

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2019-62045

(P2019-62045A)

(43) 公開日 平成31年4月18日(2019.4.18)

(51) Int.Cl.			F I			テーマコード (参考)
<b>H01L</b>	<b>21/3065</b>	<b>(2006.01)</b>	H01L	21/302	105B	4K030
<b>C23C</b>	<b>16/28</b>	<b>(2006.01)</b>	C23C	16/28		5F004
<b>C23C</b>	<b>16/511</b>	<b>(2006.01)</b>	C23C	16/511		
<b>C23C</b>	<b>16/56</b>	<b>(2006.01)</b>	C23C	16/56		

審査請求 未請求 請求項の数 21 O L (全 27 頁)

(21) 出願番号 特願2017-184682 (P2017-184682)  
 (22) 出願日 平成29年9月26日 (2017.9.26)

(71) 出願人 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 100099944  
 弁理士 高山 宏志  
 (72) 発明者 渡部 佳優  
 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  
 (72) 発明者 岡 正浩  
 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  
 (72) 発明者 近藤 佳幸  
 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

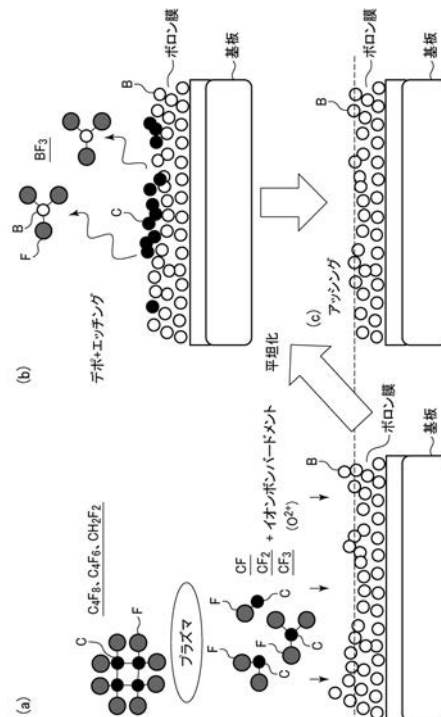
(54) 【発明の名称】 ボロン系膜の平坦化方法およびボロン系膜の形成方法

(57) 【要約】

【課題】ボロン系膜を半導体デバイスに適用可能に平坦化することができる技術を提供する。

【解決手段】基板上に形成されたボロンを主体とするボロン系膜の表面を平坦化するボロン系膜の平坦化方法は、ボロン系膜に対し、CとFとを含有するCF系ガス、および酸素含有ガスを含む処理ガスを用いたプラズマ処理を行う工程と、プラズマ処理を行う工程の後、残留するカーボン系副生成物をアッシングする工程とを有する。

【選択図】 図8



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

基板上に形成されたボロンを主体とするボロン系膜の表面を平坦化するボロン系膜の平坦化方法であって、

ボロン系膜に対し、CとFとを含有するCF系ガス、および酸素含有ガスを含む処理ガスを用いたプラズマ処理を行う工程を有することを特徴とするボロン系膜の平坦化方法。

## 【請求項 2】

前記プラズマ処理を行う工程の後、残留するカーボン系副生成物をアッシングする工程をさらに有することを特徴とする請求項 1 に記載のボロン系膜の平坦化方法。

## 【請求項 3】

前記アッシング工程は、 $O_2$  ガスのプラズマにより行うことを特徴とする請求項 2 に記載のボロン系膜の平坦化方法。

## 【請求項 4】

前記アッシング工程の後、前記ボロン系膜が形成された基板をウェット洗浄する工程をさらに有することを特徴とする請求項 2 または請求項 3 に記載のボロン系膜の平坦化方法。

## 【請求項 5】

前記CF系ガスは、CとFとを含有するガスのみ、CとFとHを含有するガスのみ、または、これらの両方であることを特徴とする請求項 1 から請求項 4 のいずれか 1 項に記載のボロン系膜の平坦化方法。

## 【請求項 6】

前記CF系ガスは、 $C_4F_6$ 、 $C_4F_8$ 、 $CH_2F_2$  からなる群から選択される少なくとも 1 種であることを特徴とする請求項 5 に記載のボロン系膜の平坦化方法。

## 【請求項 7】

前記プラズマ処理工程の際の前記酸素含有ガスは $O_2$  ガスであることを特徴とする請求項 1 から請求項 6 のいずれか 1 項に記載のボロン系膜の平坦化方法。

## 【請求項 8】

前記プラズマ処理を行う工程は、平行平板型のプラズマ処理装置により行うことを特徴とする請求項 1 から請求項 7 のいずれか 1 項に記載のボロン系膜の平坦化方法。

## 【請求項 9】

前記プラズマ処理を行う工程は、前記ボロン系膜が形成された基板に、高周波バイアス電圧を印加することを特徴とする請求項 1 から請求項 8 のいずれか 1 項に記載のボロン系膜の平坦化方法。

## 【請求項 10】

前記ボロン系膜は、ボロンと不可避的不純物を含むボロン膜であることを特徴とする請求項 1 から請求項 9 のいずれか 1 項に記載のボロン系膜の平坦化方法。

## 【請求項 11】

前記ボロン系膜は、プラズマCVDにより成膜された膜であることを特徴とする請求項 1 から請求項 10 のいずれか 1 項に記載のボロン系膜の平坦化方法。

## 【請求項 12】

前記ボロン系膜は、マイクロ波プラズマCVDにより成膜された膜であることを特徴とする請求項 11 に記載のボロン系膜の平坦化方法。

## 【請求項 13】

基板上にボロンを主体とするボロン系膜を成膜する工程と、  
前記ボロン系膜の表面を平坦化する工程と  
を有し、

前記ボロン系膜の表面を平坦化する工程は、ボロン系膜に対し、CとFとを含有するCF系ガス、および酸素含有ガスを含む処理ガスを用いたプラズマ処理を行うことを特徴とするボロン系膜の形成方法。

## 【請求項 14】

10

20

30

40

50

前記ボロン系膜を成膜する工程は、前記ボロン系膜として、ボロンと不可避的不純物を含むボロン膜を成膜することを特徴とする請求項 13 に記載のボロン系膜の形成方法。

【請求項 15】

前記ボロン系膜を成膜する工程は、ボロン含有ガスを用いてプラズマ CVD により行われることを特徴とする請求項 13 または請求項 14 に記載のボロン系膜の形成方法。

【請求項 16】

前記ボロン系膜を成膜する工程は、マイクロ波プラズマ CVD により行われることを特徴とする請求項 15 に記載のボロン系膜の形成方法。

【請求項 17】

前記ボロン系膜を成膜する工程は、ボロン含有ガスとして、ジボランガス、三塩化ボロンガス、およびアルキルボランガスからなる群から選択されるガスを用いることを特徴とする請求項 15 または請求項 16 に記載のボロン系膜の形成方法。

10

【請求項 18】

前記ボロン系膜を成膜する工程と、前記平坦化工程とは、*in situ*で行われることを特徴とする請求項 13 から請求項 17 のいずれか 1 項に記載のボロン系膜の形成方法。

【請求項 19】

前記ボロン系膜を成膜する工程と、前記平坦化工程とは、同一チャンバ内で行われることを特徴とする請求項 18 に記載のボロン系膜の形成方法。

【請求項 20】

前記ボロン系膜を成膜する工程と、前記平坦化工程とを所定回数繰り返すことを特徴とする請求項 13 から請求項 19 のいずれか 1 項に記載のボロン系膜の形成方法。

20

【請求項 21】

前記ボロン系膜を成膜する工程は、1 回の膜厚を、前記平坦化処理により所望の平坦度が得られる程度の膜厚とすることを特徴とする請求項 20 に記載のボロン系膜の形成方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、ボロン系膜の平坦化方法およびボロン系膜の形成方法に関する。

30

【背景技術】

【0002】

近時、半導体製造技術の発展により、半導体装置の微細化が進み、14nm 以下、さらには 10nm 以下のものが出現している。また、さらなる半導体装置の集積化のために半導体素子を立体的に構築する技術が進められている。このため、半導体ウエハ上に形成する薄膜の積層数が増加し、例えば 3 次元 NAND を用いたフラッシュメモリにおいては、酸化珪素 (SiO<sub>2</sub>) 膜や窒化珪素 (SiN) 膜等を含む、厚さが 1 μm 以上の厚い積層膜をドライエッチングにより微細加工する工程が必要となっている。

【0003】

微細加工を行うためのハードマスクとしては、従来、アモルファスシリコン膜やアモルファスカーボン膜が用いられているが、エッチング耐性が低い。したがって、これらの膜をハードマスクとして用いた場合は膜厚を厚くせざるを得ず、1 μm 以上もの厚い膜を形成する必要がある。

40

【0004】

さらに次世代のハードマスク材料として、アモルファスシリコン膜やアモルファスカーボン膜よりもエッチング耐性が高いタングステン等の金属材料膜が検討されている。しかし、非常にエッチング耐性が高いタングステン膜等の金属材料膜は、ドライエッチング加工後の剥離やメタル汚染等への対策が難しい。

【0005】

このため、アモルファスシリコン膜やアモルファスカーボン膜よりもドライエッチング

50

耐性が高く、 $\text{SiO}_2$ 膜等に対して高い選択比を有する新たなハードマスク材料としてボロン系膜が検討されている。特許文献1には、ハードマスクとしてボロン系膜をCVDにより成膜することが記載されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】特表2013-533376号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

ところで、ハードマスク材料としては、ボロン系膜の中でもボロン単独のボロン膜が優れた特性を有することがわかっているが、ボロン膜は、成膜した後の表面の凹凸が大きく、例えば平均面粗さ(Ra)や二乗平均粗さ(RMS)で表される表面粗さが2nm以上と大きい値を示す場合があり、これが14nm以下の微細パターンへの適用が制限される要因となる。また、ボロンに窒素(N)や炭素(C)等の他の元素を添加した他のボロン系膜についても同様に表面の凹凸が問題になる。半導体デバイスへの適用を考慮すると、RMSが1nm以下、さらには0.5nm以下のボロン系膜の平坦化技術が求められているが、このようなボロン系膜の平坦化技術は未だ確立されていない。

【0008】

したがって、本発明は、ボロン系膜を半導体デバイスに適用可能に平坦化することができる技術を提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記課題を解決するため、本発明の第1の観点は、基板上に形成されたボロンを主体とするボロン系膜の表面を平坦化するボロン系膜の平坦化方法であって、ボロン系膜に対し、CとFとを含有するCF系ガス、および酸素含有ガスを含む処理ガスを用いたプラズマ処理を行う工程を有することを特徴とするボロン系膜の平坦化方法を提供する。

【0010】

前記プラズマ処理を行う工程の後、残留するカーボン系副生成物をアッシングする工程をさらに有してもよい。前記アッシング工程は、 $\text{O}_2$ ガスのプラズマにより行うことができる。前記アッシング工程の後、前記ボロン系膜が形成された基板をウェット洗浄する工程をさらに有してもよい。

【0011】

前記CF系ガスは、CとFとを含有するガスのみ、CとFとHを含有するガスのみ、または、これらの両方であってよい。前記CF系ガスとして、 $\text{C}_4\text{F}_6$ 、 $\text{C}_4\text{F}_8$ 、 $\text{CH}_2\text{F}_2$ からなる群から選択される少なくとも1種を用いることができる。前記プラズマ処理工程の際の前記酸素含有ガスとして $\text{O}_2$ ガスを用いることができる。

【0012】

前記プラズマ処理を行う工程は、平行平板型のプラズマ処理装置により行うことができる。前記プラズマ処理を行う工程は、前記ボロン系膜が形成された基板に、高周波バイアス電圧を印加してもよい。

