝熱ガスを供給するように構成された伝熱ガス供給部を含んでもよい。

[0038] ガス導入部は、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。一実施形態において、ガス導入部は、中央ガス注入部（ＣＧＩ：Ｃｅｎｔｅｒ Ｇａｓ Ｉｎｊｅｃｔｏｒ）１３を含む。中央ガス注入部１３は、基板支持部１１の上方に配置され、誘電体窓１０１に形成された中央開口部に取り付けられる。中央ガス注入部１３は、少なくとも１つのガス供給口１３ａ、少なくとも１つのガス流路１３ｂ、及び少なくとも１つのガス導入口１３ｃを有する。ガス供給口１３ａに供給された処理ガスは、ガス流路１３ｂを通過してガス導入口１３ｃからプラズマ処理空間１０ｓ内に導入される。なお、ガス導入部は、中央ガス注入部１３に加えて又はその代わりに、側壁１０２に形成された１又は複数の開口部に取り付けられる１又は複数のサイドガス注入部（ＳＧＩ：Ｓｉｄｅ Ｇａｓ Ｉｎｊｅｃｔｏｒ）を含んでもよい。

[0039] ガス供給部２０は、少なくとも１つのガスソース２１及び少なくとも１つの流量制御器２２を含んでもよい。一実施形態において、ガス供給部２０は、少なくとも１つの処理ガスを、それぞれに対応のガスソース２１からそれぞれに対応の流量制御器２２を介してガス導入部に供給するように構成される。各流量制御器２２は、例えばマスフローコントローラ又は圧力制御式の流量制御器を含んでもよい。さらに、ガス供給部２０は、少なくとも１つの処理ガスの流量を変調又はパルス化する少なくとも１つの流量変調デバイスを含んでもよい。

[0040] 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、ソー

スＲＦ信号及びバイアスＲＦ信号のような少なくとも１つのＲＦ信号（ＲＦ電力）を、少なくとも１つのバイアス電極及びアンテナ１４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つのバイアス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を基板Wに引き込むことができる。

[0041] 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アンテナ１４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、アンテナ１４に供給される。

[0042] 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つのバイアス電極に結合され、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つのバイアス電極に供給される。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。

[0043] 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、バイアスＤＣ生成部３２ａを含む。一実施形態において、バイアスＤＣ生成部３２ａは、少なくとも１つのバイアス電極に接続され、バイアスＤＣ信号を生成するように構成される。生成されたバイアスＤＣ信号は、少なくとも１つのバイアス電極に印加される。

[0044] 種々の実施形態において、バイアスＤＣ信号は、パルス化されてもよい。この場合、ＤＣに基づく電圧パルスのシーケンスが少なくとも１つのバイアス電極に印加される。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バイアスＤＣ生成部３２ａと少なくとも１つのバイアス電極との間に接続される。従って、バイアス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。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、バイアスＤＣ生成部３２ａは、ＲＦ電源３１に加えて設けられてもよく、第２のＲＦ生成部３１ｂに代えて設けられてもよい。

[0045] アンテナ１４は、１又は複数のコイルを含む。一実施形態において、アンテナ１４は、同軸上に配置された外側コイル及び内側コイルを含んでもよい。この場合、ＲＦ電源３１は、外側コイル及び内側コイルの双方に接続されてもよく、外側コイル及び内側コイルのうちいずれか一方に接続されてもよい。前者の場合、同一のＲＦ生成部が外側コイル及び内側コイルの双方に接続されてもよく、別個のＲＦ生成部が外側コイル及び内側コイルに別々に接続されてもよい。

[0046] 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。

[0047] ＜エッチング方法の一例＞

図３は、例示的な実施形態に係るエッチング方法（以下「本エッチング方法」ともいう。）を示すフローチャートである。本エッチング方法は、基板を準備する工程ＳＴ１と、第１のエッチングを行う工程ＳＴ２と、第２のエッチングを行う工程ＳＴ３とを含む。各工程は、上述したプラズマ処理システム（図１～図２参照）のいずれか１つを用いて実行されてよく、またこれらのプラズマ処理システムの２つ以上を用いて実行されてもよい。例えば、本エッチング方法は図１に示すプラズマ処理システムで実行されてよい。以下では、制御部２がプラズマ処理装置１の各部を制御して、基板Wに対して本エッチング方法を実行する場合を例に説明する。

[0048] （工程ＳＴ１：基板の準備）

工程ＳＴ１では、基板Wが基板支持部１１上に準備される。基板Wは、エッチング対象膜ＥＦと、エッチング対象膜ＥＦ上に配されたマスクＭＫとを備える。マスクＭＫは、エッチング対象膜ＥＦを露出する少なくとも１つの開口ＯＰを備える。基板Wは、半導体デバイスの製造に用いられてよい。半導体デバイスは、例えば、ＤＲＡＭ及び３Ｄ－ＮＡＮＤフラッシュメモリ等のメモリデバイス並びにロジックデバイスを含む。

[0049] 図４は、工程ＳＴ１で準備される基板Wの断面構造の一例を示す図である。図４に例示するように、基板Wは、任意の下地膜ＵＦ上に、エッチング対象膜ＥＦ及びマスクＭＫが、この順で積層されて構成されてよい。

[0050] 下地膜ＵＦは、一例では、シリコンウェハやシリコンウェハ上に形成された有機膜、誘電体膜、金属膜、半導体膜等である。一例として、誘電体膜は、ＳｉＮ等を含んでいてよい。一例として、金属膜は、ＴｉＮ、ＴａＮ、Ｗ、ＷＳｉ及びＷＣ等を含んでいてよい。下地膜ＵＦは、複数の膜が積層されて構成されてよい。

[0051] エッチング対象膜ＥＦは、例えば、シリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から選択される少なくとも１種を含んでよい。エッチング対象膜は、

例えば、シリコン含有膜、ゲルマニウム含有膜又は金属含有膜であってよい。シリコン含有膜としては、例えば、スピンオングラス（ＳＯＧ）膜、Ｓｉ含有反射防止膜（ＳｉＡＲＣ）、シリコン酸化膜、シリコン窒化膜、シリコン酸窒化膜、シリコン炭化膜、シリコン炭窒化膜、多結晶シリコン膜及びアモルファスシリコン膜等が挙げられる。一実施形態において、シリコン含有膜は、Ｈ、Ｐ、Ｎ及びＢからなる群から選択される少なくとも１種の元素を含んでいてよい。ゲルマニウム含有膜としては、例えば、ゲルマニウム膜又はシリコンゲルマニウム膜が挙げられる。金属含有膜としては、例えば、タングステン、ハフニウム、スズ及びチタンからなる群から選択される少なくとも１種を含む膜が挙げられる。一例として、エッチング対象膜ＥＦは、導電膜であってよい。基板Ｗを構成するエッチング対象膜ＥＦ及び下地膜ＵＦは、それぞれ、ＣＶＤ法、原子堆積法（Ａｔｏｍｉｃ Ｌａｙｅｒ Ｄｅｐｏｓｉｔｉｏｎ、以下「ＡＬＤ法」という）、スピンコート法等により形成されてよい。エッチング対象膜ＥＦ及び下地膜ＵＦは、それぞれ、平坦な膜であってよく、また、凹凸を有する膜であってもよい。

