

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公表特許公報(A)

(11)公表番号
特表2024-533108
(P2024-533108A)

(43)公表日 令和6年9月12日(2024.9.12)

(51)国際特許分類
H 0 1 L 21/3065(2006.01)

F I
H 0 1 L 21/302 1 0 5 A

テーマコード (参考)
5 F 0 0 4

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全50頁)

(21)出願番号	特願2024-513687(P2024-513687)	(71)出願人	592010081
(86)(22)出願日	令和4年9月6日(2022.9.6)		ラム リサーチ コーポレーション
(85)翻訳文提出日	令和6年4月11日(2024.4.11)		LAM RESEARCH CORPOR
(86)国際出願番号	PCT/US2022/075996		ATION
(87)国際公開番号	WO2023/039382		アメリカ合衆国, カリフォルニア 9 4
(87)国際公開日	令和5年3月16日(2023.3.16)		5 3 8, フレモント, クッシング パー
(31)優先権主張番号	63/260,945		クウェイ 4 6 5 0
(32)優先日	令和3年9月7日(2021.9.7)	(74)代理人	110000028
(33)優先権主張国・地域又は機関			弁理士法人明成国際特許事務所
	米国(US)	(72)発明者	フィッシャー・アンドレアス
(81)指定国・地域	AP(BW,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ,NA		アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 4
	,RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(		5 3 8 フレモント, クッシング・パー
	AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(AL,A		クウェイ, 4 6 5 0, ラム・リサーチ・
	T,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR		コーポレーション内
	,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,	(72)発明者	ロートザーン・アaron・リン
	最終頁に続く		最終頁に続く

(54)【発明の名称】 三塩化ホウ素を使用した原子層エッチング

(57)【要約】

【解決手段】原子層エッチング中に三塩化ホウ素を使用して材料をエッチングするための方法および装置が提供される。方法は、ウエハを処理チャンバに供給し、ウエハは、酸素含有材料を有し、ウエハの表面上に改質された酸素含有層を形成するために酸素含有材料をハロゲン含有ガスに曝露し、ウエハの表面から改質された層を除去するために改質された酸素含有層を三塩化ホウ素に曝露することを含む。

【選択図】 図 2

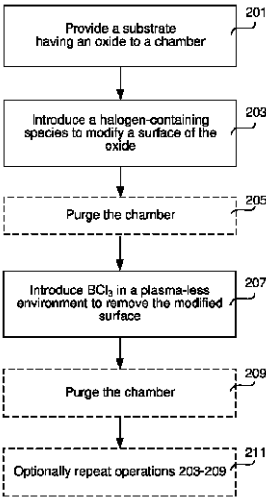


FIG. 2

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ウエハを処理するための方法であって、
ウエハを処理チャンバに供給し、前記ウエハは酸素含有材料を有し、
前記ウエハの表面上に改質された酸素含有層を形成するために前記酸素含有材料をハロゲン含有ガスに曝露し、
前記ウエハの前記表面から前記改質された層を除去するために前記改質された酸素含有層を三塩化ホウ素に曝露すること、を備える、方法。

【請求項 2】

ウエハを処理するための方法であって、
ウエハを処理チャンバに供給し、前記ウエハは酸素含有材料を有し、
前記ウエハの表面上に改質された酸素含有層を形成するために前記酸素含有材料をハロゲン含有ガスに曝露し、
前記ウエハの前記表面から前記改質された酸素含有層を除去するために前記改質された層をホウ素および塩素含有ガスに曝露すること、を備える、方法。

【請求項 3】

請求項 1 または 2 のいずれかに記載の方法であって、
前記改質された酸素含有層を曝露することは、プラズマレス環境で実行される、方法。

【請求項 4】

請求項 1 または 2 のいずれかに記載の方法であって、
前記改質された酸素含有層を曝露することは、揮発性オキシ塩化物の形成、配位子交換の発生、またはその両方を引き起こす、方法。

【請求項 5】

請求項 1 または 2 のいずれかに記載の方法であって、
前記酸素含有材料を前記ハロゲン含有ガスに曝露すること、および前記改質された酸素含有層を曝露することは、原子層エッチングにより交互パルスで実行される、方法。

【請求項 6】

請求項 1 から 5 のいずれか一項に記載の方法であって、
前記酸素含有材料は、金属酸化物である、方法。

【請求項 7】

請求項 8 に記載の方法であって、
前記金属酸化物は、アルミニウム、ケイ素、ゲルマニウム、アンチモン、インジウム、ジルコニウム、セレン、スズ、ガリウム、亜鉛、モリブデン、ハフニウム、テルル、およびそれらの組み合わせからなる群から選択される金属を含む、方法。

【請求項 8】

請求項 1 から 7 のいずれか一項に記載の方法であって、
前記酸素含有材料は、酸化ジルコニウム、酸化ハフニウム、および酸化ハフニウムジルコニウムからなる群から選択される、方法。

【請求項 9】

ウエハを処理するための方法であって、
ウエハを処理チャンバに供給し、前記ウエハはエッチングされる材料を有し、
前記ウエハの表面上に改質された層を形成するために前記エッチングされる材料をハロゲン含有ガスに曝露し、
前記ウエハの前記表面から前記改質された層を除去するためにプラズマレス環境で前記改質された層をホウ素および塩素含有ガスに曝露すること、を備える、方法。

【請求項 10】

ウエハを処理するための方法であって、
ウエハを処理チャンバに供給し、前記ウエハは金属酸化物を有し、
前記ウエハの表面上に改質された金属酸化物層を形成するために前記金属酸化物をフッ化水素または三フッ化窒素に曝露し、

10

20

30

40

50

前記ウエハの前記表面から前記改質された金属酸化物層を除去するためにプラズマレス環境で前記改質された層を三塩化ホウ素に曝露すること、を備える、方法。

【請求項 1 1】

ウエハを処理するための方法であって、

ウエハを処理チャンバに供給し、前記ウエハはタングステンフリー材料を有し、

前記ウエハの表面上に改質されたタングステンフリー層を形成するために前記エッチングされるタングステンフリー材料をフッ素含有ガスに曝露し、

前記ウエハの前記表面から前記改質されたタングステンフリー層を除去するためにプラズマレス環境で前記改質されたタングステンフリー層を非自然発火性の塩素含有ガスに曝露すること、を備える、方法。

10

【請求項 1 2】

半導体処理のための装置であって、

第 1 の内部を含む第 1 の処理チャンバと、前記第 1 の内部でウエハを支持するように構成されている第 1 のウエハ支持体を有する第 1 の処理ステーションと、前記第 1 のウエハ支持体によって支持されている前記ウエハを加熱するように構成されている第 1 のウエハ加熱ユニットと、

プロセスガスユニットであって、

前記第 1 の処理チャンバ内の前記第 1 の処理ステーションにおいてフッ素を含む第 1 の化学種を前記ウエハ上に流し、

前記第 1 の処理チャンバ内の前記第 1 の処理ステーションにおいて三塩化ホウ素を前記ウエハ上に流すように構成されているプロセスガスユニットと、

20

コントローラであって、

ウエハを前記第 1 の処理チャンバ内の前記第 1 の処理ステーションに供給させ、前記ウエハは、カルコゲニド材料の層を有し、

前記第 1 のウエハ加熱ユニットに前記ウエハを第 1 の温度に加熱させ、

前記ウエハが前記第 1 の温度にある間に改質された層を生成するために、前記プロセスガスユニットに前記第 1 の処理チャンバの前記第 1 の処理ステーションにおいて前記第 1 の化学種を前記ウエハ上に流させることにより前記ウエハ上の材料の表面を改質し、前記プロセスガスユニットに前記第 1 の処理チャンバの前記第 1 の処理ステーションにおいて前記三塩化ホウ素を前記ウエハ上に流させることにより、プラズマ使用せずに前記改質された層を除去することによって前記ウエハ上の前記材料をエッチングするように構成されている命令を有するコントローラと

30

を備える、装置。

【発明の詳細な説明】

【参照による援用】

【0001】

本出願の一部として、本明細書と同時に P C T 出願願書が提出される。この同時出願された P C T 出願願書に明記され、本出願が利益または優先権を主張する各出願は、参照によりその全体があらゆる目的で本明細書に組み込まれる。

【背景】

40

【0002】

半導体デバイスの製作は、高エネルギー種への曝露などのエッチングプロセスに敏感であり、かつ酸化、水分、およびエッチング後の高エネルギー種への追加の曝露に敏感であり得る構造の形成を伴う。その結果、一部の構造は、エッチングおよび環境への曝露による損傷に対処するためにエッチング後プロセスを受けることになる。しかし、エッチング後処理のいくつかの方法、および対応する装置は、構造に対する損傷および曝露に十分に対処することができない場合があり、構造にさらに損傷を与える可能性がある。

【0003】

ここで提供される背景の説明は、本開示の内容を概ね提示することを目的とする。この背景技術のセクションで説明されている範囲内における、現時点で名前を挙げられている

50

発明者らによる研究、ならびに出願の時点で先行技術として別途みなされ得ない説明の態様は、明示または暗示を問わず、本開示に対抗する先行技術として認められない。

【発明の概要】

【0004】

一態様は、ウエハを処理するための方法であって、ウエハを処理チャンバに供給し、ウエハは酸素含有材料を有し、ウエハの表面上に改質された酸素含有層を形成するために酸素含有材料をハロゲン含有ガスに曝露し、ウエハの表面から改質された層を除去するために改質された酸素含有層を三塩化ホウ素に曝露することを含む、方法に関する。

【0005】

様々な実施形態において、改質された酸素含有層を曝露することは、プラズマレス環境で実施される。 10

【0006】

様々な実施形態において、改質された酸素含有層を曝露することは、揮発性オキシ塩化物を形成する。

【0007】

様々な実施形態において、改質された酸素含有層を曝露することは、配位子交換を生じさせる。

【0008】

様々な実施形態において、酸素含有材料をハロゲン含有ガスに曝露すること、および改質された酸素含有層を曝露することは、原子層エッチングによって交互パルスで実施される。 20

【0009】

上記の実施形態のいずれかにおいて、改質された酸素含有層は、酸化ホウ素を含んでもよい。

【0010】

上記の実施形態のいずれかにおいて、酸素含有材料は、金属酸化物であってもよい。例えば、いくつかの実施形態では、金属酸化物は、アルミニウム、ケイ素、ゲルマニウム、アンチモン、インジウム、ジルコニウム、セレン、スズ、ガリウム、亜鉛、モリブデン、ハフニウム、テルル、およびそれらの組み合わせからなる群から選択される金属を含む。

【0011】 30

上記の実施形態のいずれかにおいて、酸素含有材料は、酸化アルミニウムおよび酸化インジウムガリウム亜鉛からなる群から選択されてもよい。

【0012】

上記の実施形態のいずれかにおいて、酸素含有材料は、酸化ジルコニウム、酸化ハフニウム、および酸化ハフニウムジルコニウムからなる群から選択されてもよい。

【0013】

上記の実施形態のいずれかにおいて、酸素含有材料は、炭化物または窒化物を酸化することによって形成された炭化物または窒化物であってもよい。

【0014】

上記の実施形態のいずれかにおいて、酸素含有材料は、ドーピングされてもよい。 40

【0015】

様々な実施形態において、エッチングされる酸素含有材料をハロゲン含有ガスに曝露することは、ハロゲン含有プラズマを形成するためにハロゲン含有ガスを点火することを含む。例えば、いくつかの実施形態では、酸素含有材料は、金属を含む。

【0016】

様々な実施形態において、ハロゲン含有プラズマは、遠隔で生成される。

【0017】

様々な実施形態において、ハロゲン含有プラズマは、*in situ*で生成される。

【0018】

様々な実施形態において、ハロゲン含有ガスは、フッ素を含む。 50

【0019】

様々な実施形態において、ハロゲン含有ガスは、三フッ化窒素を含む。

【0020】

別の態様は、ウエハを処理するための方法であって、ウエハを処理チャンバに供給し、ウエハは酸素含有材料を有し、ウエハの表面上に改質された酸素含有層を形成するために酸素含有材料をハロゲン含有ガスに曝露し、ウエハの表面から改質された酸素含有層を除去するために改質された層をホウ素および塩素含有ガス (boron-and-chlorine-containing gas) に曝露することを含む、方法に関する。

【0021】

様々な実施形態において、改質された酸素含有層を曝露することは、プラズマレス環境で実施される。 10

【0022】

様々な実施形態において、改質された酸素含有層を曝露することは、揮発性オキシ塩化物を形成する。

【0023】

様々な実施形態において、改質された酸素含有層を曝露することは、配位子交換を生じさせる。

【0024】

様々な実施形態において、酸素含有材料をハロゲン含有ガスに曝露すること、および改質された酸素含有層を曝露することは、原子層エッチングによって交互パルスで実施される。 20

【0025】

上記の実施形態のいずれかにおいて、改質された酸素含有層は、酸化ホウ素を含んでもよい。

【0026】

上記の実施形態のいずれかにおいて、酸素含有材料は、金属酸化物であってもよい。例えば、いくつかの実施形態では、金属酸化物は、アルミニウム、ケイ素、ゲルマニウム、アンチモン、インジウム、ジルコニウム、セレン、スズ、ガリウム、亜鉛、モリブデン、ハフニウム、テルル、およびそれらの組み合わせからなる群から選択される金属を含む。

【0027】

上記の実施形態のいずれかにおいて、酸素含有材料は、酸化アルミニウムおよび酸化インジウムガリウム亜鉛からなる群から選択されてもよい。 30

【0028】

上記の実施形態のいずれかにおいて、酸素含有材料は、酸化ジルコニウム、酸化ハフニウム、および酸化ハフニウムジルコニウムからなる群から選択されてもよい。

【0029】

上記の実施形態のいずれかにおいて、酸素含有材料は、炭化物または窒化物を酸化することによって形成された炭化物または窒化物であってもよい。

【0030】

上記の実施形態のいずれかにおいて、酸素含有材料は、ドーピングされてもよい。 40

【0031】

様々な実施形態において、エッチングされる酸素含有材料をハロゲン含有ガスに曝露することは、ハロゲン含有プラズマを形成するためにハロゲン含有ガスを点火することを含む。例えば、いくつかの実施形態では、酸素含有材料は、金属を含む。

【0032】

様々な実施形態において、ハロゲン含有プラズマは、遠隔で生成される。

【0033】

様々な実施形態において、ハロゲン含有プラズマは、in situで生成される。

【0034】

様々な実施形態において、ハロゲン含有ガスは、フッ素を含む。 50

【0035】

様々な実施形態において、ハロゲン含有ガスは、三フッ化窒素を含む。

【0036】

別の態様は、ウエハを処理するための方法であって、ウエハを処理チャンバに供給し、ウエハはエッチングされる材料を有し、ウエハの表面上に改質された層を形成するためにエッチングされる材料をハロゲン含有ガスに曝露し、ウエハの表面から改質された層を除去するためにプラズマレス環境で改質された層をホウ素および塩素含有ガスに曝露することし、ことを含む方法に関する。

【0037】

様々な実施形態において、エッチングされる材料は、酸化物、炭化物、窒化物、ドーパ酸化物、ドーパ炭化物、ドーパ窒化物、およびそれらの組み合わせからなる群から選択される。

10

【0038】

様々な実施形態において、ホウ素および塩素含有ガスは、三塩化ホウ素である。

【0039】

様々な実施形態において、エッチングされる材料は、酸素を含む。

【0040】

様々な実施形態において、エッチングされる材料は、誘電体である。

【0041】

様々な実施形態において、エッチングされる材料をハロゲン含有ガスに曝露することは、ハロゲン含有プラズマを形成するためにハロゲン含有ガスを点火することを含む。例えば、いくつかの実施形態では、エッチングされる材料は、金属を含む。いくつかの実施形態では、エッチングされる材料は、ハロゲン含有プラズマに曝露される前に酸化される。

20

【0042】

様々な実施形態において、ハロゲン含有プラズマは、遠隔で生成される。

【0043】

様々な実施形態において、ハロゲン含有プラズマは、*in situ*で生成される。

【0044】

様々な実施形態において、ハロゲン含有ガスは、フッ素を含む。

【0045】

様々な実施形態において、ハロゲン含有ガスは、三フッ化窒素を含む。

30

【0046】

別の実施形態は、ウエハを処理するための方法であって、ウエハを処理チャンバに供給し、ウエハは金属酸化物を有し、ウエハの表面上に改質された金属酸化物層を形成するために金属酸化物をフッ化水素または三フッ化窒素に曝露し、ウエハの表面から改質された金属酸化物層を除去するためにプラズマレス環境で改質された層を三塩化ホウ素に曝露することを含む、方法に関する。

【0047】

様々な実施形態において、金属酸化物は、酸化アルミニウム、酸化ハフニウム、および酸化インジウムガリウム亜鉛からなる群から選択される。

40

【0048】

様々な実施形態において、金属酸化物をフッ化水素または三フッ化窒素に曝露することは、フッ素含有プラズマを形成するためにフッ化水素または三フッ化窒素を点火することを含む。例えば、いくつかの実施形態では、フッ素含有プラズマは、遠隔で生成される。いくつかの実施形態では、フッ素含有プラズマは、*in situ*で生成される。

【0049】

様々な実施形態において、改質された層を形成すること、および改質された金属酸化物層を除去することは、真空を破壊することなく実施される。

【0050】

様々な実施形態において、改質された金属酸化物層を形成すること、および改質された

50

金属酸化物層を除去することは、約 170℃を超える温度で実施される。

【0051】

別の実施形態は、ウエハを処理するための方法であって、ウエハを処理チャンバに供給し、ウエハはタングステンフリー材料を有し、ウエハの表面上に改質されたタングステンフリー層を形成するためにエッチングされるタングステンフリー材料をフッ素含有ガスに曝露し、ウエハの表面から改質されたタングステンフリー層を除去するためにプラズマレス環境で改質されたタングステンフリー層を非自然発火性 (non-pyrophoric) の塩素含有ガスに曝露することを含む、方法に関する。

