

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6913569号  
(P6913569)

(45) 発行日 令和3年8月4日(2021.8.4)

(24) 登録日 令和3年7月14日(2021.7.14)

(51) Int.Cl.

F 1

HO1L 21/3065	(2006.01)	HO1L 21/302	105A
HO1L 21/31	(2006.01)	HO1L 21/31	C
HO1L 21/316	(2006.01)	HO1L 21/316	X
HO1L 21/318	(2006.01)	HO1L 21/318	B
HO1L 21/768	(2006.01)	HO1L 21/318	C

請求項の数 12 (全 28 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号

特願2017-162600 (P2017-162600)

(22) 出願日

平成29年8月25日 (2017.8.25)

(65) 公開番号

特開2019-41020 (P2019-41020A)

(43) 公開日

平成31年3月14日 (2019.3.14)

審査請求日

令和2年3月23日 (2020.3.23)

(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

(74) 代理人 100088155

弁理士 長谷川 芳樹

(74) 代理人 100113435

弁理士 黒木 義樹

(74) 代理人 100122507

弁理士 柏岡 潤二

(72) 発明者 田端 雅弘

東京都港区赤坂五丁目3番1号 赤坂B i

(72) 発明者 z タワー 東京エレクトロン株式会社内

久松 亨

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

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】被処理体を処理する方法

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

被処理体を処理する方法であって、

複数のホールが表面に設けられた被処理体を提供する工程と、

プラズマCVDにより前記ホールの内面に膜を形成する工程と、

前記膜を等方的にエッチングする工程と、

を含み、

エッチングする前記工程は、窒素を含む第1のガスからプラズマを生成し、前記ホールの内面に混合層を形成する工程と、次いで、フッ素を含む第2のガスからプラズマを生成し、前記混合層を除去する工程と、を繰り返して、前記膜を等方的にエッチングする、

方法。

## 【請求項 2】

膜を形成する前記工程とエッチングする前記工程とは、繰り返し実行される、  
請求項1に記載の方法。

## 【請求項 3】

前記第2のガスは、NF<sub>3</sub>ガスおよびO<sub>2</sub>ガスを含む、  
請求項1に記載の方法。

**【請求項 4】**

前記第2のガスは、N F<sub>3</sub>ガス、O<sub>2</sub>ガス、H<sub>2</sub>ガスおよびArガスを含む、  
請求項1に記載の方法。

**【請求項 5】**

前記第2のガスは、C H<sub>3</sub>Fガス、O<sub>2</sub>ガスおよびArガスを含む、  
請求項1に記載の方法。

**【請求項 6】**

膜を形成する前記工程は、

前記ホールの内面に第1の膜を形成する段階と、

前記第1の膜上に第2の膜を形成する段階と、  
を備え、

10

エッチングする前記工程における前記第1の膜のエッチング耐性は、前記第2の膜のエッチング耐性よりも低い、

請求項1から5の何れか一項に記載の方法。

**【請求項 7】**

第1の膜を形成する前記段階は、

前記被処理体にアミノシラン系ガスを吸着させることと、

酸素を含むガスからプラズマを生成することと、を繰り返すこと、  
を含み、

20

第2の膜を形成する前記段階は、プラズマCVDにより該第2の膜を形成する、  
請求項6に記載の方法。

**【請求項 8】**

被処理体を処理する方法であって、

被処理体を提供する工程であって、該被処理体には複数のホールが表面に設けられており、該複数のホールは第1のホール幅を有する第1のホール及び該第1のホール幅よりも大きい第2のホール幅を有する第2のホールを含む、該工程と、

前記被処理体にシーケンスを実行する工程と、  
を備え、

前記シーケンスは、

30

前記複数のホールのそれぞれの内面に膜を形成する工程であって、前記第1のホールに形成される該膜の厚さが前記第2のホールに形成される該膜の厚さよりも小さくなるように該膜を形成する、該工程と、

前記膜を等方的にエッチングする工程であって、該エッチング後における前記第1のホール幅と前記第2のホール幅との差は、膜を形成する前記工程の開始時における該第1のホール幅と該第2のホール幅との差よりも小さく、該エッチング後における該第1のホール幅及び該第2のホール幅のそれぞれは、膜を形成する該工程の開始時における該第1のホール幅及び該第2のホール幅のそれよりも狭い、該工程と、

を含む、

方法。

**【請求項 9】**

被処理体を処理する方法であって、

40

被処理体を提供する工程であって、該被処理体には複数のホールが表面に設けられており、該複数のホールは第1のホール幅を有する第1のホール及び該第1のホール幅よりも大きい第2のホール幅を有する第2のホールを含む、該工程と、

前記被処理体にシーケンスを実行する工程と、  
を備え、

前記シーケンスは、

前記複数のホールのそれぞれの内面に膜を形成する工程であって、前記第1のホールに形成される該膜の厚さが前記第2のホールに形成される該膜の厚さよりも小さくなるように該膜を形成する、該工程と、

50

前記膜を等方的にエッチングする工程であって、該エッチング後における前記第1のホール幅と前記第2のホール幅との差は、膜を形成する前記工程の開始時における該第1のホール幅と該第2のホール幅との差よりも小さい、該工程と、  
を含む、

方法（ただし、前記エッチング後において相互に隣接するホール間の距離が前記被処理体内で均一になる場合を除く）。

【請求項10】

膜を形成する前記工程は、プラズマCVDによる成膜処理を含む、  
請求項8または9に記載の方法。

【請求項11】

10

前記膜は、シリコンを含有する、  
請求項8から10の何れか一項に記載の方法。

【請求項12】

前記シーケンスは、繰り返し実行される、  
請求項8から11の何れか一項に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の実施形態は、被処理体を処理する方法に関するものである。

【背景技術】

20

【0002】

電子デバイスの製造プロセスでは、被処理層上にマスクを形成し当該マスクのパターンを当該被処理層に転写するためにエッチングが行われる。当該エッチングとしてはプラズマエッチングが用いられ得る。プラズマエッチングに用いられるマスクは、フォトリソグラフィ技術によって形成される。従って、被処理層に形成されるパターンの限界寸法は、フォトリソグラフィ技術によって形成されるマスクの解像度に依存する。マスクのパターンの解像度には解像限界がある。電子デバイスの高集積化に対する要求が高まっており、解像限界よりも小さい寸法のパターンを形成することが要求されている。このため、特許文献1等のように、パターンの寸法形状を調整し、当該パターンの開口の幅を縮小する技術が提案されている。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】米国特許出願公開第2016/0379824号明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

パターン形成は、例えばSiO<sub>2</sub>層等の被処理層に対して高詳細なホールを形成することによって成し得る。マスクのパターンの解像限界よりも小さな寸法を有するパターンを形成する場合、パターンのホールの高詳細な最小線幅(CD: Critical Dimension)の制御が要求される。パターンが詳細であるほど、最小線幅のバラツキの影響が大きい。特にEUVリソグラフィ(EUV: Extreme Ultra Violet)の場合には、イニシャルのLCDU(Local CD Uniformity)が低下し得る。従って、例えばSiO<sub>2</sub>等の被処理層を有する被処理体上のパターン形成において、高集積化に伴う微細化のために、最小線幅のバラツキを高精度に抑制する方法の実現が望まれている。

40

【課題を解決するための手段】

【0005】

一様においては、被処理体を処理する方法が提供される。被処理体には複数のホールが被処理体の表面に設けられている。この方法は、ホールの内面に対して膜を成膜する第1工程と、膜を等方的にエッチングする第2工程と、を含む第1シーケンスを備え、第1工

50

程は、プラズマCVD法を用いた成膜処理を含み、膜は、シリコンを含有する。

#### 【0006】

上記方法では、第1工程はプラズマCVD (plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition) 法を用いた成膜処理を含むので、ホール幅が比較的に狭いホールに対しては比較的に薄い膜厚の膜が形成され、ホール幅が比較的に広いホールに対しては比較的に厚い膜厚の膜が形成される。従って、複数のホールにおいてホール幅にバラツキが生じていても、当該バラツキは第1工程の成膜処理によって低減され得る。更に、第2工程では第1工程によって形成された膜を等方的にエッティングするので、第1工程により形成された膜によってホール幅のバラツキが低減された状態を維持しつつホール幅の調節が可能となる。

#### 【0007】

一実施形態では、第1シーケンスは、繰り返し実行される。

このように、第1シーケンスが繰り返し実行されるので、比較的に薄い膜厚の膜を第1工程において形成し第1シーケンスを繰り返し実行することによって最終的に所望とする膜厚の膜を形成することができる。これにより、ホール幅の比較的に狭いホールにおいて、第1工程によって形成される膜によってホールの開口が閉塞される事態が十分に回避され得る。

#### 【0008】

一実施形態において、第2工程は、被処理体が収容されたプラズマ処理装置の処理容器内に第1のガスのプラズマを生成し第1のガスのプラズマに含まれるイオンを含む混合層をホールの内面の原子層に等方的に形成する第3工程と、第3工程の実行後に、処理容器内の空間をバージする第4工程と、第4工程の実行後に、処理容器内において第2のガスのプラズマを生成し第2のガスのプラズマに含まれるラジカルによって混合層を除去する第5工程と、第5工程の実行後に、処理容器内の空間をバージする第6工程と、を含む第2シーケンスを繰り返し実行し、膜を原子層ごとに除去することによって膜を等方的にエッティングし、第1のガスは、窒素を含み、第2のガスは、フッ素を含み、第5工程において生成される第2のガスのプラズマは、シリコンの窒化物を含む混合層を除去するラジカルを含む。このように、ALD (Atomic Layer Etching) 法と同様の方法によって、第1工程によって形成された膜の表面が等方的に改質されて膜の表面に混合層が等方的に形成された後に当該混合層が全て除去されるので、第2工程において実行されるエッティングによって第1工程において形成された膜が等方的に均一に除去され得る。

#### 【0009】

一実施形態において、第2のガスは、NF<sub>3</sub>ガスおよびO<sub>2</sub>ガスを含む混合ガス、NF<sub>3</sub>ガス、O<sub>2</sub>ガス、H<sub>2</sub>ガスおよびArガスを含む混合ガス、CH<sub>3</sub>Fガス、O<sub>2</sub>ガスおよびArガスを含む混合ガスであり得る。このように、フッ素を含有する第2のガスが実現され得る。

#### 【0010】

一実施形態において、膜は、第1の膜および第2の膜を備え、第1工程は、ホールの内面に第1の膜を成膜する第7工程と、第1の膜上に第2の膜を成膜する第8工程と、を備え、第2工程において実行されるエッティングに対するエッティング耐性は、第1の膜の方が第2の膜よりも低い。

比較的にホール幅が狭く第1工程で比較的に膜厚の薄い膜が形成されたホール（第1ホールという）において第2の膜が第2工程で除去されても、この時点において、比較的にホール幅が広く第1工程で比較的に膜厚の厚い膜が形成されたホール（第2ホールという）では第2の膜の一部が残存し得る。このような状態から、第2工程におけるエッティングが更に継続して行われる場合、第1の膜のエッティング耐性が第2の膜のエッティング耐性よりも低いので、第1ホールの方が第2ホールよりも速くエッティングが進行する。従って、比較的にエッティング耐性の低い第1の膜と比較的にエッティング耐性の高い第2の膜とを用いることによって、第1ホールと第2ホールとの間のホール幅のバラツキがより効果的に低減され得る。

#### 【0011】

10

20

30

40

50

一実施形態において、第7工程は、被処理体が収容されたプラズマ処理装置の処理容器内に第3のガスを供給する第9工程と、第9工程の実行後に、処理容器内の空間をバージする第10工程と、第10工程の実行後に、処理容器内で第4のガスのプラズマを生成する第11工程と、第11工程の実行後に、処理容器内の空間をバージする第12工程と、を含む第3シーケンスを繰り返し実行することによって第1の膜を成膜し、第8工程は、プラズマCVDを用いて第2の膜を成膜し、第3のガスは、アミノシラン系ガスを含み、第4のガスは、酸素原子を含有するガスを含み、第9工程は、第3のガスのプラズマを生成しない。このように、ALD(Atomic Layer Deposition)法と同様の方法によって第1の膜が形成されるので、膜厚の比較的に薄い第1の膜が第7工程においてコンフォーマルに形成され得る。このため、第2の膜がプラズマCVD法によって形成されても、第1の膜と第2の膜とを備える膜の膜厚の全体が効果的に制御され得る。

#### 【0012】

一実施形態において、第3のガスは、モノアミノシランを含む。このように、モノアミノシランを含む第3のガスを用いてシリコンの反応前駆体の形成が行える。

#### 【0013】

一実施形態において、第3のガスのアミノシラン系ガスは、1～3個のケイ素原子を有するアミノシランを含み得る。第3のガスのアミノシラン系ガスは、1～3個のアミノ基を有するアミノシランを含み得る。このように第3のガスのアミノシラン系ガスには、1～3個のケイ素原子を含むアミノシランを用いることができる。また、第3のガスのアミノシラン系ガスには、1～3個のアミノ基を含むアミノシランを用いることができる。

#### 【発明の効果】

#### 【0014】

以上説明したように、被処理体上のパターン形成において高精度の最小線幅のバラツキを抑制する方法が提供される。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0015】

