

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7638371号  
(P7638371)

(45)発行日 令和7年3月3日(2025.3.3)

(24)登録日 令和7年2月20日(2025.2.20)

(51)国際特許分類	F I			
H 0 1 L 21/3065(2006.01)	H 0 1 L	21/302	1 0 5 A	
H 0 5 H 1/46 (2006.01)	H 0 1 L	21/302	1 0 1 B	
	H 0 5 H	1/46	M	

請求項の数 33 (全22頁)

(21)出願番号	特願2023-522607(P2023-522607)	(73)特許権者	000219967 東京エレクトロン株式会社 東京都港区赤坂五丁目3番1号
(86)(22)出願日	令和4年5月9日(2022.5.9)	(74)代理人	110002147 弁理士法人酒井国際特許事務所
(86)国際出願番号	PCT/JP2022/019684	(72)発明者	和田 敏治 宮城県黒川郡大和町テクノヒルズ1番 東京エレクトロン宮城株式会社内
(87)国際公開番号	WO2022/244638	(72)発明者	陳 章帆 東京都港区赤坂五丁目3番1号 赤坂B i zタワー東京エレクトロン株式会社内
(87)国際公開日	令和4年11月24日(2022.11.24)	(72)発明者	王 湯貴 宮城県黒川郡大和町テクノヒルズ1番 東京エレクトロン宮城株式会社内
審査請求日	令和6年3月13日(2024.3.13)	審査官	河合 俊英
(31)優先権主張番号	特願2021-84713(P2021-84713)		
(32)優先日	令和3年5月19日(2021.5.19)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 プラズマ処理装置及びRFシステム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

チャンバと、

前記チャンバ内に配置され、下部電極を含む基板支持部と、

前記基板支持部の上方に配置される上部電極と、

前記上部電極に電氣的に接続され、第1のRF信号を生成するように構成される第1のRF電源であり、前記第1のRF信号は、繰り返し期間内の第1の状態の間に第1の電力レベルを有し、前記繰り返し期間内の第2の状態、第3の状態及び第4の状態の間にゼロ電力レベルを有する、第1のRF電源と、

前記下部電極に電氣的に接続され、第2のRF信号を生成するように構成される第2のRF電源であり、前記第2のRF信号は、前記第1の状態及び前記第2の状態の間にゼロ電力レベルを有し、前記第3の状態の間に第2の電力レベルを有し、前記第4の状態の間に第3の電力レベルを有する、第2のRF電源と、

前記上部電極に電氣的に接続され、DC信号を生成するように構成されるDC電源と、を備える、プラズマ処理装置。

【請求項2】

前記DC信号は、前記第1の状態、前記第2の状態、前記第3の状態及び前記第4の状態の間に負極性を有する一定の電圧レベルを有する、

請求項1に記載のプラズマ処理装置。

【請求項3】

10

20

前記 DC 信号は、前記第 1 の状態及び前記第 2 の状態の間に負極性を有する第 1 の電圧レベルを有し、前記第 3 の状態及び前記第 4 の状態の間に第 2 の電圧レベルを有し、前記第 2 の電圧レベルの絶対値は、前記第 1 の電圧レベルの絶対値よりも小さい、

請求項 1 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 4】

前記第 2 の電圧レベルは、ゼロ電圧レベルを有する、

請求項 3 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 5】

前記第 1 の電圧レベルは、1 kHz ~ 100 kHz の範囲内にあるパルス周波数を有する負 DC パルスのシーケンスを有する、

請求項 3 に記載のプラズマ処理装置。

10

【請求項 6】

前記第 2 の電力レベルは、前記第 3 の電力レベルよりも大きい、

請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 つに記載のプラズマ処理装置。

【請求項 7】

前記第 2 の電力レベルは、前記第 3 の電力レベルよりも小さい、

請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 つに記載のプラズマ処理装置。

【請求項 8】

前記繰り返し期間は、100 ミリ秒以下である、

請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 つに記載のプラズマ処理装置。

20

【請求項 9】

前記繰り返し期間は、10 Hz ~ 100 kHz の範囲内にある繰り返し周波数を有する、

請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 つに記載のプラズマ処理装置。

【請求項 10】

前記第 2 の状態の期間は、前記繰り返し期間の 50 % 以下である、

請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 つに記載のプラズマ処理装置。

【請求項 11】

前記第 1 の状態の期間は、前記第 2 の状態の期間と同じである、

請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 つに記載のプラズマ処理装置。

【請求項 12】

前記第 1 の状態の期間は、前記第 2 の状態の期間よりも長い、

請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 つに記載のプラズマ処理装置。

30

【請求項 13】

前記第 1 の状態の期間は、前記第 2 の状態の期間よりも短い、

請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 つに記載のプラズマ処理装置。

【請求項 14】

前記第 3 の状態の期間は、前記第 4 の状態の期間と同じである、

請求項 6 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 15】

前記第 3 の状態の期間は、前記第 4 の状態の期間よりも長い、

請求項 6 に記載のプラズマ処理装置。

40

【請求項 16】

前記第 3 の状態の期間は、前記第 4 の状態の期間よりも短い、

請求項 6 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 17】

前記第 3 の状態の期間は、前記第 4 の状態の期間と同じである、

請求項 7 に記載のプラズマ処理装置。

【請求項 18】

前記第 3 の状態の期間は、前記第 4 の状態の期間よりも長い、

請求項 7 に記載のプラズマ処理装置。

50

## 【請求項 19】

前記第3の状態の期間は、前記第4の状態の期間よりも短い、  
請求項7に記載のプラズマ処理装置。

## 【請求項 20】

前記第1の状態の期間は、0.5マイクロ秒～90ミリ秒の範囲内にある、  
請求項1～5のいずれか1つに記載のプラズマ処理装置。

## 【請求項 21】

前記第2の状態の期間は、0.5マイクロ秒～90ミリ秒の範囲内にある、  
請求項20に記載のプラズマ処理装置。

## 【請求項 22】

前記第3の状態の期間は、0.5マイクロ秒～90ミリ秒の範囲内にある、  
請求項21に記載のプラズマ処理装置。

10

## 【請求項 23】

前記第4の状態の期間は、0.5マイクロ秒～90ミリ秒の範囲内にある、  
請求項22に記載のプラズマ処理装置。

## 【請求項 24】

前記第1の状態の期間は、前記繰り返し期間の5%～90%の範囲内にある、  
請求項1～5のいずれか1つに記載のプラズマ処理装置。

## 【請求項 25】

前記第2の状態の期間は、前記繰り返し期間の5%～90%の範囲内にある、  
請求項24に記載のプラズマ処理装置。

20

## 【請求項 26】

前記第3の状態の期間は、前記繰り返し期間の5%～90%の範囲内にある、  
請求項25に記載のプラズマ処理装置。

## 【請求項 27】

前記第4の状態の期間は、前記繰り返し期間の5%～90%の範囲内にある、  
請求項26に記載のプラズマ処理装置。

## 【請求項 28】

第1のRF信号を生成するように構成される第1のRF生成器であり、前記第1のRF信号は、繰り返し期間内の第1の状態の間に第1の電力レベルを有し、前記繰り返し期間内の第2の状態、第3の状態及び第4の状態の間にゼロ電力レベルを有する、第1のRF生成器と、

30

第2のRF信号を生成するように構成される第2のRF生成器であり、前記第2のRF信号は、前記第1の状態及び前記第2の状態の間にゼロ電力レベルを有し、前記第3の状態の間に第2の電力レベルを有し、前記第4の状態の間に第3の電力レベルを有する、第2のRF生成器と、

を備える、RFシステム。

## 【請求項 29】

前記第2の電力レベルは、前記第3の電力レベルよりも大きい、  
請求項28に記載のRFシステム。

40

## 【請求項 30】

前記第2の電力レベルは、前記第3の電力レベルよりも小さい、  
請求項28に記載のRFシステム。

## 【請求項 31】

前記繰り返し期間は、100ミリ秒以下である、  
請求項28～30のいずれか1つに記載のRFシステム。

## 【請求項 32】

前記繰り返し期間は、10Hz～100kHzの範囲内にある繰り返し周波数を有する、  
請求項28～30のいずれか1つに記載のRFシステム。

## 【請求項 33】

50

前記第 2 の状態の期間は、前記繰り返し期間の 50% 以下である、  
請求項 28 ~ 30 のいずれか 1 つに記載の RF システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、プラズマ処理装置及び RF システムに関する。