【0052】

別の実施形態は、半導体処理のための装置であって、第1の内部を含む第1の処理チャンバと、第1の内部でウエハを支持するように構成されている第1のウエハ支持体を有する第1の処理ステーションと、第1のウエハ支持体によって支持されているウエハを加熱するように構成されている第1のウエハ加熱ユニットと、第1の処理チャンバ内の第1の処理ステーションにおいてフッ素を含む第1の化学種をウエハ上に、および第1の処理チャンバ内の第1の処理ステーションにおいて三塩化ホウ素をウエハ上に流すように構成されているプロセスガスユニットと、ウエハを第1の処理チャンバ内の第1の処理ステーションに供給させ、ウエハはカルコゲニド材料の層を有し、第1のウエハ加熱ユニットにウエハを第1の温度に加熱させ、ウエハが第1の温度にある間に改質された層を生成するために、プロセスガスユニットに第1の処理チャンバの第1の処理ステーションにおいて第1の化学種をウエハ上に流させることによりウエハ上の材料の表面を改質し、プロセスガスユニットに第1の処理チャンバの第1の処理ステーションにおいて三塩化ホウ素をウエハ上に流させることにより、プラズマ使用せずに改質された層を除去することによってウエハ上の材料をエッチングするように構成されている命令を有するコントローラと、を含む、装置に関する。

【0053】

これらおよび他の態様は、図面を参照して以下でさらに説明される。

【図面の簡単な説明】

【0054】

【図1】図1は、特定の開示されている実施形態による、原子層エッチングの例示的な概略図である。

【0055】

【図2】図2は、特定の開示されている実施形態による、動作を実施するための例示的なプロセスフロー図である。

【0056】

【図3A】図3Aは、特定の開示されている実施形態による、例示的なガス流シーケンスを図示する図である。

【図3B】図3Bは、特定の開示されている実施形態による、例示的なガス流シーケンスを図示する図である。

【図3C】図3Cは、特定の開示されている実施形態による、例示的なガス流シーケンスを図示する図である。

【0057】

【図4】図4は、特定の開示されている実施形態による、材料を堆積するために使用され得るプロセスステーションの一実施形態を概略的に示す図である。

【0058】

【図5】図5は、特定の開示されている実施形態による、材料をエッチングするためのウエハ処理チャンバの一例を示す図である。

【0059】

【図6】図6は、特定の開示されている実施形態による、例示的な装置の断面側面図である。

【0060】

10

20

30

40

50

【図 7】図 7 は、複数の L E D を有するウエハヒータの上面図である。

【 0 0 6 1 】

【図 8】図 8 は、特定の開示されている実施形態による、第 1 の例示的な処理装置を図示する図である。

【 0 0 6 2 】

【図 9】図 9 は、特定の開示されている実施形態による、第 2 の例示的な処理装置を図示する図である。

【 0 0 6 3 】

【図 1 0】図 1 0 は、特定の開示されている実施形態による、三塩化ホウ素とフッ化水素を使用した原子層エッチングサイクル当たりのエッチング速度と、三塩化ホウ素のみに曝露した後の結果を示す図である。

【 0 0 6 4 】

【図 1 1 A】図 1 1 A は、A L E エッチングプロセスについての酸化ハフニウム、酸化アルミニウム、ケイ素、酸化ケイ素、窒化ケイ素、窒化チタン、およびタングステンの相対エッチング量を示す図である。

【 0 0 6 5 】

【図 1 1 B】図 1 1 B は、特定の開示されている実施形態による、実施された A L E エッチングプロセスについての酸化ハフニウム、酸化アルミニウム、ケイ素、酸化ケイ素、窒化ケイ素、窒化チタン、およびタングステンの相対エッチング量を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 6 6 】

以下の説明では、提示された実施形態の完全な理解を提供するために、多数の具体的な詳細が記載されている。開示されている実施形態は、これらの具体的な詳細の一部または全部なしで実践することができる。他の例では、開示されている実施形態を不必要に曖昧にしないように、周知のプロセス動作は詳細に説明されていない。開示されている実施形態は、特定の実施形態と併せて説明されるが、特定の実施形態は、開示されている実施形態を限定することを意図するものではないことが理解されるであろう。

【 0 0 6 7 】

半導体製作プロセスは、多くの場合、金属酸化物などの様々な材料のエッチングを伴う。一部の材料は、プラズマベースのエッチングプロセスに曝露されると損傷を受けやすい場合がある。しかし、一部の熱プロセスは特定の材料を十分にエッチングすることができない場合があり、場合によっては、ツールの温度制限によって特定の熱プロセスの適用が制限される可能性がある。場合によっては、熱プロセスまたはプラズマレスプロセスを使用して材料をエッチングすることができるが、一部のプロセス、特に特定の厚さの材料をエッチングする場合、またはエッチング中に他の露出面に対する選択性を達成する場合、制御が難しい場合がある。

【 0 0 6 8 】

三塩化ホウ素を使用して様々な材料をエッチングするための技法および装置が、本明細書で提供される。特定の開示されている実施形態は、ホウ素および塩素を含有するガスを使用して様々な材料をエッチングすることを対象とする。特定の開示されている実施形態は、プラズマレス環境において除去ガスとして三塩化ホウ素を使用する原子層エッチングを対象とする。三塩化ホウ素は、限定はしないが、酸化アルミニウム、酸化ハフニウム、酸化ジルコニウム、酸化ハフニウムケイ素、ケイ素ドーパ酸化ハフニウム、酸化インジウムガリウム亜鉛、酸化ハフニウムジルコニウム、ハフニウムおよびジルコニウムから作製された合金酸化物、ならびにカルコゲニド材料、例えばゲルマニウム、セレン、およびテルルを含む様々な材料のエッチングに使用することができる塩化ジメチルアルミニウム (D M A C) の代替品として使用することが可能である。三塩化ホウ素は、一般に入手可能で安価なガスであり、揮発する必要がなく、自然発火性ではないという追加の利点を有する。

【 0 0 6 9 】

特定の開示されている実施形態は、三塩化ホウ素などのホウ素および塩素含有ガスを使用して、熱的に原子層エッチング、またはプラズマレス原子層エッチングを実施する。特定の開示されている実施形態は、限定はしないが、カルコゲニド材料の1つまたは複数の層のエッチング、酸化インジウムガリウム亜鉛のエッチング、および酸化アルミニウム、酸化ハフニウム、または酸化ジルコニウムなどの金属酸化物のエッチングを含む、様々なエッチング用途に使用することができる。

【0070】

三塩化ホウ素は、除去ガスとして使用することができ、この場合、基板の表面を改質するために使用される改質ガスまたは種は、熱力学的に有利な反応で三塩化ホウ素に曝露されると表面が熱的に除去される結合を基板の表面上に形成する。三塩化ホウ素を使用して、原子層エッチングによって材料を等方的に除去することができる。

10

【0071】

以下でより詳細に説明するように、熱原子層エッチングは、ハロゲンを有する第1の化学種をウエハ上に流し、材料の改質された層を生成することによって材料の層の表面を改質し、かつ三塩化ホウ素などのホウ素および塩素を有する第2の化学種をウエハ上に流すことによって、プラズマ使用せずに材料の改質された層を除去することができ、これは、配位子交換機構によって実施することができる。

【0072】

特定の開示されている実施形態に従って、原子層エッチング（「ALE」）を使用して材料をエッチングすることができる。ALEプロセスは、連続的な自己制限反応を使用して材料の薄層を除去する。一般に、ALEサイクルは、単層のエッチングなどのエッチングプロセスを1回実施するために使用される最小セットの動作である。1つのALEサイクルの結果、ウエハ表面上の膜層の少なくとも一部がエッチングされる。典型的には、ALEサイクルは、反応層を形成する改質動作と、その後この反応層のみを除去またはエッチングする除去動作を含む。サイクルは、反応剤または副生成物の1つを除去するなどの特定の補助動作、ならびに処理チャンバの表面上に蓄積した残留物を除去する洗浄動作を含んでもよい。一般に、サイクルは、固有の一連の動作の1つのインスタンスを含む。

20

【0073】

一例として、ALEサイクルは、以下の動作を含むことができる：（i）反応剤ガスである第1のプロセスガスの送給、（ii）チャンバからの反応剤ガスのパージ、（iii）除去ガスおよび任意選択のプラズマである第2のプロセスガスの送給、ならびに（iv）チャンバのパージ。改質動作（上記の項目（ii））は、一般に、改質されていない材料よりも薄い、例えば、1、2、または3原子層の厚さ、または1サイクルで原子層全体よりも薄い、薄い反応性表面層を形成する。

30

【0074】

本明細書に記載のエッチングプロセスは、特定の温度または温度範囲にウエハを維持することと併せて化学反応に依存し、「熱ALE」または「熱エッチング」とみなされる改質および／または除去動作における化学反応を駆動する場合がある。いくつかの実施形態では、熱エッチングまたは熱ALEは、等方性エッチングとみなされてもよい。いくつかの実施形態では、ウエハの1つまたは複数の層は、ウエハが第1の温度に維持されている間、プラズマではなく化学吸着（chemical adsorption）（以下、「化学吸着（chemisorption）」）によって改質され得、その後、ウエハの1つまたは複数の改質された層は、ウエハが第2の温度にある間、プラズマではなく脱離によって除去され得る。いくつかの実施形態は、除去動作中ではなく、改質動作中にプラズマを任意選択で使用することができる。いくつかの実施形態では、第1および第2の温度は同じであってもよいが、他のいくつかの実施形態では、それらは互いに異なってもよい。

40

【0075】

化学吸着および脱離は、別々の温度レジームで起こるか、部分的に重複する温度レジームで起こるか、または同じ温度レジームで起こり得る、温度依存性の化学反応である。こ

50

のため、本明細書に記載の熱エッチング技法のいくつかは、改質および除去動作中に同じ温度、または実質的に同じ温度（例えば、互いの約10%または5%以内）にウエハの温度を維持する。いくつかの他の実施形態は、改質動作のためにある温度で生じる化学吸着を可能にして利用し、かつ除去動作のために異なる温度で生じる脱離を可能にして利用するために、改質動作と除去動作との間でウエハの温度を調節する。

【0076】

本明細書で提供されるいくつかの熱エッチングプロセスでは、材料の1つまたは複数の表面層は、ウエハが第1の温度に維持されている間に化学吸着によって改質され、これによりウエハの1つまたは複数の改質された表面層が生成され得る。ウエハは、材料の層と、材料の均一な層であってもよいし、異なる分子および元素を含む不均一な層であってもよい露出面とを含む。改質分子を有する第1のプロセスガスが、第1の温度に維持されたウエハ上に流されてもよい。いくつかの実施形態では、改質分子は、ウエハ上の分子をフッ素化または塩素化するために、後述するようにフッ素または塩素を含んでもよい。第1のプロセスガスはまた、窒素（ N_2 ）、アルゴン（ Ar ）、ヘリウム（ He ）、およびネオン（ Ne ）などのキャリアガスを含んでもよい。この第1の温度は、改質分子と材料の露出面における分子の少なくとも一部との間の化学吸着を可能にする。

【0077】

1つまたは複数の改質された表面層は、ウエハが第2の温度に維持されている間に除去されてもよい。いくつかの実施形態では、第2の温度だけで、ウエハからの改質された分子の脱離が可能となり、それによってウエハから改質された分子が除去され得る。いくつかの実施形態では、除去分子を含む第2のプロセスガスが、ウエハの露出面上を含めて、ウエハ上に流されてもよい。第2のプロセスガスはまた、上述のようにキャリアガスを含んでもよい。これらの除去分子は、改質された分子と反応し、揮発性分子とみなされ得る異なる揮発性分子を形成することができる。この揮発した分子は、ウエハが第2の温度にあるとき、脱離によってウエハから除去され得る。いくつかの実施形態では、この第2のプロセスガスの流れは、除去動作の一部であってもよく、またはウエハの加熱前、後、もしくは加熱中に行われる別々の動作であってもよい。

【0078】

いくつかの実施形態では、熱ALEは等方性であり、したがって無指向性であり得る。いくつかの他の実施形態では、改質動作中などのエッチングプロセスにおいて指向性イオンが使用される場合、熱ALEは等方性ではない。

【0079】

改質分子と除去分子がウエハ上に少なくとも共流され、したがって改質動作と除去動作が少なくとも部分的に重なる他の熱エッチングが実施されてもよい。そのような処理中、改質分子と除去分子の両方を含む1つまたは複数のプロセスガスをウエハ上に同時に流することができる。この熱エッチングの多くの実施態様では、改質分子および除去分子は、ウエハ上に共流することができるように、相互に悪影響を及ぼさないように制限されている。場合によっては、この共流はエッチング全体で発生する可能性があるが、他の場合では、共流はエッチングの一部でのみ発生する可能性がある。部分的に重なる流れのみを有するいくつかの例では、除去分子がウエハ上に流される前に改質分子がウエハ上に流されてもよく、その後、改質分子と除去分子の両方がウエハ上に同時に流されてもよい。場合によっては、改質分子と除去分子の両方の流れが実質的に同時に（例えば、互いの約10%または5%以内で）停止する場合があるが、他の場合には、改質分子の流れが停止され、除去分子がウエハ上に流れることがある。

【0080】

本明細書で提供される技法はまた、1つまたは複数のカプセル化材料をエッチングされたカルコゲニド上に堆積することができる。これは、エッチングが実施される処理チャンバとは別の処理チャンバ内で、化学気相堆積（「CVD」）、プラズマ強化CVD（「PECVD」）、または原子層堆積（「ALD」）を使用してカプセル化材料を堆積することを含み得る。いくつかの実施形態は、ウエハを大気圧に曝露することなくこれらの処理

10

20

30

40

50

チャンバ間でウエハを移送してもよく、それによりウエハが両方の処理チャンバ内および処理チャンバ間の移送中に真空圧力に留まるようになる。いくつかの実施形態では、第1のカプセル化材料の層が、ウエハがエッチングが実施される処理チャンバ内に留まっている間にエッチングされたカルコゲニド上に堆積されてもよく、第1のカプセル化材料は、酸化アルミニウムなどのアルミニウムを含み得る。第1のカプセル化材料が堆積された後、ウエハは別の処理チャンバに移送され、そこで追加のカプセル化材料がウエハ上に堆積され得る。

【0081】

記載されたエッチングのいくつかの実施態様が、開示されている実施形態による原子層エッチングの例示的な概略図を図示する図1を用いてさらに説明される。略図100a～100eは、ALEサイクルを示す。100aでは、エッチングされる酸素含有材料の1つまたは複数の層を有するウエハが供給される。100bでは、酸素含有材料の表面が改質される。100cでは、次の動作が準備され、この準備は、第2のプロセスガスを流すこと、またはチャンバをパージすることを含み得る。100dでは、ウエハは、改質された層と反応して改質された層をウエハから脱離させ、したがってウエハから除去される除去分子に曝露される。100eでは、所望の材料が除去されている。

10

【0082】

略図102a～102eでは、酸素含有材料の単一の層がウエハからエッチングされる。102aでは、ウエハが供給され、ウエハは酸素含有材料104の1つまたは複数の層を有し、各分子は陰影のない円として表される。酸素含有材料の最上層は、酸素含有材料表面層106とみなされてもよい。102bでは、フッ化物または塩化物を含む改質分子108（黒丸）を含む第1のプロセスガスがウエハに導入され、酸素含有材料の表面層106を改質し、フッ素化酸素含有材料または塩素化酸素含有材料を形成する。102bの概略図は、改質分子108の一部が酸素含有材料表面層106の酸素含有材料104の分子上に吸着され、改質された分子112を含む改質された表面層110を生成することを示す（1つの改質された分子112が102bの点線の楕円の内側で識別される）。上述したように、改質分子108は、フッ化水素などのフッ素を有する種、または塩化水素などの塩化物を有する種であってもよい。いくつかの熱ALE技法では、この略図102bは、ウエハが、例えば、酸素含有材料の表面上での改質分子の化学吸着を可能にする上述の第1の温度に維持されている間に生じ得る。

20

30

【0083】

略図102cでは、改質された分子112および改質された表面層110が102bで生成された後、第1のプロセスガスが任意選択でチャンバからパージされてもよい。

【0084】

略図102dでは、除去分子114がプロセスチャンバに導入され、いくつかの実施形態では、これは、第2の種を有する、すなわち除去分子114を有する第2のプロセスガスをウエハ上に流すことによって行うことができ、第2の種は、三塩化ホウ素などのホウ素と塩素を有する化合物を含むことができる。略図102dは、陰影を付けた菱形で示される除去分子114がフッ素化カルコゲニドまたは塩素化酸素含有材料、すなわち、改質された分子112と反応し、これにより酸素含有材料104および分子108（フッ化物または塩化物であり得る）がウエハから脱離し、したがってウエハから除去されることをさらに示している。いくつかの実施形態では、除去分子114と改質された分子112との間の反応により、改質分子108がウエハから脱離し、除去分子および酸素含有材料は、酸素含有材料104の陰影のない円と除去分子114の陰影を付けた菱形の組み合わせによって示される別の化合物116を形成し、これはウエハから脱離する。いくつかの他の実施形態では、図示されていないが、除去分子および改質された分子は一緒になって別の化合物を形成し、これはウエハから脱離する。

40

【0085】

いくつかの熱ALEの実施形態では、この除去動作は、ウエハからの改質された表面層110の改質された分子112の脱離が起こる第2の温度で実施することができ、プラズ

50

マはこれらの除去動作では利用されない。いくつかの実施形態では、第2の温度は、第1の温度と同じ、または実質的に同じ（例えば、互いの約10%または5%以内）である。他の実施形態では、第1温度と第2温度は互いに異なっていてもよく、これらの実施形態では、ウエハを加熱または冷却することによって温度を第1温度から第2温度に変化させてもよい。場合によっては、動作の1つまたは複数における温度を上昇させることができる。

【0086】

102eでは、改質された分子112、したがって改質された表面層110がウエハから除去されている。

【0087】

図2は、開示されている実施形態による、動作を実施するための例示的なプロセスフロー図を図示する。動作201では、ウエハがウエハのエッチングを実施するように構成されている処理チャンバに供給される。ウエハは、エッチングされる材料を含んでもよい。エッチングされる材料は、誘電体材料であってもよい。エッチングされる材料は、酸素含有材料であってもよい。エッチングされる材料は、金属材料であってもよい。エッチングされる材料は、タングステンフリーであってもよい。エッチングされる材料は、非タングステン金属材料であってもよい。エッチングされる材料は、タングステンフリー金属材料であってもよい。エッチングされる材料は、酸化物であってもよい。エッチングされる材料は、半導体酸化物であってもよい。エッチングされる材料は、ケイ素、ケイ素ゲルマニウム、ゲルマニウム、またはそれらの組み合わせなどの半導体材料であってもよい。エッチングされる材料は、金属酸化物であってもよい。金属酸化物は、酸化ハフニウム、酸化タングステン、酸化モリブデン、酸化アルミニウム、酸化亜鉛、酸化ガリウム、酸化ジルコニウム、酸化インジウム、酸化スズ、酸化セレン、酸化テルル、またはそれらの組み合わせであってもよい。いくつかの実施形態では、ウエハは、遷移金属酸化物を含む。