【0013】

前記ボロン系膜は、ボロンと不可避的不純物を含むボロン膜であることが好ましい。前記ボロン系膜は、プラズマCVDにより成膜された膜であることが好ましく、マイクロ波プラズマCVDにより成膜された膜であることがより好ましい。

【0014】

本発明の第2の観点は、基板上にボロンを主体とするボロン系膜を成膜する工程と、前記ボロン系膜の表面を平坦化する工程とを有し、前記ボロン系膜の表面を平坦化する工程は、ボロン系膜に対し、CとFとを含有するCF系ガス、および酸素含有ガスを含む処理ガスを用いたプラズマ処理を行うことを特徴とするボロン系膜の形成方法を提供する。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 1 5 】

前記ボロン系膜を成膜する工程は、前記ボロン系膜として、ボロンと不可避的不純物を含むボロン膜を成膜するものであることが好ましい。前記ボロン系膜を成膜する工程は、ボロン含有ガスを用いてプラズマCVDにより行われることが好ましく、マイクロ波プラズマCVDにより行われることがより好ましい。

## 【 0 0 1 6 】

前記ボロン系膜を成膜する工程は、ボロン含有ガスとして、ジボランガス、三塩化ボロンガス、およびアルキルボランガスからなる群から選択されるガスを用いることができる。

## 【 0 0 1 7 】

前記ボロン系膜を成膜する工程と、前記平坦化工程とは、*in situ*で行うことが好ましい。また、前記ボロン系膜を成膜する工程と、前記平坦化工程とは、同一チャンバ内で行ってもよい。

## 【 0 0 1 8 】

前記ボロン系膜を成膜する工程と、前記平坦化工程とを所定回数繰り返してもよい。この場合に、1回の膜厚を、前記平坦化処理により所望の平坦度が得られる程度の膜厚とすることが好ましい。

## 【 発明の効果 】

## 【 0 0 1 9 】

本発明によれば、CF系ガスのエッチング効果およびデポ効果、ならびに酸素含有ガスのプラズマによるイオンボンバードメント効果および酸化効果を併用することにより、エッチングしたくないボロン膜表面の凹部はカーボン系副生成物の堆積によりエッチングから保護され、エッチングしたい凸部は酸素含有ガスのプラズマによりカーボン系副生成物が除去されるとともに、CF系ガスから分解されたFおよび酸素含有ガスのイオンにより優先的にエッチングされ、結果的にボロン膜表面の平坦性が極めて高いものとなり、半導体装置に適用可能となる。

## 【 図面の簡単な説明 】

## 【 0 0 2 0 】

【 図 1 】 基板上にマイクロ波プラズマCVDにより成膜された *as depo* のボロン膜のSEM写真である。

【 図 2 】 図 1 のボロン膜に  $H_2$  プラズマ処理、および  $NF_3$  プラズマ処理を行った際のSEM写真である。

【 図 3 】 ボロン膜に  $H_2$  プラズマ処理を行った場合のボロン膜の状態を示す模式図である。

【 図 4 】 ボロン膜に  $NF_3$  プラズマ処理を行った場合のボロン膜の状態を示す模式図である。

【 図 5 】 ( a ) は *as depo* のボロン膜と、 $O_2$  アニール処理、およびクリーニング処理後のボロン膜のSEM写真であり、( b ) は *as depo* のボロン膜と、 $O_2$  アニールプラズマ処理、およびクリーニング処理後のボロン膜のSEM写真である。

【 図 6 】 ボロン膜に  $O_2$  アニール処理または  $O_2$  プラズマ処理を行った場合のボロン膜の状態を示す模式図である。

【 図 7 】 本発明の第 1 の実施形態に係るボロン膜の平坦化方法を示すフローチャートである。

【 図 8 】 本発明の第 1 の実施形態に係るボロン膜の平坦化方法におけるボロン膜の平坦化モデルを説明するための模式図である。

【 図 9 】 本発明の第 1 の実施形態に係るボロン膜の平坦化方法を行うための処理装置の一例を示す断面図である。

【 図 1 0 】 本発明の第 1 の実施形態の実験例の実験例 1 における各段階のSEM写真である。

【 図 1 1 】 *as depo* のボロン膜と、実験例 1 ~ 4 の平坦化処理を行った際のボロン

10

20

30

40

50

膜表面の A F M 写真である。

【図 1 2】 a s d e p o のボロン膜と、平坦化処理の際に  $O_2$  ガス流量を変化させた実験例 5、実験例 1、実験例 6 のボロン膜表面の A F M 写真である。

【図 1 3】本発明の第 2 の実施形態に係るボロン膜の形成方法を示すフローチャートである。

【図 1 4】ボロン膜の膜厚を 6 0 0 n m および 1 8 0 0 n m にした場合の a s d e p o のボロン膜の S E M 写真および A F M 写真である。

【図 1 5】ボロン膜の膜厚を 6 0 0 n m および 1 8 0 0 n m にした場合の平坦化処理後のボロン膜の S E M 写真および A F M 写真である。

【図 1 6】本発明の第 2 の実施形態に係るボロン膜の形成方法の他の例を示すフローチャートである。

【図 1 7】本発明の第 2 の実施形態に係るボロン膜の形成方法を行うための処理システムの一例を示す水平断面図である。

【図 1 8】ボロン膜を成膜するための成膜装置の好適な例を示す断面図である。

【図 1 9】ボロン膜の成膜と平坦化処理を同一チャンバ内で行える処理装置の一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0 0 2 1】

以下、添付図面を参照して本発明の実施形態について説明する。

【0 0 2 2】

< 本発明に至った経緯 >

最初に、本発明に至った経緯について説明する。

従来から、種々の材料について平坦化技術が提案されている。例えば、多結晶シリコンの平坦化技術として、プラズマエッチングを利用したものが知られている（例えば、特開平 9 - 2 3 2 2 8 5 号公報、特開 2 0 0 7 - 2 6 6 0 5 6 号公報）。また、Ge 膜の平坦化技術として、 $O_2$  アニールを行った後、D H F 洗浄を利用したものが知られている（IE EE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL.36, NO.4, APRIL 2015）。これは酸素拡散を利用した技術である。

【0 0 2 3】

このような平坦化技術を踏まえ、まず、基板上にマイクロ波プラズマ C V D により成膜されたボロン膜に対して、 $H_2$  プラズマ処理、 $NF_3$  プラズマ処理による平坦化への影響について調査した。図 1 は、イニシャル ( a s d e p o ) のボロン膜 ( ステージ温度 : 2 5 0 ° C 、圧力 : 5 0 m T o r r 、マイクロ波パワー : 4 k W 、 $B_2H_6$  : 5 0 0 s c c m 、時間 : 5 m i n ) の S E M 写真である。図 1 に示すようにボロン膜の膜厚が 1 8 0 n m であり、表面粗さ R M S は 2 . 3 n m であった。図 2 ( a ) および図 2 ( b ) は、それぞれ  $H_2$  プラズマ処理 ( ステージ温度 : 2 5 0 ° C 、圧力 : 2 0 m T o r r 、 $H_2$  : 6 0 s c c m 、時間 : 9 0 s e c ) を行った際、および  $NF_3$  プラズマ処理 ( ステージ温度 : 1 5 0 ° C 、圧力 : 5 0 m T o r r 、 $NF_3$  : 3 0 0 s c c m 、時間 : 1 0 s e c ) を行った際の S E M 写真である。図 2 ( a ) に示すように、 $H_2$  プラズマ処理ではボロン膜表面に変化が見られず、表面粗さ R M S は 2 . 3 n m のままであった。なお、He プラズマによるイオンパタリングも行ったが、その場合も同様であった。一方、図 2 ( b ) に示すように、 $NF_3$  プラズマ処理では、ボロン膜が 1 2 0 n m までエッチングされ、表面粗さ R M S は 3 . 7 n m とむしろ表面の平坦性が悪化した。

【0 0 2 4】

$H_2$  プラズマ処理の場合は、図 3 に模式的に示すように、水素イオンによる処理であるが、単純に水素イオンをボロン膜に供給しても水素イオンによって表面は変化しない。 $He$  イオン等のイオン処理についても同様である。

【0 0 2 5】

これに対し、 $NF_3$  プラズマ処理の場合は、図 4 に示すように、 $NF_3$  が F や NF に解離してボロン ( B ) と反応し、ボロン膜がエッチングされ、かえって表面が荒れたものと

10

20

30

40

50

考えられる。

【0026】

次に、基板上にマイクロ波プラズマCVDにより成膜されたボロン膜（ステージ温度：300、圧力：50mTorr）に対して、O<sub>2</sub>アニール処理、O<sub>2</sub>プラズマ処理による平坦化への影響について調査した。図5（a）はイニシャル（as de po）のボロン膜と、O<sub>2</sub>アニール処理（酸素雰囲気、600、30min）、およびクリーニング処理（純水（DIW）+超音波処理：30min）後のボロン膜のSEM写真であり、図5（b）はイニシャル（as de po）のボロン膜と、O<sub>2</sub>アニールプラズマ処理（O<sub>2</sub>プラズマ10min）、およびクリーニング処理（純水（DIW）+超音波処理：30min）後のボロン膜のSEM写真である。これらのSEM写真から、O<sub>2</sub>アニール処理およびO<sub>2</sub>プラズマ処理によって表面の平坦性はほとんど変化していないことがわかる。

10

【0027】

これは、図6に示すように、O<sub>2</sub>アニール処理およびO<sub>2</sub>プラズマ処理では、ボロン膜の表面が酸化されてエッチングされるが、全体的に酸化されるだけであり、クリーニングにより酸化膜を除去してもボロン膜表面の平坦性はほとんど変化しないためと考えられる。

【0028】

このことから、ボロン膜は、従来多結晶シリコン膜やGe膜で行っていたような平坦化手法では十分に平坦化できないことが判明した。これは、ボロン膜が、多結晶シリコン膜やGe膜とは異なり、アモルファスであることにも起因していると考えられる。

20

【0029】

そこで、ボロン膜の平坦化に適した方法を検討した結果、凹凸部を有するボロン膜表面において、凹部を保護し、凸部のみをエッチングできる方法が有効であることに想到した。

【0030】

従来、プラズマエッチングでは、CF系ガスが用いられ、CF系ガスから分解されたFがエッチングに寄与し、CF系ガスから分解されたCがカーボン系副生成物（ポリマー）として側壁に堆積（デポ）して側壁保護層となることが知られており、このようなCF系ガスのエッチング効果およびデポ効果、ならびに酸素含有ガス（例えばO<sub>2</sub>ガス）のプラズマによるイオンボンバードメント効果および酸化効果を併用することにより、エッチングしたくないボロン膜表面の凹部はカーボン系副生成物の堆積によりエッチングから保護され、エッチングしたい凸部は酸素含有ガスのプラズマによりカーボン系副生成物が除去されるとともに、CF系ガスから分解されたFおよび酸素含有ガスのイオンにより優先的にエッチングされ、結果的に極めて高い平坦性が得られ、半導体装置に適用可能であることが見出された。

30

【0031】

<第1の実施形態>

次に、第1の実施形態について説明する。

本実施形態は、所定の方法で成膜されたボロン系膜を平坦化する平坦化方法である。

【0032】

本実施形態において平坦化の対象であるボロン系膜は、エッチング耐性が高いという特性を有しており、このような特性を生かした用途として典型的にはハードマスクに適用され、例えば、半導体基板上にエッチング対象膜を介して形成される。ボロン系膜は、ボロンを50at.%以上有するボロンを主体とする膜であり、ボロンおよび不可避不純物からなるボロン膜であってもよいし、ボロンに意図的に窒素（N）、炭素（C）、珪素（Si）等の他の元素を添加した膜であってもよい。ただし、高いエッチング耐性を得る観点からは、他の添加元素を含まないボロン膜が好ましい。