【背景技術】

【0002】

半導体の微細化が進むにつれて、高アスペクト比のエッチングプロセスが求められている。これに対し、エッチャントの堆積ステップとイオン照射ステップとを繰り返すことでエッチングを促進させる ALE (Atomic Layer Etching) と呼ばれる手法が提案されている。ALE では、堆積ステップとイオン照射ステップとで使用するプロセスガスを切り替えることで、それぞれのステップを分離している。また、プラズマ処理装置の処理容器内に供給される複数の高周波電力の定在波の発生を防止するために、プラズマ生成用及びバイアス用の高周波電力のパルス波が所定の位相差を有するように制御することが提案されている (特許文献 1)。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【文献】特開 2016 - 157735 号公報

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

本開示は、選択比、抜け性及び形状コントロール性の向上と、処理時間の短縮とを両立可能なエッチングを行うことができるプラズマ処理装置及び RF システムを提供する。

【課題を解決するための手段】

【0005】

本開示の一態様によるプラズマ処理装置は、チャンバと、チャンバ内に配置され、下部電極を含む基板支持部と、基板支持部の上方に配置される上部電極と、上部電極に電氣的に接続され、第 1 の RF 信号を生成するように構成される第 1 の RF 電源であり、第 1 の RF 信号は、繰り返し期間内の第 1 の状態の間に第 1 の電力レベルを有し、繰り返し期間内の第 2 の状態、第 3 の状態及び第 4 の状態の間にゼロ電力レベルを有する、第 1 の RF 電源と、下部電極に電氣的に接続され、第 2 の RF 信号を生成するように構成される第 2 の RF 電源であり、第 2 の RF 信号は、第 1 の状態及び第 2 の状態の間にゼロ電力レベルを有し、第 3 の状態の間に第 2 の電力レベルを有し、第 4 の状態の間に第 3 の電力レベルを有する、第 2 の RF 電源と、上部電極に電氣的に接続され、DC 信号を生成するように構成される DC 電源と、を備える。

30

【発明の効果】

【0006】

本開示によれば、選択比、抜け性及び形状コントロール性の向上と、処理時間の短縮とを両立可能なエッチングを行うことができる。

40

【図面の簡単な説明】

【0007】

【図 1】図 1 は、本開示の一実施形態におけるプラズマ処理システムの一例を示す図である。

【図 2】図 2 は、本実施形態に係るプラズマ処理装置によってエッチングされる基板の構造の一例を模式的に示す図である。

【図 3】図 3 は、本実施形態と参考例とにおける RF 信号の 1 サイクルの一例を示す図である。

【図 4】図 4 は、本実施形態と参考例とにおける RF 信号の 1 サイクルの一例を示す図で

50

ある。

【図 5】図 5 は、本実施形態における DC 信号の一例を示す図である。

【図 6】図 6 は、本実施形態と参考例とにおける実験結果の一例を示す図である。

【図 7】図 7 は、本実施形態と参考例とにおける形状コントロールモデルの一例を示す図である。

【図 8】図 8 は、本実施形態と参考例とにおける選択比改善モデルの一例を示す図である。

【図 9】図 9 は、各フェーズにおけるエッチング量の一例を示す図である。

【図 10】図 10 は、各フェーズにおける発光強度の一例を示す図である。

【図 11】図 11 は、本実施形態と参考例とにおける総エッチング量の比較の一例を示す図である。

10

【図 12】図 12 は、変形例における RF 信号の 1 サイクルの一例を示す図である。

【図 13】図 13 は、LF の RF 電力配分を変化させた場合における実験結果の一例を示す図である。

【図 14】図 14 は、LF の RF 電力配分を変化させた場合におけるトレンドデータを示すグラフの一例である。

【図 15】図 15 は、変形例における形状コントロールモデルの一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0008】

以下に、開示するプラズマ処理装置及び RF システムの実施形態について、図面に基づいて詳細に説明する。なお、以下の実施形態により開示技術が限定されるものではない。

20

【0009】

高アスペクト比のエッチングプロセスでは、例えば、高周波電力を CW (Continuous Wave) で供給した場合、被エッチング膜に形成された溝の底部の形状 (ボトム形状) は矩形となり処理時間も短い、エッチング不良が発生 (抜け性の低下) し、選択比が低下する。ここで選択比は、被エッチング膜のエッチングレート / マスクのエッチングレートである。一方、ALE を用いた場合、抜け性と選択比は向上するが、ボトム形状がテーパ形状となり処理時間が長くなる。つまり、抜け性及び選択比の向上と、形状コントロール性の向上及び処理時間の短縮とは、トレードオフの関係にある。そこで、このようなトレードオフの関係を解消し、選択比、抜け性及び形状コントロール性の向上と、処理時間の短縮とを両立可能なエッチングを行うことが期待されている。

30

【0010】

[ プラズマ処理システムの構成 ]

以下に、プラズマ処理システムの構成例について説明する。図 1 は、本開示の一実施形態におけるプラズマ処理システムの一例を示す図である。図 1 に示すように、プラズマ処理システムは、容量結合プラズマ処理装置 1 及び制御部 2 を含む。なお、プラズマ処理システムは、基板処理装置の一例である。容量結合プラズマ処理装置 1 は、プラズマ処理チャンバ 10、ガス供給部 20、電源 30 及び排気システム 40 を含む。また、プラズマ処理装置 1 は、基板支持部 11 及びガス導入部を含む。ガス導入部は、少なくとも 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、少なくとも 1 つの処理ガスをプラズマ処理空間 10s 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。側壁 10a は接地される。シャワーヘッド 13 及び基板支持部 11 は、プラズマ処理チャンバ 10 筐体とは電氣的に絶縁される。

40

【0011】

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

50

、基板（ウェハ）Wを支持するための中央領域（基板支持面）111aと、リングアセンブリ112を支持するための環状領域（リング支持面）111bとを有する。本体部111の環状領域111bは、平面視で本体部111の中央領域111aを囲んでいる。基板Wは、本体部111の中央領域111a上に配置され、リングアセンブリ112は、本体部111の中央領域111a上の基板Wを囲むように本体部111の環状領域111b上に配置される。一実施形態において、本体部111は、基台及び静電チャックを含む。基台は、導電性部材を含む。基台の導電性部材は下部電極として機能する。静電チャックは、基台の上に配置される。静電チャックの上面は、基板支持面111aを有する。リングアセンブリ112は、1又は複数の環状部材を含む。1又は複数の環状部材のうち少なくとも1つはエッジリングである。また、図示は省略するが、基板支持部11は、静電チャック、リングアセンブリ112及び基板W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、又はこれらの組み合わせを含んでもよい。流路には、ブラインやガスのような伝熱流体が流れる。また、基板支持部11は、基板Wの裏面と基板支持面111aとの間に伝熱ガスを供給するように構成された伝熱ガス供給部を含んでもよい。

10

#### 【0012】

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、導電性部材を含む。シャワーヘッド13の導電性部材は上部電極として機能する。なお、ガス導入部は、シャワーヘッド13に加えて、側壁10aに形成された1又は複数の開口部に取り付けられる1又は複数のサイドガス注入部（SGI：Side Gas Injector）を含んでもよい。

20

#### 【0013】

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1又はそれ以上の流量変調デバイスを含んでもよい。

30

#### 【0014】

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、基板支持部11の導電性部材及び/又はシャワーヘッド13の導電性部材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、プラズマ処理チャンバ10において1又はそれ以上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生成部の少なくとも一部として機能し得る。また、バイアスRF信号を基板支持部11の導電性部材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。

40

#### 【0015】

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基板支持部11の導電性部材及び/又はシャワーヘッド13の導電性部材に結合され、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、13MHz～150MHzの範囲内の周波数を

50

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、基板支持部11の導電性部材及び/又はシャワーヘッド13の導電性部材に供給される。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基板支持部11の導電性部材に結合され、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。一実施形態において、バイアスRF信号は、ソースRF信号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、400kHz~13.56MHz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、基板支持部11の導電性部材に供給される。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。

10

#### 【0016】

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、基板支持部11の導電性部材に接続され、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のバイアスDC信号は、基板支持部11の導電性部材に供給される。一実施形態において、第1のDC信号が、静電チャック内の電極のような他の電極に供給されてもよい。一実施形態において、第2のDC生成部32bは、シャワーヘッド13の導電性部材に接続され、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、シャワーヘッド13の導電性部材に供給される。種々の実施形態において、第1及び第2のDC信号のうち少なくとも1つがパルス化されてもよい。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。

20

#### 【0017】

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。

30

#### 【0018】

制御部2は、本開示において述べられる種々の工程をプラズマ処理装置1に実行させるコンピュータ実行可能な命令を処理する。制御部2は、ここで述べられる種々の工程を実行するようにプラズマ処理装置1の各要素を制御するように構成され得る。一実施形態において、制御部2の一部又は全てがプラズマ処理装置1に含まれてもよい。制御部2は、例えばコンピュータ2aを含んでもよい。コンピュータ2aは、例えば、処理部(CPU: Central Processing Unit)2a1、記憶部2a2、及び通信インターフェース2a3を含んでもよい。処理部2a1は、記憶部2a2に格納されたプログラムに基づいて種々の制御動作を行うように構成され得る。記憶部2a2は、RAM(Random Access Memory)、ROM(Read Only Memory)、HDD(Hard Disk Drive)、SSD(Solid State Drive)、又はこれらの組み合わせを含んでもよい。通信インターフェース2a3は、LAN(Local Area Network)等の通信回線を介してプラズマ処理装置1との間で通信してもよい。