【図1】図1は、一実施形態に係る方法の一の部分を示す流図である。

【図2】図2は、図1に示す方法の適用対象である被処理体を例示する断面図である。

【図3】図3は、図1に示す方法の実行に用いることが可能なプラズマ処理装置の一例を示す図である。

【図4】図4は、図1に示す工程において膜が形成された後の被処理体の状態を示す断面図である。

【図5】図5は、図1に示すシーケンスを繰り返し実行する場合におけるホール幅の変化の様子を模式的に示す図である。

【図6】図6は、図1に示す工程におけるエッティングの等方性と圧力との関係を示す図である。

【図7】図7は、図1に示す方法に含まれるエッティング工程の他の一例を示す流図である。

【図8】図8は、図7に示す方法における表面改質後の被処理体の状態を示す断面図である。

【図9】図9は、図7に示すシーケンスにおける表面改質の自己制御性を示す図である。

【図10】図10は、(a)部、(b)部、(c)部を備え、図7に示す工程におけるエッティングの原理を示す図である。

【図11】図11は、図7に示すシーケンスの実行中における膜に対するエッティング量と膜に形成される混合層の厚みとの変化を示す図である。

【図12】図12は、図1に示す成膜工程において二層の膜が形成された後の被処理体の状態を示す断面図である。

【図13】図13は、図1に示す成膜工程において二層の膜を形成する場合の一例を示す流図である。

【図14】図14は、成膜時における酸素の添加量と膜のエッティング耐性との相関を示す

10

20

30

40

50

図である。

【図15】図15は、図1に示す成膜工程が二層の膜を形成する場合であって図1に示すシーケンスを繰り返し実行する場合に生じ得るホール幅の変化の様子を模式的に示す図である。

【図16】図16は、図13に示す成膜工程の他の一例を示す流図である。

【図17】図17は、(a)部、(b)部、(c)部を備え、図16に示す工程における膜の形成の原理を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0016】

以下、図面を参照して種々の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相当の部分に対しては同一の符号を附すこととする。図1は、一実施形態に係る方法（以下、方法MTという）の一の部分を示す流図である。図1に示す方法MTは、被処理体（以下、ウエハWという）を処理する方法の一実施形態である。図2は、図1に示す方法MTの適用対象であるウエハWを例示する断面図である。

10

【0017】

図2に示すウエハWは、被処理層ELと、被処理層EL上（被処理層ELの表面EL1）に設けられたマスクMKと、マスクMKに設けられたホール（ホール(hole)）とは、例えばホールHL1、ホールHL2等であり、本実施形態においては、孔、穴、窪み、凹部等その他類似の形状を含み得る。以下同様。）とを備える。ウエハWには複数のホールがウエハWの表面に設けられている。本実施形態では、ホールはマスクMKに設けられているが、ホールがマスクMKに設けられている構成に限られない。

20

【0018】

被処理層ELは、例えばSi反射防止膜、すなわちSiARC(Anti Reflection Coating)膜である。マスクMKの材料は、一実施形態においてレジストを含む。マスクMKには、開口を提供するパターンのホール（ウエハWの表面に設けられたホールと同じ意味）がフォトリソグラフィによって形成されている。マスクMKのホールは、概ねウエハWの表面の全体に亘って形成されている。図2に示すウエハWのホールHL1、ホールHL2は、互いにホール幅が異なる。ホールHL1はホール幅WW1aを有し、ホールHL2はホール幅WW1bを有する。図2に示すホールHL1、ホールHL2において、ホール幅WW1aの値は、ホール幅WW1bの値よりも小さい。

30

【0019】

方法MT（被処理体を処理する方法）は、プラズマ処理装置10によって実行される。図3は、図1に示す方法の実行に用いることが可能なプラズマ処理装置の一例を示す図である。図3には、ウエハWを処理する方法MTの種々の実施形態で利用可能なプラズマ処理装置10の断面構造が概略的に示されている。図3に示すプラズマ処理装置10は、ICP(Inductively Coupled Plasma)型のプラズマ源を備える。プラズマ処理装置10は、金属製（一実施形態において例えばアルミニウム製）の筒状（一実施形態において例えば円筒状）に形成された処理容器192を備える。処理容器192は、プラズマ処理が行われる処理空間Spを画成する。処理容器192の形状は円筒状に限られるものではなく、一実施形態において例えば箱状等の角筒状であってもよい。プラズマ処理装置10のプラズマ源は、ICP型に限るものではなく、例えば、ECR(Electron Cyclotron Resonance)型、CCP(Capacitively Coupled Plasma)型や、マイクロ波を用いたもの等であることができる。

40

【0020】

処理容器192の底部には、ウエハWを載置するための載置台PDが設けられている。載置台PDは、静電チャックESC、下部電極LEを備える。下部電極LEは、第1プレート18a、第2プレート18bを備える。処理容器192は、処理空間Spを画成する。

【0021】

支持部14は、処理容器192の内側において、処理容器192の底部上に設けられる。支持部14は、一実施形態において例えば略円筒状の形状を備える。支持部14は、一実

50

施形態において例えば絶縁材料から構成される。支持部 14 を構成する絶縁材料は、石英のように酸素を含み得る。支持部 14 は、処理容器 192 内において、処理容器 192 の底部から鉛直方向（処理容器 192 の天井の側（具体的には例えば板状誘電体 194 の側）から静電チャック E S C 上に載置されたウエハ W の表面に向かう方向）に延在する。

#### 【 0 0 2 2 】

載置台 P D は、処理容器 192 内に設けられる。載置台 P D は、支持部 14 によって支持される。載置台 P D は、載置台 P D の上面において、ウエハ W を保持する。ウエハ W は、被処理体である。載置台 P D は、下部電極 L E および静電チャック E S C を備える。

#### 【 0 0 2 3 】

下部電極 L E は、第 1 プレート 18a および第 2 プレート 18b を含む。第 1 プレート 18a および第 2 プレート 18b は、一実施形態において例えばアルミニウム等の金属から構成される。第 1 プレート 18a および第 2 プレート 18b は、一実施形態において例えば略円盤状の形状を備える。第 2 プレート 18b は、第 1 プレート 18a 上に設けられる。第 2 プレート 18b は、第 1 プレート 18a に電気的に接続される。

10

#### 【 0 0 2 4 】

静電チャック E S C は、第 2 プレート 18b 上に設けられる。静電チャック E S C は、一対の絶縁層の間、または、一対の絶縁シートの間ににおいて、導電膜の電極が配置された構造を備える。直流電源 22 は、スイッチ 23 を介して、静電チャック E S C の電極に電気的に接続される。静電チャック E S C は、直流電源 22 からの直流電圧によって生じる静電力によって、ウエハ W を吸着する。これによって、静電チャック E S C は、ウエハ W を保持することができる。

20

#### 【 0 0 2 5 】

フォーカスリング F R は、ウエハ W のエッジおよび静電チャック E S C を囲むように、第 2 プレート 18b の周縁部上に配置される。フォーカスリング F R は、エッティングの均一性を向上させるために設けられる。フォーカスリング F R は、エッティング対象の膜の材料によって適宜選択される材料から構成されており、一実施形態において例えば、石英から構成され得る。

#### 【 0 0 2 6 】

冷媒流路 24 は、第 2 プレート 18b の内部に設けられる。冷媒流路 24 は、温調機構を構成する。冷媒流路 24 には、処理容器 192 の外部に設けられるチラーユニットから配管 26a を介して冷媒が供給される。冷媒流路 24 に供給される冷媒は、配管 26b を介してチラーユニットに戻される。このように、冷媒流路 24 には、冷媒が循環するようになり、供給される。この冷媒の温度を制御することによって、静電チャック E S C によって支持されるウエハ W の温度が制御される。ガス供給ライン 28 は、伝熱ガス供給機構からの伝熱ガス、一実施形態において例えば H e ガスを、静電チャック E S C の上面とウエハ W の裏面との間に供給する。

30

#### 【 0 0 2 7 】

プラズマ処理装置 10 には、ウエハ W の温度を調節する温度調節部 H T が設けられている。温度調節部 H T は、静電チャック E S C に内蔵されている。温度調節部 H T には、ヒータ電源 H P が接続されている。ヒータ電源 H P から温度調節部 H T に電力が供給されることにより、静電チャック E S C の温度が調節され、静電チャック E S C 上に載置されるウエハ W の温度が調節されるようになっている。なお、温度調節部 H T は、第 2 プレート 18b 内に埋め込まれていることもできる。

40

#### 【 0 0 2 8 】

温度調節部 H T は、熱を発する複数の加熱素子と、当該複数の加熱素子のそれぞれの周囲の温度をそれぞれ検出する複数の温度センサとを備える。

#### 【 0 0 2 9 】

板状誘電体 194 は、載置台 P D の上方において、載置台 P D と対向配置される。下部電極 L E と板状誘電体 194 とは、互いに略平行に設けられる。板状誘電体 194 と下部電極 L Eとの間には、処理空間 S p が提供される。処理空間 S p は、プラズマ処理をウエハ

50

Wに行うための空間領域である。

**【0030】**

プラズマ処理装置10では、処理容器192の内壁に沿ってデポシールド46が着脱自在に設けられている。デポシールド46は、支持部14の外周にも設けられている。デポシールド46は、処理容器192にエッティング副生物(デボ)が付着することを防止するものであり、アルミニウム材に $\text{Y}_2\text{O}_3$ 等のセラミックスを被覆することにより構成され得る。デポシールドは、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ の他に、一実施形態において例えば、石英のように酸素を含む材料から構成され得る。

**【0031】**

排気プレート48は、処理容器192の底部側であって、且つ、支持部14と処理容器192の側壁との間に設けられている。排気プレート48は、例えば、アルミニウム材に $\text{Y}_2\text{O}_3$ 等のセラミックスを被覆することによって構成され得る。排気口12eは、排気プレート48の下方において、処理容器192に設けられている。排気装置50は、排気管52を介して排気口12eに接続される。排気装置50は、ターボ分子ポンプ等の真空ポンプを備えており、処理容器192内の空間を所望の真空度まで減圧することができる。高周波電源64は、ウエハWにイオンを引き込むための高周波電力、すなわち高周波バイアス電力を発生する電源であり、400 [kHz] ~ 40.68 [MHz] の範囲内の周波数、一例においては13 [MHz] の高周波バイアス電力を発生する。高周波電源64は、整合器68を介して下部電極LEに接続される。整合器68は、高周波電源64の出力インピーダンスと負荷側(下部電極LE側)の入力インピーダンスとを整合させるための回路である。10

**【0032】**

処理容器192の天井部には、一実施形態において例えば石英ガラスやセラミック等で構成された板状誘電体194が載置台PDに対向するように設けられている。具体的には、板状誘電体194は、一実施形態において例えば円板状に形成され、処理容器192の天井部に形成された開口を塞ぐように気密に取り付けられている。処理空間Spは、プラズマ源によってプラズマが生成される空間である。処理空間Spは、ウエハWが載置される空間である。

**【0033】**

処理容器192には、複数のガス種の処理ガス(一実施形態において例えば、後述の処理ガスG1~処理ガスG8)を供給するガス供給部120が設けられている。ガス供給部120は、上述した処理空間Spへ、各種の処理ガスを供給する。処理容器192の側壁部にはガス導入口121が形成されており、ガス導入口121にはガス供給配管123を介してガス供給源122が接続されている。ガス供給配管123の途中には各種の処理ガスの流量を制御する流量制御器(例えば、マスフローコントローラ124、および、開閉バルブ126)が介在している。このようなガス供給部120によれば、ガス供給源122から出力される各種の処理ガスは、マスフローコントローラ124によって予め設定された流量に制御されて、ガス導入口121から処理容器192の処理空間Spへ供給される。30

**【0034】**

なお、図3では説明を簡単にするため、ガス供給部120を一系統のガスラインを用いて表現しているが、ガス供給部120は、複数のガス種を供給する構成を備える。図3に示すガス供給部120は、一例として、処理容器192の側壁部からガスを供給する構成を備えているが、ガス供給部120は、図3に示す構成に限られない。例えば、ガス供給部120は、処理容器192の天井部からガスを供給する構成を備えることもできる。ガス供給部120がこのような構成を備える場合には、例えば、板状誘電体194の例え中央部にガス導入口が形成され、このガス導入口からガスが供給され得る。

**【0035】**

処理容器192の底部には、処理容器192内の雰囲気を排出する排気装置50が排気管52を介して接続されている。排気装置50は、例えば真空ポンプによって構成され、処40

理容器 192 内の圧力を予め設定された圧力にし得る。

**【 0 0 3 6 】**

処理容器 192 の側壁部にはウエハ搬出入口 134 が設けられており、ウエハ搬出入口 134 にはゲートバルブ 136 が設けられている。例えばウエハ W が搬入される際には、ゲートバルブ 136 が開かれ、図示しない搬送アーム等の搬送機構によってウエハ W が処理容器 192 内の載置台 P D 上に載置された後に、ゲートバルブ 136 が閉じられて、ウエハ W の処理が開始される。

**【 0 0 3 7 】**

処理容器 192 の天井部には、板状誘電体 194 の上側面（外側面）に、平面状の高周波アンテナ 140 と、高周波アンテナ 140 を覆うシールド部材 160 とが設けられる。10  
一実施形態における高周波アンテナ 140 は、板状誘電体 194 の中央部に配置されている内側アンテナ素子 142A と、内側アンテナ素子 142A の外周を囲むように配置されている外側アンテナ素子 142B とを備える。内側アンテナ素子 142A、外側アンテナ素子 142B のそれぞれは、一実施形態において例えば、銅、アルミニウム、ステンレス等の導体であり、渦巻きコイル状の形状を備える。