40

【0033】

ボロン系膜は、半導体装置の製造に用いられる一般的な薄膜形成技術によって形成されたものであればよく、熱CVD、プラズマCVD、ALD、PVDのいずれでもよいが、

50

特に、膜質が良好なボロン系膜が得られるプラズマCVDで成膜されたものであることが好ましい。プラズマCVDの中では、低電子温度かつラジカル主体であり、低ダメージで高密度のプラズマを生成可能なマイクロ波プラズマCVDで成膜されたものが特に好ましい。CVDやALDで成膜されたボロン系膜は、膜中に成膜原料等に由来のする不純物として主に水素(H)が5~15at%程度含まれている。

#### 【0034】

ボロン系膜は、上記いずれの成膜方法で形成されたものでも、成膜したまま(as deposited)では表面粗さが大きく、表面粗さRMSが1nmを超え、プラズマCVDでは2nmを超えた値となる。最近のエッチング加工技術はダブルパターンングにより最終パターン寸法が10nm程度まで微細化しており、ハードマスクへの適用を考慮すると、表面粗さRMSが1nm以下、さらには0.5nm以下が求められる。

10

#### 【0035】

このため、ボロン系膜の表面の平坦化処理が必要となる。図7は、第1の実施形態に係るボロン膜の平坦化方法を示すフローチャートである。本実施形態に係るボロン膜の平坦化方法は、ボロン系膜に対し、CF系ガスおよび酸素含有ガスを含む処理ガスを用いたプラズマ処理を行う工程(ステップ1)と、次いで、酸素含有ガスによるアッシングを行う工程(ステップ2)とを有する。

#### 【0036】

ステップ1に用いるCF系ガスは、CとFとを含有するガスであり、 $C_4F_6$ や $C_4F_8$ のようなCとFのみからなる $C_xF_y$ で表されるガスであっても、 $CH_2F_2$ のようなCとFの他にHを含有する $C_xH_yF_z$ で表されるガスであってもよい。また、CF系ガスとしては、いずれか単独でも2種類以上混合してもよい。また、ステップ1で用いられる酸素含有ガスとしては、 $O_2$ 、 $O_3$ 、 $NO_2$ 、 $H_2O$ 等を用いることができる。これらの中では $O_2$ が好ましい。CF系ガスは、Fが多いほどエッチング性が高く、Cが多いほどデポ性が高くなる。これらを考慮してFとCとの比F/Cを1~4(F:C=1:1~4:1)の範囲にすることが好ましい。また、CF系ガスと $O_2$ 等の酸素含有ガスとの流量比CF/ $O_2$ を1~2(CF: $O_2$ =1:1~2:1)の範囲にすることが好ましい。 $CH_2F_2$ のような $C_xH_yF_z$ ガスは、分離したHラジカルが過剰なポリマーデポを抑制する効果も有する。

20

#### 【0037】

プラズマ生成手段は、CF系ガスおよび酸素含有ガスを有効に解離することができれば特に限定されない。また、ボロン膜が形成された被処理基板、例えば半導体ウエハに高周波バイアスを印加してプラズマ中のイオンを被処理基板に引き込むことが好ましい。このときの高周波バイアスの周波数は3~40MHzの範囲、パワーは200~14000Wの範囲が好ましい。また、圧力は、1.33~13.3Pa(10~100mTorr)の範囲が好ましい。

30

#### 【0038】

ステップ2のアッシングは、ステップ1を行った後にボロン膜に残留したC(ポリマー)を除去する工程である。ただし、ボロン系膜の平坦化はステップ1で行われるので、残留したC(ポリマー)を除去する必要がなければ、ステップ2は行わなくてもよい。この際のアッシングは、通常のアッシングと同様に行われ、 $O_2$ プラズマや $O_3$ ガス等、励起された酸素含有ガスが用いられる。

40

#### 【0039】

なお、アッシングの後、希フッ酸(DHF)等によるウェット洗浄処理を行ってもよい。

#### 【0040】

##### [平坦化メカニズム]

次に、本実施形態におけるボロン膜の平坦化メカニズムについて説明する。

図8は、本実施形態におけるボロン膜の平坦化モデルを説明するための模式図である。ここではボロン系膜としてボロン膜を用いた場合を示す。表面粗さが大きいボロン膜に、

50

$C_4F_8$ 、 $C_4F_6$ 、 $CH_2F_2$ 等のCF系ガス、 $O_2$ ガス等の酸素含有ガスを供給すると、プラズマにより、CF系ガスは、活性種であるCF、 $CF_2$ 、 $CF_3$ に解離し、 $O_2$ ガス等の酸素含有ガスは酸素系イオン( $O^{2+}$ 等)となってボロン膜に供給される(図8(a))。

#### 【0041】

CF、 $CF_2$ 、 $CF_3$ から分解されたCはカーボン系副生成物となってボロン膜に堆積(デポ)し、Fは化学的作用によりボロン膜をエッチングして $BF_3$ を生成する。また、酸素系イオンはイオンボンバードメント効果によりカーボン系副生成物を除去する。このとき、CF系ガスから分解したCによるカーボン系副生成物は、ボロン表面の凹部に堆積しやすく、カーボン系副生成物が堆積した部分は、その保護効果が大きくFの化学的作用によるボロン膜のエッチングが進行し難い。一方、ボロン表面の凸部においては、カーボン系副生成物は堆積し難く、堆積したカーボン系副生成物が酸素系イオンのイオンボンバードメント効果および酸化効果により除去されるとともに、Fの化学的作用によるボロンのエッチングが進行する。このように、ボロン膜表面は、エッチングしたくない凹部がカーボン系副生成物による保護によりエッチングが進行し難く、エッチングにより除去したい凸部が優先的にエッチングされ、ボロン膜表面は平坦化される(図8(b))。そして、ボロン膜表面に残留したカーボン系副生成物はアッシングにより除去される(図8(c))。

10

#### 【0042】

本実施形態の平坦化方法により、膜厚200nm程度までのボロン系膜の表面を、表面粗さRMSを1nm以下、さらには0.5nm以下という極めて高い平坦性を得ることができ、半導体装置に適用可能となる。

20

#### 【0043】

[第1の実施形態の平坦化方法を行うための処理装置の一例]

次に、本実施形態の平坦化方法を行うための処理装置の一例について説明する。

図9は、本実施形態の平坦化方法を行うための処理装置の一例を示す断面図である。

#### 【0044】

処理装置100は、チャンバ10内に載置台(ステージ)20とガスシャワーヘッド30とを対向配置した平行平板型(容量結合型)のプラズマエッチング装置として構成される。載置台20は下部電極として機能し、ガスシャワーヘッド30は上部電極として機能する。処理装置100は、さらに、ガス供給機構40、高周波電力供給装置50、および制御部60を有する。

30

#### 【0045】

チャンバ10は、略円筒状を有し、例えば表面が陽極酸化処理されたアルミニウムで構成されており、電氣的に接地されている。チャンバ10の底面には排気口11が形成されており、排気口11は排気配管12が接続されている。排気配管12には、真空ポンプや圧力制御バルブ等からなる排気装置13が接続されており、排気装置13によってチャンバ10内が排気されるとともに、チャンバ10内を所定の圧力(真空度)に制御する。チャンバ10の側壁にはボロン膜が形成された被処理基板である半導体ウエハW(以下単にウエハWと記す)を搬入出するためのウエハ搬入出口14が設けられており、ウエハ搬入出口14はゲートバルブGによって開閉される。そして、ゲートバルブGを開放した状態で、チャンバ10に対するウエハWの搬入および搬出が行われる。

40

#### 【0046】

載置台20は、チャンバ10の底部に設置され、その上に、ウエハWが載置されるようになっている。載置台20は、例えば、アルミニウム(Al)、チタン(Ti)、炭化ケイ素(SiC)等から形成されている。載置台20の上面には、ウエハを静電吸着するための静電チャック22が設けられている。静電チャック22は、絶縁体22bの間にチャック電極22aを挟み込んだ構造になっている。チャック電極22aには直流電圧源23が接続され、直流電圧源23からチャック電極22aに直流電圧が印加されることにより、クーロン力等の静電吸着力によってウエハWが静電チャック22に吸着される。

50

## 【 0 0 4 7 】

載置台 2 0 は、支持体 2 4 により支持されている。支持体 2 4 の内部には、冷媒流路 2 5 が形成されている。冷媒流路 2 5 には、冷媒供給配管 2 5 a および冷媒排出配管 2 5 b が接続されており、これらはチラーユニット 2 6 に接続されている。そして、チラーユニット 2 6 から出力された冷媒（例えば冷却水やブライン等）は、冷媒供給配管 2 5 a、冷媒流路 2 5、および冷媒排出配管 2 5 b を循環し、これにより載置台 2 0 および静電チャック 2 2 が冷却される。

## 【 0 0 4 8 】

静電チャック 2 2 には、その上のウエハ W の裏面にヘリウムガス（He）やアルゴンガス（Ar）等の伝熱ガスを供給する伝熱ガス供給ライン 2 7 が接続されており、伝熱ガス供給ライン 2 7 には、伝熱ガス供給源 2 8 から伝熱ガスが供給される。この伝熱ガスにより、冷媒の冷熱がウエハ W に伝達され、ウエハ W が所定温度に温度制御される。

10

## 【 0 0 4 9 】

なお、載置台 2 0 にはウエハ昇降ピン（図示せず）が静電チャックの表面に対し突没可能に設けられており、ウエハ昇降ピンを突出させた状態でウエハ W を受け渡しが行われるようになっている。

## 【 0 0 5 0 】

ガスシャワーヘッド 3 0 は円板状をなし、チャンバ 1 0 の上部に設けられた円環状のリップ 1 5 に、絶縁体からなるシールドリング 3 5 を介して嵌め込まれており、チャンバ 1 0 の天井部を構成する。ガスシャワーヘッド 3 0 は、図示するように電氣的に接地してもよいし、可変直流電源を接続して所定の直流（DC）電圧が印加されるようにしてもよい。

20

## 【 0 0 5 1 】

ガスシャワーヘッド 3 0 は、本体 3 1 を有し、本体 1 の上部中央にはガスを導入するガス導入口 3 3 が形成されている。本体 3 1 の内部には、中央部に第 1 ガス拡散室 3 1 a およびエッジ部に円環状の第 2 のガス拡散室 3 1 b が設けられている。ガス導入口 3 3 は第 1 ガス拡散室 3 1 a に接続され、ガス導入口 3 3 から分岐したガス導入路 3 4 が第 2 ガス拡散室 3 1 b に接続されている。本体 3 1 の底部には、第 1 ガス拡散室 3 1 a および第 2 ガス拡散室 3 1 b からチャンバ 1 0 内に臨むように多数のガス吐出孔 3 2 が形成されている。ガス導入口 3 3 には、後述するガス供給機構 4 0 のガス供給配管 4 1 が接続されており、ガス供給機構 4 0 からのガスが、ガス導入口 3 3 から第 1 ガス拡散室 3 1 a および第 2 ガス拡散室 3 1 b に導入され、ガス吐出孔 3 2 からチャンバ 1 0 内の載置台 2 0 に向けて吐出される。