【0088】

エッチングされる材料は、金属表面を酸素含有反応剤に曝露することによって形成され得る。いくつかの実施形態では、動作201は、金属表面を酸素含有反応剤に曝露することを含む。例示的な金属表面には、ハフニウム、タングステン、モリブデン、アルミニウム、亜鉛、ガリウム、ジルコニウム、インジウム、スズ、セレン、テルルなどが挙げられる。いくつかの実施形態では、金属表面は、遷移金属を含む。いくつかの実施形態では、金属表面は、金属元素を含む。他の材料には、インジウムガリウムヒ素（InGaAs）、インジウムアルミニウムヒ素（InAlAs）、インジウムリン（InP）、およびそれらの組み合わせが挙げられる。いくつかの実施形態では、金属表面は、半金属を含む。いくつかの実施形態では、ウエハは、カルコゲニドを含む。カルコゲニドは、本明細書に列挙されたもののいずれであってもよい。いくつかの実施形態では、カルコゲニドは、ゲルマニウム（Ge）、アンチモン（Sb）、テルル（Te）（総称して「GST」または「GeSbTe」）材料などの相変化材料であってもよい。これにはまた、nドープGeSbTe化合物（N-GST）、Sb₂Te、ならびにAgおよびInがドープされたSb₂Te（AIST）が含まれ得る。上で述べたように、例えば、金属カルコゲニドの相がビット状態を決定するため、相変化材料はメモリデバイスの形成に使用するのに有利である。いくつかの実施態様では、カルコゲニドは、ゲルマニウム、ヒ素、およびセレンを含む化合物（GeAsSe）、またはゲルマニウム、アンチモン、セレン、および窒素を含む化合物（GeSb、Se、N）などを含み得るオボニック閾値スイッチング（OTS）材料など、相を変化させないものを含み得る。

【0089】

いくつかの実施形態では、ウエハ上でエッチングされる材料は、非酸化物である。エッチングされる材料は、窒化物であってもよい。エッチングされる材料は、炭化物であってもよい。エッチングされる材料は、ドープ窒化物であってもよい。エッチングされる材料は、ドープ炭化物であってもよい。エッチングされる材料は、ドープ酸化物であってもよい。エッチングされる材料は、限定はしないが、炭素などのドーパントを含んでもよい。

【0090】

動作201中、ウエハがチャンバに供給された後、ウエハは、本明細書で提供されるように、特定の温度または温度範囲の両方とみなされ得る第1の温度に加熱され得る。いくつかの実施形態では、第1の温度は、例えば、約20℃～約500℃、約20℃～約1500℃、約20℃～約800℃、約20℃～約1000℃、約1000℃～約4500℃、約1000℃～約4000℃、約1500℃～約4000℃、約2000℃～約6000℃、約2000℃～約5000℃、約2000℃～約4000℃、約2000℃～約3500℃、または約3500℃～約5000℃、または少なくとも約1200℃、または約1700℃未満であってもよい。以下でより詳細に説明するように、ウエハは、エッチング、改質動作、および／または除去動作のすべて、または実質的にすべて（例えば、少なくとも80%、90%、または95%）の間、第1の温度に維持され得る。

10

【0091】

動作203では、ハロゲン含有種がチャンバに導入される。様々な実施形態において、動作203では、酸化物表面がハロゲン含有種に曝露される。いくつかの実施形態では、酸化物表面がフッ素含有種に曝露される。いくつかの実施形態では、金属酸化物表面がフッ素含有種に曝露される。いくつかの実施形態では、金属酸化物表面が三フッ化窒素に曝露される。ハロゲン含有種は、ウエハの表面と反応するか、またはウエハの表面を改質して改質された表面を形成する。改質された表面は、反応または改質の結果として1つまたは複数のハロゲン末端基を含み得る。ハロゲン含有種は、ハロゲン含有ガスまたは気化したハロゲン含有種であってもよい。例には、フッ素含有種、例えばHFなどのフッ化水素、四フッ化硫黄または六フッ化硫黄またはフッ化スルフルル（ SO_2F_2 ）などのフッ化硫黄、三フッ化窒素（ NF_3 ）などのフッ化窒素、および二フッ化キセノンなどのフッ化キセノン、ならびに塩素含有種、例えばHClなどの塩化水素、二塩化硫黄または四塩化硫黄または塩化スルフルル（ SO_2Cl_2 ）などの塩化硫黄、またはトリクロロアミン（ NCl_3 ）などの塩化窒素が挙げられる。使用される改質ガスは、動作207において三塩化ホウ素などのホウ素および塩素含有ガスを使用する熱力学的に有利な除去に基づいて選択される。いくつかの実施形態では、エッチングされる材料の層の表面を改質するためにフッ素種または塩素種を使用すると、除去分子の存在下ですべての材料の除去を可能および許容する固有の反応性化合物が得られ、これは、フッ素および塩素が表面に非常に強く結合し、下層との結合を弱めるためである。いくつかの実施形態では、使用される改質

20

30

【0092】

動作203中、酸化物の層の表面が改質され、すなわち、この動作は改質動作を表す。動作203は、フッ化物または塩化物を有する第1の化学種を含む第1のプロセスガスをウエハ上に流すことを含む。第1の化学種をウエハ上に流すと、酸化物の層の表面が改質され、三塩化ホウ素への曝露および三塩化ホウ素との反応によって固有に除去することが可能なフッ素化材料またはフッ素化酸化物の層が生成される。第1のプロセスガス中のこの第1の化学種は、以下の非限定的な例のうちの1つまたは複数を含む、本明細書で提供されるもののいずれかであってもよい：HFなどのフッ化水素、四フッ化硫黄または六フッ化硫黄またはフッ化スルフルルなどのフッ化硫黄、三フッ化窒素などのフッ化窒素、および二フッ化キセノンなどのフッ化キセノン、HClなどの塩化水素、二塩化硫黄または四塩化硫黄または塩化スルフルルなどの塩化硫黄、またはトリクロロアミン（ NCl_3 ）などの塩化窒素。第1のプロセスガスはまた、蒸気の形態でウエハ上に流されてもよく、例えば、 N_2 、Ar、He、またはNeなどのキャリアガス任意選択で含んでもよい。動作203の改質動作は、ウエハへの第1のプロセスガスの流れを停止することによって停止することができる。

40

【0093】

いくつかの実施形態では、改質分子がウエハ上に吸着するための活性化障壁を克服する

50

のを支援するために、活性化エネルギーが提供されてもよい。この活性化エネルギーは、熱エネルギー、ラジカルエネルギー、および／またはUV光子によって提供され得、場合によっては、ウエハの加熱および／またはプラズマまたは光子の生成を含み得る。第1の材料上への改質分子のこの吸着は、エネルギー依存性（例えば、温度依存性）の化学反応である化学吸着（chemical adsorption）または「化学吸着（chemisorption）」と考えることができる。一部の熱エッチング技法では、改質動作中のこの化学吸着は、材料層内の分子および入来する改質分子の活性化障壁を克服することを可能にする特定の温度範囲でのみ発生し、これらの分子と改質分子内の吸着質との間の解離および化学結合が可能になる。この温度範囲外では、化学吸着が起こらないか、または望ましくない（例えば、遅い）速度で起こる可能性がある。

10

【0094】

したがって、動作203のいくつかの実施態様は、プラズマではなく熱活性化エネルギーのみを使用して酸化物の表面層を改質する。第1のプロセスガスは、活性化エネルギーを提供する第1の温度に維持されたウエハ上に流され、酸化物が化学吸着によって改質されて酸化物の改質された層を形成する。第1の温度は、例えば、約20℃～約500℃、約20℃～約150℃、約20℃～約80℃、約20℃～約100℃、約100℃～約450℃、約100℃～約400℃、約150℃～約400℃、約200℃～約600℃、約200℃～約500℃、約200℃～約350℃、または約350℃～約500℃、または少なくとも約120℃、または約170℃未満など、本明細書で提供される任意の温度または温度範囲であってもよい。加えて、ウエハは、改質動作のすべて、または実質的にすべて（例えば、少なくとも80%、90%、または95%）の間、第1の温度に維持されてもよい。改質動作の持続時間は、ウエハ上の所望の露出分子の実質的にすべて（例えば、少なくとも80%、90%、または95%）の改質が起こる持続時間であり得る。持続時間は、例えば、約0.5秒～約600秒、約0.5秒～約400秒、約0.5秒～約300秒、約0.5秒～約10秒、約0.5秒～約5秒、約1秒～約5秒、または約5秒～約300秒の範囲であってもよい。

20

【0095】

いくつかの実施形態では、ハロゲン含有種を点火することによって動作203でプラズマを生成することができる。プラズマはin situで、または遠隔で生成されてもよい。様々な実施形態において、エッチングされる材料が金属を含む場合、プラズマを使用することができる。様々な実施形態において、エッチングされる材料が酸化金属である場合、プラズマを使用することができる。

30

【0096】

いくつかの実施態様では、プラズマなどからのイオンエネルギーを使用して、動作203の改質動作を駆動することができる。場合によっては、プラズマが点火されてもよく、フッ素または塩素がウエハと反応するか、またはウエハの表面上に吸着され得る。プラズマから生成される種は、ウエハを収容するプロセスチャンバ内でプラズマを形成することによって直接生成することができ、またはウエハを収容しないプロセスチャンバ内で遠隔で生成することができ、ウエハを収容するプロセスチャンバに供給することが可能である。

40

【0097】

動作205では、チャンバを任意選択でパージすることができる。パージは、チャンバから過剰な副生成物もしくはガスをポンピングすることによって、または不活性ガスなどのパージガスを流すことによって、またはその両方によって実施することができる。

【0098】

動作207では、三塩化ホウ素、または別のホウ素および塩素含有ガスがプラズマレス環境でチャンバに導入され、改質された表面を除去する。動作207で使用される化学種の化合物は、フッ素化材料または塩素化材料と反応してその元素を揮発させ、ウエハから脱離させる。例えば、この交換反応はエネルギー的に有利であり、したがって、フッ素化材料または塩素化材料は、例えば、塩素の移動を通じて、または例えばカルコゲニド材料

50

のエッチングのために、フッ化物と塩化物の組み合わせを含む揮発性ゲルマニウム、アンチモン、およびテルル化合物を形成するように結合することを通じて、化合物と揮発性化合物を形成することができる。三塩化ホウ素はまた、蒸気の形態でウエハ上に流されてもよく、材料を除去するための反応に対して不活性なキャリアガスを任意選択で含み得るプロセスガスの一部として流されてもよく、例示的なキャリアガスには、例えば、窒素、アルゴン、ヘリウム、またはネオンが挙げられ得る。いくつかの実施形態では、三フッ化ホウ素が動作 207 で三塩化ホウ素の代わりに使用されてもよい。いくつかの実施形態では、他の化学種が三フッ化ホウ素または三塩化ホウ素の代わりに使用されてもよい。例示的な化学種には、アルミニウム、ホウ素、ケイ素、またはゲルマニウムである中心原子を有し、少なくとも 1 つの塩素原子を有する化合物が挙げられ得る。動作 207 で使用される種の選択は、動作 203 で改質された種および表面に依存し得る。

10

【0099】

いくつかの実施形態では、動作 207 は、そのようなエッチングを可能にする様々なプロセス条件下で実施され得る。上記の温度範囲に加えて、いくつかの実施態様は、エッチング中、例えば、約 20℃～約 500℃、約 20℃～約 150℃、約 20℃～約 80℃、約 20℃～約 100℃、約 100℃～約 450℃、約 100℃～約 400℃、約 150℃～約 400℃、約 200℃～約 600℃、約 200℃～約 500℃、約 200℃～約 350℃、または約 350℃～約 500℃、または少なくとも約 120℃、または約 170℃未満の温度にウエハを維持してもよい。エッチングはまた、処理チャンバが、例えば、約 10 ミリトール (mTorr) ～約 100 Torr、または約 20 ミリトール～760 Torr (1 気圧) (約 20 mTorr～600 mTorr、約 30 mTorr～500 mTorr、および約 40 mTorr～400 mTorr を含む)、ならびに約 3 Torr～8 Torr、約 4 Torr～8 Torr、2 Torr～10 Torr、および 100 Torr～760 Torr の圧力に維持されている間に実施されてもよい。以下でより詳細に説明するように、いくつかの実施態様は、実質的に一定のプロセス条件 (例えば、設定条件の約 10%～5% の偏差などの小さな偏差を伴う) でエッチングを実施するが、他の実施態様は、エッチング中にプロセス条件の 1 つまたは複数を変更することができる。

20

【0100】

動作 207 では、改質された酸化物、すなわちフッ素化酸化物または塩素化酸化物がウエハから除去される。動作 207 は、プラズマレス環境で三塩化ホウ素をウエハ上に流すことを含む。本明細書に記載のように、三塩化ホウ素は、様々な熱 AL E 用途に使用することができる、安価かつ容易に入手可能な不燃性のガス状前駆体である。特定の理論によって束縛されるものではないが、三塩化ホウ素を使用して、配位子交換機構において改質された層を除去することができ、これによりフッ素含有ガスで事前に改質された表面上の塩素とフッ素の交換が熱力学的に有利となる。三塩化ホウ素は、フッ素化酸化物または塩素化酸化物と反応し、その成分をウエハから脱離させ、したがってウエハから除去される。三塩化ホウ素はまた、窒素、アルゴン、ヘリウム、またはネオンなどのキャリアガスおよび/または任意の不活性ガスを使用して流されてもよい。除去動作 207 は、ウエハへの三塩化ホウ素の流れを停止することによって停止することができる。

30

【0101】

脱離の場合、特定の温度範囲により、改質された分子の活性化障壁を克服することができ、これによりウエハからの改質された層の放出が可能になる。いくつかの例では、化学吸着および脱離が起こる温度範囲は重複しないが、他の実施形態では部分的または完全に重複する可能性がある。したがって、化学吸着および脱離を使用してウエハから分子を除去するために、いくつかの実施態様は、除去および改質動作中にウエハを同じ温度または実質的に同じ温度 (例えば、互いの約 10% または 5% 以内) に維持することができる。異なる温度レジームで生じる化学吸着および脱離を使用してウエハから分子を除去するために、動作 203 は、第 1 の温度範囲で行われ得、除去動作 207 は、第 1 の温度よりも高くても低くてもよい第 2 の異なる温度範囲で行われ得る。いくつかのそのような実施形態は、除去および改質動作中に同じまたは実質的に同じ温度にウエハを維持することによ

40

50

って複数のサイクルを実施して材料の複数の層を除去することができるが、他の実施形態では、化学吸着および脱離のための2つの温度レジーム間でウエハの加熱および冷却を繰り返してもよい。

【0102】

異なる温度レジームを使用する実施形態のいくつかでは、動作207中または前に、ウエハの温度は、ウエハが動作207中に維持される第1の温度とは異なる第2の温度にすることができる。いくつかの他の実施形態では、第2の温度は、第1の温度と同じ、または実質的に同じ（例えば、互いの約10%または5%以内）温度である。この第2の温度は、脱離が1つまたは複数の改質された表面層に対して起こる温度であってもよい。いくつかの実施形態では、第2の温度は第1の温度よりも高くてもよく、これらの実施形態では、動作207はウエハを第1の温度から第2の温度まで加熱することを含み得る。いくつかの他の実施形態では、第2の温度は第1の温度より低くてもよく、これらの実施形態では、ウエハは第1の温度から第2の温度まで能動的に冷却され得る。

10

【0103】

ウエハは、輻射加熱、対流加熱、固体間熱伝達、またはプラズマを使用して加熱することができる。加えて、ウエハの上部、底部、またはその両方を加熱することができる。ウエハの加熱はまた、いくつかの実施形態では、以下でさらに説明するように、非線形的に行われ得る。同じく以下で説明するように、ウエハは、様々な方式で能動的に冷却されてもよい。場合によっては、各々が互いに異なる温度に維持される加熱台座などの2つの別々のウエハ支持体上にウエハを位置決めすることによって、ウエハを2つの異なる温度に加熱することが可能である。したがって、ウエハは、これらの2つの異なるウエハ支持体間で移送されて異なるウエハ支持体に載置されることによって、2つの異なる温度に加熱される場合がある。

20

【0104】

動作207では、1つまたは複数の改質された表面層は、プラズマレス環境で三塩化ホウ素を使用して除去され得る。いくつかの実施形態では、動作207は、ウエハが第2の温度に維持されている間に実施される。いくつかの実施形態では、第2の温度は、動作203中に使用される温度と同じである。いくつかの実施形態では、第2の温度だけで、ウエハからの改質された分子の脱離が可能となり、それによってウエハから改質された分子が除去され得る。

30

【0105】

いくつかの実施形態では、第2の温度は、例えば、約20℃～約500℃、約20℃～約150℃、約20℃～約80℃、約20℃～約100℃、約100℃～約450℃、約100℃～約400℃、約150℃～約400℃、約200℃～約600℃、約200℃～約500℃、約200℃～約350℃、または約350℃～約500℃、または少なくとも約120℃、または約170℃未満であってもよい。加えて、ウエハは、除去動作のすべて、または実質的にすべて（例えば、少なくとも80%、90%、または95%）の間、その温度に維持され得る。除去動作の持続時間は、ウエハ上の所望の分子の実質的にすべて（例えば、少なくとも80%、90%、または95%）の脱離が起こる持続時間であってもよい。持続時間は、例えば、約0.5秒～約600秒、約0.5秒～約400秒、約0.5秒～約300秒、約0.5秒～約10秒、約0.5秒～約5秒、約1秒～約5秒、または約5秒～約300秒の範囲であってもよい。

40

【0106】

いくつかの実施形態では、動作203および207は、等温で実施される。いくつかの実施形態では、動作203および207は、等圧で実施される。いくつかの実施形態では、動作203および207は、等温かつ等圧で実施される。様々な実施形態において、動作203～211は、真空を破壊することなく実施される。様々な実施形態において、動作203～211は、同じチャンバ内で実施される。様々な実施形態において、動作203～211は、チャンバの同じステーション内で実施される。