**【 0 0 3 8 】**

内側アンテナ素子 142A、外側アンテナ素子 142B は、共に、複数の挟持体 144 に挟持されて一体となっている。挟持体 144 は、一実施形態において例えば、棒状の形状を備えている。挟持体 144 は、内側アンテナ素子 142A の中央付近から外側アンテナ素子 142B の外側に張り出すように放射線状に配置されている。20

**【 0 0 3 9 】**

シールド部材 160 は、内側シールド壁 162A と外側シールド壁 162B とを備える。内側シールド壁 162A は、内側アンテナ素子 142A を囲むように、内側アンテナ素子 142A と外側アンテナ素子 142B との間に設けられている。外側シールド壁 162B は、外側アンテナ素子 142B を囲むように設けられており、筒状の形状を備える。従って、板状誘電体 194 の上側面は、内側シールド壁 162A の内側の中央部（中央ゾーン）と、内側シールド壁 162A と外側シールド壁 162B との間の周縁部（周縁ゾーン）とに分けられる。

**【 0 0 4 0 】**

内側アンテナ素子 142A 上には、内側シールド壁 162A の開口を塞ぐように円板状の内側シールド板 164A が設けられている。外側アンテナ素子 142B 上には、内側シールド壁 162A と外側シールド壁 162B との間の開口を塞ぐようにドーナツ板状の外側シールド板 164B が設けられている。30

**【 0 0 4 1 】**

シールド部材 160 の形状は、円筒状に限られるものではない。シールド部材 160 の形状は、一実施形態において例えば、角筒状等の他の形状であることができ、または、処理容器 192 の形状に合わせられたものであることができる。ここでは、処理容器 192 が一実施形態において例えば略円筒状の形状を備えるので、当該円筒形状に合わせてシールド部材 160 も略円筒状の形状を備える。処理容器 192 が略角筒状の形状を備えている場合には、シールド部材 160 も略角筒状の形状を備える。40

**【 0 0 4 2 】**

内側アンテナ素子 142A、外側アンテナ素子 142B のそれぞれには、高周波電源 150A、高周波電源 150B のそれぞれが別々に接続されている。これにより、内側アンテナ素子 142A、外側アンテナ素子 142B のそれぞれには、同じ周波数または異なる周波数の高周波を印加できる。例えば、高周波電源 150A から一実施形態において例えば 27 [MHz] 等の周波数の高周波が予め設定されたパワー [W] で内側アンテナ素子 142A に供給されると、処理容器 192 内に形成された誘導磁界によって、処理容器 192 内に導入されたガスが励起され、ウエハ W 上の中央部にドーナツ型のプラズマが生成され得る。また、高周波電源 150B から一実施形態において例えば 27 [MHz] 等の周波数の高周波が予め設定されたパワー [W] で外側アンテナ素子 142B に供給されると50

、処理容器 192 内に形成された誘導磁界によって、処理容器 192 内に導入されたガスが励起され、ウエハ W 上の周縁部に別のドーナツ型のプラズマが生成され得る。高周波電源 150 A、高周波電源 150 B のそれぞれから出力される高周波は、上述した周波数に限られるものではなく、様々な周波数の高周波が、高周波電源 150 A、高周波電源 150 B のそれぞれから供給され得る。なお、高周波電源 150 A、高周波電源 150 B のそれぞれから出力される高周波に応じて、内側アンテナ素子 142 A、外側アンテナ素子 142 B の電気的長さを調節する必要がある。内側シールド板 164 A、外側シールド板 164 B のそれぞれでは、アクチュエータ 168 A、アクチュエータ 168 B によって別々に高さが調節できる。

## 【0043】

10

制御部 Cnt は、プロセッサ、記憶部、入力装置、表示装置等を備えるコンピュータであり、プラズマ処理装置 10 の後述する各部を制御する。制御部 Cnt は、マスフローコントローラ 124、開閉バルブ 126、高周波電源 150 A、高周波電源 150 B、直流電源 22、スイッチ 23、排気装置 50、高周波電源 64、整合器 68、静電チャック ESC、ヒータ電源 HP、チラーユニット等に接続されている。制御部 Cnt は、方法 MT の各工程においてプラズマ処理装置 10 の各部を制御するためのコンピュータプログラム（入力されたレシピに基づくプログラム）に従って動作し、制御信号を送出する。制御部 Cnt からの制御信号により、プラズマ処理装置 10 の各部を制御する。制御部 Cnt は、例えば、制御部 Cnt からの制御信号により、ガス供給源 122 から供給されるガスの選択および流量、排気装置 50 の排気、高周波電源 150 A および高周波電源 150 B からの電力供給、高周波電源 64 からの電力供給、ヒータ電源 HP からの電力供給、チラーユニットからの冷媒流量および冷媒温度、等を制御することが可能である。なお、本明細書において開示される方法 MT の各工程は、制御部 Cnt による制御によってプラズマ処理装置 10 の各部を動作させることによって実行され得る。制御部 Cnt の記憶部には、方法 MT を実行するためのコンピュータプログラム、および、方法 MT の実行に用いられる各種のデータが、読み出し自在に格納されている。

20

## 【0044】

図 1 に戻り、プラズマ処理装置 10 を備える処理システム 1 において実施される形態を例にとって、方法 MT について詳細に説明する。方法 MT は、ホール幅のバラツキを調節する処理方法（被処理体を処理する方法）である。なお、方法 MT は、プラズマ処理装置 10 とは異なる他のプラズマ処理装置において実行されることも可能である。方法 MT は、図 1 に示すように、シーケンス SQ1、工程 ST3 を備える。シーケンス SQ1 は、工程 ST1（第 1 工程）、工程 ST2（第 2 工程）を備える。まず、工程 ST1 の実行前に、ウエハ W がプラズマ処理装置 10 の処理容器 192 内に搬入され、更に、プラズマ処理装置 10 の処理容器 192 内に搬入されたウエハ W は、静電チャック ESC 上に位置合わせされて載置される。

30

## 【0045】

工程 ST1 は、ウエハ W の表面のホールの内面に対して膜を成膜する。工程 ST1 は、プラズマ CVD (plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition) 法を用いた成膜処理を含む。一実施形態において例えば、工程 ST1 では、静電チャック ESC 上にウエハ W が載置された後、ウエハ W が収容されているプラズマ処理装置 10 の処理容器 192 内において処理ガス G1 のプラズマを生成し、プラズマ CVD 法によってウエハ W の表面（マスク MK の表面 MK1、ホール（ホール HL1、ホール HL2 を含む。以下同様。）の内面（側面および底面））に対して膜 LA を形成する成膜処理を含む。工程 ST1 によって形成される膜 LA は、シリコン酸化物を含有し、一実施形態において例えば SiO<sub>2</sub> を含み得る。

40

## 【0046】

工程 ST1 において、ウエハ W が静電チャック ESC 上に載置されている状態で、処理容器 192 内に処理ガス G1 を供給し、処理ガス G1 のプラズマを生成する。処理ガス G1 は、堆積性が優位なガス種を含有し、一実施形態において例えばシリコンを含有する。処

50

理ガス G 1 は、一実施形態において例えば、SiCl<sub>4</sub>, He の混合ガス（ガス流量は一実施形態において例えば 25 [sccm] (SiCl<sub>4</sub>) , 100 [sccm] (He)）、SiCl<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, Ar の混合ガス（ガス流量は一実施形態において例えば 20 [sccm] (SiCl<sub>4</sub>) , 100 [sccm] (CH<sub>4</sub>) , 100 [sccm] (H<sub>2</sub>) , 800 [sccm] (Ar)）、等であり得る。ガス供給源 122 の複数のガスソースのうち選択したガスソースから処理ガス G 1 を処理容器 192 内に供給する。高周波電源 150 A および高周波電源 150 B から高周波電力（一実施形態において例えば 60 [MHz] , 300 ~ 1000 [W]）を供給し、排気装置 50 を動作させることによって処理容器 192 内の処理空間 S<sub>p</sub> の圧力を予め設定された値（一実施形態において例えば 50 [mTorr]）に設定する。工程 ST 1 の実行時間は、一実施形態において例えば 60 [s] である。処理ガス G 1 は、堆積性が優位なガス種を含有するので、工程 ST 1 によって形成される膜 L<sub>A</sub> の膜厚は、図 4 に示すように、ホール幅の比較的に狭いホール H<sub>L</sub> 1 の内面においては比較的に薄く、ホール幅の比較的に広いホール H<sub>L</sub> 2 の内面においては比較的に厚い。図 4 は、図 1 に示す工程において膜が形成された後のウエハ W の状態を示す断面図である。ホール H<sub>L</sub> 1 の内面に形成される膜 L<sub>A</sub> の膜厚 W<sub>F</sub> 1 a の値は、ホール H<sub>L</sub> 2 の内面に形成される膜 L<sub>A</sub> の膜厚 W<sub>F</sub> 1 b の値よりも小さい。

#### 【0047】

工程 ST 1 に引き続く工程 ST 2 において、膜 L<sub>A</sub> の膜厚を調節する。より具体的に、工程 ST 2 では、膜 L<sub>A</sub> を等方的にエッティングする。工程 ST 2 では、膜 L<sub>A</sub> が等方的にエッティングされることによって、膜 L<sub>A</sub> の膜厚が調節される。工程 ST 2 において、ウエハ W が静電チャック ESC 上に載置されている状態で、処理容器 192 内に処理ガス G 2 を供給し、処理ガス G 2 のプラズマを生成する。処理ガス G 2 は、フッ素を含み、一実施形態において例えば、C<sub>1</sub><sub>2</sub> ガス（一実施形態においてガス流量は例えば 200 [sccm]）、C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>, Ar の混合ガス（一実施形態においてガス流量は例えば 40 [sccm] (C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>) , 200 [sccm] (Ar)）、等であり得る。ガス供給源 122 の複数のガスソースのうち選択したガスソースから処理ガス G 2 を処理容器 192 内に供給する。高周波電源 150 A および高周波電源 150 B から高周波電力（一実施形態において例えば 60 [MHz] , 500 [W]）を供給し、排気装置 50 を動作させることによって処理容器 192 内の処理空間 S<sub>p</sub> の圧力を予め設定された値（一実施形態において例えば 400 [mTorr]）に設定する。工程 ST 2 の実行時間は、一実施形態において例えば 30 [s] である。

#### 【0048】

ホール幅が比較的に狭いホール H<sub>L</sub> 1 に対し工程 ST 1 において形成する膜 L<sub>A</sub> の膜厚が比較的に厚い場合には、ホール H<sub>L</sub> 1 の開口が膜 L<sub>A</sub> によって閉塞される場合があり得る。このような場合を回避するために、工程 ST 1 において形成する膜 L<sub>A</sub> の膜厚を、ホール H<sub>L</sub> 1 の開口が閉塞しない程度に十分に薄く形成し、膜 L<sub>A</sub> の膜厚が所望の値に至るまで、工程 ST 1 および工程 ST 2 のシーケンス SQ 1（第 1 シーケンス）を繰り返す。このように、工程 ST 1 において形成する膜 L<sub>A</sub> の膜厚を十分に薄くしつつシーケンス SQ 1 を繰り返すことによって、ホールの開口を閉塞せざることなく、ホールの内面に所望とする膜厚の膜 L<sub>A</sub> を形成することが可能となる。

#### 【0049】

シーケンス SQ 1 におけるホール幅の変化を図 5 を参照して説明する。図 5 は、図 1 に示すシーケンスを繰り返し実行する場合に生じるホール幅の変化の様子を模式的に示す図である。線 G<sub>1</sub> a は、ホール H<sub>L</sub> 1 のホール幅の変化を示しており、線 G<sub>2</sub> a は、ホール H<sub>L</sub> 2 のホール幅の変化を示している。工程 ST 1 において膜 L<sub>A</sub> が形成される場合、ホール幅の比較的に狭いホール H<sub>L</sub> 1 においては膜 L<sub>A</sub> の膜厚は比較的に薄く、ホール幅の比較的に広いホール H<sub>L</sub> 2 においては膜 L<sub>A</sub> の膜厚は比較的に厚いので、工程 ST 1 の終了時において、ホール H<sub>L</sub> 2 におけるホール幅とホール H<sub>L</sub> 1 におけるホール幅との差（差 H<sub>2</sub> a）は、工程 ST 1 の開始時における当該差（差 H<sub>1</sub> a）よりも小さい。工程 ST 1 に引く続く工程 ST 2 では等方的なエッティングが行われるので、ホール H<sub>L</sub> 2 のホール幅

10

20

30

40

50

とホールH L 1のホール幅との差(差H 2 a)が一定に保たれつつ、膜L Aがエッティングされる。従って、工程S T 2の終了時におけるホールH L 2のホール幅とホールH L 1のホール幅との差は、工程S T 2の開始時と同じく差H 2 aが維持される。このように、シーケンスS Q 1が実行される毎に、ホールH L 2のホール幅とホールH L 1のホール幅との差が段階的に縮小され、シーケンスS Q 1が複数回実行されることによって、当該差が、所望とする範囲内に収束され、ウエハWのホールのバラツキが十分に低減され得る。

#### 【0050】

次に、工程S T 2のエッティングが等方性を有するための条件について説明する。図6は、図1に示す工程S T 2におけるエッティングの等方性と圧力との関係を示す図である。図6の縦軸はエッティング量[ nm]を表しており、図6の横軸は処理空間S pの圧力[m Torr]を表している。図6の線G R aはホールの底面側(縦)のエッティング量の変化を表しており、図6の線G R bはホールの側面側(横)のエッティング量の変化を表しており、図6の線G R cはホールの底面側(縦)のエッティング量をホールの側面側(横)のエッティング量で割った値(縦横比)の変化を表している。図6に示すように、処理空間S pの圧力が200[m Torr]以上の比較的に高い圧力(一実施形態において例えば400[m Torr]程度)の場合に、工程S T 2において、十分に等方的なエッティングが実現され得る。