30

## 【 0 0 5 2 】

ガス供給機構 4 0 は、CF 系ガス供給源 4 2 と、酸素含有ガス供給源 4 3 と、これらガス供給源からそれぞれ延びる配管 4 4 および 4 5 と、配管 4 4 および 4 5 からのガスをシャワーヘッド 3 0 に導くガス供給配管 4 1 とを有する。配管 4 4 にはマスフローコントローラのような流量制御器 4 6 および開閉バルブ 4 7 が設けられ、配管 4 5 には流量制御器 4 8 および開閉バルブ 4 9 が設けられている。なお、CF 系ガスは 1 種または複数種用いられ、CF 系ガス供給源および配管は、そのガスの種類の数だけ設けられる。

40

## 【 0 0 5 3 】

高周波電力供給装置 5 0 は、載置台 2 0 に 2 周波重畳の高周波電力を供給するものであり、プラズマ生成用の第 1 周波数の第 1 高周波電力を供給する第 1 高周波電源 5 2 と、バイアス電圧印加用の、第 1 周波数よりも低い第 2 周波数の第 2 高周波電力を供給する第 2 高周波電源 5 4 とを有する。第 1 高周波電源 5 2 は、第 1 整合器 5 3 を介して載置台 2 0 に電氣的に接続される。第 2 高周波電源 5 4 は、第 2 整合器 5 5 を介して載置台 2 0 に電氣的に接続される。第 1 高周波電源 3 2 は、例えば、4 0 M H z の第 1 高周波電力を載置台 2 0 に印加する。第 2 高周波電源 3 4 は、例えば、3 M H z の第 2 高周波電力を載置台 2 0 に印加する。なお、第 1 高周波電力は、ガスシャワーヘッド 3 0 に印加してもよい。

## 【 0 0 5 4 】

50

第1整合器53は、第1高周波電源52の内部（または出力）インピーダンスに負荷インピーダンスを整合させるもので、チャンバ10内にプラズマが生成されている時に第1高周波電源52の出力インピーダンスと負荷インピーダンスが見かけ上一致するように機能する。第2整合器55は、第2高周波電源54の内部（または出力）インピーダンスに負荷インピーダンスを整合させるもので、チャンバ10内にプラズマが生成されているときに第2高周波電源54の内部インピーダンスと負荷インピーダンスとが見かけ上一致するように機能する。

【0055】

第1高周波電源52からの高周波電力は、例えばパルス状にパワー変調して印加してもよい。パルスの周期は5～40kHz程度が好ましい。

10

【0056】

制御部60は、処理装置100の各構成部、例えばバルブ類、流量制御器、第1高周波電源52、第2高周波電源54、排気装置13、伝熱ガスの供給、冷媒の供給等を制御する。制御部60は、CPUを有する主制御部と、入力装置、出力装置、表示装置、および記憶装置を有している。記憶装置には、処理装置100で実行される処理を制御するためのプログラム、すなわち処理レシピが格納された記憶媒体がセットされ、主制御部は、記憶媒体に記憶されている所定の処理レシピを呼び出し、その処理レシピに基づいて処理装置100に所定の処理を行わせるように制御する。

【0057】

以上のように構成される処理装置100においては、まず、ゲートバルブGを開け、ウエハWをチャンバ10に搬入し、載置台20に載置するとともにゲートバルブGを閉じる。そして、チャンバ10内を排気装置13により排気するとともに、圧力調整バルブによりチャンバ10内を所定の真空度に圧力調整しつつ、直流電圧源23からチャック電極22aに直流電圧を印加することにより、ウエハWが静電チャック22に吸着され、保持される。

20

【0058】

次いで、処理ガスである、 $C_4F_8$ 、 $C_4F_6$ 、 $CH_2F_2$ 等のCF系ガスおよび $O_2$ ガスのような酸素含有ガスをチャンバ10内に供給しつつ、第1高周波電源52からプラズマ生成用の第1高周波電力を載置台20に供給してプラズマを生成するとともに、第2高周波電源54からバイアス電圧印加用の第2高周波電力を載置台20に供給してウエハWにイオンを引き込み、上述したメカニズムのボロン系膜の平坦化のためのプラズマ処理を行う。このとき、CF系ガスのトータル流量は10～100sccm、酸素含有ガス例えば $O_2$ ガスの流量は1～100sccmが好ましく、圧力は1.33～13.3Pa（10～100mTorr）が好ましい。

30

【0059】

その後、チャンバ10内に $O_2$ ガス等を供給しつつプラズマを生成し、ボロン系膜に残留するC（ポリマー）をアッシングにより除去する。

【0060】

以上のようなボロン系膜の平坦化処理の後、ウエハWの除電を行った後、ゲートバルブGを開いてウエハWを搬入出口14を介してチャンバ10から搬出する。

40

【0061】

〔実験例〕

次に、第1の実施形態の実験例について説明する。

ここでは、基板上に、ステージ温度：250、圧力：50mTorr、マイクロ波パワー：4.2kW、 $B_2H_6$ 流量：500sccm、時間：5minの条件で、マイクロ波プラズマ装置を用いたプラズマCVDにより、約150nmの厚さで形成されたボロン膜を、図9の処理装置を用いてステップ1のプラズマ処理工程、およびステップ2のアッシング工程を含む平坦化処理を行った。ステップ1のプラズマ処理工程においては、酸素含有ガスとして $O_2$ ガスを用い、CF系ガスのガス種、および $O_2$ ガスを含めたガス流量を以下の実験例1～4のように変化させた。

50

## 【0062】

## (a) 実験例 1

- ・CF系ガス
  - $C_4F_6$  : 43 sccm
  - $C_4F_8$  : 35 sccm
  - $CH_2F_2$  : 58 sccm
- ・ $O_2$ ガス : 95 sccm

## (b) 実験例 2

- ・CF系ガス
  - $C_4F_6$  : 43 sccm
- ・ $O_2$ ガス : 43 sccm

## (c) 実験例 3

- ・CF系ガス
  - $C_4F_8$  : 35 sccm
- ・ $O_2$ ガス : 17 sccm

## (d) 実験例 4

- ・CF系ガス
  - $CH_2F_2$  : 58 sccm
- ・ $O_2$ ガス : 58 sccm

## 【0063】

ステップ1の他の条件は、いずれも以下の共通条件とした。

- ・圧力：20 mTorr (2.7 Pa)
- ・高周波パワー
  - 第1高周波電源 (40 MHz) : 700 W
  - 第2高周波電源 (3 MHz) : 7800 W
- ・プラズマパルス：あり (周波数 10 kHz)
- ・ステージ温度：60

## 【0064】

また、ステップ2のアッシング工程の条件は、いずれも以下の通りとした。

- ・圧力：100 mTorr (13.3 Pa)
- ・高周波パワー
  - 第1高周波電源 (40 MHz) : 600 W
  - 第2高周波電源 (3 MHz) : 50 W
- ・ $O_2$ ガス流量：600 sccm
- ・時間：60 sec

## 【0065】

これらの処理後のボロン膜の平坦性を確認した。なお、実験例1においては、アッシング工程の後、希フッ酸 (100 : 1 DFH) : 1 min、純水 (DIW) : 5 min のウエット洗浄処理後の平坦性も確認した。

## 【0066】

図10は、実験例1における各段階のSEM写真である。図10に示すように、イニシャル (as depo) のボロン膜の表面粗さ RMS が 2.4 nm であったのに対し、実験例1のプラズマ処理工程で平坦化が進み、アッシング工程を経た後に実際に表面粗さを測定したところ、RMS が 0.3 nm という極めて高い平坦性が得られた。また、その後にウエット洗浄処理を行うことにより、RMS が 0.2 nm となり、さらに平坦性が向上した。

## 【0067】

図11は、イニシャル (as depo) のボロン膜と、実験例1~4の平坦化処理を行った際のボロン膜表面のAFM写真である。図11に示すように、実験例1~4はいずれもRMSが1nm以下であり、良好な平坦性が得られた。これらの中では、CF系ガス

10

20

30

40

50

としてHを含む $\text{CH}_2\text{F}_2$ のみを用いた実験例4ではRMSが0.7nmであるのに対し、 $\text{C}_4\text{F}_6$ 、 $\text{C}_4\text{H}_8$ のいずれかまたは両方を用いた実験例1~3ではRMSが0.3nmであった。

#### 【0068】

次に、ステップ1のプラズマ処理における $\text{O}_2$ ガスの影響を確認した。

ここでは、実験例5および実験例6として、上記と同様の条件で成膜されたボロン膜に対し、実験例1におけるプラズマ処理における $\text{O}_2$ ガス流量のみを75sccm、115sccmと変化させ、他の条件は実験例1と全く同じ条件でプラズマ処理およびアッシング処理を行い、ボロン膜の平坦性を評価した。

#### 【0069】

その結果を図12に示す。図12は、イニシャル(as depo)のボロン膜と、 $\text{O}_2$ ガス流量を75sccmとした実験例5、 $\text{O}_2$ ガス流量を95sccmとした実験例1、 $\text{O}_2$ ガス流量を115sccmとした実験例6の平坦化処理を行った際のボロン膜表面のAFM写真である。図13に示すように、イニシャル(as depo)のボロン膜の表面粗さRMSが2.4nmであるのに対し、 $\text{O}_2$ ガス流量を75sccmとした実験例5ではRMS=1.0nm、 $\text{O}_2$ ガス流量を95sccmとした実験例1ではRMS=0.3nm、 $\text{O}_2$ ガス流量を115sccmとした実験例6ではRMS=0.2nmとなり、ステップ1のプラズマ処理における $\text{O}_2$ ガス流量が平坦性に寄与していることがわかる。すなわち、CF系ガスと $\text{O}_2$ ガスとの流量比を最適化して、 $\text{O}_2$ プラズマによりカーボン系副生成物を適度に除去することによりボロン膜表面の平坦性が良好になるものと考えられる。

#### 【0070】

<第2の実施形態>

次に、第2の実施形態について説明する。

図13は、第2の実施形態に係るボロン系膜の形成方法を示すフローチャートである。本実施形態に係るボロン系膜の形成方法は、基板上にボロン系膜を成膜する工程(ステップ11)と、成膜されたボロン系膜の表面を平坦化処理する工程(ステップ12)とを有する。

#### 【0071】

ステップ11のボロン系膜の成膜は、半導体装置の製造に用いられる一般的な薄膜形成技術によって行うことができ、熱CVD、プラズマCVD、ALD、PVDのいずれでもよいが、特に、膜質が良好なボロン系膜が得られるプラズマCVDが好ましい。プラズマCVDの中では、低電子温度かつラジカル主体であり、低ダメージで高密度のプラズマを生成可能なマイクロ波プラズマCVDが特に好ましい。ボロン系膜は、ボロンを50at.%以上有するボロンを主体とする膜であり、ボロンおよび不可避不純物からなるボロン膜であってもよいし、ボロンに意図的に窒素(N)、炭素(C)、珪素(Si)等の他の元素を添加した膜であってもよい。高いエッチング耐性を得る観点からは、他の添加元素を含まないボロン膜が好ましい。CVDやALDでボロン系膜を成膜する場合は、膜中に成膜原料等に由来の不純物として主に水素(H)が5~15at.%程度含まれる。

#### 【0072】

ステップ12の平坦化工程は第1の実施形態の平坦化方法と同様に行われる。すなわち、ステップ11で成膜されたボロン系膜に対し、第1の実施形態のステップ1と同様にCF系ガスおよび酸素含有ガスを含む処理ガスを用いたプラズマ処理を行い、引き続きステップ2と同様にアッシングを行う。また、第1の実施形態と同様、アッシングの後、希フッ酸(DHF)等によるウェット洗浄処理を行ってもよい。