【0107】

50

動作 203 および動作 207 の実施は、単一の熱 ALE サイクルとみなされてもよい。いくつかの実施態様では、これらの動作 203 および 207 は、複数のサイクルを実行し、酸素含有材料または酸化物材料の原子単層、サブ単層、および複数の層を除去するために繰り返すことができる。いくつかの実施形態は、一部のエッチング速度がエッチングされる材料の格子定数よりも低い場合があるため、1 サイクルで単層の一部を除去する。これは、例えば、約 1 ～ 約 1,000 サイクル、約 1 ～ 約 500 サイクル、約 1 ～ 約 100 サイクル、約 1 サイクル ～ 約 30 サイクル、または約 1 ～ 約 20 サイクルを実施することを含んでもよい。所望の量の膜をエッチングするために、任意の適切な数の ALE サイクルを含めることができる。いくつかの実施形態では、ALE は、ウエハ上の層の表面の約 1 オングストローム (Å) ～ 約 50 Å をエッチングするサイクルで実施される。いくつかの実施形態では、ALE のサイクルは、ウエハ上の層の表面の約 2 Å ～ 約 50 Å をエッチングする。いくつかの実施形態では、各 ALE サイクルは、少なくとも約 0.1 Å、0.5 Å、1 Å、2 Å、または 3 Å をエッチングすることができる。図 2 にさらに示されるように、動作 205 および 207、およびいくつかの実施態様では、ブロック 207 の任意選択のページは、N ALE またはエッチングサイクルにわたって繰り返されてもよい。動作 211 では、N 回の ALE サイクルが実施されたと決定する場合、エッチングは完了することができ、したがって終了することが可能である。

10

【0108】

いくつかの動作では、任意選択のページ動作 205 が、変更動作 203 の後、除去動作 207 の前に実施されてもよい。ページ動作では、フッ素種または塩素種などの非表面結合活性改質分子、および／または他の残留物もしくは粒子は、プロセスチャンバ、チャンバ壁、チャンバガス容積、および／またはウエハから除去され得る。これは、吸着層を除去することなく、プロセスチャンバをページおよび／または排気して活性種または他の元素を除去することによって行うことが可能である。プラズマ内で生成された種は、プラズマを停止し、残りの種を減衰させることによって除去することができ、任意選択でチャンバのページおよび／または排気と組み合わせることができる。ページは、N₂、Ar、Ne、He、およびそれらの組み合わせなどの任意の不活性ガスを使用して行うことができる。ページはまた、改質動作後、除去動作後、またはその両方を含む、本明細書で提供される任意の動作、ブロック、またはステップの後に行うことも可能である。ページは任意選択であるため、いくつかの実施態様はページを行わない場合がある。

20

30

【0109】

いくつかの実施態様では、各動作の持続時間、温度、圧力など、改質動作 203 および除去動作 207 のプロセス条件を変更する。いくつかの実施形態では、動作 203 および 207 は、実質的にほぼ同じ時間（例えば、互いの約 10 % または 5 % 以内）で実施され得るが、他の実施形態では、動作は異なる時間で実施され得る。例えば、動作 203 は、動作 207 よりも短い期間または長い期間実施されてもよい。各ブロックの様々な期間は、例えば、約 0.5 秒 ～ 約 600 秒、約 0.5 秒 ～ 約 400 秒、約 0.5 秒 ～ 約 300 秒、約 0.5 秒 ～ 約 10 秒、約 0.5 秒 ～ 約 5 秒、約 1 秒 ～ 約 5 秒、または約 5 秒 ～ 約 300 秒の範囲であってもよい。

【0110】

動作 201 ～ 211 が図 2 に図示されているが、いくつかの実施形態では、動作 201 ～ 211 のいずれかに加えて、その間、またはその前に、追加の動作および曝露が使用されてもよいことが理解されるであろう。

40

【0111】

酸化アルミニウム、酸化ハフニウム、または酸化ジルコニウムをエッチングするための一例では、図 2 による例示的なプロセスフローは、動作 203 でフッ化水素または三フッ化窒素を導入すること、動作 207 で BCl₃ を導入すること、その後任意選択で水素プラズマも導入することを伴い得る。

【0112】

ケイ素ドーパ酸化ハフニウム、酸化インジウムガリウムジルコニウム、ハフニウムおよ

50

びジルコニウムと合金化された酸化物、またはカルコゲニドをエッチングするための別の例では、図 2 による例示的なプロセスフローは、動作 203 でフッ化水素を導入すること、および動作 207 で BCl_3 を導入することを伴い得る。

【0113】

図 3 A ~ 図 3 C は、様々な実施形態による例示的なガス流シーケンスを図示する。図 3 A では、第 1 の種を有する第 1 のプロセスガスおよび第 2 の種を有する第 2 のプロセスガスは、重なり合うことなくウエハ上に流され、図 2 に関して説明されたガス流とみなされてもよい。ここで、第 1 のプロセスガスは時間 t_1 から時間 t_2 まで流され、その後停止されるが、これは改質動作 203 とみなされてもよい。場合によっては、任意選択のパージ動作は、任意選択の動作 205 など、時間 t_2 と時間 t_3 との間で実施されてもよい。時間 t_3 において、第 2 のプロセスガスは、停止するまで時間 t_4 までウエハ上に流され、この期間は除去動作 207 とみなされてもよい。

10

【0114】

図 3 B では、第 1 のプロセスガスおよび第 2 のプロセスガスは、エッチングの一部のみで重なり合う。時間 t_1 において、第 1 のプロセスガスがウエハ上に流されるが、第 2 のプロセスガスはウエハ上に流されず、これは時間 t_2 まで続く。これは、改質動作 203 とみなすこともできる。時間 t_2 において、第 2 のプロセスガスがウエハ上に流されると同時に、第 1 のプロセスガスがウエハ上に流される。第 1 および第 2 のプロセスガスは両方とも、時間 t_2 と時間 t_3 の間でウエハ上に流れ、これは、第 1 および第 2 のプロセスガスの重複または共流期間とみなされてもよい。図 3 B の時間 t_3 において、第 1 のプロセスガスの流れが停止され、第 2 のプロセスガスは、停止される時間 t_4 まで流れ続ける。この時間はまた、動作 207 の除去動作とみなされてもよい。

20

【0115】

いくつかの実施形態では、ウエハの温度は、図 3 B に示されるエッチング中に調整することができる。例えば、ウエハは、時間 t_1 と t_2 の間で第 1 の温度に維持され、時間 t_2 で第 2 の温度に調整され、時間 t_3 または t_4 までその第 2 の温度に維持され得る。いくつかのそのような実施態様では、温度は、時間 t_3 から時間 t_4 まで第 3 の温度に調整され得る。いくつかの他の実施形態では、温度は、時間 t_1 から時間 t_3 まで第 1 の温度に保持され、その後、第 2 の温度に調整され得る。これは、いくつかの実施形態では、第 2 の温度が第 1 の温度よりも高いか低い、および該当する場合には、第 3 の温度が第 2 の温度よりも高いか低い場合の温度上昇または下降シーケンスとみなすことができる。これらの温度は、本明細書において上記で提供された温度のいずれであってもよい。本明細書で提供されるエッチングのいずれかの間に温度を調整することにより、化学吸着および脱離の追加の制御および使用が可能になり得る。いくつかの他の実施形態では、ウエハは、図 3 B のエッチング中、実質的に一定の温度（例えば、設定温度の約 10 % または 5 % 以内）に維持され得る。

30

【0116】

同様に、ウエハ温度は、改質中、除去中、またはその両方の間に上昇または減少されてもよい。例えば図 3 A を参照すると、ウエハ温度は、時間 t_1 と時間 t_2 との間の改質動作中、第 1 の温度からより高い第 2 の温度に上昇させるか、または第 1 の温度からより低い第 3 の温度に減少させることができる。代替的または追加的に、時間 t_3 と t_4 との間の除去動作中、ウエハ温度は同じく増加または減少されてもよい。

40

【0117】

代替的または追加的に、チャンバ圧力は、図 3 B のエッチング中に調整することができる。例えば、チャンバは、時間 t_1 と t_2 との間に第 1 の圧力に維持され、時間 t_2 で第 2 の圧力に調整され、時間 t_3 または t_4 までその第 2 の圧力に維持され得る。いくつかのそのような実施態様では、圧力は、時間 t_3 から時間 t_4 まで第 3 の圧力に調整され得る。いくつかの他の実施形態では、圧力は、時間 t_1 から時間 t_3 まで第 1 の圧力に保持され、その後、第 2 の圧力に調整されてもよい。これは、いくつかの実施形態では、第 2 の圧力が第 1 の圧力よりも高いか低い、および該当する場合には、第 3 の圧力が第 2 の圧

50

力よりも高いか低い場合の圧力上昇または下降シーケンスとみなすことができる。これらの圧力は、本明細書において上記で提供された圧力のいずれであってもよい。本明細書で提供されるエッチング中の圧力を調整することにより、化学吸着および脱離の追加の制御および使用が可能になるだけでなく、チャンバ内での不要な残留物の蓄積を低減することができる。いくつかの他の実施形態では、圧力は、図 3 B のエッチング中に実質的に一定であってもよい（例えば、設定圧力の約 10 % または 5 % 以内）。

【0118】

同様に、チャンバ圧力の増加または減少は、改質中、除去中、またはその両方の間に実施されてもよい。例えば図 3 A を参照すると、チャンバ圧力は、時間 t_1 と時間 t_2 との間の改質動作中、第 1 の圧力からより高い第 2 の圧力に増加させるか、または第 1 の圧力からより低い第 2 の圧力に減少させることができる。これに代えて、またはこれに加えて、時間 t_3 と t_4 との間の除去動作中、チャンバ圧力は同じく増加または減少されてもよい。

【0119】

図 3 C では、第 1 の種および第 2 の種は、実質的にエッチングのすべてにおいてウエハ上に共流されるか、または同時に流される。ガス供給システムの設計、実装、公差、および動作における不完全さにより、これらのガスは正確に同時に共流されるように意図されている可能性があるが、実際には正確ではない可能性がある。ここで図 3 C では、第 1 の種および第 2 の種は、時間 t_1 から t_2 までウエハ上に同時に流され、その後両方とも停止される。いくつかの実施態様では、第 1 および第 2 の種は、ウエハ上に流される任意のキャリアガスと共に同じプロセスガス中に存在し得る。いくつかの他の実施態様では、上述したように、第 1 の種は第 1 のプロセスガスの一部であってもよく、第 2 の種は別々の第 2 のプロセスガスの一部であってもよく、これらの第 1 および第 2 のプロセスガスは両方とも、時間 t_1 から時間 t_2 までウエハ上に共流される。

【0120】

いくつかの実施態様では、プロセスチャンバに入るまで別々に第 1 の種および第 2 の種を保つことが有利な場合がある。これにより、第 1 の種と第 2 の種との間の交差反応が回避され得る。したがって、第 1 および第 2 の種は、別々のラインで、別々のポートを通して、例えば、デュアルプレナムシャワーヘッドまたは別々のノズルなどを通して処理チャンバに流され得る。これにより、2 つの化学物質がウエハ表面上でのみ合流することが可能になり得る。

【0121】

いくつかの実施形態では、ウエハの温度は、図 3 C および図 4 に示されるエッチング中に調整することができる。例えば、ウエハは、時間 t_1 と t_a との間で第 1 の温度に維持され、時間 t_a で第 2 の温度に調整され、時間 t_2 までその第 2 の温度に維持され得る。いくつかのそのような実施態様では、温度は、このエッチング全体を通して第 3 の温度または他の温度に調整され得る。これは、いくつかの実施形態では、例えば、第 2 の温度が第 1 の温度よりも高いか低い、および該当する場合には、第 3 の温度が第 2 の温度よりも高いか低い場合の温度上昇または下降シーケンスとみなすことができる。これらの温度は、本明細書において上記で提供された温度のいずれであってもよい。いくつかの他の実施形態では、ウエハは、図 3 C のエッチング中に実質的に一定の温度に維持することができる。

【0122】

代替的または追加的に、チャンバ圧力は、図 3 C のエッチング中に調整することができる。例えば、チャンバは、時間 t_1 と t_2 との間に第 1 の圧力に維持され、時間 t_2 で第 2 の圧力に調整され、時間 t_3 までその第 2 の圧力に維持され得る。これは、いくつかの実施形態では、第 2 の圧力が第 1 の圧力よりも高いか低い場合の圧力上昇または下降シーケンスとみなすことができる。これらの圧力は、本明細書において上記で提供された圧力のいずれであってもよい。いくつかの他の実施形態では、圧力は、図 3 C のエッチング中に実質的に一定であってもよい。

【0123】

装置

本明細書における特定の開示されている実施形態は、シングルウエハ装置およびマルチウエハ装置を含む任意の適切な装置上で実施することができる。特定の開示されている実施形態は、4ステーション装置上で実施されてもよい。各ステーションは、以下に説明するように構成され得る。いくつかの実施形態では、4ステーション装置において、2つのステーションが原子層エッチング（ALE）プロセスの改質を実施するように構成され得、もう2つのステーションがALEの熱除去動作を実施するように構成される。例えば、2つのステーションは揮発フッ化水素などのフッ素含有種を送給するように構成することができ、もう2つのステーションはプラズマレス環境で三塩化ホウ素を送給するように構成することができる。マルチステーション装置は、各ステーションまたは1つまたは複数のステーションが異なる温度に設定されるように使用することができ、これを利用して効率的な改質および除去を可能にすることができる。いくつかの実施形態では、装置は、圧力を切り替えるか、動作間で圧力を増減するか、またはプロセス全体を通じて同じ圧力で動作するように構成される。いくつかの実施形態では、改質および除去は、同じステーションにおいて実施される。いくつかの実施形態では、ステーションは、シャワーヘッドを通じてチャンバに導入される改質ガスおよび除去ガスを有するように構成される。さらなる例を、図4～図9に関して以下で説明する。

10

【0124】

図4は、いずれもプラズマ強化されてもよい、原子層堆積（ALD）および／または化学気相堆積（CVD）を使用して材料を堆積するために使用され得るプロセスステーション400の一実施形態を概略的に示す。様々な開示されている実施形態において、プロセスステーション400は、原子層エッチングによって材料をエッチングするために使用され得る。簡略化のために、プロセスステーション400は、低圧環境を維持するためのプロセスチャンバ本体402を有する独立型プロセスステーションとして図示されている。しかし、複数のプロセスステーション400が共通のプロセスツール環境に含まれてもよいことが理解されよう。さらに、いくつかの実施形態では、プロセスステーション400の1つまたは複数のハードウェアパラメータ（以下で詳細に説明されるものを含む）は、1つまたは複数のコンピュータコントローラによってプログラマ的に調整することができることが理解されよう。

20

30

【0125】

プロセスステーション400は、プロセスガスを分配シャワーヘッド406に送給するための反応剤送給システム401と流体連通する。反応剤送給システム401は、シャワーヘッド406に送給するプロセスガスをブレンドおよび／または調整するための混合容器404を含む。1つまたは複数の混合容器入口弁420は、混合容器404へのプロセスガスの導入を制御することができる。同様に、シャワーヘッド入口弁405は、シャワーヘッド406へのプロセスガスの導入を制御することができる。

【0126】

いくつかの反応剤は、気化前、およびプロセスステーションへの送給後に液体形態で保存され得る。例えば、フッ化水素を気化させることができる。例えば、図4の実施形態は、混合容器404に供給される液体反応剤を気化させるための気化ポイント403を含む。いくつかの実施形態では、気化ポイント403は、加熱された気化器であってもよい。このような気化器から発生された反応剤蒸気は、下流の送給配管で凝縮する可能性がある。凝縮した反応剤に不適合なガスを曝露すると、小さな粒子が生成される場合がある。これらの小さな粒子は、配管を詰まらせたり、弁の動作を妨げたり、基板を汚染したりする可能性がある。これらの問題に対処するいくつかのアプローチは、送給配管を掃除および／または排気し、残留反応剤を除去することを伴う。しかし、送給配管を掃除すると、プロセスステーションのサイクル時間が増加し、プロセスステーションのスループットが低下する可能性がある。したがって、いくつかの実施形態では、気化ポイント403の下流の送給配管は、ヒートトレースされ得る。いくつかの例では、混合容器404もまた、ヒ

40

50

ートトレースされ得る。1つの非限定的な例では、気化ポイント403の下流の配管は、混合容器404においておよそ100℃～およそ150℃に及ぶ上昇温度プロファイルを有する。

【0127】

いくつかの実施形態では、反応剤液体は、液体注入器で気化され得る。例えば、液体注入器は、液体反応剤のパルスを混合容器の上流のキャリアガス流に注入することができる。1つのシナリオでは、液体注入器は、液体を高圧から低圧にフラッシュすることによって反応剤を気化させることができる。別のシナリオでは、液体注入器は、液体を分散微小液滴に霧化し、続いて加熱された送給パイプ内で気化することができる。小さな液滴は大きな液滴よりも速く気化することができ、液体注入と完全気化との間の遅延を減少させることが理解されよう。気化が速いほど、気化ポイント403から下流の配管の長さを短くすることができる。1つのシナリオでは、液体注入器は、混合容器404に直接取り付けられてもよい。別のシナリオでは、液体注入器は、シャワーヘッド406に直接取り付けられてもよい。

10

【0128】

いくつかの実施形態では、気化されてプロセスステーション400に送給される液体の質量流量を制御するために、液体流コントローラを気化ポイント403の上流に設けることができる。例えば、液体流コントローラ(LFC)は、LFCの下流に位置する熱質量流量計(MFM)を含み得る。次に、LFCのプランジャ弁は、MFMと電気的に通信する比例積分微分(PID)コントローラによって提供されるフィードバック制御信号に回答して調整され得る。しかし、フィードバック制御を使用して液体の流れを安定化するには1秒以上かかる場合がある。これは、液体反応剤の投与時間を延長する可能性がある。したがって、いくつかの実施形態では、LFCは、フィードバック制御モードと直接制御モードとの間で動的に切り替えられてもよい。いくつかの実施形態では、LFCの感知管およびPIDコントローラを無効にすることによって、LFCをフィードバック制御モードから直接制御モードに動的に切り替えることができる。

20

【0129】

シャワーヘッド406は、プロセスガスを基板412に向かって分配する。例示的なプロセスガスには、限定はしないが、フッ化水素、三フッ化窒素、および三塩化ホウ素が挙げられる。図4に示す実施形態では、基板412は、シャワーヘッド406の下に位置し、台座408上に静止した状態で示されている。台座は、静電チャックであってもよい。台座は、約150℃～約500℃、または約200℃～約400℃の温度に加熱することができる。シャワーヘッド406は、任意の適切な形状を有してもよく、プロセスガスを基板412に分配するための任意の適切な数および配置のポートを有してもよいことが理解されよう。