[0052] マスクＭＫは、エッチング対象膜ＥＦ上に形成され、少なくとも１つの開口ＯＰを備える。マスクＭＫは、シリコン含有膜、炭素含有膜及び金属含有膜から選択される少なくとも１種を含んでいてよい。一例として、シリコン含有膜は、シリコン酸化膜、シリコン窒化膜、シリコン炭窒化膜、多結晶シリコン膜、炭素含有シリコン膜であってよい。一例として、シリコン酸化膜は、ＴＥＯＳ（テトラエトキシシラン）であってよい。シリコン含有膜には、リン、ホウ素又は窒素等の元素がドープされていてもよい。なお、エッチング対象膜ＥＦがシリコン含有膜である場合、マスクＭＫは、エッチング対象膜ＥＦと異なるシリコン含有膜である。一例として、炭素含有膜は、スピンオンカーボン（ＳＯＣ）膜、アモルファスカーボン（ＡＣＬ）膜、フォトレジスト膜、炭化タングステン膜、又は炭化ホウ素膜であってよい。一例として、金属含有膜は、タングステン、モリブデン、ルテニウム、チタン、スズ及びアルミニウムからなる群から選択される少なくとも１種の金属を含む

膜であってよい。一実施形態において、マスクＭＫは、１つの層からなる単層マスクでよく、また２つ以上の層からなる多層マスクであってもよい。マスクＭＫが多層マスクである場合、マスクＭＫは、シリコン窒化膜とシリコン酸化膜とを含んでよく、当該シリコン酸化膜は当該シリコン窒化膜よりも厚く形成されていてよい。一例として、マスクＭＫは、ＳｉＮ膜とＴＥＯＳ膜とをこの順に含む多層マスクであってよい。一実施形態において、マスクＭＫは、フォトレジストであってよい。一実施形態において、マスクＭＫは、極端紫外光（Ｅｘｔｒｅｍｅ　Ｕｌｔｒａ　Ｖｉｏｌｅｔ；以下「ＥＵＶ」と表記する。）により露光されたフォトレジストであってもよい。一例として、金属含有レジストは、ＥＵＶにより露光されてもよい。一実施形態において、マスクＭＫは、化学増幅レジスト（Ｃｈｅｍｉｃａｌｌｙ　Ａｍｐｌｉｆｉｅｄ　Ｒｅｓｉｓｔ；以下「ＣＡＲ」と表記する。）であってよい。一例として、ＣＡＲは、ＥＵＶにより露光されてもよい。

[0053]　開口ＯＰは、基板Ｗの平面視、すなわち、基板Ｗを図４の上から下に向かう方向に見た場合において、任意の形状を有してよい。当該形状は、例えば、円、楕円、矩形、線やこれらの１種類以上を組み合わせた形状であってよい。マスクＭＫは、複数の側壁を有し、複数の側壁が複数の開口ＯＰを規定してよい。複数の開口ＯＰは、それぞれ線形状を有し、一定の間隔で並んでライン＆スペースのパターンを構成してよい。また、複数の開口ＯＰは、それぞれ孔形状を有し、アレイパターンを構成してもよい。一実施形態において、開口ＯＰの寸法は、１００ｎｍ以下であってよく、５０ｎｍ以下であってもよく、３０ｎｍ以下であってもよい。一実施形態において、開口ＯＰは、リソグラフィにより形成されてよい。一例として、開口ＯＰは、エッチング対象膜ＥＦ上に形成されたフォトレジストを露光及び現像することにより形成されてよい。フォトレジストとしてＥＵＶレジストを用いる場合、露光は、ＥＵＶ露光装置を用いたＥＵＶ露光であってよい。また、現像は、ドライ現像であってもよく、ウェット現像であってもよい。

[0054]　工程ＳＴ１において、基板Ｗは、プラズマ処理チャンバ１０（以下「チャ

ンバ１０」ともいう。）内で準備されてよい。一実施形態において、基板Ｗは、搬送アームによりチャンバ１０内に搬入され、リフターにより基板支持部１１に載置され、例えば図２に示すように基板支持部１１上に吸着保持される。

[0055]（工程ＳＴ２：第１のエッチング）

工程ＳＴ２において、エッチング対象膜ＥＦがエッチングされる。工程ＳＴ２においては、マスクＭＫを介し、第１の処理ガスから生成したプラズマにより、エッチング対象膜ＥＦがエッチングされる。第１の処理ガスは、塩素含有ガスを含む。一実施形態において、塩素含有ガスは、Cl_2ガス、ＨＣｌガス及び$CHCl_3$等を含んでいてよい。一実施形態において、第１の処理ガスは、Cl_2ガスであってよい。一実施形態において、第１の処理ガスは、ＨＣｌガスを含まない。一実施形態において、第１の処理ガスは、ＨＣｌガス以外の塩素含有ガスを含む。工程ＳＴ２は、第１の処理ガスをチャンバ１０に供給すること、第１の処理ガスからプラズマを生成することを含む。

[0056] 工程ＳＴ２においては、第１の処理ガスがチャンバ１０内に供給される。第１の処理ガスは、例えば、ガス供給部２０から中央ガス注入部１３のガス導入口１３ｃを介してチャンバ１０内に供給されてよい。一実施形態において、第１の処理ガスは、酸素含有ガス、臭素含有ガス、フッ素含有ガス及び貴ガスからなる群から選択される少なくとも１種を含んでよい。一例として、酸素含有ガスは、O_2、ＣＯ、CO_2、SO_2及びＣＯＳからなる群から選択される少なくとも１種のガスを含んでいてよい。一例として、貴ガスは、Ａｒ及びＨｅからなる群から選択される少なくとも１種を含んでいてよい。一例として、臭素含有ガスは、ＨＢｒを含んでいてよい。一例として、フッ素含有ガスは、CHF_3ガス、CH_2F_2ガス、CH_3Fガス、$C_3H_2F_4$ガス、$C_4H_2F_6$ガス、C_2HF_5ガス、$C_2H_2F_4$ガス、$C_2H_3F_3$ガス、$C_2H_4F_2$ガス、C_3HF_7ガス、$C_3H_2F_2$ガス、$C_3H_2F_6$ガス、$C_3H_3F_5$ガス、$C_4H_5F_5$ガス、$C_4H_2F_8$ガス、$C_5H_2F_6$ガス、$C_5H_2F_{10}$ガス及び$C_5H_3F_7$ガス等のＣＨＦ系ガスを含んでいてよい。チャンバ１０内の圧力は、