40

#### 【0019】

##### [処理対象の基板]

次に、図2を用いてエッチング処理対象の基板について説明する。図2は、本実施形態に係るプラズマ処理装置によってエッチングされる基板の構造の一例を模式的に示す図である。図2には、処理前の状態50と、処理後の状態51とにおける基板Wを示している。基板Wは、シリコン基板52上に、シリコン酸化膜53と、マスク54とを有する。シ

50

リコン酸化膜 53 は、被エッチング膜である。マスク 54 は、シリコン窒化膜であり、所定パターンの開口、例えば、 状の開口を有する。開口間のピッチは、例えば 25 ~ 30 nm 以下であり、ライン CD (Critical Dimension) の目標値は、例えば 10 nm である。本実施形態に係るエッチングでは、状態 51 に示すように、マスク 54 の開口部のシリコン酸化膜 53 をシリコン基板 52 に達する前にエッチングを終了し、シリコン酸化膜 53 の溝のアスペクト比が 7 以上となるようにパーシャルエッチを行う。このとき、エッチング深さ 55 と、マスク 54 の残量 56 との関係である選択比の向上や、溝の底部の形状 57 における形状コントロール性の向上といったことが求められる。そこで、本実施形態では、高周波電力のソース RF 信号とバイアス RF 信号とをパルスで供給する供給パターンのうち、バイアス RF 信号の電力レベルを制御することにより、選択比、抜け性及び形状コントロール性を向上させるとともに、ガス切り替え方式の ALE より処理時間を短縮する。

10

## 【0020】

## [RF 信号の供給パターン]

次に、図 3 及び図 4 を用いて、エッチング処理における RF 信号 (高周波電力) の供給パターンについて参考例と対比しながら説明する。図 3 及び図 4 は、本実施形態と参考例とにおける RF 信号の 1 サイクルの一例を示す図である。図 3 (a) では、参考例における供給パターン 60a を示し、図 3 (b) では、本実施形態における供給パターン 60b を示す。本実施形態では、供給パターン 60b を繰り返すことで、デポステップとエッチステップとを繰り返す。供給パターン 60b の 1 サイクルは、例えば、10000  $\mu$ s (0.1 kHz) で繰り返される。なお、供給パターン 60b の 1 サイクルは、例えば 100ms (10 Hz) 以下の任意の周期であってもよい。例えば、供給パターン 60b の 1 サイクルを繰り返し期間として繰り返し周波数で表すと、当該繰り返し期間は、10 Hz ~ 100 kHz (100ms ~ 10  $\mu$ s) の範囲内にある繰り返し周波数を有するようにしてもよい。また、以下の説明及び図中では、ソース RF 信号を HF (High Frequency) と表し、バイアス RF 信号を LF (Low Frequency) と表し、第 2 の DC 信号を DC と表す場合がある。また、RF 信号の供給中を「RF . PW」、RF 信号の停止中を「RF Off」と表す場合がある。

20

## 【0021】

参考例の供給パターン 60a は、バイアス RF 信号の電力レベルを変更しない場合である。供給パターン 60a は、供給パターン 60b と同様に 1 サイクル 10000  $\mu$ s (0.1 kHz) であり、先頭から順に、HF を 2500  $\mu$ s 供給、HF 及び LF を 2500  $\mu$ s 停止、LF を 5000  $\mu$ s 供給の 3 つのフェーズに分割されている。これに対し、本実施形態の供給パターン 60b は、先頭から順に、HF を第 1 の電力レベルで 2500  $\mu$ s 供給、HF 及び LF を 2500  $\mu$ s 停止、LF を第 2 の電力レベルで 2500  $\mu$ s 供給 (RF . PW - 1)、LF を第 3 の電力レベルで 2500  $\mu$ s 供給 (RF . PW - 2) の 4 つのフェーズに分割されている。

30

## 【0022】

図 4 では、供給パターン 60a、60b の各フェーズにおける電力レベルと、DC の ON/OFF とを表している。なお、以下の説明及び図中では、供給パターン 60a の各フェーズを先頭から順に、それぞれフェーズ Ph1a、Ph2a、Ph3a と表し、供給パターン 60b の各フェーズを先頭から順に、それぞれフェーズ Ph1b、Ph2b、Ph3b、Ph4b と表す。なお、フェーズ Ph1a、Ph1b はデポステップに対応し、フェーズ Ph3a、Ph3b、Ph4b はエッチステップに対応する。また、フェーズ Ph1b、Ph2b、Ph3b、Ph4b は、それぞれ、繰り返し期間内の第 1 の状態、第 2 の状態、第 3 の状態及び第 4 の状態の一例である。

40

## 【0023】

図 4 (a) に示す供給パターン 60a では、フェーズ Ph1a で HF が電力レベル A1 で供給され、フェーズ Ph2a で HF 及び LF の供給が停止され、フェーズ Ph3a で LF が電力レベル A2 で供給される。また、フェーズ Ph1a ~ Ph3a において、DC が

50

供給されている（図4（a）中、「ON」と表す）。一方、図4（b）に示す供給パターン60bでは、フェーズPh1bでHFが電力レベルB1（第1の電力レベル）で供給され、フェーズPh2bでHF及びLFの供給が停止され、フェーズPh3bでLFが電力レベルB2-1（第2の電力レベル）で供給され、フェーズPh4bでLFが電力レベルB2-2（第3の電力レベル）で供給される。このとき、電力レベルB2-1（第2の電力レベル）は、電力レベルB2-2（第3の電力レベル）よりも大きい。また、フェーズPh1b, Ph2bでは、DCが供給され（図4（b）中、「ON」と表す）、フェーズPh3b, Ph4bでは、DCの供給が停止される（図4（b）中、「OFF」と表す）。つまり、供給パターン60bは、供給パターン60aと比較して、LF供給時の電力レベルが2段階に変化するとともに、エッチステップにおいてDCの供給が停止されるようになっている。なお、LF供給時の電力レベルの変化は、2段階に限定されず、3段階以上に変化するようにしてもよく、連続的に変化するようにしてもよい。

10

**【0024】**

ここで、供給パターン60bにおけるフェーズPh1b~Ph4bは、上述のように繰り返し期間の一例であり、繰り返し期間内において、フェーズPh1b~Ph4bの比率を変更することができる。図4（b）に示す供給パターン60bでは、フェーズPh1b~Ph4bが各25%と等分割されている。この場合、フェーズPh1bの期間は、フェーズPh2bの期間と同じであるといえる。また、フェーズPh3bの期間は、フェーズPh4bの期間と同じであるといえる。

**【0025】**

一方、フェーズPh1b~Ph4bの比率を変更する場合、例えば、フェーズPh1bの期間は、フェーズPh2bの期間よりも長くしてもよいし、短くしてもよい。同様に、フェーズPh3bの期間は、フェーズPh4bの期間よりも長くしてもよいし、短くしてもよい。また、フェーズPh2bの期間は、繰り返し期間の50%以下であることが好ましい。さらに、フェーズPh1b~Ph4bの比率の範囲としては、繰り返し期間の5%~90%の範囲内にあることが好ましい。また、繰り返し期間の長さとは比率の両方を変更してもよく、この場合、フェーズPh1b~Ph4bの期間は、0.5マイクロ秒~90ミリ秒（0.5 $\mu$ s~90ms）の範囲内にあることが好ましい。なお、フェーズPh1b~Ph4bの期間の長さとは比率の変更は、後述する変形例と組み合わせてもよい。

20

**【0026】**

フェーズPh1bの期間とフェーズPh2bの期間との関係は、フェーズPh2bの期間がフェーズPh1bの期間より長くなると、プラズマ密度の減少が顕著になり、ラジカル/イオン比が大きくなる。また、フェーズPh2bの期間がフェーズPh1bの期間より長くなると、溝（トレンチ）のボトムへのラジカルの輸送が促進され、エッチングが進行しやすくなり、抜け性が改善される。一方、フェーズPh2bの期間がフェーズPh1bの期間より短くなると、マスク54に堆積するデポ量が増加し、選択比を向上させることができる。