30

【0130】

いくつかの実施形態では、マイクロ容積407がシャワーヘッド406の下に位置する。プロセスステーションの全容積ではなくマイクロ容積でプロセスを実施することは、反応剤への曝露およびパージ時間を短縮することができ、プロセス条件(例えば、圧力、温度など)を変更するための時間を短縮することができ、プロセスガスへのプロセスステーションロボットの曝露を制限することなどが可能である。例示的なマイクロ容積サイズには、限定はしないが、0.1リットル～2リットルの容積が挙げられる。このマイクロ容積もまた、生産性スループットに影響を与える。サイクル当たりの堆積速度が低下する一方で、サイクル時間も同時に短縮される。場合によっては、後者の影響は、膜の所与の目標厚さに対するモジュールの全体的なスループットを改善するのに十分効果的である。

40

【0131】

いくつかの実施形態では、台座408を上昇または下降させて基板412をマイクロ容積407に露出させ、かつ／またはマイクロ容積407の容積を変化させることができる。例えば、基板移送段階では、台座408を下降させ、基板412が台座408上にロードされることを可能にすることができる。堆積プロセス段階中、台座408を上昇させ、

50

マイクロ容積 407 内に基板 412 を位置決めすることができる。いくつかの実施形態では、マイクロ容積 407 は、基板 412 ならびに台座 408 の一部を完全に包囲し、堆積プロセス中に流れインピーダンスの高い領域を形成することができる。

【0132】

任意選択で、台座 408 は、マイクロ容積 407 内のプロセス圧力、反応剤濃度などを調節するために、堆積プロセスの一部の間に下降および／または上昇されてもよい。プロセスチャンバ本体 402 が堆積プロセス中にベース圧力のままである 1 つのシナリオでは、台座 408 を下降させることにより、マイクロ容積 407 を排気することができる。マイクロ容積対プロセスチャンバ容積の例示的な比には、限定はしないが、1:2000~1:10 の容積比が挙げられる。いくつかの実施形態では、台座の高さは、適切なコンピュータコントローラによってプログラマ的に調整することができることが理解されよう。

10

【0133】

別のシナリオでは、台座 408 の高さを調整することにより、熱 ALE プロセスの改質動作におけるプラズマ動作中にプラズマ密度を変化させることが可能になり得る。プロセス段階の終わりに、別の基板の移送段階中に台座 408 を下降させ、台座 408 から基板 412 を取り出し可能にすることができる。

【0134】

本明細書に記載の例示的なマイクロ容積変動は高さ調整可能な台座に言及しているが、いくつかの実施形態では、シャワーヘッド 406 の位置を台座 408 に対して調整し、マイクロ容積 407 の容積を変化させることができることが理解されよう。さらに、台座 408 および／またはシャワーヘッド 406 の垂直位置は、本開示の範囲内の任意の適切な機構によって変化させてもよいことが理解されよう。いくつかの実施形態では、台座 408 は、基板 412 の配向を回転させるための回転軸を含んでもよい。いくつかの実施形態では、これらの例示的な調整の 1 つまたは複数は、1 つまたは複数の適切なコンピュータコントローラによってプログラマ的に実施することができることが理解されよう。

20

【0135】

いくつかの実施形態では、図 400 の処理チャンバは熱 ALE に対してプラズマを使用しないため、プラズマ関連機器を有していない。いくつかの他の実施形態では、プラズマが使用されてもよいし、またはリアクタがそのようなプラズマ関連機器を有してもよい。例えば、図 4 に示すように、シャワーヘッド 406 および台座 408 は、プラズマに電力を供給するために、RF 電源 414 および整合ネットワーク 416 と電気的に通信する。いくつかの実施形態では、プラズマエネルギーは、プロセスステーション圧力、ガス濃度、RF 源電力、RF 源周波数、およびプラズマ電力パルスタイミングの 1 つまたは複数によって制御することによって制御することができる。例えば、RF 電源 414 および整合ネットワーク 416 は、任意の適切な電力で動作してラジカル種の所望の組成を有するプラズマを形成することができる。適切な電力の例は、上記に含まれている。同様に、RF 電源 414 は、任意の適切な周波数の RF 電力を提供することができる。いくつかの実施形態では、RF 電源 414 は、互いに独立して高周波および低周波の RF 電源を制御するように構成され得る。例示的な低周波 RF 周波数は、限定はしないが、50 kHz ~ 2000 kHz の周波数を含み得る。例示的な高周波 RF 周波数は、限定はしないが、1.8 MHz ~ 2.45 GHz の周波数を含み得る。表面反応のためのプラズマエネルギーを提供するために、任意の適切なパラメータを離散的または連続的に調節することができることが理解されよう。1 つの非限定的な例では、プラズマ電力を断続的にパルス化し、連続的に電力を供給されるプラズマと比較して基板表面でのイオン衝撃を低減することができる。

30

40

【0136】

いくつかの実施形態では、プラズマは、1 つまたは複数のプラズマモニタによって in situ で監視することができる。1 つのシナリオでは、プラズマ電力は、1 つまたは複数の電圧、電流センサ（例えば、V I プローブ）によって監視され得る。別のシナリオでは、プラズマ密度および／またはプロセスガス濃度は、1 つまたは複数の発光分光センサ（OES）によって測定されてもよい。いくつかの実施形態では、1 つまたは複数のプラ

50

ズマパラメータは、そのような *in-situ* プラズマモニタからの測定値に基づいてプログラマティックに調整することができる。例えば、OES センサは、プラズマ電力のプログラム制御を提供するためのフィードバックループで使用され得る。いくつかの実施形態では、他のモニタを使用して、プラズマおよび他のプロセス特性を監視することができることが理解されよう。そのようなモニタには、限定はしないが、赤外線 (IR) モニタ、音響モニタ、および圧力変換器が挙げられ得る。

【0137】

いくつかの実施形態では、プラズマは、入出力制御 (IOC) シーケンス命令を介して制御され得る。一例では、プラズマプロセス段階に対するプラズマ条件を設定するための命令は、堆積プロセスレシピの対応するプラズマ活性化レシピ段階に含まれてもよい。場合によっては、プロセスレシピ段階は、堆積プロセス段階に対するすべての命令がそのプロセス段階と同時に実行されるように、順に配置されてもよい。いくつかの実施形態では、1つまたは複数のプラズマパラメータを設定するための命令が、プラズマプロセス段階に先行するレシピ段階に含まれ得る。例えば、第1のレシピ段階は、不活性ガスおよび／または反応剤ガスの流量を設定するための命令、プラズマ発生器を電力設定点に設定するための命令、および第1のレシピ段階のための時間遅延命令を含んでもよい。第2の後続のレシピ段階は、プラズマ発生器を有効にするための命令、および第2のレシピ段階のための時間遅延命令を含んでもよい。第3のレシピ段階は、プラズマ発生器を無効にするための命令、および第3のレシピ段階のための時間遅延命令を含んでもよい。これらのレシピ段階は、本開示の範囲内で任意の適切な方法でさらに細分化および／または反復され得ることが理解されよう。

【0138】

いくつかの堆積プロセスでは、プラズマの衝突は、持続時間として数秒以上続く。特定の実施態様では、はるかに短いプラズマの衝突が使用されてもよい。これらは 10 ms ~ 1 秒程度、典型的には約 20 ~ 80 ms であり得、具体例としては 50 ms である。そのような非常に短い RF プラズマの衝突は、プラズマの非常に迅速な安定化を必要とする。これを達成するために、プラズマ発生器は、周波数が変動することを許容しながら、インピーダンス整合が特定の電圧に事前設定されるように構成され得る。従来、高周波プラズマは、約 13.56 MHz の RF 周波数で生成される。本明細書に開示される様々な実施形態において、周波数は、この標準値とは異なる値に変動することが許容される。インピーダンス整合を所定の電圧に固定しながら周波数の変動を許容することによって、プラズマははるかに迅速に安定化することができ、この結果は、ある種の堆積サイクルに関連付けられた非常に短いプラズマの衝突を使用する場合に重要となり得る。

【0139】

いくつかの実施形態では、台座 408 は、ヒータ 410 を介して温度制御され得る。いくつかの実施形態では、ヒータ 410 は、ウエハを加熱するために使用される複数の LED を含むヒータユニットなど、上述され図 5 ~ 図 7 に示すヒータユニットと同じであってもよい。さらに、いくつかの実施形態では、プロセスステーション 400 についての圧力制御は、バタフライ弁 418 によって提供され得る。図 4 の実施形態に示すように、バタフライ弁 418 は、下流の真空ポンプ (図示せず) によって提供される真空を絞る。しかし、いくつかの実施形態では、プロセスステーション 400 の圧力制御はまた、プロセスステーション 400 に導入される 1つまたは複数のガスの流量を変化させることによって調整することができる。

【0140】

図 4 は単一のステーションとして図示されているが、処理チャンバは、ガス送給システムまたは他の機器を共有する複数のそのようなステーションを有してもよいことが理解されよう。例えば、図 8 および図 9 に示すように、チャンバ 804、806、902、および 904 は、4つの処理ステーションを含む。各ステーションは、図 4 ~ 図 7 の単一ステーションに関して説明した特徴のいずれかを含むことができる。チャンバ 804 および 902 内のステーションは、エッチングに使用することができ、チャンバ 806 および 90

4 内のステーションは、ウエハ上に材料を堆積するために使用することができる。例えば、チャンバ 804 および 902 の各ステーションを使用して、特定のプロセスステーションにおいて台座などのウエハホルダに保持されたウエハ上に熱 ALE などの熱エッチングを実施してもよく、同様に、チャンバ 806 および 904 の各ステーションを使用して、特定のプロセスステーションにおいてウエハホルダに保持されたウエハ上に ALD および熱 ALD などの堆積を実施してもよい。他の同様のマルチステーション処理装置は、実施態様および、例えば、所望のレベルの並行ウエハ処理、サイズ／スペースの制約、コストの制約などに応じて、より多くのまたはより少ない数のプロセスステーションを有してもよい。

【0141】

いくつかの処理チャンバ、例えばそれぞれ図 8 および図 9 の堆積チャンバ 806 および 904 の場合、RF サブシステム 890 および 990 は、RF 電力を生成し、高周波入力ポートを介して集積回路製作チャンバ 806 および 904 に伝達することができる。特定の実施形態では、集積回路製作チャンバ 806 および 904 は、高周波入力ポートに加えて入力ポートを備えることができる。したがって、集積回路製作チャンバ 806 および 904 は、8 つの RF 入力ポートを利用することができる。特定の実施形態では、集積回路製作チャンバ 806 および 904 のステーション 882A～D および 982A～D は各々、第 1 および第 2 の入力ポートを利用することができ、第 1 の入力ポートが第 1 の周波数を有する信号を伝達し得、第 2 の入力ポートが第 2 の周波数を有する信号を伝達し得る。いくつかの実施形態では、ステーション 882A～D および 982A～D などのステーションは、3 つ以上の入力ポートを利用することができ、各入力ポートは、異なる周波数を有する信号を伝達することができる。いくつかの実施形態では、複数の RF 発生器が使用されてもよい。二重周波数を使用することで、プラズマ特性の向上をもたらすことができる。様々な実施形態において、複数の電極が基板支持体内にあってもよい。いくつかの実施形態では、追加の電極がエッジリング内にあってもよい。

【0142】

上で述べたように、エッチングおよび／または堆積中のプロセス条件を制御するために、システムコントローラを本明細書に記載のツールに用いることができる。例えば、コントローラ（図 8 の 829、および図 9 の 929）は、典型的には、1 つまたは複数のメモリデバイスと、1 つまたは複数のプロセッサとを含む。コントローラ 829 は、ツール 800 および／または 900 の活動のすべてを制御することができる。いくつかの実施態様では、コントローラ 829 および／または 929 は、システムの一部であり、上述の例の一部であってもよい。そのようなシステムは、1 つまたは複数の処理ツール、1 つまたは複数のチャンバ、1 つまたは複数の処理用プラットフォーム、および／または特定の処理構成要素（ウエハ台座、ガス流システムなど）を含む半導体処理機器を含むことができる。これらのシステムは、半導体ウエハまたは基板の処理前、処理中、および処理後のシステム動作を制御するための電子機器と一体化されてもよい。

【0143】

コントローラは、上述の任意の技法を実施するように構成される。例えば、図 8 のツール 800 または図 9 のツール 900、および図 2 の技法を参照すると、いくつかの実施形態では、コントローラ 829 および／または 929 は、基板加熱ユニットに基板支持フィーチャ上に位置決めされたウエハを第 1 の温度にさせ（すなわち、加熱する）、プロセスガスユニットに第 1 のプロセスガスをウエハに流させるように構成される。上記のように、第 1 のプロセスガスは、ウエハが第 1 の温度に維持されている間、いくつかの実施形態ではプラズマ使用せずに、化学吸着によってウエハ上の材料の 1 つまたは複数の表面層を改質するように構成される。コントローラは、プロセスガスユニットに、本明細書に記載のように第 2 のプロセスガスまたは三塩化ホウ素を基板上に流し、材料の改質された層を除去させるようにさらに構成することができる。コントローラは、ロボットアームのいずれかを含むウエハ移送ユニットに、処理ステーションのいずれかの間でウエハを搬送させ、1 つまたは複数の真空ポンプを含み得る圧力ユニット 816 および 916 を制御させ、

10

20

30

40

50

そしてツールおよびチャンバ内の圧力を制御させるようにさらに構成される。

【0144】

本明細書に開示されている主題は図示された実施形態に関して特に説明されてきたが、様々な変更、修正、および適応を本開示に基づいて行うことが可能であり、それらは本発明の範囲内にあることを意図していることが理解されよう。説明は開示されている実施形態に限定されず、逆に、特許請求の範囲内に含まれる様々な修正および同等の構成を包含することを意図していることを理解されたい。

【0145】

本開示は、上記のおよび本明細書の以下に提供される装置を含む。ここで図5を参照すると、本開示による材料をエッチングするための基板処理チャンバの一例が示される。特定の基板処理チャンバが示され説明されるが、本明細書で説明される方法は、他の種類の基板処理システム上で実施されてもよい。様々な実施形態において、特定の開示されている実施形態を処理するための適切な装置またはチャンバは、以下の構成要素のうちの1つまたは複数を含む：陽極酸化チャンバ本体、陽極酸化上部プレート、陽極酸化ライナ、セラミックまたは陽極酸化アルミニウム台座、三塩化ホウ素を送給するために加熱可能な送給ライン、ニッケル含有量の高いステンレス鋼の低圧構成要素、およびイットリアコーティング。

10

【0146】

図5は、熱原子層エッチングを含む、開示されている実施形態による半導体処理のための例示的な装置520を図示し、この装置520は、チャンバ522と、プロセスガスユニット524と、基板加熱ユニット526と、基板冷却ユニット528とを含む。処理チャンバ522は、チャンバ内部532（プレナム容積とみなすことができる）を少なくとも部分的に境界付けて画定するチャンバ壁530を有する。

20

【0147】

プロセスガスユニット524は、反応剤、改質分子、変換分子、または除去分子などの液体および／もしくはガスを含み得るプロセスガスを、チャンバ内部532における基板534上に流すように構成される。プロセスガスユニット524はまた、穴、ノズル（そのうちの2つが図示される）、またはシャワーヘッドなど、第1のプロセスガスを基板534上に流すように構成されている1つまたは複数の流れフィーチャ542を含む。1つまたは複数の流れフィーチャ542は、例えば、処理チャンバの壁、上部、および底部など、チャンバ内部532内の上方、下方、側方、またはそれらの位置の組み合わせに位置決めすることができる。プロセスガスユニット524は、チャンバ内部532に送給するプロセスガスをブレンドおよび／または調整するための混合容器を含んでもよい。1つまたは複数の混合容器入口弁は、混合容器へのプロセスガスの導入を制御することができる。

30

【0148】

プロセスガスユニット524は、第1のプロセスガス源536と、第1のプロセス液体源538と、第1の液体をガスに気化させることができる気化ポイント（図示せず）と、キャリアガス源540とを含むことができる。いくつかの反応剤は、気化前、およびチャンバ522への送給後に液体形態で保存され得る。第1のプロセスガスは、いくつかの実施形態では、プラズマを使用せずに基板上の材料の1つまたは複数の層を改質するように構成されている塩素またはフッ素を含んでもよく、第2のプロセスガスは、上述のように、第2の処理チャンバ内のウエハ上への三塩化ホウ素などのホウ素および塩素を有する化合物を含んでもよい。

40

【0149】

いくつかの実施態様では、気化ポイントは、加熱された液体注入モジュールであってもよい。いくつかの他の実施態様では、気化ポイントは、加熱された気化器であってもよい。いくつかの他の実施形態では、蒸気は、液体試薬を含む容器の上を真空にすることによって生成することができる。さらに他の実施態様では、気化ポイントは、プロセスステーションから排除することができる。いくつかの実施態様では、液体流コントローラ（LF

50

C) を気化ポイントの上流に設け、気化されてチャンバ内部 532 に送給するための液体の質量流量を制御することができる。キャリアガス源 540 は、処理ガスと共に流すことができる 1 つまたは複数のキャリアガスまたは液体を含み、これらは、 N_2 、 Ar 、 Ne 、 He のような不活性ガスであり得る。装置 520 はまた、チャンバ内部を低圧、例えば、 1 mTorr または 10 Torr の圧力を有する真空中にポンピングするように構成されている真空ポンプ 533 を含んでもよい。

【0150】

チャンバ内部 532 は、チャンバ内で基板 534 を支持し、熱的に浮上させるように構成されている基板支持フィーチャ 535 を含む。基板支持フィーチャ 535 は、例えば、チャンバ内部 532 において基板 534 を支持するクランプ、水平ピンまたは支持体、垂直ピンまたは支持体、および半円形リングを含んでもよい。これらのフィーチャは、基板 534 の熱質量が基板のみの熱質量まで可能な限り低減されるように基板 534 を支持するように構成される。したがって、各基板支持フィーチャ 535 は、基板 534 との接触を最小限にすることができ、処理中に基板を適切に支持するために（例えば、基板の重量を支持し、かつ基板の非弾性変形を防止するために）必要な最小数のフィーチャであってもよい。例えば、基板と接触する 1 つの基板支持フィーチャ 535 の表面積は、基板の裏側の全表面積の約 1%、0.5%、0.1%、0.05%、または 0.01% 未満であり得、また、例えば、2、3、または 4 つのフィーチャを利用することもできる。