設定圧力に調整されてよい。設定圧力は、１５ｍＴｏｒｒ以上２００ｍＴｏｒｒ以下であってよい。

[0057] 次に、チャンバ１０内の第１の処理ガスからプラズマが生成される。一実施形態において、アンテナ１４にソースＲＦ信号が供給され、これにより、アンテナ１４と基板支持部１１との間で高周波電界が生成され、プラズマ処理空間１０ｓ内の処理ガスからプラズマが生成される。このとき、基板支持部１１にバイアス信号が供給されてよい。バイアス信号は、ＲＦ電源３１から供給されるバイアスＲＦ信号又は、ＤＣ電源３２から供給されるバイアスＤＣ信号であってよい。この場合、プラズマと基板Ｗとの間にバイアス電位が発生する。プラズマ中のイオン、ラジカル等の活性種は、基板Ｗに引きよせられ、当該活性種によって、エッチング対象膜ＥＦがエッチングされる。一実施形態において、バイアス信号は、３００Ｗ以上１５００Ｗ以下の電力を有してよく、３００Ｗ以上９００Ｗ以下の電力を有してよい。

[0058] 図５は、工程ＳＴ２を実行した後における基板Ｗの断面構造の一例を示す図である。工程ＳＴ２において、マスクＭＫはマスクとして機能する。すなわちエッチング対象膜ＥＦのうち開口ＯＰに対して露出する部分がプラズマ中の活性種により選択的にエッチングされる。これにより、図５に示すように凹部ＲＣが形成される。工程ＳＴ２では、第１の処理ガスが塩素含有ガスを含むことにより、エッチングレートの低下が抑制される傾向にある一方、凹部ＲＣの底部ＢＴ近傍においては裾残り（フッティングＦ）が生じる傾向にある。フッティングＦは、凹部ＲＣの底部ＢＴ近傍において、エッチング対象膜ＥＦの側壁から水平方向に向かって延出する部分である。フッティングＦは、本技術分野において、裾部や残渣等とも称される。フッティングＦは、凹部ＲＣの底部ＢＴ近傍において凹部ＲＣの幅（水平方向（図５における紙面左右方向）の幅）を規定する。フッティングＦが与える幅（凹部ＲＣの幅ＣＤ）は、凹部ＲＣの底部ＢＴ近傍から底部ＢＴに向けて漸減する傾向にあり、フッティングＦは、凹部ＲＣの底部ＢＴにおいて幅ＣＤ１を与える。本エッチング方法においては、後述する工程ＳＴ３が実行されることによ

り、フッティングＦが減少（幅ＣＤ１が拡大）する傾向にある。このように、本エッチング方法においては、エッチングレートを損ねることなくフッティングＦが低減された凹部ＲＣの形状が得られ得る。なお、フッティングＦの低減は、後述する実施例に記載の方法に基づいて評価し得る。一実施形態において、塩素含有ガスがCl_2ガスを含む場合、エッチングレートの低下が抑制される一方でフッティングの発生が顕在化する傾向にあるため、工程ＳＴ３が実行されることによるフッティング低減の効果も顕在化し得る。塩素含有ガスがCl_2ガスを含む場合、上記観点から、塩素含有ガスにおけるCl_2ガスの流量は、他の塩素含有ガスの各々の流量よりも多くてよい。一例として、塩素含有ガスがCl_2ガス及びＨＣｌガスを含む場合、塩素含有ガスにおけるCl_2ガスの流量はＨＣｌガスの流量よりも多くてよい。

[0059] 一実施形態において、工程ＳＴ２が実行されている間、基板支持部１１の温度が温調モジュールにより設定温度に調整されてよい。工程ＳＴ２が実行されている間の設定温度は、例えば、－３０℃以上１２０℃以下の温度であってよい。一実施形態において、工程ＳＴ２が実行されている間の設定温度は、１２０℃超であってもよい。一例では、基板支持部１１の温度を調整又は維持することは、流路１１１０ａを流れる伝熱流体の温度を設定温度又は設定温度と異なる温度に調整又は維持することを含む。一例では、基板支持部１１の温度を調整又は維持することは、静電チャック１１１１と基板Ｗの裏面との間の伝熱ガス（例えばＨｅ）の圧力を制御することを含む。なお、流路１１１０ａに伝熱流体が流れ始めるタイミングは、基板Ｗが基板支持部１１に載置される前でも後でもよく、また同時でもよい。また、本エッチング方法において、基板支持部１１の温度は、工程ＳＴ２の前又は工程ＳＴ１の前に設定温度に調整されてよい。すなわち、基板支持部１１の温度が設定温度に調整された後に、基板支持部１１上に基板Ｗを準備してよい。一実施形態において、基板支持部１１を設定温度に制御することに代えて、基板Ｗを設定温度に制御してもよい。基板Ｗの温度を設定温度に制御することは、基板支持部１１、流路１１１０ａを流れる伝熱流体の温度及び／又はヒータ

温度を設定温度にすること、又は、設定温度とは異なる温度にすることを含む。本エッチング方法において、基板支持部１１又は基板Ｗの温度は、工程ＳＴ１、工程ＳＴ２及びＳＴ３の各々において変更されてよい。本エッチング方法の以降の工程において、基板支持部１１の温度は、工程ＳＴ１、工程ＳＴ２又は後述する工程ＳＴ３で調整した設定温度に維持されてよい。

[0060] 一実施形態において、凹部ＲＣの形成過程において、凹部の底部ＢＴが下地膜ＵＦに到達することにより、下地膜ＵＦの少なくとも一部が開口ＯＰに対して露出され得る。工程ＳＴ２は、下地膜ＵＦの少なくとも一部が露出した後で、又は、下地膜ＵＦの少なくとも一部が露出する前（例えば直前）で、終了されてよい。すなわち、工程ＳＴ２において、下地膜ＵＦの少なくとも一部が露出した後で、又は、下地膜ＵＦの少なくとも一部が露出する前（例えば直前）で、後述する工程ＳＴ３に切り替えてよい。また、工程ＳＴ２は、所与の停止条件が満たされることによって終了されてよい。停止条件は、例えば、エッチング時間であってよく、また凹部ＲＣの深さであってよい。エッチング終了時における操作は、ソースＲＦ信号、バイアスＲＦ信号、バイアスＤＣ信号、第１の処理ガスの供給の停止であってよい。