30

**【0027】**

フェーズPh3bの期間とフェーズPh4bの期間とが同じである場合、フェーズPh3bの電力レベルB2-1と、フェーズPh4bの電力レベルB2-2とを制御することで、溝（トレンチ）のボトム形状を制御することができる。フェーズPh3bの電力レベルB2-1がフェーズPh4bの電力レベルB2-2よりも大きい場合、溝（トレンチ）のボトム形状は、テーパ形状となる。一方、フェーズPh3bの電力レベルB2-1がフェーズPh4bの電力レベルB2-2よりも小さい場合（後述する変形例を参照）、溝（トレンチ）のボトム形状は、矩形形状（パーティカル形状）となる。このように、フェーズPh3bの期間とフェーズPh4bの期間とが同じ場合、フェーズPh3bの電力レベルB2-1と、フェーズPh4bの電力レベルB2-2とを制御することで、溝（トレンチ）のボトム形状を制御することができる。なお、後述する図13において実験結果を示している。

40

**【0028】**

50

また、フェーズ P h 3 b の期間とフェーズ P h 4 b の期間との関係は、フェーズ P h 3 b の期間がフェーズ P h 4 b の期間より長くなると、溝（トレンチ）のボトム形状が矩形形状（バチカル形状）となる。一方、フェーズ P h 3 b の期間がフェーズ P h 4 b の期間より短くなると、溝（トレンチ）のボトム形状がテーパ形状となる。つまり、フェーズ P h 3 b の期間とフェーズ P h 4 b の期間とを制御することで、溝（トレンチ）のボトム形状を制御することができる。

【 0 0 2 9 】

次に、図 5 を用いて、シャワーヘッド 1 3 の導電性部材（上部電極）に供給される第 2 の DC 信号（以下、単に DC 信号ともいう。）について説明する。図 5 は、本実施形態における DC 信号の一例を示す図である。一実施形態において、DC 信号は、図 5（a）に示すように、ON 期間に負極性の一定の電圧レベルを有する。一実施形態において、DC 信号は、図 5（b）に示すように、ON 期間に負極性の複数のパルスのシーケンスを有する。例えば、フェーズ P h 1 b において、負極性の複数のパルスのシーケンスは、上部電極において HF と重畳される。

10

【 0 0 3 0 】

DC 信号は、図 4（b）に示す供給パターン 6 0 b において、例えば、フェーズ P h 1 b , P h 2 b では、第 1 の電圧レベルとし、フェーズ P h 3 b , P h 4 b では、第 2 の電圧レベルとする。このとき、第 1 の電圧レベルと第 2 の電圧レベルとの関係は、例えば、第 1 の電圧レベルの絶対値 > 第 2 の電圧レベルの絶対値とする。すなわち、DC 信号は、フェーズ P h 1 b , P h 2 b の間に負極性を有する第 1 の電圧レベルを有し、フェーズ P h 3 b , P h 4 b の間に第 2 の電圧レベルを有し、第 2 の電圧レベルの絶対値は、第 1 の電圧レベルの絶対値よりも小さい。

20

【 0 0 3 1 】

また、DC 信号は、図 4（b）に示す供給パターン 6 0 b では、例えば、第 1 の電圧レベルを - 5 0 V ~ - 2 5 0 0 V、第 2 の電圧レベルを 0 V（ゼロ電圧レベル）とすることができる。このとき、第 1 の電圧レベルは、1 k H z ~ 1 0 0 k H z の範囲内にあるパルス周波数を有する。つまり、第 1 の電圧レベルは、1 k H z ~ 1 0 0 k H z の範囲内にあるパルス周波数を有する負 DC パルスのシーケンスを有する。なお、DC 信号は、例えば、フェーズ P h 1 b ~ P h 4 b において、パルスではない、負極性の一定の電圧レベルの信号であってもよい。

30

【 0 0 3 2 】

このように、フェーズ P h 1 b , P h 2 b において、DC 信号が供給されることで、反応性生物（デポ）である CF デポのカーボン組成比をより高くすることができる。すなわち、マスク選択比の向上、及び、CD の制御性に寄与することができる。

【 0 0 3 3 】

[ 実験結果 ]

続いて、図 6 を用いて実験結果について説明する。図 6 は、本実施形態と参考例とにおける実験結果の一例を示す図である。図 6（a）は、供給パターン 6 0 a に対応する参考例と、供給パターン 6 0 b に対応する実施例とにおける実験結果である。図 6（b）は、エッチング深さ d 1、マスク残量 r 1 およびボトムの角度 の測定箇所を示す。なお、図 6（b）において、マスク（SiN）の周囲には、シリコン窒化膜の酸化層である SiO<sub>2</sub> 層 6 5 が形成されている。また、処理条件は、下記の処理条件を用いた。なお、図 6 では、LF の電力レベルを LF 欄（第 2 の電力レベル）及び LF - 2 欄（第 3 の電力レベル）として表し、電力レベルが 1 段階である場合は LF - 2 欄を 0 として表している。また、LF 実効パワーは、参考例と実施例とで同じとなるようにしている。

40

【 0 0 3 4 】

< 処理条件 >

プラズマ処理チャンバ 1 0 内の圧力 : 2 5 m T o r r ( 3 . 3 3 P a )

温度 : 1 3 3

ソース RF 信号の電力 ( 6 0 M H z ) : 2 0 0 W ( パルス )

50

バイアス R F 信号の電力 ( 1 2 . 8 8 M H z ) :

参考例 : 1 7 5 W ( パルス )

実施例 : 3 0 0 W / 5 0 W ( パルス )

第 2 の D C 信号の電圧 : - 5 0 0 V

パルス周波数 : 0 . 1 k H z

パルスデューティ : H F / L F / L F オフセット  
= 2 5 / 5 0 / 5 0 %

プロセスガス

( C 4 F 6 / O 2 / A r ) の流量比 : 0 . 5 / 0 . 4 7 / 1 0 0

【 0 0 3 5 】

図 6 に示すように、エッチング深さ d 1 は、参考例の 3 7 . 8 n m に対して、実施例では 4 0 . 9 n m と深くなった。また、マスク残量 r 1 は、参考例の 2 1 . 5 n m に対して、実施例では 2 4 . 9 n m となり、マスク選択比が高くなった。また、エッチング時間は、参考例の 4 4 4 . 8 秒に対して、実施例では 4 1 6 . 7 秒と短縮することができた。また、ボトム角度は、参考例の 8 6 . 2 ° に対して、 8 7 . 5 ° と、より角度が立っており、実施例の方が参考例よりもボトム形状が矩形になっていることがわかる。このように、本実施形態に係る供給パターンでは、L F の電力レベルが一定である供給パターンよりも選択性が高く、ボトム形状も矩形に近く、処理時間も短縮することができる。

【 0 0 3 6 】

[ 分析結果 ]

< 形状コントロールモデル >

次に、図 7 を用いて形状コントロールモデルについて説明する。図 7 は、本実施形態と参考例とにおける形状コントロールモデルの一例を示す図である。図 7 ( a ) は、参考例のフェーズ P h 3 a における形状コントロールモデルである。フェーズ P h 3 a では、マスク 5 4 の開口部からシリコン酸化膜 5 3 の溝の底部に、第 2 のプラズマによって生成された A r イオンがバイアス電位により引き込まれることで、状態 5 8 に示すようにエッチングが進む。

【 0 0 3 7 】

図 7 ( b ) は、実験例のフェーズ P h 3 b , P h 4 b における形状コントロールモデルである。フェーズ P h 3 b では、マスク 5 4 の開口部からシリコン酸化膜 5 3 の溝の底部に、第 2 のプラズマによって生成された A r イオンがバイアス電位により引き込まれることで、状態 5 9 a に示すようにエッチングが進む。続くフェーズ P h 4 b では、バイアス R F 信号の電力レベルが低下するため、第 2 のプラズマによって生成される A r イオンのイオンエネルギーが低下するとともに、入射角度が大きくなることにより、状態 5 9 b に示すように、シリコン酸化膜 5 3 の溝の底部の形状 ( ボトム形状 ) を広げることができ、ボトム形状を矩形形状 ( 壁面の垂直化 ) とすることができる。

【 0 0 3 8 】

< 選択比改善モデル >

続いて、図 8 を用いて選択比改善モデルについて説明する。図 8 は、本実施形態と参考例とにおける選択比改善モデルの一例を示す図である。図 8 では、供給パターン 6 0 a , 6 0 b の 1 サイクル中におけるマスク 5 4 の表面に付着した反応生成物 ( デポ ) である C F 量と、C F のエッチング量との関係を、それぞれ表している。図 8 ( a ) に示すグラフ 6 1 a は、参考例の供給パターン 6 0 a の場合を示している。フェーズ P h 1 a + P h 2 a では、グラフ 6 2 a で表す C F 量が増加し、グラフ 6 3 a で示すエッチング量はゼロである。次に、フェーズ P h 3 a では、エッチング量の増加に応じて C F 量が減少し、タイミング 6 4 a の時点でマスク 5 4 の表面に付着していた C F がなくなり、マスク 5 4 がダメージを受ける。