【0151】

一例では、基板支持フィーチャ 535 は、垂直の長手方向軸に沿って巻かれるか螺旋状である溝を有し、長手方向軸から様々な距離でオフセットされ、基板を支持するように構成される 2 つ以上の垂直ピンを含んでもよい。垂直ピンがその長手方向軸に沿って回転し、基板の縁部が溝内に位置決めされると、溝の縁部、したがって基板の縁部は長手方向軸からさらに離れるように移動する。複数の垂直ピンが基板を支持するために使用される場合、垂直ピンの回転により、溝が長手方向軸に垂直な方向に支持力を基板に加える。

【0152】

いくつかの実施形態では、チャンバ 522 は、基板リフトピンを含むウエハ支持台座を含んでもよい。いくつかの実施形態では、ウエハ支持台座は、セラミックで作製される。熱 ALE 処理中、リフトピンは、台座と基板との間の熱エネルギーの伝達を実質的にないように（例えば、両者の間で伝達されるエネルギーが 10%、5%、1%、0.5%、または 0.1% 未満）、台座から基板を支持して位置決めすることができる。いくつかの他の実施形態では、チャンバ 522 は、台座を有していなくてもよい。いくつかの実施形態では、約 20°C ～ 500°C など、基板を本明細書で提供される温度に加熱するように構成されている基板加熱ユニット 526 を含む静電チャック (ESC) が使用され得る。

【0153】

基板加熱ユニット 526 は、基板を複数の温度に加熱し、そのような温度を、例えば、少なくとも 1 秒、5 秒、10 秒、30 秒、1 分、2 分、または 3 分間維持するように構成される。いくつかの実施形態では、基板加熱ユニット 526 は、少なくとも 2 つの温度範囲の間で基板を加熱するように構成され（第 1 の範囲は約 20°C ～ 150°C であり、第 2 の範囲は約 200°C ～ 600°C である）、かつ基板をこれらの範囲内の温度に、例えば、少なくとも 1 秒、5 秒、または 10 秒間維持するように構成される。加えて、いくつかの実施形態では、基板加熱ユニット 526 は、例えば、約 250 ミリ秒、150 ミリ秒、100 ミリ秒、または 50 ミリ秒未満で基板を第 1 の温度範囲から第 2 の温度範囲に加熱するように構成される。

【0154】

いくつかの実施形態では、基板加熱ユニット 526 は、セラミックで作製される。基板加熱ユニット 526 は、輻射加熱、対流加熱、レーザ加熱、プラズマ加熱、固体間熱伝達（例えば、加熱された静電チャックまたは台座内の 1 つまたは複数の加熱要素によって生成された熱を、そのチャックまたは台座によってまたはその上に支持される基板に伝達すること）、またはこれらの項目の組み合わせを利用することができる。輻射加熱の場合、

基板加熱ユニット526は、放出光加熱、紫外線加熱、マイクロ波加熱、高周波加熱、および誘導加熱に使用することができる。例えば、基板加熱ユニット526は、400ナノメートル（nm）～800nmに及ぶ範囲であり得る波長を有する可視光を放出する発光ダイオード（LED）を含んでもよい。これには、例えば、加熱ランプ、発光ダイオード（例えば、LED）、セラミックヒータ、石英ヒータ、または光エネルギー源に接続された複数の屈折率分布（GRIN）レンズも挙げられ得る。GRINレンズは、熱エネルギー（熱または光）を光エネルギー源から均一な方式で基板に送給するように構成され、光源は、光ファイバケーブルなどの導管を通して熱エネルギーをGRINレンズに伝達するレーザまたは高強度光源であってもよい。基板加熱ユニット526によって利用される加熱要素は、基板534の上方、下方、側方、またはそれらの位置の組み合わせに位置決めされてもよく、かつチャンバ内部532の内側、外側、またはその両方に位置決めされてもよい。図5では、基板加熱ユニット526によって利用される加熱要素は、基板534の上方と下方の両方に位置決めされた複数のLED526Aを含み、下部加熱要素がチャンバ内部532の内側に位置決めされ、上部加熱要素がチャンバ内部532の外側に位置決めされる。いくつかの実施形態では、チャンバ522（「プロセスチャンバ」とも呼ばれ得る）の外側に位置決めされる加熱要素の一部について、チャンバ522は、放射がチャンバ内部532内および基板534上に伝達されることを可能にする窓554を有してもよい。いくつかの実施形態では、この窓554は光学グレードの石英プレートであってもよいが、他の実施形態では、透明なインジウムスズ酸化物（ITO）窓であってもよい。いくつかの実施形態では、基板加熱ユニット526は、複数のLED526Aを含み、基板534の下にのみ位置決めされ得、この位置は、LEDによって放出された光が通過して基板の裏側に達し得る窓を含むこともできる台座またはESCの内部を含み得る。様々な実施形態において、MFCの下流の低圧構成要素は、ハステロイから作製されたニッケル含有量の高いステンレス鋼で作製される。

10

20

【0155】

固体間熱伝達の場合、基板加熱ユニット526は、チャンバ内部において基板に接触して基板を加熱するように構成されている1つまたは複数の加熱面を有することができる。いくつかの実施形態では、基板加熱ユニット526は、基板の裏面に接触して基板を加熱するように構成されている、平面または基板台座の表面などの加熱プラテンを有し得る。この加熱プラテンは、加熱プラテンの表面を加熱することができる、加熱コイル、加熱流体、または上述の輻射加熱などの加熱要素を有してもよい。基板は、基板の裏面が加熱プラテンと直接接触しているか、または加熱プラテンからオフセットしているが加熱プラテンから熱エネルギーを受け取るのに十分に近いときに加熱することができる。この固体間熱伝達を使用して基板を加熱する場合、基板は、冷却されるときに加熱プラテンから分離される。一部の従来のALE装置は加熱要素と冷却要素の両方を含む基板台座を有する場合があるが、これらの装置は、繰り返し加熱および冷却される台座の熱質量が大きいため、熱ALEの温度間を迅速に（例えば、250ミリ秒未満で）循環することができない。例えば、台座を第1の温度範囲（例えば、20℃～100℃）から第2の温度範囲（例えば、200℃～500℃）に加熱するのに数秒または数分かかる場合があり、かつ台座を第2の温度範囲から、基板を第1の温度範囲まで冷却することができるより低い温度に冷却するのに数秒または数分かかる場合がある。したがって、この固体間加熱技法を使用した後、加熱プラテンおよび基板は互いに分離され、これは、例えば、基板および／または加熱プラテンを互いに遠ざけることによって達成され得る。この分離がない場合、基板と加熱プラテンの両方の熱質量の冷却が発生し、冷却時間が増加し、基板のスループットが低下する。いくつかの実施形態では、基板加熱ユニットおよび冷却用ペルチェ素子を有するESCまたは台座により、高速の加熱および冷却時間（基板を所望の温度に冷却するのに約30秒など）を可能にすることができる。いくつかの実施形態では、これは、例えば、50mTorr未満を含むより少ない次に1Torrなどの低圧で実施され得る。

30

40

【0156】

図5の基板冷却ユニット528は、基板を能動的に冷却するように構成される。いくつ

50

かの実施形態では、基板冷却ユニット 528 は、冷却ガスを基板 534 上に流し、基板 534 を能動的に冷却する。基板冷却ユニット 528 は、冷却流体（ガスまたは液体）を含むことができる冷却流体源 548 と、冷却流体を例えば、 0°C 、 -50°C 、 -100°C 、 -150°C 、 -170°C 、 -200°C 、および -250°C 以下などの所望の温度に冷却するように構成されているクーラ 550 とを含むことができる。基板冷却ユニット 528 は、冷却剤流体をチャンバ内部 532 内に流すように構成されている配管および冷却剤流れフィーチャ（図示せず）、例えば、ノズルまたは穴を含む。いくつかの実施形態では、流体は、チャンバ 522 に流れるときに液体状態であってもよく、例えばチャンバ内部 532 が、例えば、 1 Torr などの低圧状態にある場合、チャンバ内部 532 に達すると蒸気状態に変化し得る。冷却流体は、窒素、アルゴン、ヘリウムなどの不活性元素であってもよい。いくつかの実施形態では、チャンバ内部 532 内への冷却流体の流量は、例えば、少なくとも 10 リットル/秒 、 50 リットル/秒 、 100 リットル/秒 、 150 リットル/秒 、 200 リットル/秒 、 250 リットル/秒 、および 300 リットル/秒 であってもよい。

10

20

30

40

50

【0157】

様々な要因により、基板を冷却する冷却流体の能力が増大する可能性がある。冷却流体の流量が高くなるほど基板がより速く冷却されることが、様々な実験を通じて発見された。ある例示的な実験では、約 -196°C の冷却ガスを 1 リットル/秒 の流量で基板上に流すと、基板の温度が約 $5,000\text{ ミリ秒}$ で約 220°C から約 215°C に低下し、同じ冷却ガスを 10 リットル/秒 の流量で流すと、基板の温度が約 $5,000\text{ ミリ秒}$ で約 220°C から約 195°C に低下することが判明した。また、基板とチャンバの上部との間のギャップも基板の冷却に影響を及ぼす可能性があることが発見され、ギャップが小さいほど冷却が速くなる。ある例では、約 50 マイクロメートル のギャップによってチャンバの上部から分離された基板は、約 -196°C の冷却ガスを使用して約 $5,000\text{ ミリ秒}$ で約 220°C から約 215°C に冷却され、約 5 ミリメートル のギャップによってチャンバの上部から分離された基板は、同じ冷却ガスを使用して約 $5,000\text{ ミリ秒}$ で約 220°C から約 209°C に冷却されることが発見された。したがって、流量が高くギャップが小さいほど、基板がより速く冷却されることが発見された。

【0158】

いくつかの実施形態では、基板冷却ユニット 528 は、固体間熱伝達を利用して、基板 534 を能動的に冷却することができる。これらの実施形態のいくつかでは、平坦な冷却面などの冷却プラテンを使用して、基板の底部に接触して基板を冷却することができる。このプラテンは、プラテンの上、中、または下に冷却流体を流すことによって冷却され得る。この固体間冷却を使用する場合、上述の固体間加熱と同様に、基板は、基板の加熱中、例えば、リフトピンで基板を持ち上げることによって冷却プラテンから遠ざけることなどによって冷却プラテンから分離される。この分離がない場合、基板と冷却プラテンの両方の熱質量が冷却されるためにより多くの冷却が必要となり、その結果、プロセス時間が増加し、スループットが低下する。いくつかの実施形態では、基板の上部の輻射加熱または基板の底部のプラズマ加熱は、固体間冷却と併せて使用することができる。

【0159】

いくつかの実施形態では、基板冷却ユニット 528 は、基板を冷却するためにレーザ冷却を使用することができる。これにより、逆ナビエーストックス反応を利用することによって、基板の少なくとも露出面上にツリウム分子を含む基板の冷却が可能になり得る。例えば、基板の温度はフォノンとして現れ、レーザ冷却が光子を基板表面に放出することでツリウム内のフォノンと相互作用して捕捉し、その後、より高いエネルギーレベルでツリウムからのフォノンを基板に残す。これらのフォノンの除去により、基板の温度が低下する。このレーザ冷却を可能にするためにツリウムを基板の表面上にドーピングすることができ、このドーピングは、除去動作などの動作の後または前に行うなど、上に挙げた技法に組み込むことが可能である。

【0160】

上記のように、装置のいくつかの実施形態は、チャンバ内部内にプラズマを生成するように構成されているプラズマ源を含むことができる。これらのプラズマ源は、容量結合プラズマ（CCP）、誘導結合プラズマ（ICP）、上部遠隔プラズマ、および下部遠隔プラズマであってもよい。

【0161】

いくつかの実施形態では、本明細書に記載の装置は、本明細書に記載の技法を実施するために装置の様々な態様を制御するように構成されているコントローラを含み得る。例えば、図5では、装置520は、処理チャンバと通信可能に接続され、処理チャンバの動作の一部またはすべてを制御するコントローラ566（1つまたは複数の物理的または論理的コントローラを含み得る）を含む。コントローラ566は、1つまたは複数のメモリデバイス568と、1つまたは複数のプロセッサ570とを含むことができる。いくつかの実施形態では、装置は、例えば、開示されている実施形態が実施される場合、流量および持続時間を制御するためのスイッチングシステム、基板加熱ユニット、基板冷却ユニット、チャンバ内の基板のロードおよびアンロード、基板の熱的浮上、ならびにプロセスガスユニットを含む。いくつかの実施形態では、装置は、最大約500ms、または最大約550msのスイッチング時間を有することができる。スイッチング時間は、フローケミストリー、選択されたレシピ、リアクタ構造、および他の要因に依存し得る。

10

【0162】

いくつかの実施形態では、コントローラ566は装置またはシステムの一部であり、そのような装置またはシステムは上述した例の一部であってもよい。そのようなシステムまたは装置は、1つまたは複数の処理ツール、1つまたは複数のチャンバ、1つまたは複数の処理用プラットフォーム、および／または特定の処理構成要素（ガス流システム、基板加熱ユニット、基板冷却ユニットなど）を含む半導体処理機器を含むことができる。これらのシステムは、半導体ウエハまたは基板の処理前、処理中、および処理後のシステム動作を制御するための電子機器と一体化されてもよい。そのような電子機器は「コントローラ」と呼ばれることがあり、1つまたは複数のシステムの様々な構成要素または副部品を制御してもよい。コントローラ566は、処理パラメータおよび／またはシステムのタイプに応じて、本明細書に開示されるプロセスのいずれかを制御するようにプログラムされてもよい。そのようなプロセスとしては、処理ガスの送給、温度設定（例えば、加熱および／または冷却）、圧力設定、真空設定、電力設定、高周波（RF）発生器設定、RF整合回路設定、周波数設定、流量設定、流体送給設定、位置および動作設定、特定のシステムに接続または連動するツールおよび他の移送ツールに対するウエハの搬入と搬出、および／またはロードロックに対するウエハの搬入と搬出が含まれる。

20

30

【0163】

広義には、コントローラ566は、命令を受信し、命令を発行し、動作を制御し、洗浄動作を可能にし、エンドポイント測定を可能にするなどの様々な集積回路、論理、メモリ、および／またはソフトウェアを有する電子機器として定義されてもよい。集積回路は、プログラム命令を記憶するファームウェアの形式のチップ、デジタル信号プロセッサ（DSP）、特定用途向け集積回路（ASIC）として定義されたチップ、および／または1つまたは複数のマイクロプロセッサ、すなわちプログラム命令（例えば、ソフトウェア）を実行するマイクロコントローラを含んでもよい。プログラム命令は、様々な個々の設定（またはプログラムファイル）の形式でコントローラに通信される命令であって、特定のプロセスを半導体ウエハ上で、または半導体ウエハ用に、またはシステムに対して実行するための動作パラメータを定義してもよい。動作パラメータは、いくつかの実施形態では、1つまたは複数の層、材料、金属、酸化物、ケイ素、二酸化ケイ素、表面、回路、および／またはウエハダイの製作における1つまたは複数の処理動作を実現するためプロセスエンジニアによって定義されるレシピの一部であってもよい。

40

【0164】

コントローラ566は、いくつかの実施形態では、システムと統合または結合されるか、他の方法でシステムにネットワーク接続されるコンピュータの一部であってもよく、ま

50

たはそのようなコンピュータに結合されてもよく、またはそれらの組み合わせであってもよい。例えば、コントローラは、「クラウド」内であってもよいし、ファブホストコンピュータシステムのすべてもしくは一部であってもよい。これにより、ウエハ処理のリモートアクセスが可能となる。コンピュータは、システムへのリモートアクセスを可能にして、製作動作の現在の進捗状況を監視し、過去の製作動作の履歴を検討し、複数の製作動作から傾向または性能基準を検討し、現在の処理のパラメータを変更し、現在の処理に続く処理動作を設定するか、または新しいプロセスを開始してもよい。いくつかの例では、リモートコンピュータ（例えば、サーバ）は、ネットワークを通じてプロセスレシピをシステムに提供することができる。そのようなネットワークは、ローカルネットワークまたはインターネットを含んでいてもよい。リモートコンピュータは、パラメータおよび／または設定のエントリまたはプログラミングを可能にするユーザインターフェースを含んでもよく、そのようなパラメータおよび／または設定は、その後リモートコンピュータからシステムに通信される。いくつかの例では、コントローラ 566 は命令をデータの形式で受信する。そのようなデータは、1 つまたは複数の動作中に実施される各処理動作のためのパラメータを特定するものである。パラメータは、実施されるプロセスのタイプ、およびコントローラが連動または制御するように構成されるツールのタイプに特有のものであってもよいことを理解されたい。したがって、上述したように、コントローラ 566 は、例えば、互いにネットワーク接続され共通の目的（本明細書で説明されるプロセスおよび制御など）に向けて協働する 1 つまたは複数の個別のコントローラを備えることによって分散されてもよい。このような目的のための分散型コントローラの例として、チャンバ上の 1 つまたは複数の集積回路であって、（例えば、プラットフォームレベルで、またはリモートコンピュータの一部として）遠隔配置されておりチャンバにおけるプロセスを制御するよう組み合わせられる 1 つまたは複数の集積回路と通信するものが挙げられるであろう。

10

20

【0165】

上記のように、装置によって実施される 1 つまたは複数のプロセス動作に応じて、コントローラ 566 は、1 つまたは複数の他の装置回路もしくはモジュール、他のツール構成要素、クラスタツール、他のツールインターフェース、隣接するツール、近接するツール、工場全体に位置するツール、メインコンピュータ、別のコントローラ、または半導体製造工場内のツール場所および／もしくはロードポートに対してウエハの容器を搬入および搬出する材料搬送に使用されるツールと通信してもよい。

30

【0166】

また上で述べたように、コントローラは、上述の任意の技法を実施するように構成される。例えば、図 5 の装置 520 および図 2 の技法を参照すると、いくつかの実施形態では、コントローラ 566 は、基板加熱ユニット 526 に基板支持フィーチャ 535 上に位置決めされた基板 534 を第 1 の温度にさせ（すなわち、加熱する）、プロセスガスユニット 524 に第 1 のプロセスガスを基板 534 に流させるように構成される。上記のように、第 1 のプロセスガスは、基板が第 1 の温度に維持されている間、いくつかの実施形態ではプラズマを使用せずに、化学吸着によって基板 534 上の材料の 1 つまたは複数の表面層を改質するように構成される。コントローラ 566 は、プロセスガスユニットに、本明細書に記載のように第 2 のプロセスガスを基板 534 上に流し、材料の改質された層を除去させるようにさらに構成することができる。いくつかの実施態様は、本明細書で提供されるようにカプセル化材料の 1 つまたは複数の層を基板 534 上に堆積させるコントローラ 566 を含む。