[0061] 一実施形態において、工程ＳＴ２の終了後、工程ＳＴ３を実行する前に、基板Ｗを酸素含有ガス又は酸素含有ガスから生成したプラズマに晒す工程ＳＴ２Ａをさらに含んでいてよい。工程ＳＴ２Ａにおける酸素含有ガスは、O_2ガスを含んでいてよい。工程ＳＴ２Ａを実行する場合、エッチング対象膜ＥＦ及びマスクＭＫの表面の少なくとも一部に保護膜が形成され得る。また、工程ＳＴ２Ａの終了後、工程ＳＴ３を実行する前に、基板Ｗをフッ素含有ガスから生成したプラズマに晒す工程ＳＴ２Ｂをさらに含んでいてよい。工程ＳＴ２Ｂにおけるフッ素含有ガスは、CF_4ガスを含んでいてよい。工程ＳＴ２Ｂを実行する場合、凹部ＲＣの底部ＢＴ近傍から底部ＢＴにおける領域の保護膜を選択的に除去し得ると共に当該領域を除く領域の保護膜は維持し得る。保護膜が形成されている場合、ボーイングが抑制される傾向にある。これにより、エッチング対象膜ＥＦ上の凹部ＲＣの形状異常が抑制され得る。

[0062]（工程ＳＴ３：第２のエッチング）

工程ＳＴ３において、エッチング対象膜ＥＦがさらにエッチングされる。工程ＳＴ３においては、マスクＭＫを介し、第２の処理ガスから生成したプラズマにより、エッチング対象膜ＥＦがさらにエッチングされる。第２の処理ガスは、ＨＣｌガスを含む。一実施形態において、第２の処理ガスは、ＨＣｌガスであってよい。一実施形態において、第２の処理ガスは、Cl_2ガス及び$CHCl_3$等を含んでいてよい。一実施形態において、第２の処理ガスは、Cl_2ガスを含まない。工程ＳＴ３は、第２の処理ガスをチャンバ１０に供給すること、第２の処理ガスからプラズマを生成することを含む。

[0063] 工程ＳＴ３においては、第２の処理ガスがチャンバ１０内に供給される。第２の処理ガスは、例えば、ガス供給部２０から中央ガス注入部１３のガス導入口１３ｃを介してチャンバ１０内に供給されてよい。一実施形態において、第２の処理ガスは、酸素含有ガス、臭素含有ガス、フッ素含有ガス及び貴ガスからなる群から選択される少なくとも１種を含んでよい。一例として、酸素含有ガスは、O_2、ＣＯ、CO_2、SO_2及びＣＯＳからなる群から選択される少なくとも１種のガスを含んでいてよい。一例として、貴ガスは、Ａｒ及びＨｅからなる群から選択される少なくとも１種を含んでいてよい。一例として、臭素含有ガスは、ＨＢｒを含んでいてよい。一例として、フッ素含有ガスは、CHF_3ガス、CH_2F_2ガス、CH_3Fガス、$C_3H_2F_4$ガス、$C_4H_2F_6$ガス、C_2HF_5ガス、$C_2H_2F_4$ガス、$C_2H_3F_3$ガス、$C_2H_4F_2$ガス、C_3HF_7ガス、$C_3H_2F_2$ガス、$C_3H_2F_6$ガス、$C_3H_3F_5$ガス、$C_4H_5F_5$ガス、$C_4H_2F_8$ガス、$C_5H_2F_6$ガス、$C_5H_2F_{10}$ガス及び$C_5H_3F_7$ガス等のＣＨＦ系ガスを含んでいてよい。チャンバ１０内の圧力は、設定圧力に調整されてよい。設定圧力は、１５ｍＴｏｒｒ以上２００ｍＴｏｒｒ以下であってよい。

[0064] 次に、チャンバ１０内の第２の処理ガスからプラズマが生成される。一実施形態において、アンテナ１４にソースＲＦ信号が供給され、これにより、アンテナ１４と基板支持部１１との間で高周波電界が生成され、プラズマ処

理空間１０ｓ内の処理ガスからプラズマが生成される。このとき、基板支持部１１にバイアス信号が供給されてよい。バイアス信号は、ＲＦ電源３１から供給されるバイアスＲＦ信号又は、ＤＣ電源３２から供給されるバイアスＤＣ信号であってよい。この場合、プラズマと基板Wとの間にバイアス電位が発生する。プラズマ中のイオン、ラジカル等の活性種は、基板Wに引きよせられ、当該活性種によって、エッチング対象膜ＥＦがエッチングされる。一実施形態において、工程ＳＴ２及び工程ＳＴ３において基板支持部１１にバイアス信号を供給する場合、工程ＳＴ３におけるバイアス信号のレベルは、工程ＳＴ２におけるバイアス信号のレベルよりも高くてよい。一例として、バイアス信号として、バイアスＲＦ信号を用いる場合、工程ＳＴ３におけるバイアスＲＦ信号の電力Ｗ３は、工程ＳＴ２におけるバイアスＲＦ信号の電力Ｗ２よりも高くてよい。一実施形態において、バイアスＲＦ信号は、３００W以上１５００W以下の電力を有してよく、３００W以上９００W以下の電力を有してよい。

[0065] 図６は、工程ＳＴ３を実行した後における基板Wの断面構造の一例を示す図である。工程ＳＴ３において、マスクＭＫはマスクとして機能し、エッチング対象膜ＥＦのうち開口ＯＰに対して露出する部分がプラズマ中の活性種により選択的にエッチングされることにより、工程ＳＴ２によって形成された凹部ＲＣの形状が変化する。工程ＳＴ３では、第２の処理ガスがＨＣｌガスを含むことにより、工程ＳＴ２で形成された凹部ＲＣにおけるフッティングＦが減少する傾向にある。これは、エッチングの過程において、ＨＣｌガスに由来する水素イオンがエッチング対象膜ＥＦにおけるシリコンの結合状態の少なくとも一部を変化（例えば、Ｓｉ－Ｓｉ結合からＳｉ－Ｈ結合に変化）させ、それによってフッティングＦが減少する傾向にあるためと考えられる。なお、本エッチング方法における作用機序を上記した内容に限定する趣旨ではなく、工程ＳＴ３が実行される限り、工程ＳＴ２で形成された凹部ＲＣにおけるフッティングＦが減少する傾向にある。上記のとおり、工程ＳＴ３は、工程ＳＴ２によってエッチング対象膜ＥＦ上に形成された凹部ＲＣ