#### 【0073】

本実施形態により、200nm程度までの膜厚で、表面粗さRMSが1nm以下、さらには0.5nm以下という極めて高い平坦性を有するボロン系膜を形成することができる。

#### 【0074】

10

20

30

40

50

ところで、成膜するボロン系膜が厚くなると、核の成長が進み、表面のうねり等が大きくなり、表面粗さは大きくなる傾向にある。例えば、上述した実験例 1 に示すように、プラズマ CVD により成膜したボロン膜（ステージ温度：250、圧力：50 mTorr、マイクロ波パワー：4.2 kW、 $B_2H_6$ ：500 sccm、時間：5 min）は、膜厚が 150 nm では、as depo で表面粗さ RMS が 2.4 nm であったが、成膜時間を長くして膜厚を 600 nm、1800 nm と厚くすると、それぞれ図 14 (a)、(b) の SEM 写真および AFM 写真に示すように、as depo の表面粗さが全体的に粗くなり、膜厚が 600 nm では  $RMS = 3.9$  nm、膜厚が 1800 nm では  $RMS = 6.7$  nm となった。

#### 【0075】

このため、膜厚が 150 nm では平坦化処理後に  $RMS = 0.3$  nm と極めて高い平坦性が得られたが、膜厚が 600 nm、1800 nm では、平坦化処理後の表面は、図 15 (a)、(b) の SEM 写真および AFM 写真に示すように、微視的には非常に平坦ではあるものの、as depo 状態の大きい凹凸が残ってしまい、膜厚が 600 nm では  $RMS = 0.9$  nm、膜厚が 1800 nm では  $RMS = 3.1$  nm と膜厚が 150 nm の場合の 0.3 nm と比べて粗くなってしまふ。

#### 【0076】

そこで、ボロン系膜の成膜と、平坦化処理とを所定回繰り返す。好ましくは、図 16 に示すように、基板の上にボロン系膜を平坦化処理により所望の平坦度が得られる程度の膜厚で成膜する工程（ステップ 21）と、成膜されたボロン系膜の表面を平坦化処理する工程（ステップ 22）とを所定回数繰り返す。これにより、膜厚が厚く、かつ表面の平坦性が高いボロン系膜を形成することができる。

#### 【0077】

このとき、連続性の良い膜を形成するために、アッシング処理で除去しきれなかった C やステップ 22 等で形成された酸化層の除去を目的としたウエット処理やプラズマ処理をステップ 21 の直前に行ってもよい。

#### 【0078】

[ 第 2 の実施形態のボロン系膜の形成方法を行うための処理システムの一例 ]

次に、本実施形態のボロン系膜の形成方法を行うための処理システムの一例について説明する。

図 17 は、本実施形態のボロン系膜の形成方法を行うための処理システムの一例を示す水平断面図である。

#### 【0079】

図 17 に示すように、処理システム 300 は、平坦化処理のための処理装置 100 を 2 つ、ボロン系膜を成膜するための成膜装置 200 を 2 つ有している。処理装置 100 は、第 1 の実施形態の処理装置 100 と同じ構成を有する。これらは、平面形状が七角形をなす真空搬送室 301 の 4 つの壁部にそれぞれゲートバルブ G を介して接続されている。真空搬送室 301 内は、真空ポンプにより排気されて所定の真空度に保持される。すなわち、処理システム 300 は、マルチチャンバタイプの真空処理システムであり、上述したステップ 11 の成膜工程とステップ 12 の平坦化処理工程とを、真空を破ることなく連続して行えるものである。

#### 【0080】

成膜装置 200 は、通常用いられる薄膜形成手法を行える装置であればよく、上述したように、熱 CVD、プラズマ CVD、ALD、PVD のいずれを行う装置であってもよいが、特に、膜質が良好なボロン系膜が得られるプラズマ CVD 装置が好ましく、中でも、後述するようなマイクロ波プラズマ CVD 装置が好ましい。

#### 【0081】

また、真空搬送室 301 の他の 3 つの壁部には 3 つのロードロック室 302 がゲートバルブ G1 を介して接続されている。ロードロック室 302 を挟んで真空搬送室 301 の反対側には大気搬送室 303 が設けられている。3 つのロードロック室 302 は、ゲートバ

10

20

30

40

50

ルブG2を介して大気搬送室303に接続されている。ロードロック室302は、大気搬送室303と真空搬送室301との間でシリコンウエハWを搬送する際に、大気圧と真空との間で圧力制御するものである。

【0082】

大気搬送室303のロードロック室302取り付け壁部とは反対側の壁部にはウエハWを収容するキャリア(F O U P等)Cを取り付ける3つのキャリア取り付けポート305を有している。また、大気搬送室303の側壁には、シリコンウエハWのアライメントを行うアライメントチャンバ304が設けられている。大気搬送室303内には清浄空気のダウフローが形成されるようになっている。

【0083】

真空搬送室301内には、搬送機構306が設けられている。搬送機構306は、酸化膜除去装置100、金属膜成膜装置200、ロードロック室302に対してシリコンウエハWを搬送する。搬送機構306は、独立に移動可能な2つの搬送アーム307a, 307bを有している。

【0084】

大気搬送室303内には、搬送機構308が設けられている。搬送機構308は、キャリアC、ロードロック室302、アライメントチャンバ304に対してシリコンウエハWを搬送するようになっている。

【0085】

処理システム300は全体制御部310を有している。全体制御部310は、処理装置100および成膜装置200にそれぞれ設けられた制御部に制御指令を送るとともに、真空搬送室301の排気機構、ガス供給機構や搬送機構306、ロードロック室302の排気機構やガス供給機構、大気搬送室303の搬送機構308、ゲートバルブG、G1、G2の駆動系等を制御する。

【0086】

このように構成される処理システム300においては、まず、搬送機構308により大気搬送室303に接続されたキャリアCから被処理基板であるウエハWを取り出し、アライメントチャンバ304を経由して、いずれかのロードロック室302内に搬入し、ロードロック室302内を真空排気した後、搬送機構306の搬送アーム307a, 307bのいずれかによりロードロック室302からウエハWを取り出し、いずれかの成膜装置200に搬入し、ボロン系膜の成膜処理を行う。

【0087】

成膜処理が終了後、搬送機構306の搬送アーム307a, 307bのいずれかにより、その中のウエハWを搬出し、処理装置100に搬入してボロン系膜の平坦化処理を行う。

【0088】

ウエハWに対し、必要に応じて成膜装置200による成膜処理と、処理装置100による平坦化処理とを繰り返してもよい。

【0089】

搬送機構306の搬送アーム307a, 307bのいずれかにより、処理後のウエハWをいずれかのロードロック室302内に搬送し、そのロードロック室302内を大気に戻し、搬送機構308にてロードロック室302内のウエハWをキャリアCに戻す。以上の処理をキャリアC内の全てのウエハWについて行う。

【0090】

この処理システム300によれば、ボロン膜の成膜と平坦化処理とを*in situ*で行うことができる。

【0091】

[成膜装置]

次に、ボロン系膜を成膜するための成膜装置200の一例について説明する。

図18は成膜装置200の一例を示す断面図である。成膜装置200は、ボロン系膜と

10

20

30

40

50

してボロン膜を成膜するためのマイクロ波プラズマCVD装置として構成される。

【0092】

この成膜装置200は、気密に構成され、接地された略円筒状のチャンバ101を有している。処理容器101は、例えばアルミニウムおよびその合金等の金属材料によって構成されている。チャンバ101の上部にはマイクロ波プラズマ源120が設けられている。マイクロ波プラズマ源120は、例えばRLSA（登録商標）マイクロ波プラズマ源として構成される。

【0093】

チャンバ101の底壁の略中央部には円形の開口部110が形成されており、底壁にはこの開口部110と連通し、下方に向けて突出する排気室111が設けられている。

10

【0094】

チャンバ101内にはウエハWを水平に支持するためのAlN等のセラミックスからなる円板状の載置台102が設けられている。この載置台102は、排気室111の底部中央から上方に延びる円筒状のAlN等のセラミックスからなる支持部材103により支持されている。また、載置台102には抵抗加熱型のヒーター105が埋め込まれており、このヒーター105はヒーター電源（図示せず）から給電されることにより載置台102が加熱され、ウエハWが所定の温度に加熱される。また、載置台102には電極107が埋め込まれており、電極107には整合器108を介してバイアス電圧印加用の高周波電源109が接続されている。

【0095】

載置台102には、ウエハWを支持して昇降させるためのウエハ支持ピン（図示せず）がサセプタ2の表面に対して突没可能に設けられている。

20

【0096】

排気室111の側面には排気管123が接続されており、この排気管123には真空ポンプや自動圧力制御バルブ等を含む排気機構124が接続されている。排気機構124の真空ポンプを作動させることによりチャンバ1内のガスが、排気室111の空間111a内へ均一に排出され、排気管123を介して排気され、自動圧力制御バルブによりチャンバ101内を所定の真空度に制御可能となっている。

【0097】

チャンバ101の側壁には、成膜装置200に隣接する真空搬送室301との間でウエハWの搬入出を行うための搬入出口125が設けられており、この搬入出口125はゲートバルブGにより開閉される。

30

【0098】

チャンバ101の上部は開口部となっており、その開口部の周縁部がリング状の支持部127となっている。マイクロ波プラズマ源120はこの支持部127に支持される。

【0099】

マイクロ波プラズマ源120は、誘電体、例えば石英やAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等のセラミックスからなる円板状のマイクロ波透過板128と、複数のスロットを有する平面スロットアンテナ131と、遅波材133と、同軸導波管137と、モード変換部138と、導波管139と、マイクロ波発生器140とを有している。

40

【0100】

マイクロ波透過板128は、支持部材127にシール部材129を介して気密に設けられている。したがって、チャンバ101は気密に保持される。

【0101】

平面アスロットアンテナ131は、マイクロ波透過板128に対応する円板状をなし、マイクロ波透過板128に密着するように設けられている。この平面スロットアンテナ131はチャンバ101の側壁上端に係止されている。平面アンテナ31は導電性材料からなる円板で構成されている。

【0102】

平面アンテナ131は、例えば表面が銀または金メッキされた銅板またはアルミニウム

50

板からなり、マイクロ波を放射するための複数のスロット 132 が所定パターンで貫通するように形成された構成となっている。スロット 132 のパターンは、マイクロ波が均等に放射されるように適宜設定される。例えば、パターンの例としては、T 字状に配置された 2 つのスロット 132 を一対として複数対のスロット 132 が同心円状に配置されているものを挙げることができる。スロット 132 の長さや配列間隔は、マイクロ波の実効波長 ( $g$ ) に応じて決定され、例えばスロット 132 は、それらの間隔が  $g/4$ 、 $g/2$  または  $g$  となるように配置される。なお、スロット 132 は、円形状、円弧状等の他の形状であってもよい。さらに、スロット 132 の配置形態は特に限定されず、同心円状のほか、例えば、螺旋状、放射状に配置することもできる。

#### 【0103】

遅波材 133 は、平面アンテナ 131 の上面に密着して設けられている。遅波材 133 は、真空よりも大きい誘電率を有する誘電体、例えば石英、セラミックス ( $Al_2O_3$ )、ポリテトラフルオロエチレン、ポリイミドなどの樹脂からなる。遅波材 133 はマイクロ波の波長を真空中より短くして平面アンテナ 131 を小さくする機能を有している。

#### 【0104】

マイクロ波透過板 128 および遅波材 133 の厚さは、遅波材 133、平面スロットアンテナ 131、マイクロ波透過板 128、およびプラズマで形成される等価回路が共振条件を満たすように調整される。遅波材 133 の厚さを調整することにより、マイクロ波の位相を調整することができ、平面アンテナ 131 の接合部が定在波の「はら」になるように厚さを調整することにより、マイクロ波の反射が極小化され、マイクロ波の放射エネルギーが最大となる。また、遅波材 133 とマイクロ波透過板 128 を同じ材質とすることにより、マイクロ波の界面反射を防止することができる。