40

【0167】

上記のように、本明細書において実施される一部のエッチングは、処理チャンバの側壁、上部、および／または底部、ならびにシャワーヘッドおよびガス送給システムなど、処理チャンバの温度制御されたフィーチャであり得る。図 6 は、開示されている実施形態による、例示的な装置の断面側面図を図示する。以下に詳述するように、この装置 600 は、熱エッチング動作の実施を含めて、基板の温度を急速かつ正確に制御することが可能で

50

ある。装置 600 は、処理チャンバ 602 と、基板ヒータ（図示せず）および基板 618 を支持するように構成されている複数の基板支持体 608 を有する台座 604 と、ガス分配ユニット 610 とを含む。

【0168】

処理チャンバ 602 は、プレナム容積とみなすことができるチャンバ内部 614 を少なくとも部分的に画定する側壁 612 A、上部 612 B、および底部 612 C を含む。本明細書で述べるように、いくつかの実施形態では、チャンバ壁 612 A、上部 612 B、および底部 612 C の温度を能動的に制御し、それらの表面上における不要な凝縮を防止することが望ましい場合がある。一部の新たな半導体処理動作は、水および／またはアルコール蒸気などの蒸気を基板上に流すことで蒸気が基板上に吸着するが、望ましくないこと
10
にチャンバの内面上にも吸着する可能性がある。これによりチャンバ内面上に不要な堆積およびエッチングが生じ、チャンバ表面に損傷を与え、粒子が基板上に剥離することで基板欠陥を引き起こす場合がある。チャンバの内面上における不要な凝縮を低減および防止するために、チャンバの壁、上部、および底部の温度は、処理動作で使用される化学物質の凝縮が発生しない温度に維持され得る。

【0169】

チャンバの表面のこの能動的な温度制御は、ヒータを使用してチャンバ壁 612 A、上部 612 B、および底部 612 C を加熱することによって達成することができる。図 6 に示されるように、チャンバヒータ 616 A は、チャンバ壁 612 A 上に位置決めされてチャンバ壁 612 A を加熱するように構成され、チャンバヒータ 616 B は、上部 612 B
20
上に位置決めされて上部 612 B を加熱するように構成され、チャンバヒータ 616 C は、底部 612 C 上に位置決めされて底部 612 C を加熱するように構成される。チャンバヒータ 616 A ～ 616 C は、電流が抵抗要素を通して流れるときに熱を生成するように構成されている抵抗ヒータであってもよい。チャンバヒータ 616 A ～ 616 C はまた、加熱された水を含み得る加熱流体などの熱伝達流体が通って流れることができる流体導管であってもよい。場合によっては、チャンバヒータ 616 A ～ 616 C は、加熱流体と抵抗ヒータの両方の組み合わせであってもよい。チャンバヒータ 616 A ～ 616 C は、チャンバ壁 612 A、上部 612 B、および底部 612 C の各々の内面を所望の温度にするために熱を生成するように構成され、所望の温度は、例えば、約 80℃～約 130℃、約 90℃、または約 120℃を含む約 40℃～約 150℃の範囲であり得る。いくつかの条
30
件下では、水およびアルコール蒸気は、約 90℃以上に保たれた表面上で凝縮しないことが発見されている。

【0170】

チャンバ壁 612 A、上部 612 B、および底部 612 C はまた、処理技法で使用される化学物質に耐えることができる様々な材料で構成されてもよい。これらのチャンバ材料には、例えば、アルミニウム、陽極酸化アルミニウム、プラスチックなどのポリマーを有するアルミニウム、イットリアコーティングを有する金属または金属合金、ジルコニアコーティングを有する金属または金属合金、および酸化アルミニウムコーティングを有する金属または金属合金が挙げられ得、場合によっては、コーティングの材料は、酸化アルミニウムとイットリア、または酸化アルミニウムとジルコニアの交互層など、ブレンドされ
40
てもよく、または異なる材料の組み合わせの層であってもよい。いくつかの実施形態では、チャンバは、陽極酸化アルミニウムライナを含む。これらの材料は、無水 HF、水蒸気、メタノール、イソプロピルアルコール、塩素、フッ素ガス、窒素ガス、水素ガス、ヘリウムガス、およびそれらの混合物など、処理技法で使用される化学物質に耐えるように構成される。

【0171】

装置 600 はまた、約 0.1 Torr ～ 約 100 Torr、または約 20 Torr ～ 約 200 Torr、または約 0.1 Torr ～ 約 10 Torr など、真空でまたは真空に近い圧力で処理動作を実施するように構成されてもよい。これには、チャンバ内部 614 を低圧、例えば約 0.1 Torr ～ 約 10 Torr、および約 20 Torr ～ 約 200 T o
50

rr、または約0.1 Torr～約10 Torrを含む約0.1 Torr～約100 Torrの圧力を有する真空中にポンピングするように構成されている真空ポンプ684が含まれ得る。

【0172】

次に、台座604の様々な特徴について説明する。台座604は、450 nmを含む400 nm～800 nmの波長を有する可視光を放出するように構成されている複数のLED624を有する基板ヒータ622（図6の破線の長方形によって囲まれている）を含む。ヒータLEDは、この可視光を基板の裏側に放出し、基板を加熱する。約400 nm～800 nmの波長を有する可視光は、ケイ素がこの範囲内の光を吸収するため、ケイ素ウエハを周囲温度、例えば、約20℃から約600℃に迅速かつ効率的に加熱することができる。対照的に、赤外線放射を含む輻射加熱は、ケイ素が約400℃未満の温度では赤外線を透過する傾向があるため、最大約400℃の温度でケイ素を効果的に加熱しない場合がある。基板と加熱コイルを有する台座などの加熱プラテンとの間の固体間熱伝達に依存する従来の「ホットプレート」ヒータは、加熱および冷却速度が比較的遅く、基板の反りおよび加熱プラテンとの一貫性のない接触によって引き起こされ得る不均一な加熱をもたらす。例えば、従来の台座を所望の温度に加熱し、かつ第1の温度から第2のより高い温度に加熱することに加え、台座をより低い温度に冷却するのに数分かかる場合がある。

【0173】

ヒータの複数のLEDは、様々な方式で配置され、電氣的に接続され、かつ電氣的に制御され得る。各LEDは、可視青色光および／または可視白色光を放出するように構成されてもよい。特定の実施形態では、白色光（EMスペクトルの可視部分における波長範囲を使用して発生される）が使用される。一部の半導体処理動作では、白色光は、不要な薄膜干渉を低減または防止することができる。例えば、一部の基板は、様々な量で異なる光波長を反射する裏面膜を有し、それによって不均一で潜在的に非効率的な加熱が生じる。白色光を使用すると、白色光によって提供される広い可視スペクトルにわたる薄膜干渉を平均化することによって、この不要な反射変動を低減することができる。場合によっては、基板の背面における材料に応じて、単一または狭帯域の波長を提供し、白色光よりも狭帯域波長を吸収し得る一部の基板のより効率的、強力かつ直接的な加熱を行うために、例えば、450 nmの波長を有する青色光などの可視非白色光を使用することが有利な場合がある。

【0174】

様々なタイプのLEDを用いることができる。例には、チップオンボード（COB）LEDまたは表面実装ダイオード（SMD）LEDが挙げられる。SMD LEDの場合、LEDチップは、チップ上の各ダイオードの制御を可能にする複数の電気接点を有し得るプリント回路基板（PCB）に融合されてもよい。例えば、単一のSMDチップは、典型的には、例えば、異なる色を生成するために個々に制御可能であり得る3つのダイオード（例えば、赤、青、または緑）を有することに制限される。SMD LEDチップは、2.8×2.5 mm、3.0×3.0 mm、3.5×2.8 mm、5.0×5.0 mm、および5.6×3.0 mmなどの範囲のサイズであってもよい。COB LEDの場合、各チップは、同じPCB上に印刷された、9つ、12、数十、数百、またはそれ以上など、4つ以上のダイオードを有することができる。COB LEDチップは、典型的には、ダイオードの数に関係なく1つの回路および2つの接点を有し、それによって単純な設計および効率的な単色用途を提供する。基板を加熱するLEDの能力および性能は、各LEDによって放出される熱のワットによって測定することができ、これらの熱のワットは、基板の加熱に直接寄与する場合がある。

【0175】

図7は、複数のLEDを有する基板ヒータの上面図を図示する。この基板ヒータ622は、プリント回路基板（PCB）626と、複数のLED624とを含み、それらのいくつかにはラベルが付けられている。この図示された複数は、およそ1,300個のLEDを含む。外部接続628は、電力を複数のLED624に供給するためにトレースによ

て接続される。図 7 に示されるように、LED は、異なる半径だけ基板ヒータ 622 の中心 630 から半径方向にオフセットされた多数の円弧に沿って配置されてもよく、各円弧において、LED は、互いに等間隔に配置されてもよい。例えば、1 つの円弧 632 は、部分的に陰影を付けた点線形状によって囲まれ、16 個の LED 624 を含み、かつ中心 630 の周りに延びる半径 R を有する円の一部分である。16 個の LED 624 は、この円弧 632 に沿って互いに等間隔に配置されていると考えることができる。

【0176】

いくつかの実施形態では、複数の LED は、例えば、約 1,200、1,500、2,000、3,000、4,000、5,000、または 6,000 を超える LED を含む、少なくとも約 1,000 個の LED を含んでもよい。各 LED は、場合によっては、100% の電力で 3 ワットおよび 100% の電力で 1 ワットを含む、100% の電力で 4 ワット以下を使用するように構成されてもよい。これらの LED は、基板全体にわたる温度調整および微調節を可能にするために、個々に制御可能なゾーンに配置され、それらに電氣的に接続され得る。場合によっては、LED は、例えば、少なくとも約 25、50、75、80、85、90、95、または 100 個のゾーンを含む、少なくとも 20 個の、例えば、独立して制御可能なゾーンにグループ化することができる。これらのゾーンにより、半径方向および方位角（すなわち、角度）方向の温度調整が可能になり得る。これらのゾーンは、矩形グリッド、六角形グリッド、または所望の温度プロファイルを生成するための他の適切なパターンなど、定義されたパターンで配置することができる。ゾーンはまた、正方形、台形、長方形、三角形、長円形、楕円形、円形、環状（例えば、リング）、部分環（すなわち、環状セクタ）、円弧、セグメント、およびヒータの中心を中心とし、基板ヒータの PCB の全半径以下の半径を有するセクタなど、様々な形状を有してもよい。これらのゾーンは、より均一な温度分布、ならびに基板の中心よりも基板の縁部の周りで温度が高いなどの所望の温度プロファイルを作り出すために、ウエハ全体にわたる多数の場所で温度を調整することができる。これらのゾーンの独立した制御はまた、各ゾーンの電力出力を制御する能力を含んでもよい。例えば、各ゾーンは、少なくとも 15、20、または 25 個の調整可能な電力出力を有してもよい。場合によっては、各ゾーンは、1 つの LED を有し、それによって各 LED を個々に制御および調整することが可能になり、これにより基板上でのより均一な加熱プロファイルをもたらすことができる。したがって、いくつかの実施形態では、基板ヒータにおける複数の LED の各 LED は、個々に制御可能であってもよい。

【0177】

特定の実施形態では、基板ヒータ 622 は、基板を複数の温度に加熱し、様々な持続時間にわたってそのような各温度を維持するように構成される。これらの持続時間は、以下の非限定的な例、すなわち、少なくとも約 1 秒、少なくとも約 5 秒、少なくとも約 10 秒、少なくとも約 30 秒、少なくとも約 60 秒、少なくとも約 90 秒、少なくとも約 120 秒、少なくとも約 150 秒、または少なくとも約 180 秒を含んでもよい。基板ヒータは、基板を、例えば、約 130℃ を含む約 50℃～150℃、または約 150℃～350℃ を含む約 50℃～600℃ に加熱するように構成されてもよい。基板ヒータは、以下の非限定的な例を含む様々な持続時間にわたって、これらの範囲内の温度で基板を維持するように構成されてもよい：例えば、少なくとも約 1 秒、少なくとも約 5 秒、少なくとも約 10 秒、少なくとも約 30 秒、少なくとも約 60 秒、少なくとも約 90 秒、少なくとも約 120 秒、少なくとも約 150 秒、または少なくとも約 180 秒。加えて、いくつかの実施形態では、基板ヒータ 622 は、例えば、約 60 秒未満、約 45 秒未満、約 30 秒未満、または約 15 秒未満、基板をこれらの範囲内の任意の温度に加熱するように構成される。特定の実施形態では、基板ヒータ 622 は、例えば、少なくとも約 0.1℃/秒～少なくとも約 20℃/秒など、1 つまたは複数の加熱速度で基板を加熱するように構成される。

【0178】

基板ヒータは、少なくとも約 80%、少なくとも約 90%、少なくとも約 95%、または少なくとも約 100% の電力を含む 1 つまたは複数の電力レベルで LED に可視光を放

出させることによって基板の温度を上昇させることができる。いくつかの実施形態では、基板ヒータは、少なくとも約10W、少なくとも約30W、少なくとも約0.3キロワット(kW)、少なくとも約0.5kW、少なくとも約2kW、少なくとも約3kW、または少なくとも約4kWを含む約10W~4000Wで放出するように構成される。装置は、約0.1kW~9kWの電力を台座に供給するように構成され、電源は、図示しないが、台座を通して基板ヒータに接続される。温度上昇中、基板ヒータは、加熱された基板の温度を維持するために、高い電力で動作してもよく、かつより低い電力レベル(例えば、約5W~約0.5kWを含む)で動作してもよい。

【0179】

いくつかの実施形態では、基板ヒータはまた、複数のLEDによって生成された熱がLEDから台座クーラに伝達され得るように、LEDに熱的に接続された台座クーラを含んでもよい。この熱的接続は、熱が複数のLEDからこれらの構成要素間の1つまたは複数の熱流通路に沿って台座クーラに伝導され得るようになっている。場合によっては、台座クーラは、基板ヒータの1つまたは複数の要素と直接接触し、他の例では、(例えば、金属を含む)熱伝導性プレートなどの他の伝導性要素が、基板ヒータと台座クーラとの間に介在される。図8に戻って参照すると、基板ヒータは、PCB626の底部と直接接触する台座クーラ636を含む。熱は、LEDからPCB626に、そして台座クーラ636に流れるように構成される。台座クーラ636はまた、複数の流体導管638を含み、熱を受け取ることで基板ヒータ622内のLEDを冷却するために、水などの熱伝達流体が流体導管638を通して流れるように構成される。流体導管638は、チャンバの外側に位置するリザーバおよびポンプ(図示せず)に接続されてもよい。場合によっては、台座クーラは、約5℃~20℃などの冷却された水を流すように構成され得る。

【0180】

本明細書で提供されるように、処理チャンバ602の外表面を能動的に加熱することが有利であり得る。場合によっては、その外表面上における不要な凝縮および堆積を防止するために、台座604の外表面を加熱することも同様に有利である可能性がある。図6に示されるように、台座604は、台座604の外表面を加熱するように構成されている台座ヒータ644を台座604の内側にさらに含んでもよく、その側面642Aおよび底部642Bを含む。台座ヒータ644は、1つまたは複数の抵抗加熱要素などの1つまたは複数の加熱要素と、加熱流体がその内部を流れるように構成されている流体導管とを含んでもよい。場合によっては、台座クーラと台座ヒータの両方が、同じ熱伝達流体が台座クーラと台座ヒータの両方に流れ得るように互いに流体的に接続された流体導管を有してもよい。これらの実施形態では、流体は、約90℃~120℃を含む50℃~130℃に加熱されてもよい。

【0181】

台座はまた、処理動作中に使用される処理化学物質および圧力への曝露によって引き起こされる損傷から複数のLEDを含む基板ヒータを保護する窓を含んでもよい。図6に示されるように、窓650は、チャンバ内部から流体的に隔離されたプレナム容積を台座内に形成するために、基板ヒータ622の上に位置決めされてもよく、かつ台座604の側壁649にシールされてもよい。このプレナム容積はまた、ボウル646の内部とみなされてもよい。窓は、400nm~800nmの範囲の波長を有する光を含む、LEDによって放出される可視光に対して光学的に透明な1つまたは複数の材料で構成され得る。いくつかの実施形態では、この材料は、石英、サファイア、サファイアコーティングを有する石英、またはフッ化カルシウム(CaF₂)であってもよい。窓はまた、その内部に穴や開口部を有さなくてもよい。いくつかの実施形態では、ヒータは、20mmおよび25mmを含む15~30mmの厚さを有し得る。

【0182】

図6に示すように、台座604の基板支持体608は、窓650および基板ヒータ622の上で、それらからオフセットして基板618を支持するように構成される。特定の実施形態では、基板の温度は、チャンバ内で基板を熱的に浮上させる、または熱的に隔離す

ることによって急速かつ正確に制御することができる。基板の加熱および冷却は、基板の熱質量と、基板と接触している他のアイテムの熱質量の両方を対象とする。例えば、多くの従来のエッチング装置のように、基板の裏面全体が台座または静電チャックの大きな表面上に載っているなど、基板が大きな物体と熱的に接触する場合、この物体は、基板温度を正確に制御する能力に影響を及ぼし、かつ基板を加熱および冷却する速さを減少させる基板用のヒートシンクとして作用する。したがって、最小の熱質量が加熱および冷却されるように基板を位置決めするのが望ましい。この熱的浮上は、チャンバ内の他の物体と最小限の熱接触（直接および放射を含む）を有するように基板を位置決めするように構成される。

【0183】

したがって、台座604は、いくつかの実施形態では、チャンバ内部614で基板を熱的に浮上させる、または熱的に隔離することによって基板618を支持するように構成される。台座604の複数の基板支持体608は、基板618の熱質量が基板618のみの熱質量まで可能な限り低減されるように、基板618を支持するように構成される。各基板支持体608は、基板618との最小限の接触を提供する基板支持体表面620を有することができる。基板支持体608の数は、少なくとも3つから、例えば、少なくとも6つまたはそれ以上の範囲であってもよい。支持体表面620の表面積もまた、処理動作中に基板を適切に支持するために（例えば、基板の重量を支持し、かつ基板の非弾性変形を防止するために）必要な最小面積であってもよい。いくつかの実施形態では、ある支持体表面620の表面積は、例えば、約0.1%未満、約0.075%未満、約0.05%未満、約0.025%未満、または約0.01%未満であってもよい。