#### 【0051】

<工程S T 2の変形例>工程S T 2の等方的なエッティングは、一実施形態において例えば図7に示す方法によって実現され得る。図7に示す方法は、A L E(Atomic Layer Etching)法と同様の方法によって、ホール幅の大小、および、ホールの疎密によらずに、等方的に均一に膜L Aをエッティングする方法である。なお、工程S T 2の等方的なエッティングは、図7に示す方法に限られない。図7は、図1に示す方法に含まれる工程S T 2の他の一例を示す流図である。図7に示す工程S T 2は、シーケンスS Q 2(第2シーケンス)、工程S T 2 eを備える。シーケンスS Q 2は、工程S T 2 a(第3工程)、工程S T 2 b(第4工程)、工程S T 2 c(第5工程)、工程S T 2 d(第6工程)を備える。

#### 【0052】

工程S T 2 aは、ウエハWが収容されたプラズマ処理装置10の処理容器192内に処理ガスG 3(第1のガス)のプラズマを生成し、処理ガスG 3のプラズマに含まれるイオンを含む混合層MXをホールの内面の原子層に対して等方的に均一に形成する。工程S T 2 aでは、膜L Aの表面の原子層に対し、処理ガスG 3のプラズマに含まれるイオンを含む混合層MXを、等方的に均一に形成し得る。工程S T 2 aにおいて、ウエハWが静電チャックE S C上に載置されている状態で、処理容器192内に処理ガスG 3を供給し、処理ガスG 3のプラズマを生成する。処理ガスG 3は、窒素を含み、一実施形態において例えば、N<sub>2</sub>ガス(ガス流量は一実施形態において例えば100[sccm])を含み得る。具体的には、ガス供給源122の複数のガスソースのうち選択したガスソースから処理ガスG 3を処理容器192内に供給する。そして、高周波電源150Aおよび高周波電源150Bから高周波電力(一実施形態において例えば60[MHz], 600[W])を供給し、排気装置50を動作させることによって処理容器192内の処理空間S pの圧力を予め設定された値(一実施形態において例えば400[m Torr])に設定する。このようにして、処理ガスG 3のプラズマが処理容器192内において生成される。工程S T 2 aの実行時間は、一実施形態において例えば400~600[s]である。

#### 【0053】

工程S T 2(特に工程S T 2 a)における処理空間S pの圧力の設定値は、図6に示すように、比較的に高く、200[m Torr]以上であり、一実施形態において例えば400[m Torr]であり得る。処理空間S pの圧力が、このように比較的に高い場合、処理ガスG 3のプラズマに含まれる窒素原子のイオン(以下、窒素イオンという)が等方的に膜L Aの表面に接触し、膜L Aの表面が窒素イオンによって等方的に均一に改質され、よって、図8に示すように、均一な(略同一の)厚みの混合層MXが膜L Aの表面に一様に形成される。図8は、図7に示す方法による表面改質後のウエハWの状態を示す断面図

10

20

30

40

50

である。

**【 0 0 5 4 】**

工程 S T 2 a では、以上のようにして、処理ガス G 3 のプラズマが処理容器 1 9 2 内において生成され、処理ガス G 3 のプラズマに含まれる窒素イオンが、高周波バイアス電力による鉛直方向（処理容器 1 9 2 の天井の側（具体的には例えば板状誘電体 1 9 4 の側）から静電チャック E S C 上に載置されたウエハ W の表面に向かう方向）への引き込みによって、膜 L A の表面に接触し、膜 L A の表面が等方的に均一に改質される。このように工程 S T a において膜 L A の表面が、ウエハ W の表面に亘り均一な厚みの（略同一な厚みの）混合層 M X となる。処理ガス G 3 が窒素を含み膜 L A がシリコンの酸化物（一実施形態において例えば SiO<sub>2</sub>）を含むので、混合層 M X の組成は、一実施形態において例えば SiN / SiO<sub>2</sub> (SiON) であり得る。10

**【 0 0 5 5 】**

工程 S T 2 a における処理時間は、A L E 法の自己制御領域に至る時間以上の時間である。図 9 は、図 7 に示すシーケンス S Q 2（特に工程 S T 2 a）における表面改質の自己制御性を示す図である。図 9 の横軸は表面改質（より具体的には工程 S T 2 a で行われる処理）の処理時間 [ s ] を表し、図 9 の縦軸はエッチング量 [ nm ]（工程 S T 2 a によって表面改質された箇所の厚み）を表している。図 9 に示す結果は、処理空間 S p の圧力を 400 [ mTorr ] とし、高周波電力の値を 600 [ W ] とし、高周波バイアス電力の値を 50 [ W ] として、工程 S T 2 a を実行することによって得られた結果である。図 9 に示すように、工程 S T 2 a によって行われる表面改質は自己制御性を伴う。すなわち、A L E 法の自己制御領域に至る時間以上の時間をかけて表面改質を行えば、ホール幅の大小、および、ホールの疎密によらずに、等方的に、均一に表面改質が成され、等方的な、均一な混合層 M X が、ウエハ W の表面（マスク M K の表面 M K 1 およびウエハ W のトンレンチ（ホール H L 1、ホール H L 2 を含む）の内面）において、一様に形成され得る。20

**【 0 0 5 6 】**

図 10 は、(a) 部、(b) 部、(c) 部を備え、図 8 に示す工程におけるエッチングの原理を示す図である。図 10 において、白抜きの円（白丸）は、膜 L A を構成する原子（一実施形態において例えば SiO<sub>2</sub> を構成する原子）を示しており、黒塗りの円（黒丸）は、処理ガス G 3 のプラズマに含まれる窒素イオンを示しており、円で囲まれた「x」は、後述の処理ガス G 4 のプラズマに含まれるラジカルを示している。図 10 の (a) 部に示すように、工程 S T 2 a によって、処理ガス G 3 のプラズマに含まれる窒素イオン（黒塗りの円（黒丸））が、膜 L A の表面の原子層に等方的に供給される。このように、工程 S T 2 a によって、膜 L A を構成する原子と処理ガス G 3 の窒素原子とを含む混合層 M X が、膜 L A の表面の原子層に形成される。30

**【 0 0 5 7 】**

以上のように、処理ガス G 3 が窒素を含むので、工程 S T 2 a において、膜 L A の表面の原子層（シリコンの酸化物の原子層）に窒素原子が供給され、シリコンの窒化物を含有する混合層 M X（一実施形態において例えば SiN / SiO<sub>2</sub>）が膜 L A の表面の原子層に形成され得る。

**【 0 0 5 8 】**

工程 S T 2 a に引き続く工程 S T 2 b では、処理容器 1 9 2 内の処理空間 S p をバージする。具体的には、工程 S T 2 a において供給された処理ガス G 3 が排気される。工程 S T 2 a では、バージガスとして希ガス（一実施形態において例えば Ar ガス等）といった不活性ガスを処理容器 1 9 2 に供給してもよい。すなわち、工程 S T 2 a のバージは、不活性ガスを処理容器 1 9 2 内に流すガスバージ、または真空引きによるバージの何れであってもよい。40

**【 0 0 5 9 】**

工程 S T 2 b に引き続く工程 S T 2 c では、処理容器 1 9 2 内において処理ガス G 4（第 2 のガス）のプラズマを生成し、該プラズマに含まれるラジカルを用いたケミカルエッチングによって、混合層 M X の全てを除去する。これによって、膜 L A は、ウエハ W の表面50

に亘って（特に全てのホールの内面に設けられた膜 L A）、等方的に、均一に、エッティングされ得る。工程 S T 2 c では、工程 S T 2 a における混合層 M X の形成後のウエハ W が静電チャック E S C 上に載置されている状態において、処理容器 1 9 2 内に処理ガス G 4 を供給し、処理ガス G 4 のプラズマを生成する。工程 S T 2 c において生成される処理ガス G 4 のプラズマは、シリコンの窒化物を含む混合層 M X を除去するラジカルを含む。処理ガス G 4 は、フッ素を含み、一実施形態において例えば、N F<sub>3</sub> ガスおよびO<sub>2</sub> ガスを含む混合ガスであり得る。なお、処理ガス G 4 は、N F<sub>3</sub> ガス、O<sub>2</sub> ガス、H<sub>2</sub> ガス、および、A r ガスを含む混合ガス、C H<sub>3</sub> F ガス、O<sub>2</sub> ガス、および、A r ガスを含む混合ガス、等であることもできる。具体的には、ガス供給源 1 2 2 の複数のガスソースのうち選択したガスソースから上記の処理ガス G 4 を処理容器 1 9 2 内に供給し、高周波電源 1 5 0 A および高周波電源 1 5 0 B から高周波電力（一実施形態において例えば 6 0 [ M H z ] , 6 0 0 [ W ] ）を供給し、排気装置 5 0 を動作させることによって処理容器 1 9 2 内の処理空間 S p の圧力が予め設定された値（一実施形態において例えば 4 0 0 [ mTorr ] ）に設定する。このようにして、処理ガス G 4 のプラズマが処理容器 1 9 2 内において生成される。工程 S T 2 c の実行時間は、一実施形態において例えば 4 0 0 ~ 6 0 0 [ s ] である。  
10

#### 【 0 0 6 0 】

図 1 0 の ( b ) 部に示すように、工程 S T 2 c において生成された処理ガス G 4 のプラズマ中のラジカル（図 1 0 の ( b ) 部において、円で囲まれた「×」）は、膜 L A の表面の混合層 M X に接触し、膜 L A の表面に形成された混合層 M X に処理ガス G 4 の原子のラジカルが供給されて混合層 M X がケミカルエッティングによって膜 L A から除去され得る。図 1 0 の ( c ) 部に示すように、工程 S T 2 c において、膜 L A の表面に形成された混合層 M X の全ては、処理ガス G 4 のプラズマに含まれるラジカルによって、膜 L A の表面から除去され得る。混合層 M X の除去によって、ホール幅は、ウエハ W の表面に亘って、ホール幅の大小、ホールの疎密によらずに、等方的に、均一に大きくなる。  
20

#### 【 0 0 6 1 】

工程 S T 2 c に引き続く工程 S T 2 d では、処理容器 1 9 2 内の処理空間 S p をバージする。具体的には、工程 S T 2 c において供給された処理ガス G 4 が排気される。工程 S T 2 c では、バージガスとして希ガス（一実施形態において例えば A r ガス等）といった不活性ガスを処理容器 1 9 2 に供給してもよい。すなわち、工程 S T 2 a のバージは、不活性ガスを処理容器 1 9 2 内に流すガスバージ、または真空引きによるバージの何れであってもよい。  
30

#### 【 0 0 6 2 】

シーケンス S Q 2 に引き続く工程 S T 2 e では、シーケンス S Q 2 の実行を終了するか否かを判定する。具体的には、工程 S T 2 e では、シーケンス S Q 2 の実行回数が予め設定された回数に達したか否かを判定する。シーケンス S Q 2 の実行回数の決定は、膜 L A に対するエッティング量を決定することである。シーケンス S Q 2 は、膜 L A に対するエッティング量が予め設定された値に至るまで膜 L A がエッティングされるように、繰り返し実行され得る。シーケンス S Q 2 の実行回数の増加に伴って、膜 L A に対するエッティング量も増加（ほぼ線形的に増加）する。従って、1 回（単位サイクル）のシーケンス S Q 2 の実行によってエッティングされる膜 L A の厚み（1 回の工程 S T 2 e で形成される混合層 M X の厚み）とシーケンス S Q 2 の実行回数との積が予め設定された値となるように、シーケンス S Q 2 の実行回数が決定され得る。  
40

#### 【 0 0 6 3 】

図 1 1 を参照して、シーケンス S Q 2 の実行中において生じる膜 L A に対するエッティング量の変化と膜 L A に形成される混合層 M X の厚みの変化について説明する。図 1 1 の線 G L 1 は、シーケンス S Q 2 の実行中において生じる膜 L A に対するエッティング量（任意単位）の変化を示しており、図 1 1 の線 G L 2 は、シーケンス S Q 2 の実行中において生じる混合層 M X の厚み（任意単位）の変化を示している。図 1 1 の横軸は、シーケンス S Q 2 の実行中の時間を表しているが、工程 S T 2 b の実行時間および工程 S T 2 d の実行  
50

時間は図示簡略化のために省略されている。図11に示すように、1回(単位サイクル)のシーケンスSQ2の実行において、工程ST2aの実行は、線GL2に示すように、混合層MXの厚みが予め設定された値TWになるまで行われる。工程ST2aにおいて形成される混合層MXの厚みの値TWは、高周波電源64によって印加されるバイアス電力の値と、処理ガスG3のプラズマに含まれている窒素イオンの膜LAに対する単位時間当たりのドーズ(dose)量と、工程ST5cの実行時間とによって決定され得る。