【 0 0 3 9 】

図 8 ( b ) に示すグラフ 6 1 b は、実施形態の供給パターン 6 0 b の場合を示している。フェーズ P h 1 a + P h 2 a では、グラフ 6 2 b で表す C F 量が増加し、グラフ 6 3 b

10

20

30

40

50

で示すエッチング量はゼロである。次に、フェーズ P h 3 b では、エッチング量の増加に応じて C F 量が減少するが、フェーズ P h 3 b の終了時点において、C F が若干残存している状態である。続いて、フェーズ P h 4 b では、バイアス R F 信号の電力レベルが低下して A r イオンのイオンエネルギーが低下するので、残存していた C F 量の減少が緩やかになり、タイミング 6 4 b の時点でマスク 5 4 の表面に付着していた C F がなくなり、マスク 5 4 がダメージを受ける。グラフ 6 1 a とグラフ 6 1 b とを比較すると、本実施形態に係る供給パターン 6 0 b の方が、参考例に係る供給パターン 6 0 a よりも、マスク 5 4 へ与えるダメージが少ないことがわかる。つまり、参考例の供給パターン 6 0 a よりも本実施形態の供給パターン 6 0 b の方が選択比を改善することができる。

#### 【 0 0 4 0 】

##### < R F 信号供給時の挙動 >

次に、図 9 及び図 1 0 を用いて、本実施形態の供給パターン 6 0 b の各フェーズにおける挙動を説明する。図 9 は、各フェーズにおけるエッチング量の一例を示す図である。図 9 に示すグラフ 7 0 は、供給パターン 6 0 b において、H F 又は L F が供給されるフェーズ P h 1 b , P h 3 b , P h 4 b におけるシリコン酸化膜 5 3 のエッチング量を示している。グラフ 7 0 に示すように、フェーズ P h 1 b では、シリコン酸化膜 5 3 のエッチングは進んでおらず、フェーズ P h 1 b のエッチングへの寄与が小さいことがわかる。一方、フェーズ P h 3 b , P h 4 b では、シリコン酸化膜 5 3 のエッチングが進み、フェーズ P h 3 b , P h 4 b のエッチングへの寄与が大きいことがわかる。また、バイアス R F 信号の電力レベルが高いフェーズ P h 3 b が、電力レベルが低いフェーズ P h 4 b よりもシリ

#### 【 0 0 4 1 】

図 1 0 は、各フェーズにおける発光強度の一例を示す図である。図 1 0 に示すグラフ 7 1 は、供給パターン 6 0 b において、H F 又は L F が供給されるフェーズ P h 1 b , P h 3 b , P h 4 b における発光強度を示している。グラフ 7 1 の領域 7 2 に示すように、フェーズ P h 1 b では、C F 発光が強く、デポ生成への寄与が大きいことがわかる。一方、フェーズ P h 3 b , P h 4 b では、C F 発光が弱く、デポ生成への寄与が小さいことがわかる。

#### 【 0 0 4 2 】

##### < エッチング速度の検証 >

続いて、図 1 1 を用いてエッチング速度について説明する。図 1 1 は、本実施形態と参考例とにおける総エッチング量の比較の一例を示す図である。図 1 1 に示すように、参考例と本実施形態に係る実施例とでは、L F 実効パワーは同じであるが、S i O エッチング量が L F パワーによって異なる。参考例では、L F パワーが 1 7 5 W (フェーズ P h 3 a ) の場合に、S i O エッチング量が 3 6 . 1 [ n m / 2 m i n ] である。これに対し、実施例では、L F パワーが 3 0 0 W (フェーズ P h 3 b ) の場合に、S i O エッチング量が 6 3 . 2 [ n m / 2 m i n ] であり、L F パワーが 5 0 W (フェーズ P h 4 b ) の場合に、S i O エッチング量が 1 5 . 2 [ n m / 2 m i n ] である。これらに 1 サイクル中の L F パワーの供給時間の比率 ( o n / ( o n + o f f ) ) であるデューティを掛けると、S i O 総エッチング量は、参考例では、1 8 . 1 [ n m / d u t y % ] となる。一方、実施例では、L F パワーが 3 0 0 W (フェーズ P h 3 b ) の場合に、1 5 . 8 [ n m / d u t y % ] となり、L F パワーが 5 0 W (フェーズ P h 4 b ) の場合に、3 . 8 [ n m / d u t y % ] となるので、合計 1 9 . 6 [ n m / d u t y % ] となる。従って、参考例よりも、複数の電力レベルで処理する実施例の方が、エッチング速度が速くなる。

#### 【 0 0 4 3 】

##### [ 変形例 ]

上記の実施形態では、供給パターン 6 0 b において、バイアス R F 信号を供給するフェーズ P h 3 b の電力レベルを高く、フェーズ P h 4 b の電力レベルをフェーズ P h 3 b より低くしたが、フェーズ P h 3 b とフェーズ P h 4 b の電力レベルの関係を変更してもよい。つまり、L F の R F 電力 ( L F パワー ) の配分を変化させてもよい。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 4 4 】

図 1 2 は、変形例における R F 信号の 1 サイクルの一例を示す図である。図 1 2 に示す供給パターン 6 0 c では、フェーズ P h 1 b で H F が電力レベル B 1 (第 1 の電力レベル) で供給され、フェーズ P h 2 b で H F 及び L F の供給が停止される。また、フェーズ P h 3 b で L F が電力レベル B 2 - 1 (第 2 の電力レベル) で供給され、フェーズ P h 4 b で L F が電力レベル B 2 - 2 (第 3 の電力レベル) で供給されるが、電力レベル B 2 - 2 が電力レベル B 2 - 1 よりも高くなっている。つまり、供給パターン 6 0 c は、図 4 ( b ) に示す供給パターン 6 0 b に対して、電力レベル B 2 - 1 , B 2 - 2 の大小が入れ替わっている供給パターンである。すなわち、電力レベル B 2 - 1 (第 2 の電力レベル) は、電力レベル B 2 - 2 (第 3 の電力レベル) よりも小さい。

10

## 【 0 0 4 5 】

## [ 変形例の実験結果 ]

次に、図 1 3 を用いて変形例の実験結果について説明する。図 1 3 ( a ) は、L F の R F 電力配分を変化させた場合における実験結果の一例を示す図である。図 1 3 ( b ) は、エッチング深さ  $d_1$ 、マスク残量  $r_1$ 、ボトム の角度、T C D (Top Critical Dimension) および B C D (Bottom Critical Dimension) の測定箇所を示す。なお、図 1 3 ( b ) において、マスク (S i N) の周囲には、シリコン窒化膜の酸化層である S i O N 層 6 5 が形成されている。図 1 3 における処理条件は、L F パワーの配分を除いて上述の実施形態の図 6 と同様である。図 1 3 は、条件 A から条件 F まで、フェーズ P h 3 b とフェーズ P h 4 b の電力レベル B 2 - 1 , B 2 - 2 の配分を変化させた場合の実験結果である。条件 A は、図 6 と同じ条件、つまり、フェーズ P h 3 b の電力レベル B 2 - 1 を 3 0 0 W、フェーズ P h 4 b の電力レベル B 2 - 2 を 5 0 W とした場合である。図 1 3 では、L F パワー配分欄に、電力レベル B 2 - 1 , B 2 - 2 の順に、3 0 0 W / 5 0 W といった形式で表している。

20

## 【 0 0 4 6 】

また、条件 B から条件 F についても、それぞれ電力レベル B 2 - 1 , B 2 - 2 の順に同様の形式で表している。条件 B は 2 5 0 W / 1 0 0 W、条件 C は 2 0 0 W / 1 5 0 W、条件 D は 1 7 5 W / 1 7 5 W、条件 E は 1 0 0 W / 2 5 0 W、条件 F は 5 0 W / 3 0 0 W である。L F 実効パワーは、条件 A から条件 F まで、8 7 . 5 W と同一としている。

## 【 0 0 4 7 】

エッチング時間は、条件 A が 4 1 6 . 7 秒、条件 B が 4 8 7 . 6 秒、条件 C が 5 1 5 . 8 秒、条件 D が 4 5 2 . 0 秒、条件 E が 5 5 8 . 8 秒、条件 F が 5 5 6 . 1 秒であった。マスク残量  $r_1$  は、条件 A が 2 4 . 9 n m、条件 B が 2 2 . 2 n m、条件 C が 2 1 . 7 n m、条件 D が 2 0 . 5 n m、条件 E が 1 9 . 7 n m、条件 F が 2 2 . 4 n m であった。エッチング深さ  $d_1$  は、条件 A が 4 0 . 9 n m、条件 B が 4 1 . 3 n m、条件 C が 4 3 . 0 n m、条件 D が 4 0 . 6 n m、条件 E が 3 6 . 3 n m、条件 F が 3 2 . 3 n m であった。