をさらに水平方向（図６における紙面左右方向）にエッチングすることを含み得る。フッティングＦが減少する結果、凹部ＲＣの底部ＢＴの幅ＣＤ２（工程ＳＴ３の終了時における凹部ＲＣの底部ＢＴの幅）は、幅ＣＤ１（工程ＳＴ２の終了時における凹部ＲＣの底部ＢＴの幅）よりも大きくなる傾向にある。このように、本エッチング方法においては、工程ＳＴ２によりエッチングレートの低下を抑制した上で、工程ＳＴ３によりフッティングＦが低減された凹部ＲＣの形状が得られ得るため、エッチングの加工性が向上され得る。なお、本エッチング方法は、上記のほか、凹部ＲＣの底部の水平方向のエッチング量が、凹部ＲＣの底部以外のエッチング量よりも大きい傾向、すなわち、ボーイング抑制される傾向にある。一実施形態において、第２の処理ガスがCl_2ガスを含む場合、第２の処理ガスにおけるCl_2ガスの流量はＨＣｌガスの流量よりも少なくてよい。また、第２の処理ガスがCl_2ガスを含む場合、第２の処理ガスにおけるCl_2ガスの流量は第１の処理ガスにおけるCl_2ガスの流量よりも少なくてよい。一実施形態において、第１の処理ガスがＨＣｌガスを含む場合、第１の処理ガスにおけるＨＣｌガスの流量は、第１の処理ガスにおけるＨＣｌガスの流量よりも少なくてよい。

[0066] 工程ＳＴ３を経た後の凹部ＲＣは、フッティングＦが低減された領域に対応する領域ＤＦを有する。一実施形態において、領域ＤＦは、図６に示すように、フッティングＦが完全に除去されて形成される領域であってよい。一実施形態において、領域ＤＦは、フッティングＦの少なくとも一部が除去されて形成される領域であってよい。

[0067] 一実施形態において、工程ＳＴ３が実行されている間、基板支持部１１の温度が温調モジュールにより設定温度に調整されてよい。工程ＳＴ３が実行されている間の設定温度は、例えば、－３０℃以上１２０℃以下の温度であってよい。一実施形態において、工程ＳＴ３が実行されている間の設定温度は、１２０℃超であってもよい。一例では、基板支持部１１の温度を調整又は維持することは、流路１１１０ａを流れる伝熱流体の温度を設定温度又は設定温度と異なる温度に調整又は維持することを含む。一例では、基板支持

部１１の温度を調整又は維持することは、静電チャック１１１１と基板Wの裏面との間の伝熱ガス（例えばＨｅ）の圧力を制御することを含む。一実施形態において、基板支持部１１を設定温度に制御することに代えて、基板Wを設定温度に制御してもよい。基板Wの温度を設定温度に制御することは、基板支持部１１、流路１１１０ａを流れる伝熱流体の温度及び／又はヒータ温度を設定温度にすること、又は、設定温度とは異なる温度にすることを含む。一実施形態において、工程ＳＴ３における基板W又は基板支持部１１の温度Ｔ３は、工程ＳＴ２における基板W又は基板支持部１１の温度Ｔ２よりも高くてよい。

[0068] 一実施形態において、工程ＳＴ１、工程ＳＴ２及び工程ＳＴ３は、同一のチャンバ内で実行されてよい。一実施形態において、工程ＳＴ２及び工程ＳＴ３は、別のチャンバ内で実行されてよい。一実施形態において、工程ＳＴ２と工程ＳＴ３は、交互に繰り返し実行されてよい。一実施形態において、工程ＳＴ２と工程ＳＴ３は、同時に実行されてもよい。

[0069]（変形例１）

本エッチング方法の変形例として、工程ＳＴ２において、塩素含有ガスがCl_2ガス及びＨＣｌガスを含み、塩素含有ガスにおけるＨＣｌガスの流量がCl_2ガスの流量よりも多い例について説明する。上記の他、本変形例の工程ＳＴ１、工程ＳＴ２及び工程ＳＴ３は、本エッチング方法の工程ＳＴ１、工程ＳＴ２及び工程ＳＴ３と同様に実行し得る。本変形例の工程ＳＴ２を実行した後も、図５の例に示すようなフッティングＦが凹部ＲＣの底部ＢＴ近傍において生じ得る。この場合も、本変形例の工程ＳＴ３を実行することで、図６の例に示すようにフッティングＦを低減し得る。

[0070] 本変形例の工程ＳＴ２における第１処理ガスは、酸素含有ガスを含んでいてよい。また、本変形例の工程ＳＴ３における第２処理ガスは、酸素含有ガスを含んでいてよい。本変形例において、第１処理ガス及び／又は第２処理ガスが酸素含有ガスを含む場合、選択比の低下が抑制され得る。

[0071] 本変形例において、工程ＳＴ３における基板W又は基板支持部１１の温度

Ｔ３は、工程ＳＴ２における基板W又は基板支持部１１の温度Ｔ２よりも高くてよい。一例として、温度Ｔ２は、－３０℃以上３０℃以下であってよく、温度Ｔ３は、－３０℃以上１２０℃以下であってよい。このように温度制御する場合、フッティングＦの低減が促進され得る。

[0072] 本変形例において、工程ＳＴ３におけるバイアス信号の電力Ｗ３は、工程ＳＴ２におけるバイアス信号の電力Ｗ２よりも高くてよい。一例として、電力Ｗ２は、３００W以上９００W以下であってよく、電力Ｗ３は、３００W以上１５００W以下であってよい。このように電力制御する場合、フッティングＦの低減が促進され得る。

[0073]（変形例２）

図７は、本エッチング方法の他の一例を示すフローチャートである。図７に示すように、変形例２のエッチング方法は、基板を準備する工程ＳＴ２１と、エッチングを行う工程ＳＴ２２と、を含む。

[0074]（工程ＳＴ２１：基板の準備）

工程ＳＴ２１では、基板Wが準備される。一実施形態において、工程ＳＴ２１は、本エッチング方法に関して説明した工程ＳＴ１及び工程ＳＴ２と同様にして実行し得る。工程ＳＴ２１で準備される基板Wは、下地膜ＵＦと、下地膜ＵＦ上のエッチング対象膜ＥＦと、を備える。工程ＳＴ２１で準備される基板Wにおいて、エッチング対象膜ＥＦは、凹部ＲＣを含む。工程ＳＴ２１で準備される基板Wにおいて、凹部ＲＣの底部には、フッティングＦが形成されている。ＳＴ２１で準備される基板Wは、本エッチング方法に関して説明した工程ＳＴ２で準備される基板Wと同様の構成であってよい。例えば、工程ＳＴ２１で準備される基板Wの断面構造は、図５に例示する基板Wの断面構造と同様であってよい。