#### 【0064】

図11に示すように、1回(単位サイクル)のシーケンスSQ2の実行において、工程ST2cの実行は、線GL1および線GL2に示すように、工程ST2aで形成された混合層MXが全て除去されるまで行われる。工程ST2cの実行中においてタイミングTIに至るまでに、混合層MXがケミカルエッティングによって全て除去される。タイミングTIは、工程ST2cにおいて行われるケミカルエッティングのエッティングレートによって決定され得る。タイミングTIは、工程ST2cの実行中に生じる。タイミングTIから工程ST2cの終了までの間において、混合層MXの除去後におけるシリコンの酸化物の膜LAは、処理ガスG4のプラズマによってはエッティングされない。すなわち、処理ガスG4のプラズマに含まれるラジカルを用いた場合、膜LAを構成するシリコンの酸化物(例えばSiO<sub>2</sub>)に対するエッティングのエッティングレートは、混合層MXに含まれるシリコンの窒化物(例えばSiN)に対するエッティングのエッティングレートに比較して極めて小さい。

#### 【0065】

工程STeにおいてシーケンスSQ2の実行回数が予め設定された回数に達していないと判定される場合には(工程ST2e: NO)、シーケンスSQ2の実行が再び繰り返される。一方、工程ST2eにおいてシーケンスSQ2の実行回数が予め設定された回数に達していると判定される場合には(工程ST2e: YES)、工程ST2が終了し、図1に示す工程ST3に移行する。

#### 【0066】

以上のように、シーケンスSQ2および工程ST2eの一連の等方的なエッティング処理は、ALD法と同様の方法によって、膜LAの表面を原子層ごとに除去することができる。従って、シーケンスSQ2および工程ST2eの一連の等方的なエッティング処理は、シーケンスSQ2を繰り返し実行して膜LAの表面を原子層ごとに除去することによって、ホール幅の大小、および、ホールの疎密によらずに、膜LAを等方的に精密にエッティングする。すなわち、シーケンスSQ2が予め設定された回数だけ繰り返されることによって、膜LAは、ホール幅の大小、および、ホールの疎密によらずに、ウエハWの表面に亘って、等方的な、均一な厚みで(略同一の厚みで)、等方的に精密にエッティングされる。

#### 【0067】

<工程ST1の変形例> 次に、工程ST1の他の実施例(変形例)について説明する。図4に示す膜LAは、一層であるが、これに限らず、二層であることも可能である。図12は、図1に示す成膜工程において二層の膜が形成された後のウエハWの状態を示す断面図である。図12に示す膜LAは、二層の膜を備え、膜LA1(第1の膜)、膜LA2(第2の膜)を備える。膜LA1は、ウエハWの表面(マスクMKの表面MK1(ホールの内面を含む))に設けられ、膜LA2は、膜LA1の表面に設けられている。ホールHL1における膜LA1は膜厚WF2aを有し、ホールHL1における膜LA2は膜厚WF3aを有する。ホールHL2における膜LA1は膜厚WF2bを有し、ホールHL2における膜LA2は膜厚WF3bを有する。ホールHL1のホール幅WW1aはホールHL2のホール幅WW1bに比較して狭いので、膜厚WF2aは膜厚WF2bに比較して薄く、膜厚WF3aは膜厚WF3bに比較して薄い。膜LA1と膜LA2とは、シリコン酸化物を含有し、一実施形態において例えばSiO<sub>2</sub>を含み得る。膜LA2の酸素の含有量は、膜LA1の酸素の含有量よりも多い。工程ST2において実行されるエッティングに対するエッティング耐性は、膜LA1の方が膜LA2よりも低い。換言すれば、工程ST2において実行されるエッティングに対する膜LA1のエッティングレートの値[nm/min]は、工程

10

20

30

40

50

S T 2において実行されるエッティングに対する膜 L A 2のエッティングレートの値 [ nm / min ]よりも大きい。

#### 【 0 0 6 8 】

本変形例に係る工程 S T 1について、図 1 3を参照して説明する。図 1 3に示す工程 S T 1は、工程 S T 1 a(第7工程)、工程 S T 1 b(第8工程)を備える。工程 S T 1 aは、ホールの内面に膜 L A 1を成膜する。工程 S T 1 bは、膜 L A 1上に膜 L A 2を成膜する。一実施形態において例えば、工程 S T 1 aでは、工程 S T 2において実行されるエッティングに対するエッティング耐性の比較的に低い膜 L A 1がプラズマ C V D法によって形成され、工程 S T 1 bでは、工程 S T 2において実行されるエッティングに対するエッティング耐性の比較的に高い膜 L A 2がプラズマ C V D法によって形成される。すなわち、工程 S T 1 aは、一実施形態において例えば、プラズマ C V D法を用いて膜 L A 1を成膜し、工程 S T 1 bは、プラズマ C V D法を用いて膜 L A 2を成膜する。  
10

#### 【 0 0 6 9 】

シリコン酸化物の膜のエッティング耐性は、成膜時に添加するO<sub>2</sub>ガスの流量によって変化し得る。図 1 4は、成膜時における酸素の添加量と膜のエッティング耐性との相関を示す図である。図 1 4に示す横軸は、膜の形成時に添加され得るO<sub>2</sub>ガスの流量 [ sccs ] を表しており、図 1 4に示す縦軸は、膜のエッティング耐性を示すエッティングレート [ nm / min ] を表している。図 1 4に示す線 G E 1に示す結果は、成膜条件として、10 [ m Torr ] の圧力と、高周波電源 150 A および高周波電源 150 B による 60 [ MHz ] · 1000 [ W ] の高周波電力と、SiCl<sub>4</sub> ( 25 [ sccs ] ) , He ( 100 [ sccs ] ) , O<sub>2</sub> ( 0 ~ 100 [ sccs ] ) の混合ガスと、60 [ s ] の処理時間と、を用い、エッティング条件として、20 [ m Torr ] の圧力と、高周波電源 150 A および高周波電源 150 B による 60 [ MHz ] · 500 [ W ] の高周波電力と、高周波電源 64 による 40 [ MHz ] · 50 [ W ] の高周波電力と、C<sub>12</sub>ガス ( 200 [ sccs ] ) と、60 [ s ] の処理時間と、を用いて得られた。図 1 4に示す線 G E 2に示す結果は、成膜条件として線 G E 1に示す結果を得た場合と同様の成膜条件を用い、エッティング条件として、20 [ m Torr ] の圧力と、高周波電源 150 A および高周波電源 150 B による 60 [ MHz ] · 500 [ W ] の高周波電力と、高周波電源 64 による 40 [ MHz ] · 100 [ W ] の高周波電力と、C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> ( 40 [ sccs ] ) , Ar ( 200 [ sccs ] ) の混合ガスと、60 [ s ] の処理時間と、を用いて得られた。図 1 4に示すように、酸素の添加量 (O<sub>2</sub>ガスの流量)を調節することによって、シリコン酸化物の膜のエッティング耐性をえることが可能となる。酸素の添加量が少ない程、エッティングレートは増加する。例えば、図 1 4に示す場合、酸素の添加量を調節することによって、エッティングの選択比は、1 ~ 17の範囲内において制御され得る。  
20  
30

#### 【 0 0 7 0 】

図 1 3に戻って説明する。工程 S T 1 aにおいて、ウエハ W が静電チャック E S C 上に載置されている状態で、処理容器 192 内に処理ガス G 5を供給し、処理ガス G 5のプラズマを生成する。処理ガス G 5は、堆積性が優位なガス種を含有し、一実施形態において例えばシリコンを含有する。処理ガス G 5は、一実施形態において例えば、SiCl<sub>4</sub> , He , O<sub>2</sub>の混合ガス (ガス流量は一実施形態において例えば 25 [ sccm ] ( SiCl<sub>4</sub> ) , 100 [ sccm ] ( He ) , 0 ~ 5 [ sccm ] ( O<sub>2</sub> ) ) 等であり得る。処理ガス G 5が含むO<sub>2</sub>ガスは、0 ~ 数 [ sccm ] (一実施形態において例えば 0 ~ 5 [ sccm ] ) 程度であって、比較的に少ない。ガス供給源 122 の複数のガスソースのうち選択したガスソースから処理ガス G 5を処理容器 192 内に供給する。高周波電源 150 A および高周波電源 150 B から高周波電力 (一実施形態において例えば 60 [ MHz ] , 1000 [ W ] ) を供給し、排気装置 50 を動作させることによって処理容器 192 内の処理空間 S p の圧力を予め設定された値 (一実施形態において例えば 10 [ m Torr ] ) に設定する。工程 S T 1 aの実行時間は、一実施形態において例えば 60 [ s ] である。処理ガス G 5は、堆積性が優位なガス種を含有するので、工程 S T 1 aによって形成される膜 L A 1の膜厚は、図 1 2に示すように、ホール幅の比較的に狭いホール H L 1 の  
40  
50

内面においては比較的に薄く、ホール幅の比較的に広いホールH L 2 の内面においては比較的に厚い。すなわち、ホールH L 1 の内面に形成される膜L A 1 の膜厚W F 2 a の値は、ホールH L 2 の内面に形成される膜L A 1 の膜厚W F 2 b の値よりも小さい。

#### 【0071】

工程S T 1 a に引き続く工程S T 1 b において、ウェハW が静電チャックE S C 上に載置されている状態で、処理容器1 9 2 内に処理ガスG 6 を供給し、処理ガスG 6 のプラズマを生成する。処理ガスG 6 は、堆積性が優位なガス種を含有し、一実施形態において例えばシリコンを含有する。処理ガスG 6 は、一実施形態において例えば、SiC<sub>1</sub><sub>4</sub>, He, O<sub>2</sub> の混合ガス（ガス流量は一実施形態において例えば25 [ sccm ] (SiC<sub>1</sub><sub>4</sub>) , 100 [ sccm ] (He) , 100 [ sccm ] (O<sub>2</sub>) ）等であり得る。<sup>10</sup> 処理ガスG 6 が含むO<sub>2</sub> ガスは、一実施形態において例えば100 [ sccm ] 程度であって、比較的に多い。ガス供給源1 2 2 の複数のガスソースのうち選択したガスソースから処理ガスG 6 を処理容器1 9 2 内に供給する。高周波電源1 5 0 A および高周波電源1 5 0 B から高周波電力（一実施形態において例えば60 [ MHz ] , 1000 [ W ] ）を供給し、排気装置5 0 を動作させることによって処理容器1 9 2 内の処理空間S p の圧力を予め設定された値（一実施形態において例えば10 [ mTorr ] ）に設定する。工程S T 1 b の実行時間は、一実施形態において例えば60 [ s ] である。処理ガスG 6 は、堆積性が優位なガス種を含有するので、工程S T 1 b によって形成される膜L A 2 の膜厚は、図1 2 に示すように、ホール幅の比較的に狭いホールH L 1 の内面においては比較的に薄く、ホール幅の比較的に広いホールH L 2 の内面においては比較的に厚い。<sup>20</sup> すなわち、ホールH L 1 の内面に形成される膜L A 2 の膜厚W F 3 a の値は、ホールH L 2 の内面に形成される膜L A 2 の膜厚W F 3 b の値よりも小さい。

#### 【0072】

方法M T が図1 3 に示す工程S T 1 （二層の膜（膜L A 1 、膜L A 2 ）を形成する工程）を含む場合に生じ得るホール幅の変化を図1 5 を参照して説明する。図1 5 は、図1 に示す成膜工程が二層の膜を形成する場合であって図1 に示すシーケンスを繰り返し実行する場合に生じ得るホール幅の変化の様子を模式的に示す図である。線G 1 b は、ホールH L 1 のホール幅の変化を示しており、線G 2 b は、ホールH L 2 のホール幅の変化を示している。<sup>30</sup>

#### 【0073】

工程S T 1 は、区間V 1 1 によって表される工程と、区間V 1 2 によって表される工程とを含む。区間V 1 1 は膜L A 1 を形成する工程S T 1 a を表し、区間V 1 2 は膜L A 2 を形成する工程S T 1 b を表している。区間V 1 1 ではエッティング耐性の比較的に低い膜L A 1 が形成され、区間V 1 1 に引き続く区間V 1 2 ではエッティング耐性の比較的に高い膜L A 2 が形成される。工程S T 1 において膜L A が形成される場合、ホール幅の比較的に狭いホールH L 1 においては膜L A の膜厚は比較的に薄く、ホール幅の比較的に広いホールH L 2 においては膜L A の膜厚は比較的に厚いので、工程S T 1 の終了時において、ホールH L 2 におけるホール幅とホールH L 1 におけるホール幅との差（差H 2 b ）は、工程S T 1 の開始時における当該差（差H 1 b ）よりも小さい。

#### 【0074】

工程S T 1 に引く続く工程S T 2 では等方的なエッティングが行われる。工程S T 2 は、区間V 2 1 によって表される工程と、区間V 2 2 によって表される工程と、区間V 2 3 によって表される工程とを含む。区間V 2 1 は、工程S T 2 の開始から、ホールH L 1 における膜L A 2 の全てがエッティングによって除去されるまでの工程を表している。区間V 2 1 では、ホールH L 1 およびホールH L 2 の何れにおいても、エッティング耐性の比較的に高い膜L A 2 がエッティングされる。ホールH L 1 における膜L A 2 の膜厚W F 3 a は、ホールH L 2 における膜L A 2 の膜厚W F 3 b よりも薄いので、ホールH L 1 における膜L A 2 の方がホールH L 2 における膜L A 2 よりも先にエッティングによって除去される。区間V 2 1 の終了時点においては、ホールH L 1 における膜L A 2 の全てがエッティングによって除去されているが、ホールH L 2 における膜L A 2 の一部は残留している。<sup>40</sup> 区間V 2 1

では、ホールH L 1 およびホールH L 2 の何れにおいても膜L A 2 に対して等方的なエッチングが行われるので、ホールH L 2 のホール幅とホールH L 1 のホール幅との差（差H 2 b）が一定に保たれつつ、膜L A 2 がエッチングされる。従って、区間V 2 1 の終了時におけるホールH L 2 のホール幅とホールH L 1 のホール幅との差は、区間V 2 1 の開始時と同じく差H 2 b が維持される。