#### 【0105】

なお、平面アンテナ 131 とマイクロ波透過板 128 との間、また、遅波材 133 と平面アンテナ 131 との間は、離間して配置されていてもよい。

#### 【0106】

チャンバ 101 の上面には、これら平面アンテナ 131 および遅波材 133 を覆うように、例えばアルミニウムやステンレス鋼、銅等の金属材料からなる冷却ジャケット 134 が設けられている。冷却ジャケット 134 には、冷却水流路 134a が形成されており、そこに冷却水を通流させることにより、遅波材 133、平面アンテナ 131、マイクロ波透過板 128 を冷却するようになっている。

#### 【0107】

同軸導波管 137 は、冷却ジャケット 134 の上壁の中央形成された開口部の上方から挿入されている。同軸導波管 137 は、中空棒状の内導体 137a と円筒状の外導体 137b が同心状に配置されてなる。内導体 137a の下端は平面スロットアンテナ 131 に接続されている。同軸導波管 137 は上方に延びている。モード変換器 138 は、同軸導波管 137 の上端に接続されている。モード変換器 138 には、水平に延びる断面矩形状の導波管 139 の一端が接続されている。導波管 139 の他端にはマイクロ波発生器 140 が接続されている。導波管 139 にはマッチング回路 141 が介在されている。

#### 【0108】

マイクロ波発生器 140 は、例えば周波数が 2.45 GHz のマイクロ波を発生し、発生したマイクロ波は TE モードで導波管 139 を伝播し、モード変換器 138 でマイクロ波の振動モードが TE モードから TEM モードへ変換され、同軸導波管 137 を介して遅波材 133 に向けて伝播する。そして、マイクロ波は、遅波材 133 の内部を径方向外側に向かって放射状に広がり、平面スロットアンテナ 131 のスロット 132 から放射され、マイクロ波透過板 128 を透過してチャンバ 101 内のマイクロ波透過板 128 の直下領域に電界を生じさせ、マイクロ波プラズマを生成させる。マイクロ波透過板 128 の下面の一部には、導入されたマイクロ波による定在波の発生を容易にするためのテーパ上に凹んだ環状の凹部 128a が形成されており、マイクロ波プラズマが効率よく生成可能となっている。

10

20

30

40

50

## 【0109】

なお、マイクロ波の周波数としては、2.45 GHz の他、8.35 GHz、1.98 GHz、860 MHz、915 MHz 等、種々の周波数を用いることができる。

## 【0110】

成膜装置 200 は、ボロン含有ガスを含む処理ガスを供給するためのガス供給部 106 を有している。ボロン含有ガスとしては、ジボラン ( $B_2H_6$ ) ガス、三塩化ホウ素 ( $BCl_3$ ) ガス、アルキルボランガス、デカボランガス等を挙げることができる。アルキルボランガスとしては、トリメチルボラン ( $B(CH_3)_3$ ) ガス、トリエチルボラン ( $B(C_2H_5)_3$ ) ガスや、 $B(R1)(R2)(R3)$ 、 $B(R1)(R2)H$ 、 $B(R1)H_2$  ( $R1, R2, R3$  はアルキル基) で表されるガス等を挙げることができる。これらの中では  $B_2H_6$  ガスを好適に用いることができる。

10

## 【0111】

また、処理ガスはプラズマ励起用の不活性ガスや水素 ( $H_2$ ) ガスを含んでおり、不活性ガスとしては、希ガス例えば He ガスや Ar ガスなどが用いられる。  $N_2$  ガスを用いることもできるが、窒化ホウ素の生成を抑制する観点から、He ガスや Ar ガスなどを用いることが好ましい。以下では、ボロン含有ガスとして  $B_2H_6$  ガス、プラズマ励起用の不活性ガスとして He ガスを含む反応ガスを用いる場合を例にして説明する。

## 【0112】

ガス供給部 106 は、ウエハ W の中央に向かってガスを吐出する第 1 のガス供給部 161 と、ウエハ W の外方からガスを吐出する第 2 のガス供給部 162 とを備えている。第 1 のガス供給部 161 は、モード変換器 138 および同軸導波管 37 の内導体 37a の内部に形成されたガス流路 163 を含み、このガス流路 163 の先端のガス供給口 164 は、例えばマイクロ波透過板 128 の中央部において、チャンバ 101 内に開口している。ガス流路 164 には、配管 165 および 166 が接続されている。配管 165 にはボロン含有ガスである  $B_2H_6$  ガスを供給する  $B_2H_6$  ガス供給源 167 が接続されており、配管 166 には不活性ガスである He ガスを供給する He ガス供給源 168 が接続されている。配管 165 には、マスフローコントローラのような流量制御 165a および開閉バルブ 165b が設けられ、配管 166 には、流量制御器 166a および開閉バルブ 166b が設けられている。

20

## 【0113】

第 2 のガス供給部 162 は、処理容器 1 の内壁に沿ってリング状に設けられたシャワーリング 170 を備えている。シャワーリング 170 には、環状に設けられたバッファ室 171 と、バッファ室 171 から等間隔でチャンバ 101 内に臨むように設けられた複数のガス吐出口 172 とが設けられている。バッファ室 171 には、チャンバ 101 に向かうガス供給路 173 が形成されている。配管 165 および 166 からは、それぞれ配管 174 および 175 が分岐しており、配管 174 および 175 は合流してシャワーリング 170 のバッファ室 171 に接続されている。配管 174 には、流量制御 174a および開閉バルブ 174b が設けられ、配管 175 には、流量制御器 175a および開閉バルブ 175b が設けられている。

30

## 【0114】

本例では、第 1 のガス供給部 161 および第 2 のガス供給部 162 には、同じガス供給源 167、168 から同じ種類のボロン含有ガスや不活性ガスが、それぞれ流量を調整された状態で供給され、それぞれ、マイクロ波透過板 128 の中央およびチャンバ 101 の周縁からチャンバ 101 内に吐出される。なお、成膜処理の種別によっては、第 1 のガス供給部 161 および第 2 のガス供給部 162 から別個のガスを供給することもでき、それらの流量比等を個別に調整することもできる。

40

## 【0115】

第 1、第 2 のガス供給部 161、162 からは、例えば 1000 ~ 10000 sccm の範囲、ボロン膜の成膜速度を向上させるため、好適には 2000 ~ 10000 sccm の範囲の流量の処理ガスが供給される。

50

## 【0116】

なお、ガス供給部106は、第1、第2のガス供給部161、162、 $B_2H_6$ ガス供給源167、Heガス供給源168、配管、流量制御器、バルブ等を全て含む。

## 【0117】

成膜装置200は、制御部150を有している。制御部150は、成膜装置200の各構成部、例えばバルブ類、流量制御器、マイクロ波発生器140、ヒーター電源、高周波電源109等を制御する。制御部150は、CPUを有する主制御部と、入力装置、出力装置、表示装置、および記憶装置を有している。記憶装置には、成膜装置200で実行される処理を制御するためのプログラム、すなわち処理レシピが格納された記憶媒体がセットされ、主制御部は、記憶媒体に記憶されている所定の処理レシピを呼び出し、その処理

10

## 【0118】

以上のように構成される成膜装置200においては、まず、ゲートバルブGを開け、ウエハWをチャンバ101に搬入し、載置台102に載置するとともにゲートバルブGを閉じる。そして、チャンバ101内を排気装置13により排気するとともに、圧力調整バルブによりチャンバ101内の圧力を例えば0.67Pa~33.3Pa(5mTorr~250mTorr)に調圧する。そして、載置台120内のヒーター105によりウエハWを成膜温度、例えば60~500の範囲内の温度に安定化させる。

## 【0119】

次いで、第1のガス供給部161および第2のガス供給部162から、 $B_2H_6$ ガス( $B_2H_6$ 濃度:10vol%、Heガス希釈)およびHeガスを、例えば各々200sccm、800sccmの流量でチャンバ101内に導入するとともに、マイクロ波プラズマ源120のマイクロ波発生器140からチャンバ101内に例えば2~5kWのマイクロ波を導入する。このとき、高周波電源109から載置台102にバイアス電圧を印加する。

20

## 【0120】

誘電体窓41の下面の直下の領域はプラズマが生成されるプラズマ生成領域であり、その領域ではプラズマの電子温度が比較的高い。プラズマ生成領域のプラズマは、その下方側に拡散していき、プラズマ拡散領域が形成される。このプラズマ拡散領域は、プラズマの電子温度が比較的低い領域であり、載置台102上のウエハWはこの拡散領域に存在する。マイクロ波プラズマは本質的にラジカル主体で高密度のプラズマを生成可能であるから、ウエハWには低電子温度かつラジカル主体であり、低ダメージかつ高密度プラズマが作用し、良好なボロン膜を成膜することができる。

30

## 【0121】

このとき、例えば $B_2H_6$ ガスなどのボロン含有ガスを用い、当該ボロン含有ガスを不活性ガス(HeガスやArガス)、または水素ガスで希釈して反応ガスを構成すると、上述の成膜条件(成膜圧力、成膜温度)下でウエハWの表面に成膜されたボロン膜には、ボロンに加え、5~15原子%程度の範囲内で不可避免的に水素が含まれる。一方、酸素や窒素は、大気中に存在するこれらの成分が不可避成分として取り込まれる程度であり、ボロン膜中の原子濃度としては、1.0原子%未満となる。

40

## 【0122】

所定厚さのボロン膜を成膜した後、ガス供給部106からの $B_2H_6$ ガスの供給を停止し、チャンバ101内をHeガスによりパージする。続いて、処理容器2内を所定の圧力まで真空引きして、チャンバ101内を所定の真空雰囲気を設定し、ゲートバルブGを開き、搬入出口125を介してボロン膜が形成されたウエハWを搬出する。

## 【0123】

なお、ボロン含有ガスの他に他の添加ガスを供給して、ボロンの他に他の元素を意図的に添加したボロン系膜を成膜してもよい。また、成膜装置としては、以上のようなマイクロ波プラズマCVDを行う装置以外に、図10のような平行平板型のプラズマ処理装置を用い、ボロン含有ガスをプラズマ化してプラズマCVDを行うこともできる。

50

## 【 0 1 2 4 】

[ ボロン膜の成膜と平坦化処理を行える処理装置の例 ]

次に、ボロン膜の成膜と平坦化処理を同一チャンバ内で行える処理装置の例について説明する。

図 19 は、このような処理装置を示す断面図である。図 19 の処理装置 400 は、基本構成は図 10 の処理装置 100 と同様であり、図 9 の処理装置 100 と同じものには同じ符号を付して説明を省略する。

## 【 0 1 2 5 】

本例の処理装置 400 の処理装置 100 と異なるところは、ガス供給機構 40 の代わりに、CF系ガスと酸素含有ガスに加えて、ボロン含有ガス ( $B_2H_6$  ガス) および不活性ガス (He ガス) を供給可能なガス供給機構 410 を有することである。

10

## 【 0 1 2 6 】

すなわち、ガス供給機構 410 は、ガス供給機構 40 と同様、CF系ガス供給源 42 と、酸素含有ガス供給源 43 と、これらガス供給源からそれぞれ延びる配管 44 および 45 と、配管 44 に設けられた流量制御器 46 および開閉バルブ 47 と、配管 45 に設けられた流量制御器 48 および開閉バルブ 49 とを有する他、 $B_2H_6$  ガス供給源 411 と、He ガス供給源 412 と、これらガス供給源からそれぞれ延びる配管 413 および 414 と、配管 413 に設けられた流量制御器 415 および開閉バルブ 416 と、配管 414 に設けられた流量制御器 417 および開閉バルブ 418 とを有している。