[0075]（工程ＳＴ２２：基板のエッチング）

工程ＳＴ２２において、ＨＣｌガスを含む処理ガスから生成したプラズマにより、基板Wのエッチングが実行される。工程ＳＴ２２は、本エッチング方法に関して説明した工程ＳＴ３と同様にして実行し得る。変形例２のエッ

チング方法においては、工程ＳＴ２２を実行することにより、フッティングＦの少なくとも一部が除去される。ＳＴ２２を実行した後における基板Ｗは、本エッチング方法に関して説明した工程ＳＴ３を実行した後における基板Ｗと同様の構成であってよい。例えば、工程ＳＴ２１で準備される基板Ｗの断面構造は、図５に例示する基板Ｗの断面構造と同様であってよい。このように、変形例２のエッチング方法によれば、フッティングＦが低減される傾向にあり、エッチングの加工性が向上し得る。

[0076] ＜実施例＞

次に、本エッチング方法に基づいてフッティングの除去性能を評価した例について説明する。本開示は、以下の実施例によって何ら限定されるものではない。

[0077] （実施例１）

図２に示すプラズマ処理装置１と同様の構成を有する装置を準備した。当該装置の基板支持部１１上に、基板を載置した。かかる基板は、図４に示す基板Ｗと同様の構成を備えていた。下地膜ＵＦとしては、シリコン基材上のＴＥＯＳ膜を用いた。エッチング対象膜ＥＦとしては、アモルファスシリコン膜を用いた。マスクＭＫとしては、ＳｉＮとＴＥＯＳ膜と、を用いた。すなわち、基板Ｗは、ＴＥＯＳ膜と、アモルファスシリコン膜と、ＳｉＮと、ＴＥＯＳ膜と、をこの順に備えていた。マスクＭＫには、エッチング対象膜ＥＦを露出する複数の開口ＯＰが形成されていた。すなわち、複数の開口ＯＰは、ライン＆スペースのパターンを構成するように形成されていた。

[0078] 上記の基板Ｗに対して、本エッチング方法を適用してエッチングを実行した。すなわち、第１の処理ガスを用いた第１エッチングと、第２の処理ガスを用いた第２エッチングとを、この順に実行した。第１エッチングは、下地膜ＵＦが露出する直前で終了した。第１処理ガスとしては、Cl_2ガスとＡｒガスを用いた。第２処理ガスは、第１処理ガスにおけるCl_2ガスをＨＣｌガスに変更したことを除き、第１処理ガスと同様とした。第２エッチングは、第１エッチングにおける第１の処理ガスを第２の処理ガスに変更し、かつ、

処理時間を第１エッチングの０．５倍にしたことを除き、第１エッチングと同様に実行した。

[0079]（参考例１）

参考例１では、実施例１の第２エッチングにおいて、第１処理ガスを第２処理ガスに変更しなかった。すなわち、参考例１の第２エッチングにおいては、第２の処理ガスとして、実施例１における第１の処理ガスと同様のガスを用いた。かかる変更点を除き、実施例１と同様の条件で、基板Ｗをエッチングした。

[0080]（フッティング幅及びボトム角度）

図８は、第１エッチングを実行した後における基板Ｗの断面構造において、フッティング幅及びボトム角の測定例を説明する図である。図８に示すように、フッティング幅Ｆｗは、フッティングＦの水平方向（図８における紙面左右方向）の長さに対応する。ボトム角θは、凹部ＲＣの底部ＢＴとフッティングＦのなす角（図８の例において鈍角）に対応する。なお、ボトム角θを測定する際に基準とする凹部ＲＣの底部ＢＴからの高さｈは、例えば、３０～５０ｎｍであってよく、４０ｎｍであってもよい。実施例１及び参考例１において、図８に示すフッティング幅Ｆｗ及びボトム角θを測定することにより、フッティングの除去性能を評価した。すなわち、第２エッチングを実行した後における基板Ｗの断面構造において測定されるフッティング幅Ｆｗが、０ｎｍに近いほどフッティングの除去性能が高いものと評価することとした。また、ボトム角θについては、９０°に近いほど、すなわち、測定されたボトム角θと９０°との差分（θ－９０°）の数値が０°に近いほど、フッティングの除去性能が高いものと評価することとした。

[0081] 上記測定の結果、参考例１では、第２エッチング終了時のフッティング幅が、第１エッチング終了時のフッティング幅の６２％となった。一方、実施例１では、第２エッチング終了時のフッティング幅が、第１エッチング終了時のフッティング幅の４６％となった。参考例１よりも実施例１の方がフッティング幅Ｆｗを低減できたといえる。次いで、参考例１では、第２エッチ

ング終了時のボトム角から９０°を引いた値が、第１エッチング終了時のボトム角から９０°を引いた値の３４％となった。一方、実施例１では、第２エッチング終了時のボトム角から９０°を引いた値が、第１エッチング終了時のボトム角から９０°を引いた値の１４％となった。参考例１よりも実施例１の方がボトム角θを９０°に近付けることができたといえる。以上より、参考例１よりも実施例１の方がフッティングの除去性能に優れるものといえる。

[0082] 本開示の実施形態は、以下の態様をさらに含む。

[0083] （付記１）

（ａ）基板を基板支持部上に準備する工程であって、前記基板は、下地膜と、前記下地膜上のシリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から選択される少なくとも１種を含むエッチング対象膜と、前記エッチング対象膜上のマスクと、を備え、前記マスクは、前記エッチング対象膜を露出する少なくとも１つの開口を備える、工程と、

（ｂ）Cl_2ガスを含む第１の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をエッチングする工程と、

（ｃ）ＨＣｌガスを含む第２の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をさらにエッチングする工程と、

を含む、エッチング方法。

[0084] （付記２）

前記（ｂ）は、前記エッチング対象膜に凹部を形成することであって、前記凹部の底部には、フッティングが形成されている、ことを含み、

前記（ｃ）は、前記フッティングの少なくとも一部を除去することを含む、付記１に記載のエッチング方法。

[0085] （付記３）

前記第１の処理ガスは、ＨＣｌガスを含まないか、前記第２の処理ガスにおけるＨＣｌガスの流量よりも少ない流量でＨＣｌガスを含む、付記１又は付記２に記載のエッチング方法。