#### 【0075】

区間B 2 1 に引き続く区間V 2 2 は、ホールH L 1 における膜L A 2 の全てがエッチングによって除去されてから（区間V 2 1 の終了時点から）、ホールH L 2 における膜L A 2 の全てがエッチングによって除去されるまで（ウエハWの表面から膜L A 2 の全てが除去されるまで）の工程を表している。区間V 2 2 では、ホールH L 2 においては引き続きエッチング耐性の比較的に高い膜L A 2 がエッチングされ、ホールH L 1 においてはエッチング耐性の比較的に低い膜L A 1 がエッチングされるので、ホールH L 1 におけるエッチングがホールH L 2 におけるエッチングよりも速く進むこととなる。区間V 2 2 の終了時点において、ホールH L 2 における膜L A 2 の全てはエッチングによって除去されている。従って、区間V 2 2 では、エッチングの進行と共にホールH L 2 のホール幅とホールH L 1 のホール幅との差はより小さくなり、区間V 2 2 の終了時におけるホールH L 2 のホール幅とホールH L 1 のホール幅との差（差H 3 b）は、区間V 2 2 の開始時におけるホールH L 2 のホール幅とホールH L 1 のホール幅との差（差H 2 b）よりも小さい。10

#### 【0076】

区間V 2 2 に引き続く区間V 2 3 は、ホールH L 1 およびホールH L 2 において膜L A 1 がエッチングされる工程を表している。区間V 2 2 では、このようにホールH L 1 およびホールH L 2 の何れにおいても膜L A 1 が等方的にエッチングされるので、ホールH L 2 のホール幅とホールH L 1 のホール幅との差（差H 3 b）が一定に保たれつつ、膜L A 1 がエッチングされる。従って、区間V 2 3 の終了時におけるホールH L 2 のホール幅とホールH L 1 のホール幅との差は、区間V 2 3 の開始時と同じく差H 3 b が維持される。20

#### 【0077】

図13に示す工程S T 1 を用いたシーケンスS Q 1 を一回実行することによるホール幅のバラツキの改善について説明する。ホールH L 1 において、膜L A 1 の膜厚WF 2 a の値をK 1 1 とし、膜L A 2 の膜厚WF 3 a の値をK 1 2 とする。ホールH L 2 において、膜L A 1 の膜厚WF 2 b の値をK 2 1 とし、膜L A 2 の膜厚WF 3 b の値をK 2 2 とする。30  
工程S T 2 のエッチングにおいて、膜L A 1 のエッチングレートの値をR 1 とし、膜L A 2 のエッチングレートの値をR 2 とする。図15に示す区間V 2 2 の終了時点（ウエハWの表面から膜L A 2 が全て除去された時点）において、ホールH L 2 の内面に設けられた膜L A 2 の膜厚の値と、ホールH L 1 の内面に設けられた膜L A 2 の膜厚の値との差は、  
$$K 2 1 - ( K 1 1 - ( R 1 / R 2 ) \times ( K 2 2 - K 1 2 ) )$$
、となる。従って、LCDU (local CD Uniformity) の改善量は、  
$$( K 2 1 - K 1 1 ) + ( R 1 / R 2 ) \times ( K 2 2 - K 1 2 )$$
となる。R 1 > R 2 なので、R 1 / R 2 > 1 となり、よって、当該改善量は、ホールH L 2 における膜L A 1 の膜厚WF 2 b とホールH L 1 における膜L A 1 の膜厚WF 2 aとの差（K 2 1 - K 1 1）と、ホールH L 2 における膜L A 2 の膜厚WF 3 b とホールH L 1 における膜L A 2 の膜厚WF 3 aとの差（K 2 2 - K 1 2）とを単に加えた値よりも大きな値となり、ホール幅のバラツキの低減に対する効果的な改善が見込まれる。40

#### 【0078】

また、図15に示す差H 1 b の値（膜L A の形成前におけるホールH L 2 のホール幅WW 1 b の値から膜L A の形成前におけるホールH L 1 のホール幅WW 1 a の値を差し引いた値）を とすると、図15に示す差H 3 b の値は、  
$$- 2 \times ( K 2 1 - K 1 1 ) - 2 \times ( R 1 / R 2 ) \times ( K 2 2 - K 1 2 )$$
となる。従って、シーケンスS Q 1 の実行後におけるホールH L 1 とホールH L 2 との間のホール幅の差は、シーケンスS Q 1 の実行前におけるホールH L 1 とホールH L 2 との間のホール幅の差（ ）より、  
$$2 \times ( K 2 1 - K 1 1 ) + 2 \times ( R 1 / R 2 ) \times ( K 2 2 - K 1 2 )$$
の差（ 1 ）だけ、低減される。50

$R_1 = R_2$  の場合、すなわち、膜 L A が一層のみの場合の値、 $2 \times (K_{21} - K_{11}) + 2 \times (K_{22} - K_{12})$ 、よりも大きいので、本変形例（膜 L A が膜 L A 1、膜 L A 2 の二層を備える場合）に係る工程 S T 1 を用いれば、シーケンス S Q 1 の実行によるホール幅のバラツキの低減は、より効果的に実現され得る。

#### 【0079】

なお、二層を有する膜 L A を形成する工程（工程 S T 1 の変形例）として、図 12 に示すような酸素の添加量が互いに異なる二層（膜 L A 1、膜 L A 2）を有する膜 L A を形成する工程を例示したが、これに限らず、例えば、シリコン含有膜、ホウ素含有膜、金属膜、カーボン膜、等のうち二つ以上の膜を組み合わせて、膜 L A 1、膜 L A 2 を有する膜 L A と同様の効果を得るようになることができる。10

#### 【0080】

また、工程 S T 1 a では、膜 L A 1 の形成にプラズマ C V D 法を用いたが、これに限らず、A L D (Atomic Layer Deposition) 法と同様の方法によって膜 L A 1 をウエハ W の表面（特にホールの内面）にコンフォーマルに形成することも可能である。工程 S T 1 a において A L D 法と同様の方法によって膜 L A 1 を形成する方法を、図 16 および図 17 を参照して説明する。図 16 は、図 13 に示す成膜工程のうち工程 S T 1 a の他の一例を示す流図である。図 17 は、(a) 部、(b) 部、(c) 部を備え、図 16 に示す工程における膜 L A 1 の形成の原理を示す図である。

#### 【0081】

工程 S T 1 a は、シーケンス S Q 3（第 3 シーケンス）、工程 S T 1 a e を備える。シーケンス S Q 3 および工程 S T 1 a e の一連の工程は、処理容器 192 内に搬入されたウエハ W の表面（マスク M K の表面 M K 1、および、マスク M K のホールの内面）に膜（膜 L A 1）を形成する。シーケンス S Q 3 は、工程 S T 1 a a（第 9 工程）、工程 S T 1 a b（第 10 工程）、工程 S T 1 a c（第 11 工程）、工程 S T 1 a d（第 12 工程）を備える。工程 S T 1 a a では、処理容器 192 内に処理ガス G 7（第 3 のガス）を供給する。具体的には、工程 S T 1 a a では、図 17 の (a) 部に示すように、処理容器 192 内にシリコンを含有する処理ガス G 7 を導入する。20

#### 【0082】

処理ガス G 7 は、有機含有されたアミノシラン系ガスを含む。処理ガス G 7 は、アミノシラン系ガスとして、アミノ基の数が比較的に少ない分子構造のものが用いられることがで  
き、例えばモノアミノシラン ( $H_3 - Si - R$  (R は有機を含んでおり置換されていても良いアミノ基)) が用いられ得る。また、処理ガス G 7 として用いられる上記のアミノシラン系ガスは、1 ~ 3 個のケイ素原子を有し得るアミノシランを含むことができ、または、1 ~ 3 個のアミノ基を有するアミノシランを含むことができる。1 ~ 3 個のケイ素原子を有するアミノシランは、1 ~ 3 個のアミノ基を有するモノシラン（モノアミノシラン）、1 ~ 3 個のアミノ基を有するジシラン、または、1 ~ 3 個のアミノ基を有するトリシランであり得る。さらに、上記のアミノシランは、置換されていてもよいアミノ基を有し得る。さらに、上記のアミノ基は、メチル基、エチル基、プロピル基、および、ブチル基の何れかによって置換され得る。さらに、上記のメチル基、エチル基、プロピル基、または、ブチル基は、ハロゲンによって置換され得る。ガス供給源 122 の複数のガスソースのうち選択したガスソースから有機含有されたアミノシラン系ガスの処理ガス G 7 を処理容器 192 内に供給する。工程 S T 1 a a における処理時間は、A L D 法の自己制御領域に至る時間以上の時間である。30

#### 【0083】

処理ガス G 7 の分子は、図 17 の (b) 部に示すように、反応前駆体（層 L y 1）としてウエハ W の表面（マスク M K の表面 M K 1、および、マスク M K のホールの内面）に付着する。工程 S T 1 a a では、処理ガス G 7 のプラズマを生成しない。処理ガス G 7 の分子は、化学結合に基づく化学吸着によってウエハ W の表面に付着するのであり、プラズマは用いられない。なお、処理ガス G 7 としては、化学結合によってウエハ W の表面に付着可能であって且つシリコンを含有するものであれば利用され得る。40

**【 0 0 8 4 】**

一方、例えば処理ガス G 7 にモノアミノシランが選択される場合、モノアミノシランが選択される理由としては、モノアミノシランが比較的に高い電気陰性度を有し且つ極性を有する分子構造を有することによって化学吸着が比較的に容易に行われ得る、ということに更に起因する。処理ガス G 7 の分子がウエハ W の表面に付着することによって形成される反応前駆体の層 L y 1 は、当該付着が化学吸着であるために单分子層（单層）に近い状態となる。モノアミノシランのアミノ基（R）が小さいほど、ウエハ W の表面に吸着される分子の分子構造も小さくなるので、分子の大きさに起因する立体障害が低減され、よって、処理ガス G 7 の分子がウエハ W の表面に均一に吸着でき、層 L y 1 はウエハ W の表面に對し均一な膜厚で形成され得る。

10

**【 0 0 8 5 】**

以上のように、処理ガス G 7 が有機を含んだアミノシラン系ガスを含むので、工程 S T 1 a a によって、シリコンの反応前駆体（層 L y 1 ）がウエハ W の表面の原子層に沿って形成される。

**【 0 0 8 6 】**

工程 S T 1 a a に引き続く工程 S T 1 a b は、処理容器 1 9 2 内の処理空間 S p をパージする。具体的には、工程 S T 1 a a において供給された処理ガス G 7 が排気される。工程 S T 1 a b では、パージガスとして窒素ガスまたは希ガス（例えば Ar 等）ガスといった不活性ガスを処理容器 1 9 2 内に供給してもよい。すなわち、工程 S T 1 a b のパージは、不活性ガスを処理容器 1 9 2 内に流すガスパージ、または真空引きによるパージの何れであってもよい。工程 S T 1 a b では、ウエハ W の表面上に過剰に付着した分子も除去され得る。以上によって、反応前駆体の層 L y 1 は、ウエハ W の表面に形成された極めて薄い分子層となる。

20

**【 0 0 8 7 】**

工程 S T 1 a b に引き続く工程 S T 1 a c では、図 1 7 の（b）部に示すように、処理容器 1 9 2 の処理空間 S p 内で処理ガス G 8（第 4 のガス）のプラズマ P 1 を生成する。処理ガス G 8 は、酸素原子を含有するガスを含み、例えば酸素ガスを含み得る。ガス供給源 1 2 2 の複数のガスソースのうち選択したガスソースから酸素原子を含有するガスを含む処理ガス G 8 を処理容器 1 9 2 内に供給する。そして、高周波電源 1 5 0 A および高周波電源 1 5 0 B から高周波電力を供給する。排気装置 5 0 を動作させることによって処理容器 1 9 2 内の処理空間 S p の圧力を予め設定された圧力に設定する。このようにして、処理ガス G 8 のプラズマ P 1 が処理空間 S p 内において生成される。

30

**【 0 0 8 8 】**

図 1 7 の（b）部に示すように、処理ガス G 8 のプラズマ P 1 が生成されると、酸素の活性種、例えば、酸素ラジカルが生成され、図 1 7 の（c）部に示すように、シリコン酸化膜である層 L y 2（図 1 2 に示す膜 L A 1 に含まれる層）が極めて薄い分子層として形成される。

**【 0 0 8 9 】**

以上のように、処理ガス G 8 が酸素原子を含むので、工程 S T 1 a c において、当該酸素原子がウエハ W の表面に設けられるシリコンの反応前駆体（層 L y 1 ）と結合することによって、ウエハ W の表面に酸化シリコン膜の層 L y 2 が形成され得る。従って、シーケンス S Q 3 においては、A L D 法と同様の方法によって、シリコン酸化膜の層 L y 2 をウエハ W の表面に形成することができる。

40

**【 0 0 9 0 】**

工程 S T 1 a c に引き続く工程 S T 1 a d では、処理容器 1 9 2 内の処理空間 S p をパージする。具体的には、工程 S T 1 a c において供給された処理ガス G 8 が排気される。工程 S T 1 a d では、パージガスとして窒素ガスまたは希ガス（例えば Ar 等）といった不活性ガスを処理容器 1 9 2 内に供給してもよい。すなわち、工程 S T 1 a d のパージは、不活性ガスを処理容器 1 9 2 内に流すガスパージ、または真空引きによるパージの何れであってもよい。