30

## 【 0 0 4 8 】

フィン (F i n) の T C D と B C D の差 (T C D - B C D) である C D は、条件 A が 3 . 5 n m、条件 B が 2 . 6 n m、条件 C が 2 . 5 n m、条件 D が 2 . 5 n m、条件 E が 1 . 5 n m、条件 F が 1 . 4 n m であった。断面のうち、ボトム の角度は、条件 A が 8 7 . 5 5 °、条件 B が 8 8 . 2 0 °、条件 C が 8 8 . 4 0 °、条件 D が 8 8 . 2 4 °、条件 E が 8 8 . 8 0 °、条件 F が 8 8 . 7 5 ° であった。図 1 3 の実験結果より、溝 (トレンチ) のボトム形状を矩形形状とする形状コントロール性は、条件 F が最も垂直化しており優れているが、エッチング時間は長くなる。一方、マスク残量  $r_1$  は、条件 A が最も多くなる。このように、処理条件は、形状コントロール性や、溝のアスペクト比等、求められる特性に応じて条件 A ~ F から適宜適用することができる。

40

## 【 0 0 4 9 】

図 1 4 は、L F の R F 電力配分を変化させた場合におけるトレンドデータを示すグラフの一例である。図 1 4 に示すグラフ 7 3 は、図 1 3 ( a ) に示す実験結果のうち、エッチング深さ  $d_1$  と、ボトム の角度とをグラフ化したものである。グラフ 7 3 に示すように

50

、L F パワー配分に応じて、ボトム角度は条件 A から条件 F にかけて垂直になるようなトレンドがあることがわかる。一方、エッチング深さ  $d_1$  は、条件 E , F が条件 A ~ D よりも若干浅くなっているが、ボトム角度ほどのトレンドはないことがわかる。このことから、形状コントロール性は、条件 E , F のように、フェーズ Ph 4 b の電力レベルをフェーズ Ph 3 b の電力レベルよりも大きくする供給パターンの方がよくなることわかる。

#### 【0050】

図 15 は、変形例における形状コントロールモデルの一例を示す図である。図 15 には、変形例におけるフェーズ Ph 3 b , Ph 4 b における形状コントロールモデルを示す。フェーズ Ph 3 b では、マスク 54 の開口部からシリコン酸化膜 53 の溝の底部に、第 2 のプラズマによって生成された Ar イオンがバイアス電位により引き込まれることで、状態 74 a に示すようにエッチングが進む。このとき、フェーズ Ph 3 b では、バイアス R F 信号の電力レベルが低いため、第 2 のプラズマによって生成される Ar イオンのイオンエネルギーが低く、入射角度が大きくなることにより、シリコン酸化膜 53 の溝の底部の形状（ボトム形状）を広げることになる。続くフェーズ Ph 4 b では、バイアス R F 信号の電力レベルが増加するため、第 2 のプラズマによって生成される Ar イオンのイオンエネルギーも高くなり、フェーズ Ph 3 b よりもエッチング速度が速くなる。この場合、状態 74 b に示すように、シリコン酸化膜 53 の溝の底部の形状（ボトム形状）を矩形形状とする形状コントロール性が、図 7 ( b ) に示す供給パターン 60 b の場合よりも向上することになる。

#### 【0051】

以上、本実施形態によれば、プラズマ処理装置は、チャンバ（プラズマ処理チャンバ 10）と、チャンバ内に配置され、下部電極を含む基板支持部 11 と、基板支持部 11 の上方に配置される上部電極と、上部電極に電氣的に接続され、第 1 の R F 信号を生成するように構成される第 1 の R F 電源（第 1 の R F 生成部 31 a）であり、第 1 の R F 信号は、繰り返し期間内の第 1 の状態の間に第 1 の電力レベルを有し、繰り返し期間内の第 2 の状態、第 3 の状態及び第 4 の状態の間にゼロ電力レベルを有する、第 1 の R F 電源と、下部電極に電氣的に接続され、第 2 の R F 信号を生成するように構成される第 2 の R F 電源（第 2 の R F 生成部 31 b）であり、第 2 の R F 信号は、第 1 の状態及び第 2 の状態の間にゼロ電力レベルを有し、第 3 の状態の間に第 2 の電力レベルを有し、第 4 の状態の間に第 3 の電力レベルを有する、第 2 の R F 電源と、上部電極に電氣的に接続され、D C 信号を生成するように構成される D C 電源（第 2 の D C 生成部 32 b）と、を備える。その結果、選択比、抜け性及び形状コントロール性の向上と、処理時間の短縮とを両立可能なエッチングを行うことができる。

#### 【0052】

また、本実施形態によれば、D C 信号は、第 1 の状態、第 2 の状態、第 3 の状態及び第 4 の状態の間に負極性を有する一定の電圧レベルを有する。その結果、反応性生物（デポ）である C F デポのカーボン組成比をより高くすることができる。

#### 【0053】

また、本実施形態によれば、D C 信号は、第 1 の状態及び第 2 の状態の間に負極性を有する第 1 の電圧レベルを有し、第 3 の状態及び第 4 の状態の間に第 2 の電圧レベルを有し、第 2 の電圧レベルの絶対値は、第 1 の電圧レベルの絶対値よりも小さい。その結果、反応性生物（デポ）である C F デポのカーボン組成比をより高くできるとともに、マスク選択比の向上、及び、C D の制御性に寄与することができる。

#### 【0054】

また、本実施形態によれば、第 2 の電圧レベルは、ゼロ電圧レベルを有する。その結果、反応性生物（デポ）である C F デポのカーボン組成比をより高くできるとともに、マスク選択比の向上、及び、C D の制御性に寄与することができる。

#### 【0055】

また、本実施形態によれば、第 1 の電圧レベルは、1 kHz ~ 100 kHz の範囲内に

10

20

30

40

50

あるパルス周波数を有する負DCパルスのシーケンスを有する。その結果、反応性生物（デポ）であるCFデポのカーボン組成比をより高くすることができるとともに、マスク選択比の向上、及び、CDの制御性に寄与することができる。

【0056】

また、本実施形態によれば、第2の電力レベルは、第3の電力レベルよりも大きい。その結果、溝（トレンチ）のボトム形状をテーパ形状とすることができる。

【0057】

また、本実施形態によれば、第2の電力レベルは、第3の電力レベルよりも小さい。その結果、溝（トレンチ）のボトム形状を矩形形状（パーティカル形状）とすることができる。

【0058】

また、本実施形態によれば、繰り返し期間は、100ミリ秒以下である。その結果、マスクへのダメージを低減でき、選択比を向上させることができる。

【0059】

また、本実施形態によれば、繰り返し期間は、10Hz～100kHzの範囲内にある繰り返し周波数を有する。その結果、マスクへのダメージを低減でき、選択比を向上させることができる。

【0060】

また、本実施形態によれば、第2の状態の期間は、繰り返し期間の50%以下である。その結果、選択比と抜け性を向上させることができる。

【0061】

また、本実施形態によれば、第1の状態の期間は、第2の状態の期間と同じである。その結果、ラジカル/イオン比を中程度の範囲に制御でき、デポの生成量と選択比を制御することができる。

【0062】

また、本実施形態によれば、第1の状態の期間は、第2の状態の期間よりも長い。その結果、ラジカル/イオン比を小さな範囲に制御でき、デポの生成量と選択比を制御することができる。

【0063】

また、本実施形態によれば、第1の状態の期間は、第2の状態の期間よりも短い。その結果、ラジカル/イオン比を大きな範囲に制御でき、デポの生成量と選択比を制御することができる。

【0064】

また、本実施形態によれば、第2の電力レベルは、第3の電力レベルよりも大きく、第3の状態の期間は、第4の状態の期間と同じである。その結果、深さ方向のエッチング量を増大させ、ボトムにおける横方向のエッチング量を抑制させることができる。また、ボトム形状をテーパ形状とすることができる。

【0065】

また、本実施形態によれば、第2の電力レベルは、第3の電力レベルよりも大きく、第3の状態の期間は、第4の状態の期間よりも長い。その結果、深さ方向のエッチング量を増大させ、ボトムにおける横方向のエッチング量を抑制させることができる。また、ボトム形状をテーパ形状とすることができる。

【0066】

また、本実施形態によれば、第2の電力レベルは、第3の電力レベルよりも大きく、第3の状態の期間は、第4の状態の期間よりも短い。その結果、深さ方向のエッチング量を抑制させ、ボトムにおける横方向のエッチング量を増大させることができる。また、ボトム形状を矩形形状（パーティカル形状）とすることができる。

【0067】

また、本実施形態によれば、第2の電力レベルは、第3の電力レベルよりも小さく、第3の状態の期間は、第4の状態の期間と同じである。その結果、深さ方向のエッチング量を抑制させ、ボトムにおける横方向のエッチング量を増大させることができる。また、ボ