20

## 【 0 1 2 7 】

このような構成により、 $B_2H_6$  ガスおよび He ガスをチャンバ 10 内に供給しつつ第 1 高周波電源 52 から載置台 20 に高周波電力を印加して生成されるプラズマによりボロン膜を成膜し、次いでチャンバ 10 をパージした後、CF系ガスおよび酸素含有ガスを供給しつつ第 1 高周波電源 52 から載置台 20 に高周波電力を印加して生成されるプラズマにより平坦化処理を行うことができる。

## 【 0 1 2 8 】

処理装置 400 によれば、ボロン膜の成膜と平坦化処理を一つのチャンバで行うことができ、極めて高い効率により平坦性の良好なボロン膜を形成することができる。

## 【 0 1 2 9 】

< 他の適用 >

以上、本発明の実施の形態について説明したが、本発明は上記実施形態に限定されることなく本発明の思想の範囲内で種々変形可能である。

30

## 【 0 1 3 0 】

例えば、上記実施形態では、ボロン系膜の用途としてハードマスクを示したが、これに限らず、薄膜用途では拡散防止用のバリア膜等の他の用途にも適用可能である。

## 【 0 1 3 1 】

また、上記実施の形態においては、主にボロン膜について説明したが、本発明の原理上、ボロンに他の添加元素を意図的に加えたボロン系膜、例えばボロンリッチな BN 膜やボロンリッチな BC 膜であっても本発明により平坦性の良好な表面が得られることはいうまでもない。

40

## 【 0 1 3 2 】

さらに、上記実施の形態で説明した平坦化のための処理装置、ボロン系膜の成膜のための成膜装置、ボロン系膜の成膜および平坦化処理を行うための処理システムおよび処理装置は例示に過ぎず、他の種々の構成を有する装置により本発明を実施できることもいうまでもない。

## 【 符号の説明 】

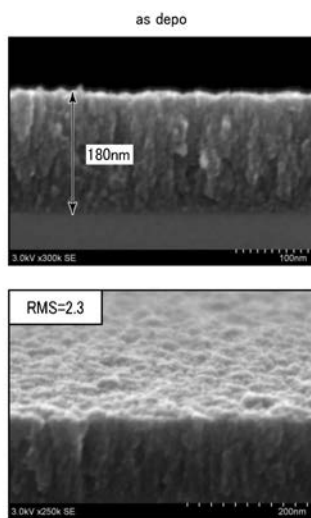
## 【 0 1 3 3 】

- 10, 101 ; チャンバ
- 13, 124 ; 排気装置
- 20, 102 ; 載置台

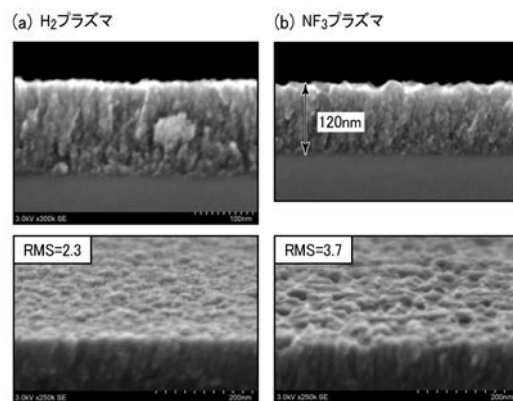
50

- 3 0 ; シャワーヘッド
- 4 0 ; ガス供給機構
- 5 0 ; 高周波電力供給装置
- 6 0 , 1 5 0 ; 制御部
- 1 0 0 , 4 0 0 ; 処理装置
- 1 0 6 ; ガス供給部
- 1 2 0 ; マイクロ波プラズマ源
- 2 0 0 ; 成膜装置
- 3 0 0 ; 処理システム
- W ; 半導体ウエハ