50

**【0091】**

シーケンスSQ3に引き続く工程ST1a-eでは、シーケンスSQ3の繰り返し回数が、予め設定された回数に達したか否かを判定し、当該回数に達していないと判定した場合（工程ST1a-e：NO）、シーケンスSQ3を再び実行し、当該回数に達したと判定した場合（工程ST1a-e：YES）、工程ST1bに移行する。すなわち、工程ST1a-eでは、シーケンスSQ3の繰り返し回数が予め設定された回数に達するまで、シーケンスSQ3の実行を繰り返し行って、ウエハWの表面に対し膜LA1を形成する。工程ST1a-eによって制御されるシーケンスSQ3の繰り返し回数は、ウエハWの表面に設けられた複数のホールのうち最もホール幅の小さいホールが、シーケンスSQ3等によって形成される膜LA1（更には工程ST1bによって形成される膜LA2）によって閉塞せずに（少なくともホールの開口が閉塞せずに）、予め設定された基準幅よりも大きなホール幅を有するように設定される。

**【0092】**

このように、工程ST1aにおいてALD法と同様の方法によって膜LA1をコンフォーマルに形成する場合、まずアミノシラン系ガスを用いて、ウエハWの表面（特にホールの内面）に、シリコンを含有する反応前駆体（層Ly1）をプラズマを用いずに形成する工程ST1a-aと、酸素原子を含むガスのプラズマを用いて、当該反応前駆体に酸素原子を結合させて、シリコン酸化物を含有する薄膜（層Ly2）を形成する工程ST1a-cと、を備えるシーケンスSQ3を繰り返し実行することによって、ウエハWの表面（特にホールの内面）に膜LA1をコンフォーマルに形成する。

**【0093】**

以上説明したように、一実施形態に係る方法MTでは、工程ST1はプラズマCVD法を用いた成膜処理を含むので、ホール幅が比較的に狭いホールHL1に対しては比較的に薄い膜厚の膜LAが形成され、ホール幅が比較的に広いホールHL2に対しては比較的に厚い膜厚の膜LAが形成される。従って、複数のホールにおいてホール幅にバラツキが生じても、当該バラツキは工程ST1の成膜処理によって低減され得る。更に、工程ST2では工程ST1によって形成された膜LAを等方的にエッチングするので、工程ST1によって形成された膜LAによりホール幅のバラツキが低減された状態を維持しつつホール幅の調節が可能となる。

**【0094】**

また、シーケンスSQ1が繰り返し実行されるので、比較的に薄い膜厚の膜（膜LAに含まれる膜）を工程ST1において形成し、シーケンスSQ1を繰り返し実行することによって最終的に所望とする膜厚の膜LAを形成することができる。これにより、ホール幅の比較的に狭いホールHL1において、工程ST1によって形成される膜によってホールHL1の開口が閉塞される事態が十分に回避され得る。

**【0095】**

図7に示す工程ST2のように、ALE法と同様の方法によって、工程ST1によって形成された膜LAの表面が等方的に改質されて膜の表面に混合層MXが等方的に形成された後に混合層MXが全て除去されるので、工程ST2において実行されるエッチングによって工程ST1において形成された膜LAが等方的に均一に除去され得る。

**【0096】**

また、比較的にホール幅が狭く工程ST1で比較的に膜厚の薄い膜が形成されたホールHL1において膜LA2が工程ST2で除去されても、この時点において、比較的にホール幅が広く工程ST1で比較的に膜厚の厚い膜が形成されたホールHL2では膜LA2の一部が残存し得る。このような状態から、工程ST2におけるエッチングが更に継続して行われる場合、膜LA1のエッティング耐性が膜LA2のエッティング耐性よりも低いので、ホールHL1の方がホールHL2よりも速くエッティングが進行する。従って、比較的にエッティング耐性の低い膜LA1と比較的にエッティング耐性の高い膜LA2とを用いることによって、ホールHL1とホールHL2との間のホール幅のバラツキがより効果的に低減され得る。

10

20

30

40

50

**【 0 0 9 7 】**

図16に示す工程S T 1 aのように、A L D法と同様の方法によって膜L A 1が形成されるので、膜厚の比較的に薄い膜L A 1が工程S T 1 aにおいてコンフォーマルに形成され得る。このため、膜L A 2がプラズマC V D法によって形成されても、膜L A 1と膜L A 2とを備える膜L Aの膜厚の全体が効果的に制御され得る。

**【 0 0 9 8 】**

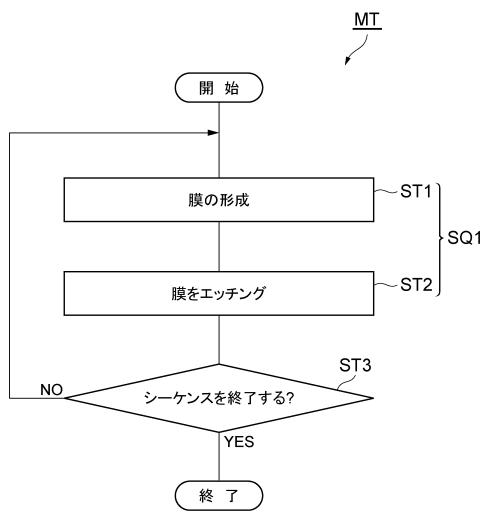
以上、好適な実施の形態において本発明の原理を図示し説明してきたが、本発明は、そのような原理から逸脱することなく配置および詳細において変更され得ることは、当業者によって認識される。本発明は、本実施の形態に開示された特定の構成に限定されるものではない。したがって、特許請求の範囲およびその精神の範囲から来る全ての修正および変更に権利を請求する。10

**【 符号の説明 】****【 0 0 9 9 】**

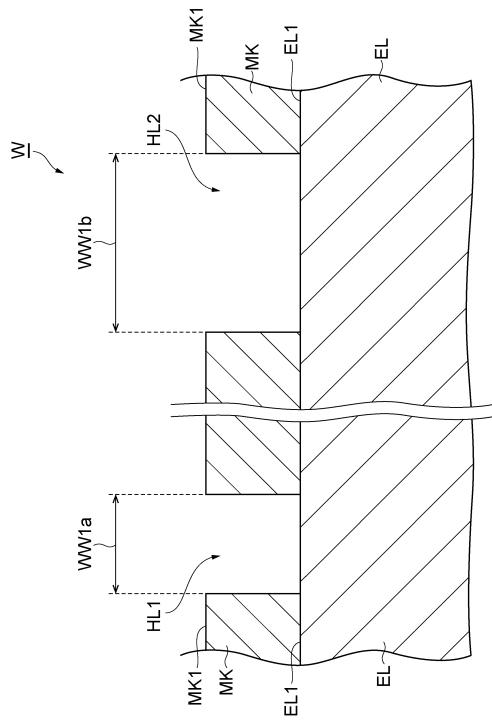
1 0 ... プラズマ処理装置、1 2 0 ... ガス供給部、1 2 1 ... ガス導入口、1 2 2 ... ガス供給源、1 2 3 ... ガス供給配管、1 2 4 ... マスフローコントローラ、1 2 6 ... 開閉バルブ、1 2 e ... 排気口、1 3 4 ... ウエハ搬出入口、1 3 6 ... ゲートバルブ、1 4 ... 支持部、1 4 0 ... 高周波アンテナ、1 4 2 A ... 内側アンテナ素子、1 4 2 B ... 外側アンテナ素子、1 4 4 ... 挾持体、1 5 0 A ... 高周波電源、1 5 0 B ... 高周波電源、1 6 0 ... シールド部材、1 6 2 A ... 内側シールド壁、1 6 2 B ... 外側シールド壁、1 6 4 A ... 内側シールド板、1 6 4 B ... 外側シールド板、1 6 8 A ... アクチュエータ、1 6 8 B ... アクチュエータ、1 8 a ... 第1プレート、1 8 b ... 第2プレート、1 9 2 ... 処理容器、1 9 4 ... 板状誘電体、2 2 ... 直流電源、2 3 ... スイッチ、2 4 ... 冷媒流路、2 6 a ... 配管、2 6 b ... 配管、2 8 ... ガス供給ライン、4 6 ... デポシールド、4 8 ... 排気プレート、5 0 ... 排気装置、5 2 ... 排気管、6 4 ... 高周波電源、6 8 ... 整合器、C n t ... 制御部、E L ... 被処理層、E L 1 ... 表面、E S C ... 静電チャック、F R ... フォーカスリング、H P ... ヒータ電源、H T ... 温度調節部、L A ... 膜、L A 1 ... 膜、L A 2 ... 膜、L E ... 下部電極、L y 1 ... 層、L y 2 ... 層、M K ... マスク、M K 1 ... 表面、M T ... 方法、M X ... 混合層、P 1 ... プラズマ、P D ... 載置台、S p ... 処理空間、H L 1 ... ホール、H L 2 ... ホール、W ... ウエハ、W F 1 a ... 膜厚、W F 1 b ... 膜厚、W F 2 a ... 膜厚、W F 2 b ... 膜厚、W F 3 a ... 膜厚、W F 3 b ... 膜厚、W W 1 a ... ホール幅、W W 1 b ... ホール幅。20