[0086]（付記４）

前記第２の処理ガスは、Cl_2ガスを含まないか、前記第１の処理ガスにおけるCl_2ガスの流量よりも少ない流量でCl_2ガスを含む、付記１～付記３のいずれかに記載のエッチング方法。

[0087]（付記５）

前記（ｃ）は、前記（ｂ）のエッチングにより前記エッチング対象膜に形成された凹部をさらに水平方向にエッチングすることを含む、付記１～付記４のいずれかに記載のエッチング方法。

[0088]（付記６）

前記（ｃ）の終了時における前記凹部の底部の幅は、前記（ｂ）の終了時における前記凹部の底部の幅よりも大きい、付記５に記載のエッチング方法。

[0089]（付記７）

前記（ｃ）において、前記凹部の底部の水平方向のエッチング量は、前記凹部の底部以外の水平方向のエッチング量よりも大きい、付記５又は付記６に記載のエッチング方法。

[0090]（付記８）

前記（ｂ）において、前記下地膜の少なくとも一部が露出した後で、又は、前記下地膜の少なくとも一部が露出する直前で、前記（ｃ）に切り替える、付記１～付記７のいずれかに記載のエッチング方法。

[0091]（付記９）

前記（ｂ）と前記（ｃ）とを交互に繰り返す、付記１～付記８のいずれかに記載のエッチング方法。

[0092]（付記１０）

前記（ｂ）と前記（ｃ）とを同時に実行する、付記１～付記８のいずれかに記載のエッチング方法。

[0093]（付記１１）

前記第１の処理ガス及び前記第２の処理ガスの少なくとも一方は、酸素含

有ガスをさらに含む、付記１～付記１１のいずれかに記載のエッチング方法。

[0094]（付記１２）

前記酸素含有ガスは、O_2、ＣＯ、CO_2、SO_2及びＣＯＳからなる群から選択される少なくとも１種のガスを含む、付記１１に記載のエッチング方法。

[0095]（付記１３）

前記（ｃ）における前記基板又は基板支持部の温度は、前記（ｂ）における前記基板又は基板支持部の温度よりも高い、付記１～付記１２のいずれかに記載のエッチング方法。

[0096]（付記１４）

前記（ｂ）及び前記（ｃ）において、前記基板支持部にバイアス信号を供給し、

前記（ｃ）における前記バイアス信号のレベルは、前記（ｂ）における前記バイアス信号のレベルよりも高い、付記１～付記１３のいずれかに記載のエッチング方法。

[0097]（付記１５）

前記第１の処理ガス及び第２の処理ガスの少なくとも一方は、貴ガスをさらに含む、付記１～付記１４のいずれかに記載のエッチング方法。

[0098]（付記１６）

前記貴ガスは、Ａｒ及びＨｅからなる群から選択される少なくとも１種を含む、付記１５に記載のエッチング方法。

[0099]（付記１７）

前記第１の処理ガス及び第２の処理ガスの少なくとも一方は、臭素含有ガス及びフッ素含有ガスからなる群から選択される少なくとも１種をさらに含む、付記１～付記１６のいずれかに記載のエッチング方法。

[0100]（付記１８）

（ａ）基板を基板支持部上に準備する工程であって、前記基板は、下地膜

と、前記下地膜上のシリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から選択される少なくとも１種を含むエッチング対象膜と、前記エッチング対象膜上のマスクと、を備え、前記マスクは前記エッチング対象膜を露出する少なくとも１つの開口を備える、工程と、

（ｂ）ＨＣｌガス以外の塩素含有ガスを含む第１の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をエッチングする工程と、

（ｃ）ＨＣｌガスを含む第２の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をさらにエッチングする工程と、

を含む、エッチング方法。

[0101]（付記１９）

（ａ）基板を基板支持部上に準備する工程であって、前記基板は、下地膜と、前記下地膜上のシリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から選択される少なくとも１種を含むエッチング対象膜と、を備え、前記エッチング対象膜は凹部を含み、前記凹部の底部には、フッティングが形成されている、工程と、

（ｂ）ＨＣｌガスを含む処理ガスから生成したプラズマにより、前記フッティングの少なくとも一部を除去する工程と、

を含む、エッチング方法。

[0102]（付記２０）

チャンバと、

前記チャンバ内に設けられた基板支持部と、

前記チャンバ内に第１の処理ガス及び第２の処理ガスを供給するためのガス供給部と、

前記チャンバ内でプラズマを生成するためのプラズマ生成部と、

制御部と、を備え、

前記制御部は、前記ガス供給部及び前記プラズマ生成部を用いて、

（ａ）基板を前記基板支持部上に準備する制御であって、前記基板は、下地膜と、前記下地膜上のシリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から

選択される少なくとも１種を含むエッチング対象膜と、前記エッチング対象膜上のマスクと、を備え、前記マスクは前記エッチング対象膜を露出する少なくとも１つの開口を備える、制御と、

（ｂ）Cl_2ガスを含む第１の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をエッチングする制御と、

（ｃ）ＨＣｌガスを含む第２の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をさらにエッチングする制御と、

を含む制御を実行するように構成される、プラズマ処理システム。

[0103]（付記２１）

（ａ）基板を基板支持部上に準備する工程であって、前記基板は、下地膜と、前記下地膜上のシリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から選択される少なくとも１種を含むエッチング対象膜と、前記エッチング対象膜上のマスクと、を備え、前記マスクは前記エッチング対象膜を露出する少なくとも１つの開口を備える、工程と、

（ｂ）塩素含有ガスを含む第１の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をエッチングする工程と、

（ｃ）ＨＣｌガスを含む第２の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をさらにエッチングする工程と、

を含む、エッチング方法。

[0104]（付記２２）

チャンバと、

前記チャンバ内に設けられた基板支持部と、

制御部と、を備え、

前記制御部は、

（ａ）基板を前記基板支持部上に準備する制御であって、前記基板は、下地膜と、前記下地膜上のシリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から選択される少なくとも１種を含むエッチング対象膜と、前記エッチング対象膜上のマスクと、を備え、前記マスクは前記エッチング対象膜を露出する少

なくとも１つの開口を備える、制御と、

（ｂ）塩素含有ガスを含む第１の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をエッチングする制御と、

（ｃ）ＨＣｌガスを含む第２の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をさらにエッチングする制御と、

を含む制御を実行するように構成される、プラズマ処理システム。

[0105] 以上の各実施形態は、説明の目的で記載されており、本開示の範囲を限定することを意図するものではない。各実施形態は、本開示の範囲及び趣旨から逸脱することなく種々の変形をなし得る。例えば、ある実施形態における一部の構成要素を、他の実施形態に追加することができる。また、ある実施形態における一部の構成要素を、他の実施形態の対応する構成要素と置換することができる。