10

20

30

40

50

トム形状を矩形形状（バーチカル形状）とすることができる。

【0068】

また、本実施形態によれば、第2の電力レベルは、第3の電力レベルよりも小さく、第3の状態の期間は、第4の状態の期間よりも長い。その結果、深さ方向のエッチング量を抑制させ、ボトムにおける横方向のエッチング量を増大させることができる。また、ボトム形状を矩形形状（バーチカル形状）とすることができる。

【0069】

また、本実施形態によれば、第2の電力レベルは、第3の電力レベルよりも小さく、第3の状態の期間は、第4の状態の期間よりも短い。その結果、深さ方向のエッチング量をより増大させ、ボトムにおける横方向のエッチング量を抑制させることができる。また、ボトム形状をテーパ形状とすることができる。

10

【0070】

また、本実施形態によれば、第1の状態の期間及び第2の状態の期間は、0.5マイクロ秒～90ミリ秒の範囲内にある。その結果、ラジカル/イオン比を制御でき、デポの生成量と選択比を制御することができる。

【0071】

また、本実施形態によれば、第3の状態の期間及び第4の状態の期間は、0.5マイクロ秒～90ミリ秒の範囲内にある。その結果、溝（トレンチ）のボトム形状を制御することができる。

【0072】

また、本実施形態によれば、第1の状態の期間及び第2の状態の期間は、繰り返し期間の5%～90%の範囲内にある。その結果、ラジカル/イオン比を制御でき、デポの生成量と選択比を制御することができる。

20

【0073】

また、本実施形態によれば、第3の状態の期間及び第4の状態の期間は、繰り返し期間の5%～90%の範囲内にある。その結果、溝（トレンチ）のボトム形状を制御することができる。

【0074】

また、本実施形態によれば、RFシステム（RF電源31）は、第1のRF信号を生成するように構成される第1のRF生成器（第1のRF生成部31a）であり、第1のRF信号は、繰り返し期間内の第1の状態の間に第1の電力レベルを有し、繰り返し期間内の第2の状態、第3の状態及び第4の状態の間にゼロ電力レベルを有する、第1のRF生成器と、第2のRF信号を生成するように構成される第2のRF生成器（第2のRF生成部31b）であり、第2のRF信号は、第1の状態及び第2の状態の間にゼロ電力レベルを有し、第3の状態の間に第2の電力レベルを有し、第4の状態の間に第3の電力レベルを有する、第2のRF生成器と、を備える。その結果、選択比、抜け性及び形状コントロール性の向上と、処理時間の短縮とを両立可能なエッチングを行うことができる。

30

【0075】

今回開示された実施形態は、すべての点で例示であって、制限的なものではないと考えられるべきである。上記の実施形態は、添付の請求の範囲及びその主旨を逸脱することなく、様々な形体で省略、置換、変更されてもよい。

40

【0076】

また、上記した実施形態では、プラズマ源として容量結合型プラズマを用いて基板Wに対してエッチング等の処理を行う容量結合プラズマ処理装置1を例に説明したが、開示の技術はこれに限られない。プラズマを用いて基板Wに対して処理を行う装置であれば、プラズマ源は容量結合プラズマに限られず、例えば、誘導結合プラズマ、マイクロ波プラズマ、マグネトロンプラズマ等、任意のプラズマ源を用いることができる。

【0077】

また、上述してきた実施形態及び変形例は、構成内容を矛盾させない範囲で適宜組み合わせることが可能である。

50

## 【符号の説明】

## 【0078】

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	
20	ガス供給部	
31	RF電源	
31a	第1のRF生成部	10
31b	第2のRF生成部	
40	排気システム	
52	シリコン基板	
53	シリコン酸化膜	
54	マスク	
W	基板	