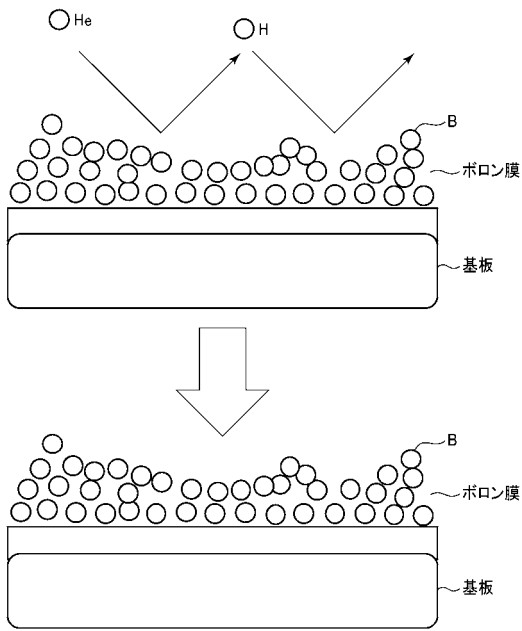
【 図 1 】



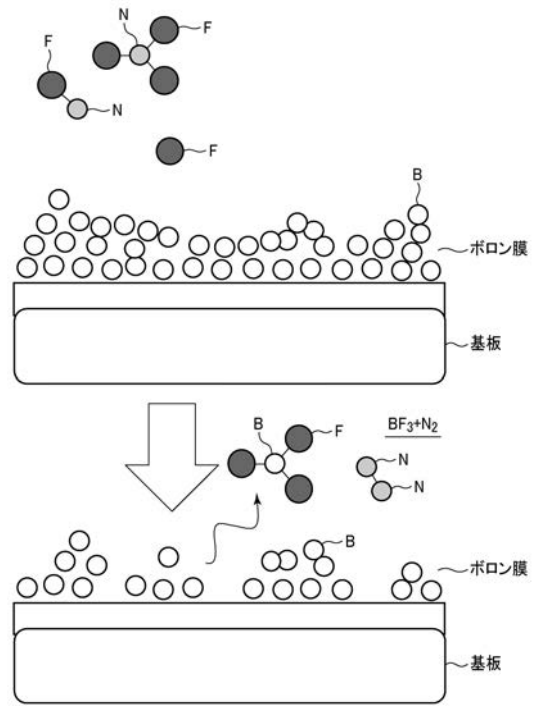
【 図 2 】



【 図 3 】

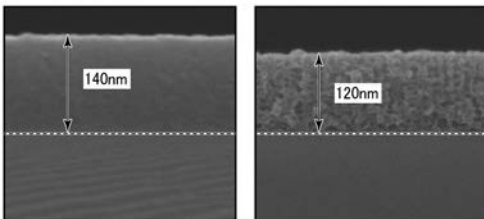


【 図 4 】

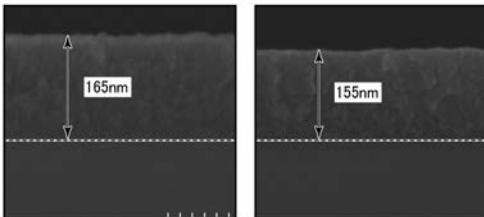


【 図 5 】

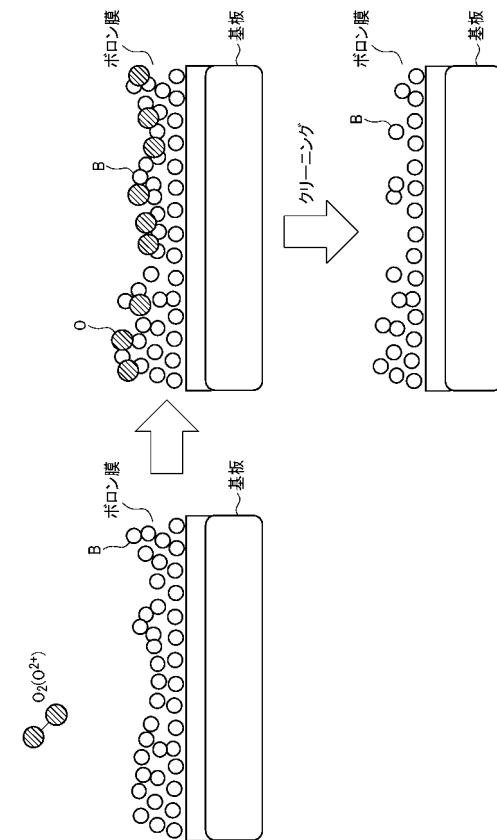
(a)  $O_2$ アニール600°C、30min



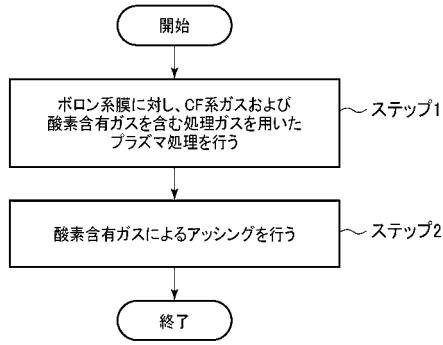
(b)  $O_2$ プラズマ10min



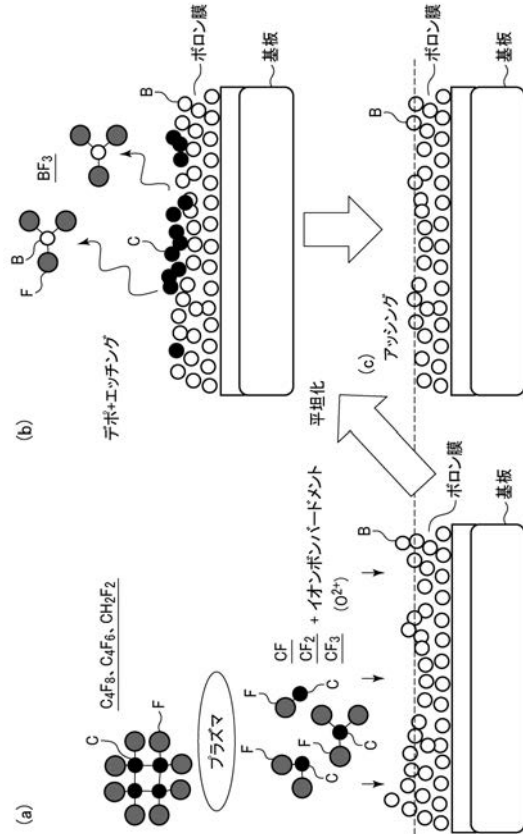
【 図 6 】



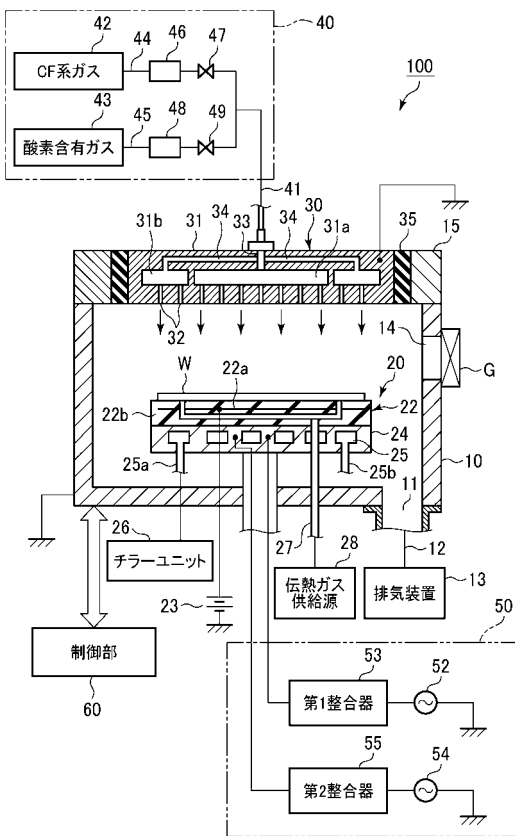
【 図 7 】



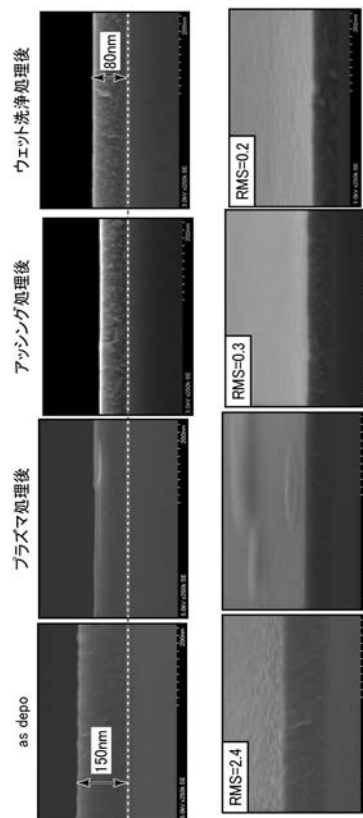
【 図 8 】



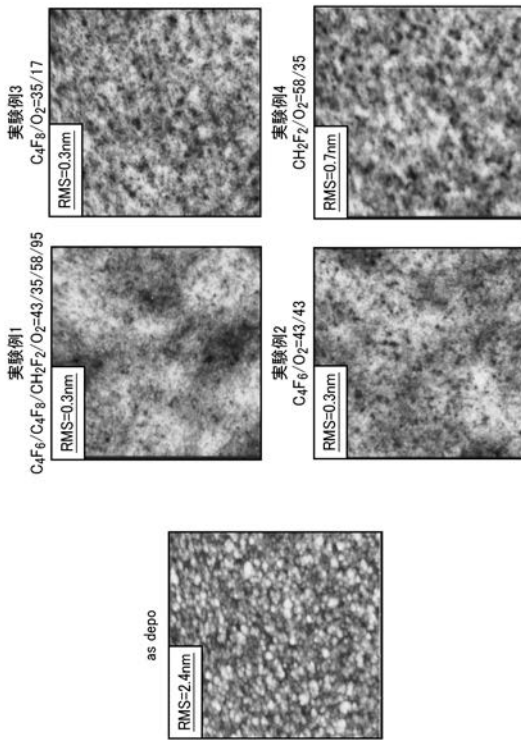
【 図 9 】



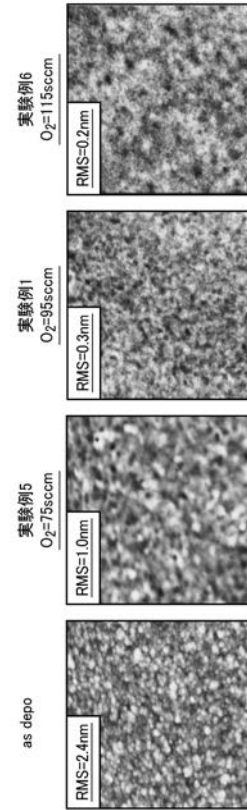
【 図 10 】



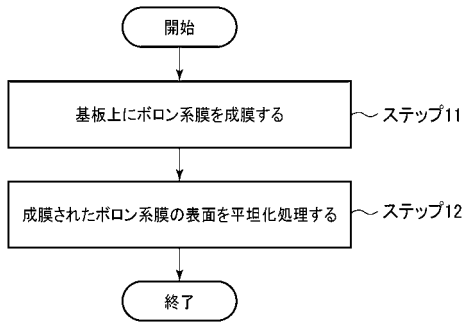
【 図 1 1 】



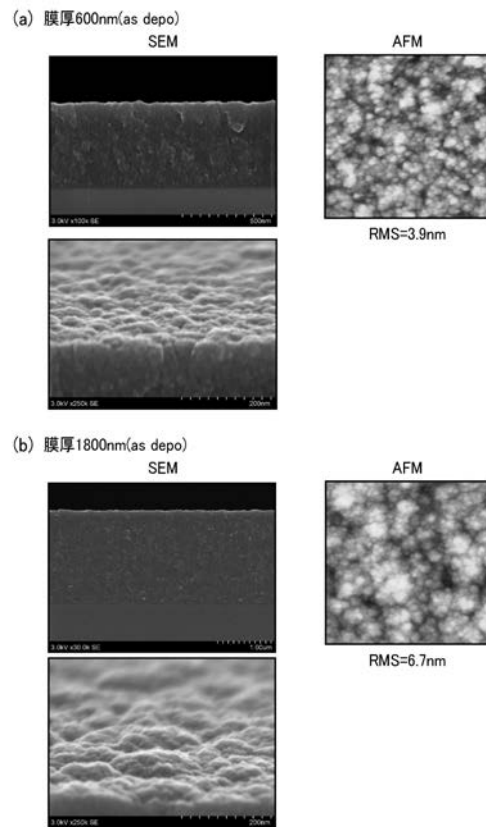
【 図 1 2 】



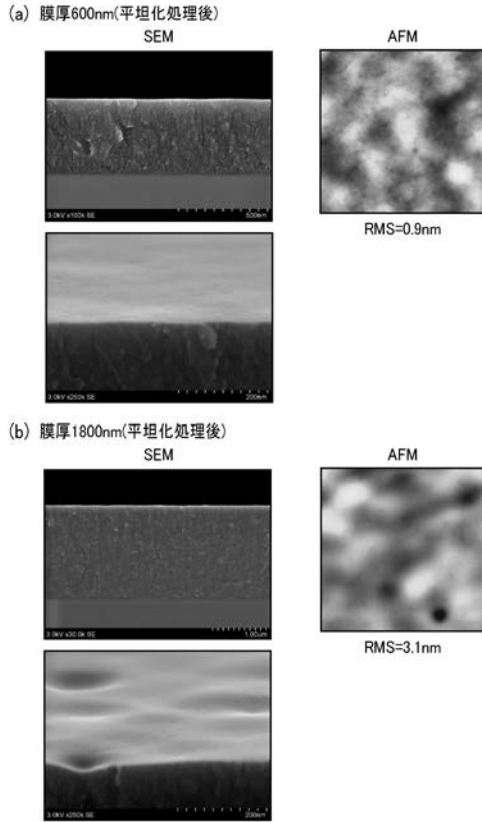
【 図 1 3 】



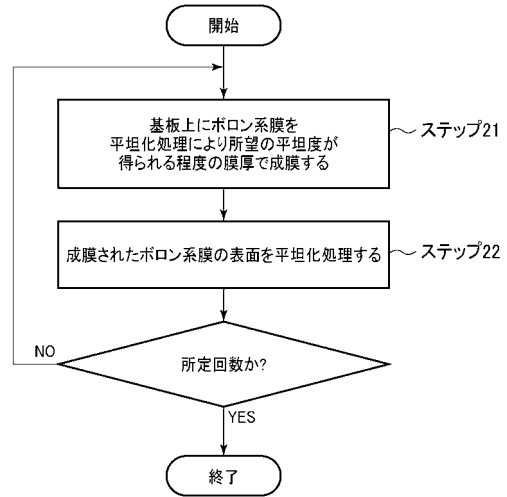
【 図 1 4 】



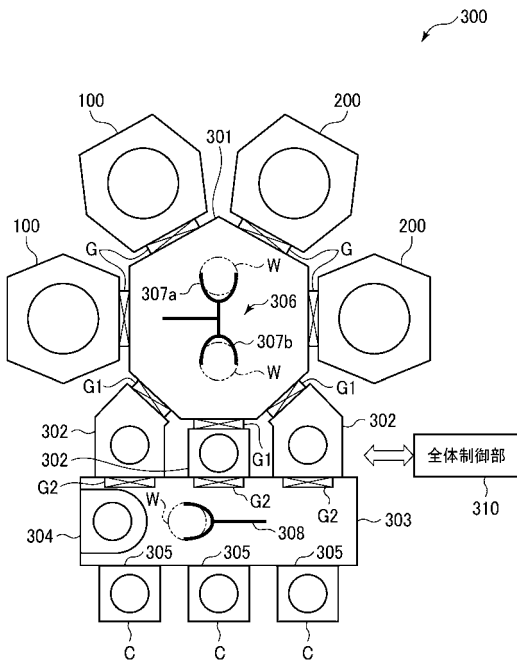
【 図 1 5 】



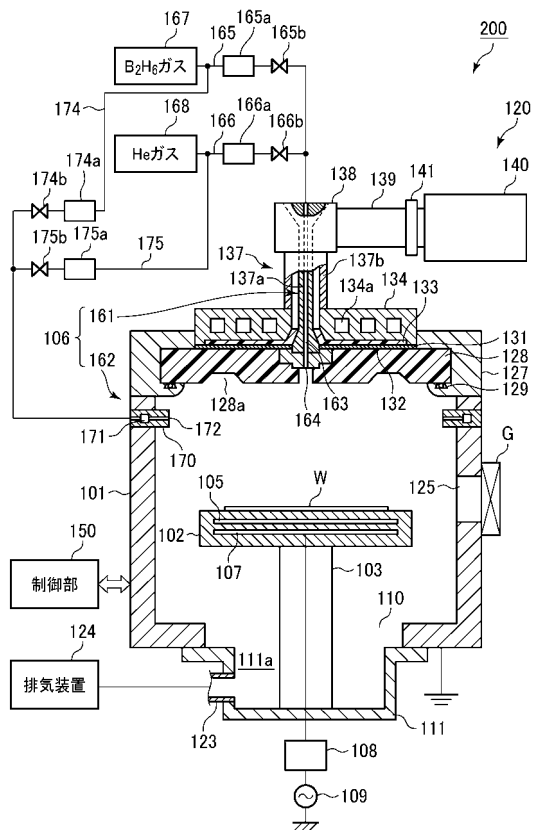
【 図 1 6 】



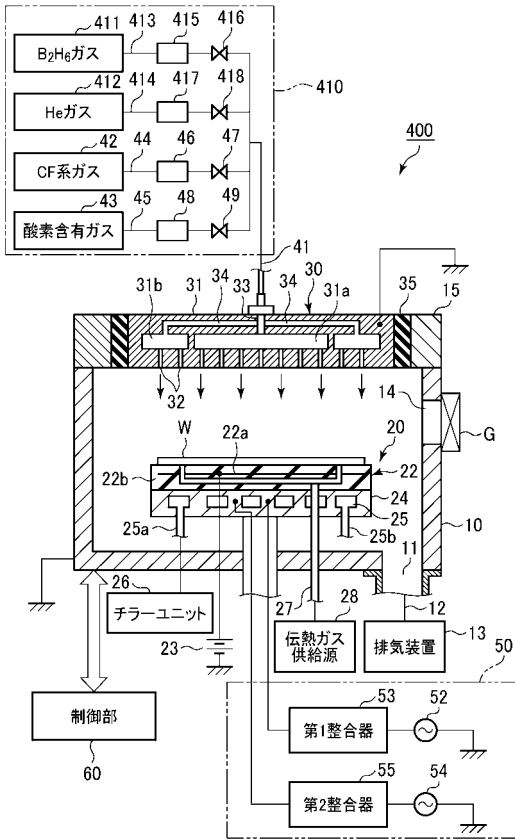
【 図 1 7 】



【 図 1 8 】



【図19】



---

フロントページの続き

(72)発明者 米澤 周平

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

(72)発明者 土橋 和也

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

(72)発明者 上田 博一

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

Fターム(参考) 4K030 AA03 AA07 AA11 BA26 CA04 CA12 DA08 EA05 EA06 FA01

GA02 GA12 JA05 JA09 JA10 JA16 JA18 LA15

5F004 AA11 BA09 BB13 BB22 BB25 BB28 BD01 CA06 DA15 DA26

DB00