30

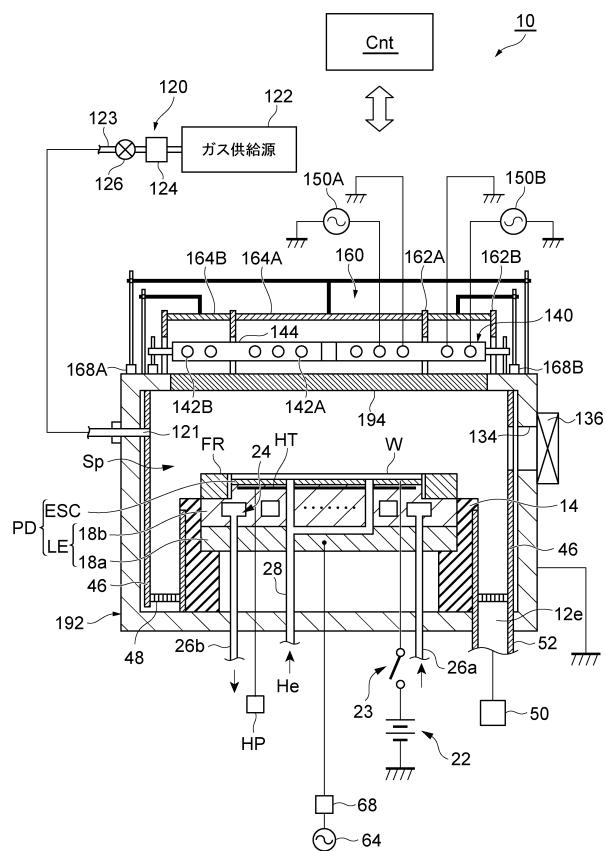
【図1】



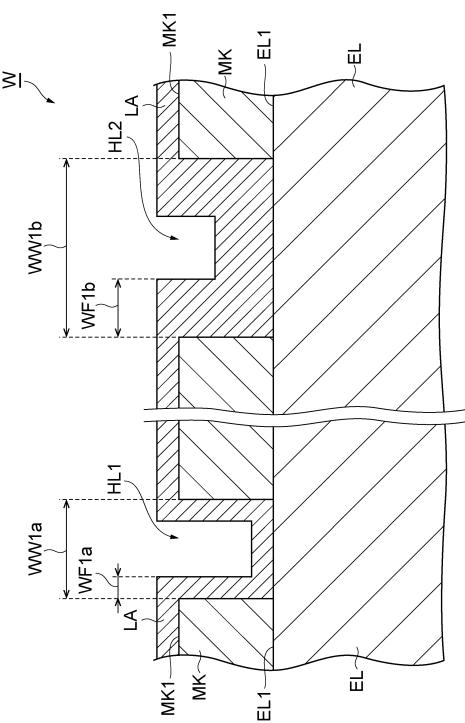
【図2】



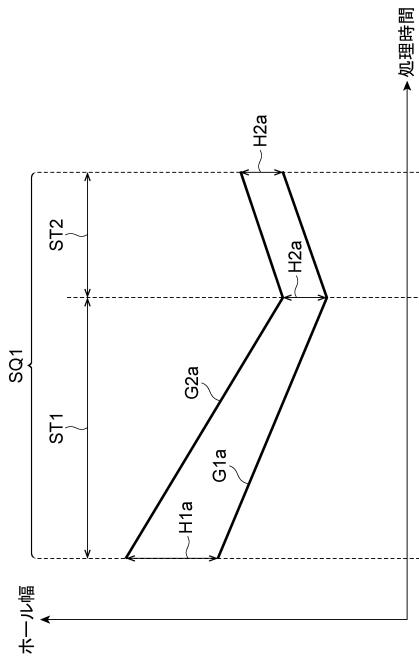
【図3】



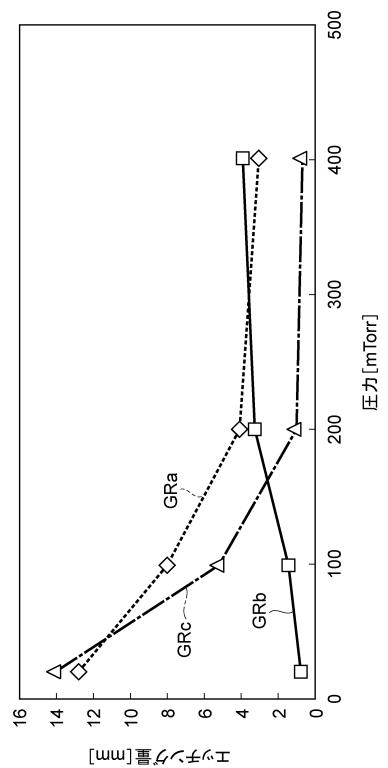
【図4】



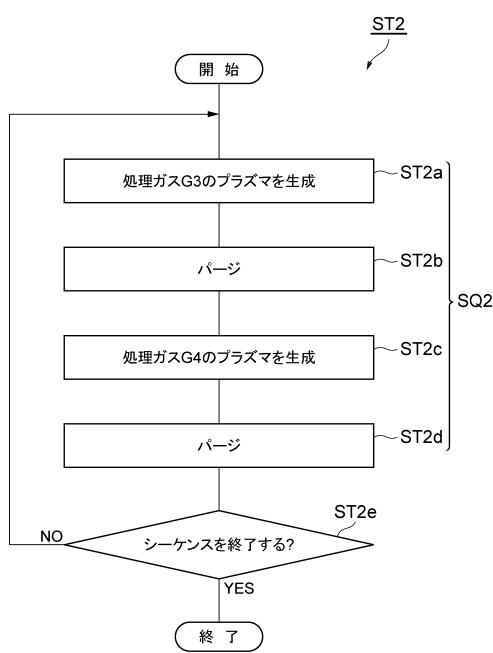
【図5】



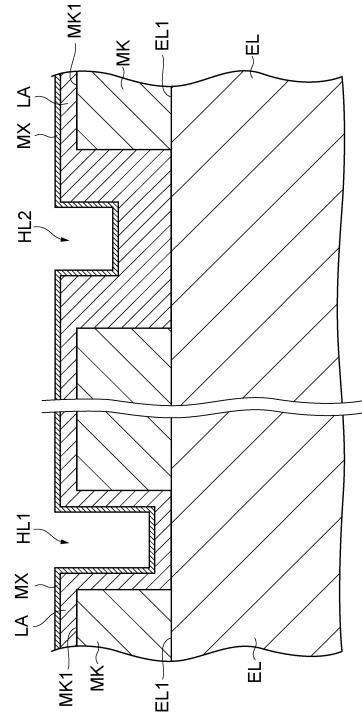
【図6】



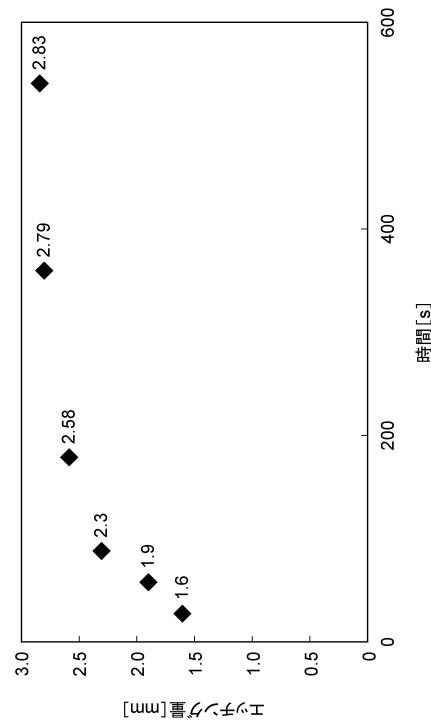
【図7】



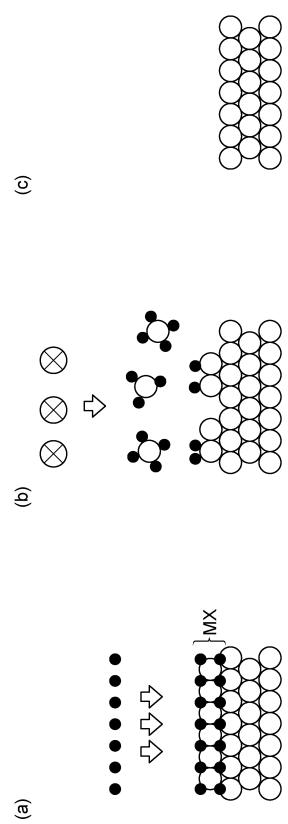
【図8】



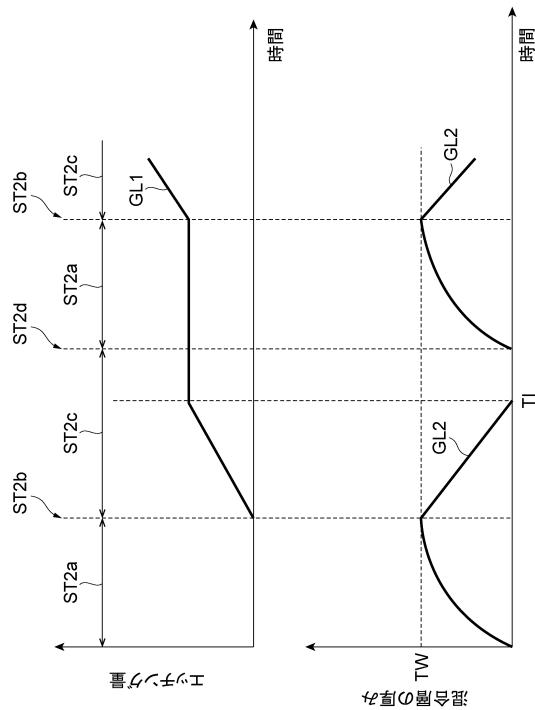
【図 9】



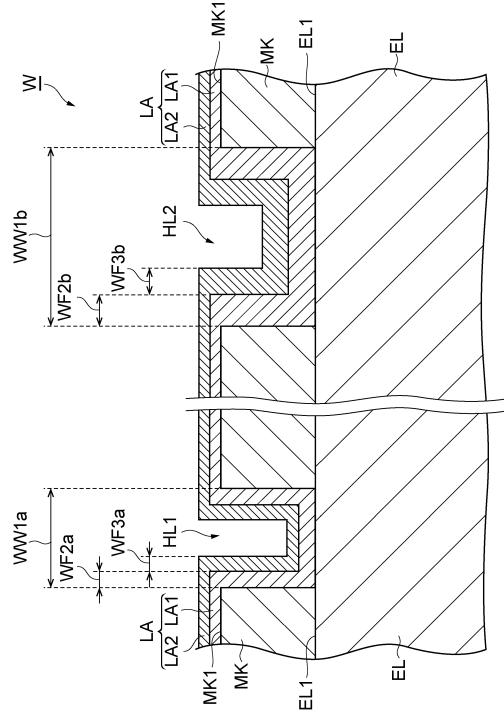
【図 10】



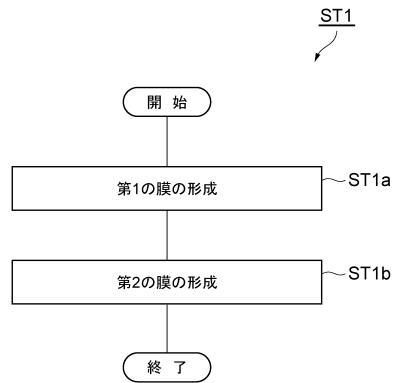
【図 11】



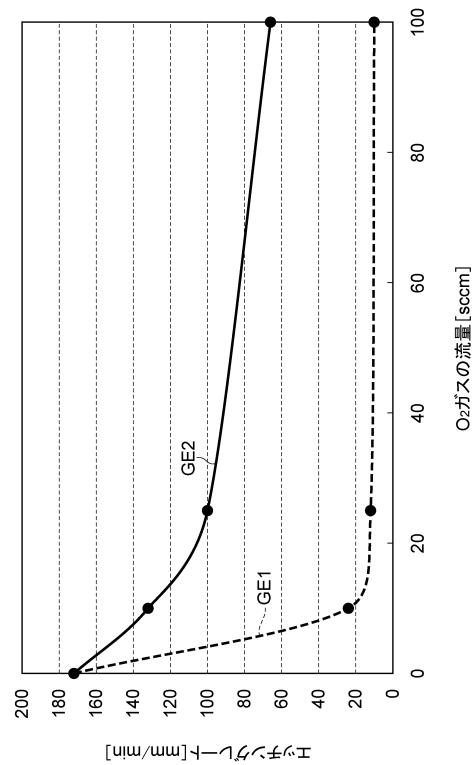
【図 12】



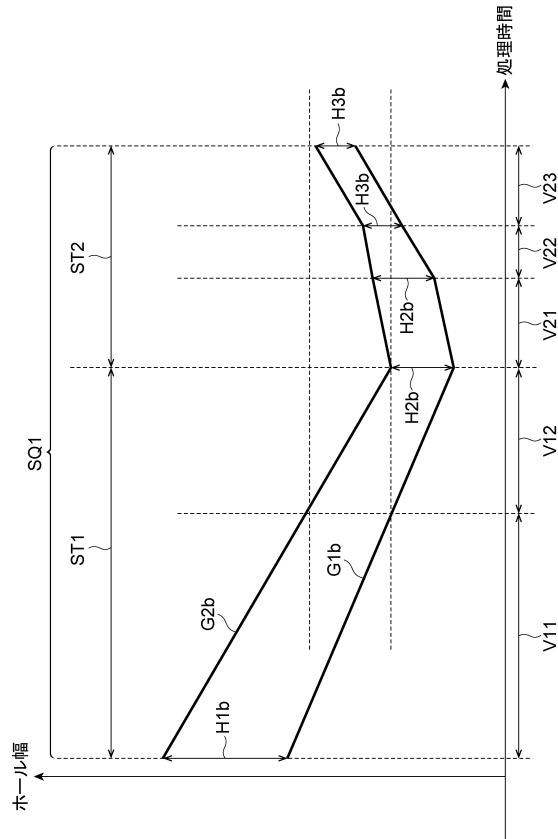
【図13】



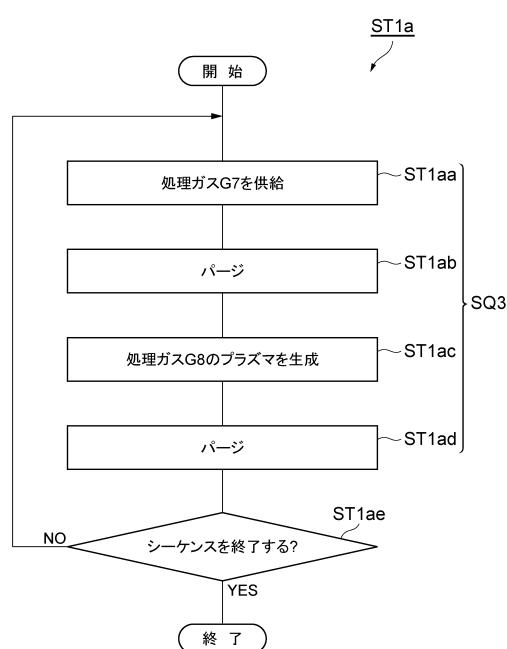
【図14】



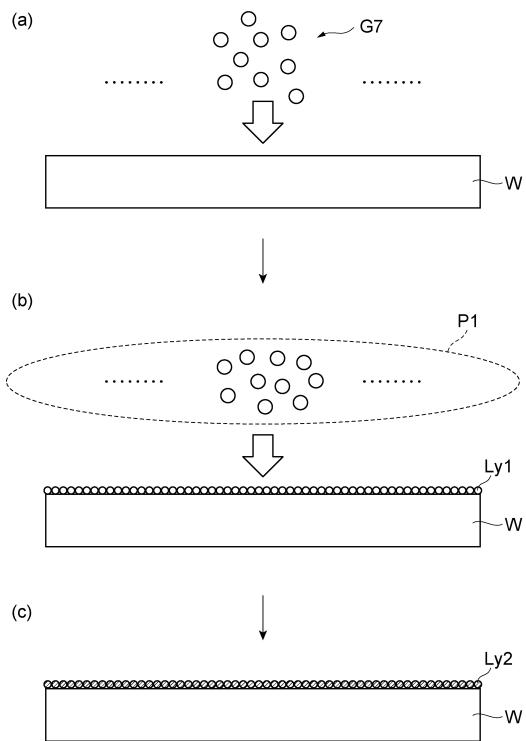
【図15】



【図16】



【図17】



---

フロントページの続き

(51)Int.Cl.

F I

H 0 1 L 21/90

A  
C

(72)発明者 木原 嘉英

東京都港区赤坂五丁目3番1号 赤坂Bizタワー 東京エレクトロン株式会社内

審査官 鈴木 聰一郎

(56)参考文献 特開2005-129893(JP,A)

特開2015-220277(JP,A)

特開2016-127285(JP,A)

特開2007-305981(JP,A)

特開2016-143698(JP,A)

特開2010-283213(JP,A)

特開2016-058590(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H 0 1 L 2 1 / 2 0 5

H 0 1 L 2 1 / 3 0 2

H 0 1 L 2 1 / 3 0 6 5

H 0 1 L 2 1 / 3 1

H 0 1 L 2 1 / 3 1 2 - 2 1 / 3 2 1 3

H 0 1 L 2 1 / 3 6 5

H 0 1 L 2 1 / 4 6 1

H 0 1 L 2 1 / 4 6 9 - 2 1 / 4 7 5

H 0 1 L 2 1 / 7 6 8

H 0 1 L 2 1 / 8 6

H 0 1 L 2 3 / 5 2 2

H 0 1 L 2 3 / 5 3 2