20

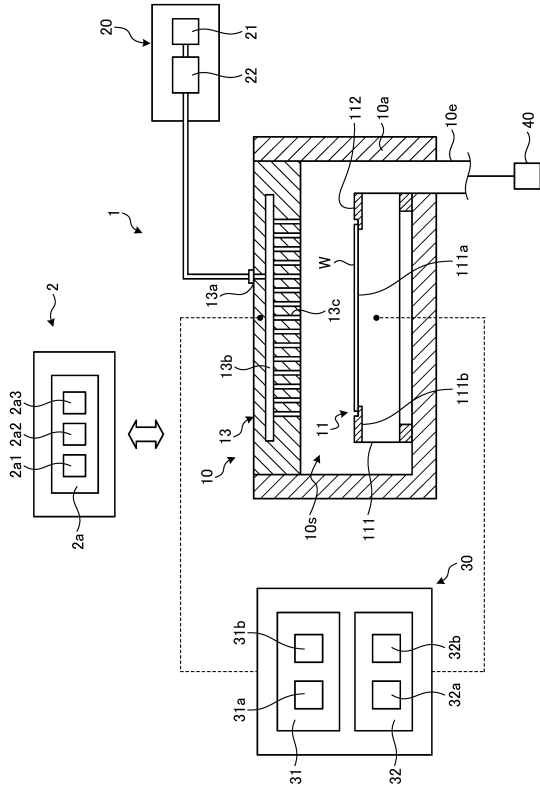
30

40

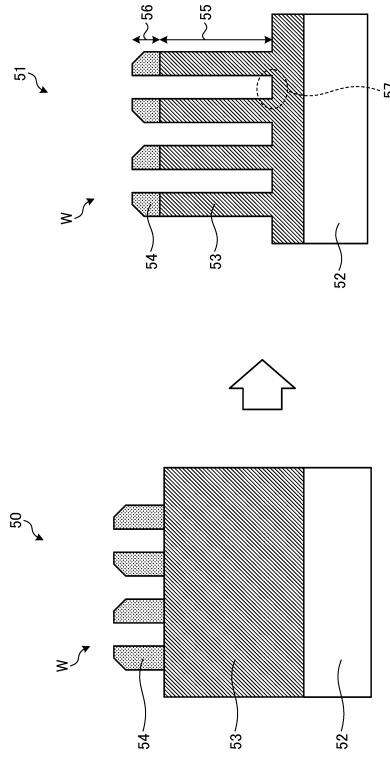
50

【図面】

【図 1】



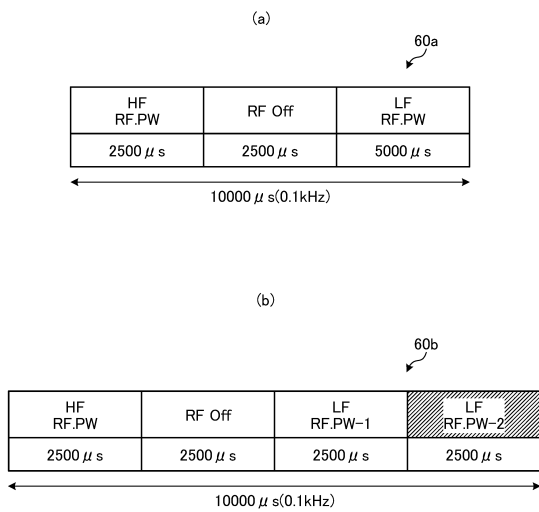
【図 2】



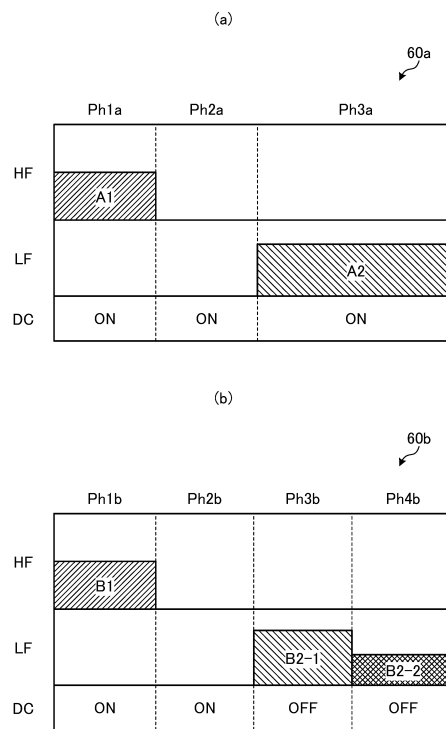
10

20

【図 3】



【図 4】

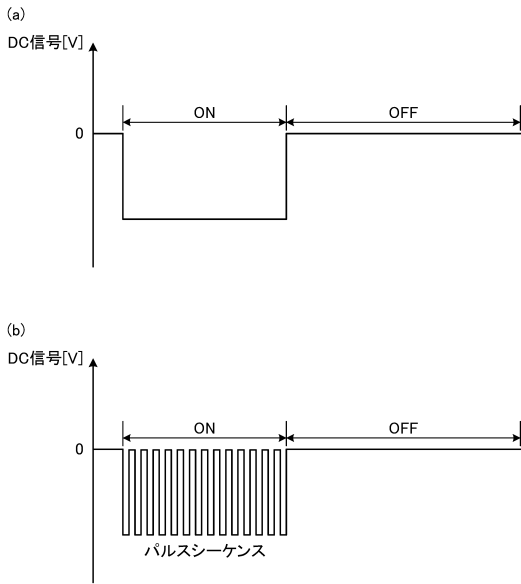


30

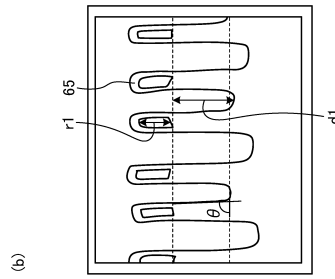
40

50

【図5】



【図6】



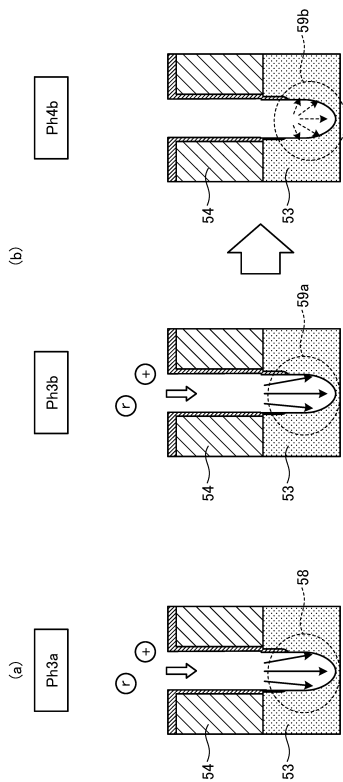
(a)

	参考例	実施例
HF[W]	200	200
LF[W]	175	300
LF-2[W]	0	50
DC[V]	-500	-500
LF実効パワー[W]	87.5	87.5
エッチング深さd1[ $\mu$ m]	37.8	40.9
マスク残量r1[ $\mu$ m]	21.5	24.9
エッチング時間[s]	444.8	416.7
ボトム角度 $\theta$ [ $^{\circ}$ ]	86.2	87.5

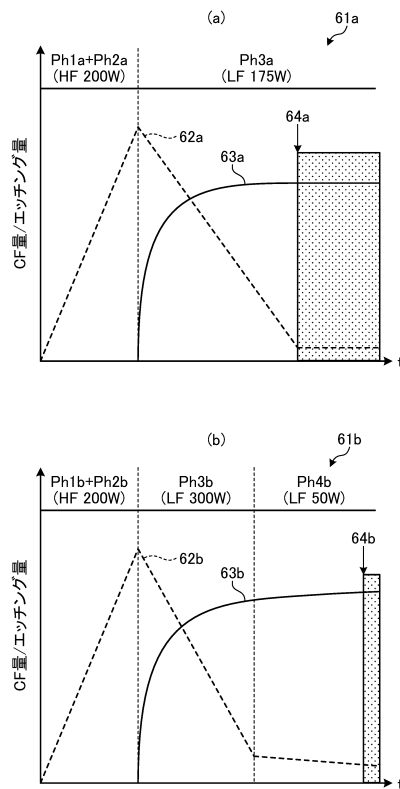
10

20

【図7】



【図8】

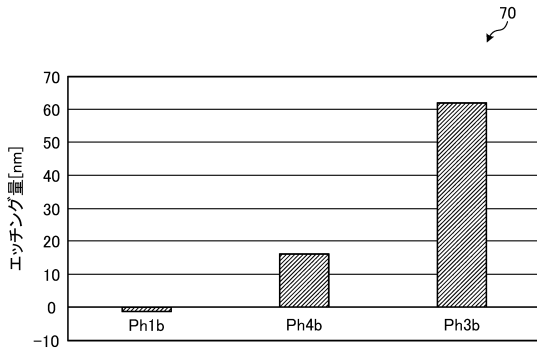


30

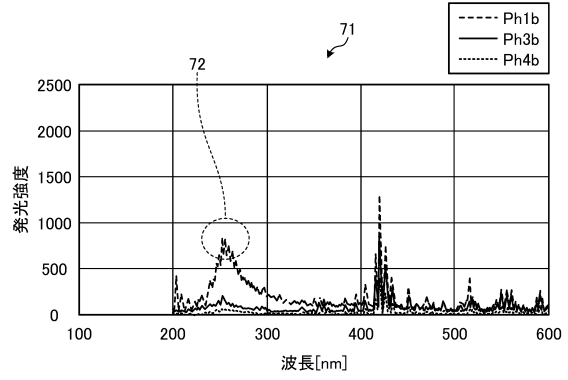
40

50

【図 9】



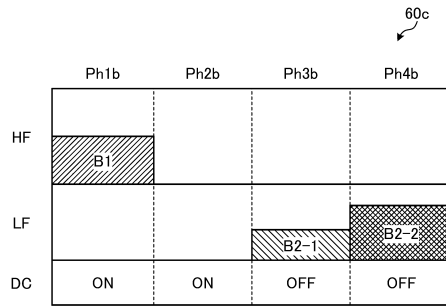
【図 10】



【図 11】

	LF パワー [W]		LF 実効パワー [W]	デューティ [%]	SiO <sub>2</sub> イッチング量 [nm/2min]		SiO <sub>2</sub> 総イッチング量 [nm/duty%]	
	175	300			63.2	15.8	18.1	19.6
参考例	175	300	87.5	50	63.2	15.8	18.1	19.6
実施例	50	50	87.5	25	15.2	3.8	19.6	3.8

【図 12】



10

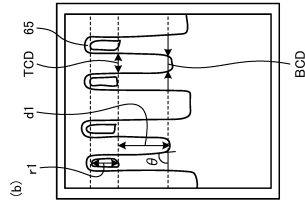
20

30

40

50

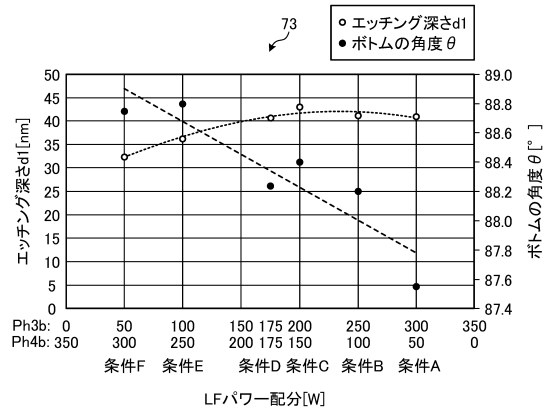
【 図 1 3 】



	条件A	条件B	条件C	条件D	条件E	条件F
LFパワー配分	300W/50W	250W/100W	200W/150W	175W/175W	100W/250W	50W/300W
LF実効パワー	87.5W	87.5W	87.5W	87.5W	87.5W	87.5W
エッチング時間	416.7s	487.6s	515.8s	452.0s	558.8s	556.1s
マスク残量r1	24.9nm	22.2nm	21.7nm	20.5nm	19.7nm	22.4nm
エッチング深さd1	40.9nm	41.3nm	43.0nm	40.6nm	38.3nm	32.3nm
Fin Δ OD (=TCD-BCD)	3.5nm	2.6nm	2.5nm	2.5nm	1.5nm	1.4nm
ボトム角度θ	87.55°	88.20°	88.40°	88.24°	88.80°	88.75°

(a)

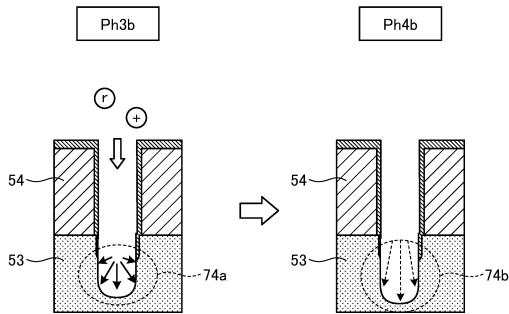
【 図 1 4 】



10

20

【 図 1 5 】



30

40

50

---

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開 2 0 1 7 - 2 1 2 3 6 1 ( J P , A )  
国際公開第 2 0 2 0 / 0 2 6 8 0 2 ( W O , A 1 )  
国際公開第 2 0 1 8 / 1 7 3 2 2 7 ( W O , A 1 )  
特表 2 0 1 2 - 5 2 9 7 7 7 ( J P , A )  
中国特許出願公開第 1 1 1 9 1 6 3 2 7 ( C N , A )  
米国特許第 9 8 7 2 3 7 3 ( U S , B 1 )
- (58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)  
H 0 1 L 2 1 / 3 0 6 5  
H 0 5 H 1 / 4 6