符号の説明

[0106] 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、Ｗ……基板、ＵＦ……下地膜、ＥＦ……エッチング対象膜、ＭＫ……マスク、ＯＰ……開口、ＲＣ……凹部、ＢＴ……凹部の底部、ＣＤ１……工程ＳＴ２の終了時における凹部の底部の幅、ＣＤ２……工程ＳＴ３の終了時における凹部の底部の幅、Ｆ……フッティング、Ｆｗ……フッティング幅、ＤＦ……フッティングＦが低減された領域

請求の範囲

[請求項1] （ａ）基板を基板支持部上に準備する工程であって、前記基板は、下地膜と、前記下地膜上のシリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から選択される少なくとも１種を含むエッチング対象膜と、前記エッチング対象膜上のマスクと、を備え、前記マスクは、前記エッチング対象膜を露出する少なくとも１つの開口を備える、工程と、

（ｂ）Cl_2ガスを含む第１の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をエッチングする工程と、

（ｃ）ＨＣｌガスを含む第２の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をさらに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、前記エッチング対象膜に凹部を形成することであって、前記凹部の底部には、フッティングが形成されている、ことを含み、

前記（ｃ）は、前記フッティングの少なくとも一部を除去することを含む、請求項１に記載のエッチング方法。

[請求項3] 前記第１の処理ガスは、ＨＣｌガスを含まないか、前記第２の処理ガスにおけるＨＣｌガスの流量よりも少ない流量でＨＣｌガスを含む、請求項１に記載のエッチング方法。

[請求項4] 前記第２の処理ガスは、Cl_2ガスを含まないか、前記第１の処理ガスにおけるCl_2ガスの流量よりも少ない流量でCl_2ガスを含む、請求項１に記載のエッチング方法。

[請求項5] 前記（ｃ）は、前記（ｂ）のエッチングにより前記エッチング対象膜に形成された凹部をさらに水平方向にエッチングすることを含む、請求項１に記載のエッチング方法。

[請求項6] 前記（ｃ）の終了時における前記凹部の底部の幅は、前記（ｂ）の終了時における前記凹部の底部の幅よりも大きい、請求項５に記載のエッチング方法。

[請求項7] 前記（ｃ）において、前記凹部の底部の水平方向のエッチング量は、前記凹部の底部以外の水平方向のエッチング量よりも大きい、請求項５に記載のエッチング方法。

[請求項8] 前記（ｂ）において、前記下地膜の少なくとも一部が露出した後で、又は、前記下地膜の少なくとも一部が露出する直前で、前記（ｃ）に切り替える、請求項１～請求項７のいずれか１項に記載のエッチング方法。

[請求項9] 前記（ｂ）と前記（ｃ）とを交互に繰り返す、請求項１～請求項７のいずれか１項に記載のエッチング方法。

[請求項10] 前記（ｂ）と前記（ｃ）とを同時に実行する、請求項１～請求項７のいずれか１項に記載のエッチング方法。

[請求項11] 前記第１の処理ガス及び前記第２の処理ガスの少なくとも一方は、酸素含有ガスをさらに含む、請求項１～請求項７のいずれか１項に記載のエッチング方法。

[請求項12] 前記酸素含有ガスは、O_2、ＣＯ、CO_2、SO_2及びＣＯＳからなる群から選択される少なくとも１種のガスを含む、請求項１１に記載のエッチング方法。

[請求項13] 前記（ｃ）における前記基板又は基板支持部の温度は、前記（ｂ）における前記基板又は基板支持部の温度よりも高い、請求項１～請求項７のいずれか１項に記載のエッチング方法。

[請求項14] 前記（ｂ）及び前記（ｃ）において、前記基板支持部にバイアス信号を供給し、

前記（ｃ）における前記バイアス信号のレベルは、前記（ｂ）における前記バイアス信号のレベルよりも高い、請求項１～請求項７のいずれか１項に記載のエッチング方法。

[請求項15] 前記第１の処理ガス及び第２の処理ガスの少なくとも一方は、貴ガスをさらに含む、請求項１～請求項７のいずれか１項に記載のエッチング方法。

[請求項16] 前記貴ガスは、Ａｒ及びＨｅからなる群から選択される少なくとも１種を含む、請求項１５に記載のエッチング方法。

[請求項17] 前記第１の処理ガス及び第２の処理ガスの少なくとも一方は、臭素含有ガス及びフッ素含有ガスからなる群から選択される少なくとも１種をさらに含む、請求項１～請求項７のいずれか１項に記載のエッチング方法。

[請求項18] （ａ）基板を基板支持部上に準備する工程であって、前記基板は、下地膜と、前記下地膜上のシリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から選択される少なくとも１種を含むエッチング対象膜と、前記エッチング対象膜上のマスクと、を備え、前記マスクは前記エッチング対象膜を露出する少なくとも１つの開口を備える、工程と、

（ｂ）ＨＣｌガス以外の塩素含有ガスを含む第１の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をエッチングする工程と、

（ｃ）ＨＣｌガスを含む第２の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をさらにエッチングする工程と、

を含む、エッチング方法。

[請求項19] （ａ）基板を基板支持部上に準備する工程であって、前記基板は、下地膜と、前記下地膜上のシリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から選択される少なくとも１種を含むエッチング対象膜と、を備え、前記エッチング対象膜は凹部を含み、前記凹部の底部には、フッティングが形成されている、工程と、

（ｂ）ＨＣｌガスを含む処理ガスから生成したプラズマにより、前記フッティングの少なくとも一部を除去する工程と、

を含む、エッチング方法。

[請求項20] チャンバと、

前記チャンバ内に設けられた基板支持部と、

前記チャンバ内に第１の処理ガス及び第２の処理ガスを供給するた

めのガス供給部と、

前記チャンバ内でプラズマを生成するためのプラズマ生成部と、

制御部と、を備え、

前記制御部は、前記ガス供給部及び前記プラズマ生成部を用いて、

（ａ）基板を前記基板支持部上に準備する制御であって、前記基板は、下地膜と、前記下地膜上のシリコン、ゲルマニウム及び金属からなる群から選択される少なくとも１種を含むエッチング対象膜と、前記エッチング対象膜上のマスクと、を備え、前記マスクは前記エッチング対象膜を露出する少なくとも１つの開口を備える、制御と、

（ｂ）Cl_2ガスを含む第１の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をエッチングする制御と、

（ｃ）ＨＣｌガスを含む第２の処理ガスから生成したプラズマにより、前記エッチング対象膜をさらにエッチングする制御と、

を含む制御を実行するように構成される、プラズマ処理システム。