【0184】

基板支持体はまた、台座の表面および表面の下の特徴を含む台座の他の要素と基板が接触するのを防止するように構成される。基板618はまた、基板618の加熱の多数の態様に影響を及ぼし得る距離だけ、基板ヒータ622からオフセットされる（場合によっては、LED624の上面であり得る基板ヒータ622の上面から測定）。

【0185】

記載したように、基板支持体608は、窓の上で基板618を支持するように構成される。いくつかの実施形態では、これらの基板支持体は、静止しており、かつ所定の位置に固定されており、リフトピンまたは支持リングでなくてもよい。いくつかの実施形態では、支持体表面620を含む各基板支持体608の少なくとも一部は、少なくともLED624によって放出される光に対して透明である材料で構成されてもよい。この材料は、場合によっては、石英またはサファイアであってもよい。これらの基板支持体608の透明性は、基板ヒータ622のLEDによって放出された可視光が基板支持体608を通過し、基板618まで達することを可能にしてもよく、したがって基板支持体608はこの光を遮断せず、基板618は、それが支持されている領域内で加熱することができる。これは、可視光に対して不透明な材料を含む基板支持体を用いるよりも、基板618のより均一な加熱を提供する場合がある。いくつかの他の実施形態では、基板支持体608は、二酸化ジルコニウム（ ZrO_2 ）などの不透明な材料で構成されてもよい。

【0186】

図6に戻って参照すると、いくつかの実施形態では、台座はまた、垂直に移動するように構成される。これは、ガス分配ユニット610のフェースプレート676と基板618との間のギャップ686が2mm~70mmの範囲とすることを可能にするように台座を移動させることを含んでもよい。以下でより詳細に提供されるように、垂直に台座を移動させることは、ガス分配ユニット610と基板618との間に形成された低容積により、基板の能動的な冷却、ならびにガスを流すことおよびパージを含む処理動作の迅速なサイクル時間を可能にし得る。この移動はまた、基板とガス分配ユニットとの間に小さなプロセス容積の形成を可能にしてもよく、結果として、より小さなパージおよびプロセス容積をもたらすことができ、したがってパージおよびガス移動の時間を短縮し、かつスループットを増加させる。

【0187】

ガス分配ユニット610は、プロセスガスをチャンバ内部614における基板618上に流すように構成され、プロセスガスは、反応剤、改質分子、変換分子、または除去分子などの液体および／またはガスを含んでもよい。図6に見られるように、ガス分配ユニット610は、1つまたは複数のガス源672および／または1つまたは複数の蒸気源674に流体的に接続された1つまたは複数の流体入口670を含む。いくつかの実施形態では、ガスラインおよび混合チャンバは、内部を流れる蒸気またはガスの不要な凝縮を防止するために加熱されてもよい。これらのラインは、少なくとも約40℃、少なくとも約80℃、少なくとも約90℃、少なくとも約120℃、少なくとも約130℃、または少なくとも約150℃に加熱することができる。1つまたは複数の蒸気源は、ガスおよび／または気化される液体の1つまたは複数のソースを含んでもよい。気化は、直接噴射式気化器、フローオーバー気化器、またはそれら両方であってもよい。ガス分配ユニット610はまた、ガス分配ユニット610をチャンバ内部614と流体的に接続する複数の貫通孔678を含むフェースプレート676を含む。これらの貫通孔678は、1つまたは複数の流体入口670に流体的に接続され、さらにフェースプレート676の前面677を通して延び、前面677は、基板618に面するように構成される。いくつかの実施形態では、ガス分配ユニット610は、上部プレートとみなされてよく、いくつかの他の実施形態では、シャワーヘッドとみなされてよい。

10

【0188】

貫通孔678は、均一なガス流を基板上に送給するために、様々な方法で構成されてもよい。いくつかの実施形態では、これらの貫通孔はすべて、0.04インチ(1.016mm)を含む、約0.03インチ～0.05インチなどの同じ外径を有してもよい。これらのフェースプレート貫通孔はまた、フェースプレートからの均一な流れを作り出すために、フェースプレート全体にわたって配置されてもよい。

20

【0189】

図6に戻って参照すると、ガス分配ユニット610はまた、フェースプレート676に熱的に接続されたユニットヒータ680を含んでもよく、それにより熱をフェースプレート676とユニットヒータ680との間で伝達することができる。ユニットヒータ680は、流体導管を含んでもよく、その中を熱伝達流体が流れてもよい。上記と同様に、熱伝達流体は、例えば、約20℃～120℃の温度範囲に加熱されてもよい。場合によっては、ユニットヒータ680は、ガス分配ユニット610を加熱し、蒸気およびガスの不要な凝縮を防止するために使用されてもよく、いくつかのそのような例では、この温度は、少なくとも約90℃または120℃であり得る。

30

【0190】

いくつかの実施形態では、ガス分配ユニット610は、フェースプレート676を加熱するように構成されている第2のユニットヒータ682を含んでもよい。この第2のユニットヒータ682は、1つまたは複数の抵抗加熱要素、加熱流体を流すための流体導管、またはそれら両方を含んでもよい。ガス分配ユニット610において2つのヒータ680および682を使用することで、ガス分配ユニット610内で様々な熱伝達が可能になり得る。これは、ガス分配ユニット610の要素上での不要な凝縮を低減または防止するために、上述のように、温度制御されたチャンバを提供するために、第1および／または第2のユニットヒータ680および682を使用してフェースプレート676を加熱することを含んでもよい。

40

【0191】

装置600はまた、基板を冷却するように構成されてもよい。この冷却は、冷却ガスを基板上に流すこと、基板とフェースプレートとの間の熱伝達を可能にするためにフェースプレート近くに基板を移動させること、またはそれら両方を含み得る。基板を能動的に冷却することで、より正確な温度制御、およびより速い温度間遷移が可能になり、これにより処理時間を短縮し、スループットを改善する。いくつかの実施形態では、流体導管を通して熱伝達流体を流す第1のヒータユニット680は、基板618から伝達される熱をフ

50

フェースプレート 676 から逃がすことによって基板 618 を冷却するために使用されてもよい。基板 618 は、したがって、5 mm または 2 mm 以下のギャップ 686 などによってフェースプレート 676 に近接して位置決めされることによって冷却されてもよく、その結果、基板 618 における熱がフェースプレート 676 に放射的に伝達され、第 1 のユニットヒータ 680 における熱伝達流体によってフェースプレート 676 から逃がされる。フェースプレート 676 は、したがって、基板 618 を冷却するための基板 618 用のヒートシンクとみなされてもよい。

【0192】

いくつかの実施形態では、装置 600 は、冷却流体源 673 をさらに含んでもよく、冷却流体源 673 は、冷却流体（ガスまたは液体）と、例えば、少なくとも約 90℃、少なくとも約 70℃、少なくとも約 50℃、少なくとも約 20℃、少なくとも約 10℃、少なくとも約 0℃、少なくとも約 -50℃、少なくとも約 -100℃、少なくとも約 -150℃、少なくとも約 -190℃、少なくとも約 -200℃、または少なくとも約 -250℃ 以下などの所望の温度に冷却流体を冷却するように構成されているクーラ（図示せず）とを含んでもよい。装置 600 は、冷却流体を 1 つまたは複数の流体入口 670 に送給する配管と、冷却流体を基板上に流すように構成されているガス分配ユニット 610 とを含む。いくつかの実施形態では、例えばチャンバ内部 614 が、上述したように、例えば、約 0.1 Torr ~ 10 Torr、または約 0.1 Torr ~ 100 Torr、または約 20 Torr ~ 200 Torr などの低圧状態である場合、流体は、処理チャンバ 602 に流されるときに液体状態でもよく、かつチャンバ内部 614 に達したときに蒸気状態にされてもよい。冷却流体は、窒素、アルゴン、またはヘリウムなどの不活性元素であってもよい。場合によっては、冷却流体は、水素ガスなどの非不活性元素または混合物を含んでもよく、またはそのみを有してもよい。いくつかの実施形態では、チャンバ内部 614 への冷却流体の流量は、例えば、少なくとも約 0.25 リットル/分、少なくとも約 0.5 リットル/分、少なくとも約 1 リットル/分、少なくとも約 5 リットル/分、少なくとも約 10 リットル/分、少なくとも約 50 リットル/分、または少なくとも約 100 リットル/分であってもよい。特定の実施形態では、装置は、少なくとも約 5℃/秒、少なくとも約 10℃/秒、少なくとも約 15℃/秒、少なくとも約 20℃/秒、少なくとも約 30℃/秒、または少なくとも約 40℃/秒などの 1 つまたは複数の冷却速度で基板を冷却するように構成されてもよい。

【0193】

いくつかの実施形態では、装置 600 は、フェースプレート近くに基板を移動させることと、冷却ガスを基板上に流すことの両方によって、基板を能動的に冷却してもよい。場合によっては、能動的な冷却は、基板がフェースプレートに近接している間に冷却ガスを流すことによってより効果的な場合がある。冷却ガスの有効性もまた、使用されるガスのタイプに依存する場合がある。

【0194】

本明細書で提供される装置は、したがって、基板を迅速に加熱および冷却することができる。図 9 は、例示的な温度制御シーケンスを提供する。時間 0 において、基板は、およそ 20 または 25℃ であり、本明細書で提供される基板ヒータの LED は、400 nm ~ 800 nm の波長を有する可視光を放出し、基板温度をおよそ 30 秒で約 400℃ に上昇させる。この加熱は、基板ヒータへのおよそ 9 kW の供給電力によって提供される、1 kW ~ 2 kW の加熱電力を使用して達成された。約 30 秒 ~ 約 95 秒の間、基板ヒータ 622 は、およそ 2 kW の供給電力によって提供された 0.3 ~ 約 0.5 kW の加熱電力などのより低い電力を使用して、400℃ に基板を保持した。約 30 ~ 60 秒の間、基板は、基板上に流された冷却ガス（例えば、水素またはヘリウム）と、フェースプレートへの熱伝達の両方を使用して能動的に冷却された。冷却されると、基板ヒータは、約 100 W の供給電力によって提供された約 10 ~ 30 W の加熱電力を使用して、基板を加熱しておよそ 70℃ にその温度を保持した。様々な処理技法が、基板を処理するために、このタイプのシーケンスを 1 回または繰り返し使用することができる。

【0195】

いくつかの実施形態では、装置600は、流体入口670に達する前に、送給用にプロセスガスをブレンドおよび／または調整するための混合プレナムを含んでもよい。1つまたは複数の混合プレナム入口弁は、混合プレナムへのプロセスガスの導入を制御することができる。いくつかの他の実施形態では、ガス分配ユニット610は、ガス分配ユニット610内に1つまたは複数の混合プレナムを含んでもよい。ガス分配ユニット610はまた、貫通孔678に流体的に接続された1つまたは複数の環状流路を含んでもよく、基板上の均一な流れを提供するために、受け取った流体を貫通孔678に均等に分配してもよい。

【0196】

装置600は、コントローラ631を含み、コントローラ631は、コントローラ631と同じであってもよく、処理チャンバと通信可能に接続され、処理チャンバの動作の一部またはすべてを制御し、本明細書に記載のプロセスのいずれかを実施することができる1つまたは複数の物理的または論理的コントローラを含んでもよい。コントローラ631は、1つまたは複数のメモリデバイス633と、1つまたは複数のプロセッサ635とを含むことができる。

【0197】

開示されている実施形態による第1の例示的な処理装置を図示する図8を用いて、ウエハの移送についてさらに説明する。ツール800の追加の特徴については以下でより詳細に説明し、ここでは、説明される技法のいくつかに関する様々な特徴について説明する。ツール800は、第1の処理チャンバ802と、第2の処理チャンバ804と、第3の処理チャンバ806とを含む。いくつかの実施態様では、第1の処理チャンバ802は、ウエハ上でRIEまたは他のイオン支援エッチングなどのエッチング動作を実施するように構成され、第2の処理チャンバ804は、熱ALEを含む熱エッチングを実施するように構成される。第2の処理チャンバ804はまた、各々がウエハを処理することができる複数の処理ステーション、すなわち4つのステーション880A～880Dを含む。第1および第2の処理チャンバ802および804は、エッチングチャンバとみなされてもよい。第3の処理チャンバ806は、ウエハ上に堆積を実施するように構成され、堆積チャンバとみなすことができる。第3の処理チャンバ806はまた、各々がウエハを処理することができる複数の処理ステーション、すなわち4つのステーション882A～Dを含む。第2および第3の処理チャンバ804および806は、マルチステーション処理チャンバとみなされてもよい。

【0198】

ツール800はまた、ウエハ移送ユニットを含み、ツール800内で1つまたは複数のウエハを搬送するように構成される。例えば、ウエハが第1の処理チャンバ802内でエッチングされた後、ウエハ移送ユニットは、ウエハを第1の処理チャンバ802から第2の処理チャンバ804に移送することができ、ここで本明細書に記載の熱エッチングが1つまたは複数のウエハに対して実施され得る。第2の処理チャンバ804におけるこの熱エッチングに続いて、ウエハ移送ユニットは、1つまたは複数のウエハを第2の処理チャンバ804から第3の処理チャンバ806に移送することができ、ここでカプセル化材料の1つまたは複数の層が1つまたは複数のウエハ上に堆積され得る。

【0199】

図8の図示の例示では、ウエハ移送ユニットは、第1のウエハ移送モジュール810内の第1のロボットアームユニット808と、第2のウエハ移送モジュール814内の第2のロボットアームユニット812とを含む。第1のロボットアームユニット808は、第1の処理チャンバ802と第2のロボットアームユニット812との間でウエハを搬送するように構成され、第2のロボットアームユニット812は、第1のロボットアームユニット808、第2の処理チャンバ804、および第3の処理チャンバ806の間でウエハを搬送するように構成される。一実施態様では、各ロボットアームユニット808および812は、1つのアームを有してもよく、別の実施態様では、各々2つのアームを有して

10

20

30

40

50

もよく、各アームは、搬送用の基板をピックするエンドエフェクタを有する。大気移送モジュール（A T M）8 2 2、例えば、機器フロントエンドモジュール（E F E M）内のフロントエンドロボット8 2 0を使用して、基板をカセットまたはフロントオープニングユニファイドポッド（F O U P）8 2 4からエアロック8 1 8に移送することができる。

【0 2 0 0】

第1および第2のウエハ移送モジュールは各々、真空移送モジュール（V T M）であってもよい。ロードロックまたは移送モジュールとしても知られるエアロック8 1 8が示されており、様々な製作プロセスを実施するために個々に最適化することが可能である。ツール8 0 0はまた、ツール8 0 0の圧力を真空または低圧、例えば、約1 m T o r r ~ 約1 0 T o r r に低下させ、この圧力にツール8 0 0を維持するように構成されている圧力ユニット8 1 6を含む。これには、真空または低圧に第1、第2、および第3の処理チャンバ8 0 2 ~ 1 0 0 6、第1のウエハ移送モジュール8 1 0、および第2のロボットアームユニット8 1 2を維持することが含まれる。

10

【0 2 0 1】

ウエハがツール全体に移送されるとき、ウエハは、真空または低圧に維持される環境内に置くことができる。例えば、ウエハが第1の処理チャンバ8 0 2から第1のウエハ移送モジュール8 1 0に、第2のウエハ移送モジュール8 1 4に、そして第2の処理チャンバ8 0 4に移送されるとき、ウエハは真空または低圧に曝露されて維持されるため、大気圧には曝露されない。同様に、ウエハが第2の処理チャンバ8 0 4から第2のウエハ移送モジュール8 1 4に、そして第3の処理モジュール8 0 6に移送されるとき、ウエハは真空または低圧に維持され、大気圧に曝露されない。

20

【0 2 0 2】

さらなる例では、基板はF O U P 8 2 4のうちの1つに載置され、フロントエンドロボット8 2 0が基板をF O U P 8 2 4からアライナに移送し、これにより基板は、エッチングされるか、その上に堆積されるか、または他の方法で処理される前に適切に中心に置くことが可能になる。位置合わせされた後、基板は、フロントエンドロボット8 2 0によってエアロック8 1 8に移動される。エアロックモジュールはA T MとV T Mとの間の環境に適合する能力を有するため、基板は、損傷を受けることなく2つの圧力環境の間を移動することができる。エアロック8 1 8から、基板は、第1のロボットアームユニット8 0 8によって、第1のウエハ移送モジュール8 1 0またはV T M 8 1 0を通して、第1の処理チャンバ8 0 2に移動される。この基板の移動を達成するために、第1のロボットアームユニット8 0 8は、そのアームの各々に対してエンドエフェクタを使用する。

30

【0 2 0 3】

図8のツール8 0 0を使用する実施態様のいくつかでは、エッチング動作は、複数の処理チャンバで実施され得る。例えば、R I Eまたは他のイオン支援エッチングなどのエッチング動作は、処理チャンバ8 0 2で実施されてもよく、熱A L Eなどの熱エッチングは、第2の処理チャンバ8 0 4などの異なる処理チャンバで実施されてもよい。2つの異なるエッチング処理チャンバを使用することにより、ウエハ上で異なるエッチング技法を使用することが可能になり得る。例えば、熱原子層エッチングは、第1の処理チャンバ8 0 2で実施されてもよく、熱エッチング洗浄動作は、第2の処理チャンバ8 0 4で実施されてもよい。

40

【0 2 0 4】

いくつかの実施形態では、基板表面から材料を除去するためにR I Eエッチングまたは他のイオン支援エッチングを使用する代わりに、熱エッチングが材料をエッチングするために使用され得る。材料の熱エッチングのための技法は、R I Eまたはイオン支援エッチングが実施されないため洗浄動作が不要であり得ることを除いて、上記で提供された技法と同じであってもよい。熱エッチングに続いて、ウエハは、カプセル化材料がその上に堆積される堆積チャンバに移送され得る。

【0 2 0 5】

いくつかの本明細書で提供される熱エッチングは、材料の複数の層を同時にエッチングす

50

るなど、複数の層をエッチングすることを含んでもよい。これには、材料のスタック内に位置する複数の層が含まれ得る。例えば、ウエハは、複数のトレンチ、穴、またはビアを有し、各々が材料の複数の層および異なる幾何学的形状を有する側壁を有する。様々なデバイスを形成するために、材料をこれらのトレンチ、穴、またはビア内に堆積することができ、本明細書で説明する熱エッチングの等方性により、材料は様々な構造内でエッチングすることができる。

【0206】

様々な装置が、熱エッチングを実施するために使用され得る。例えば、図8のツール800では、第2の処理チャンバ804をこの熱エッチングに使用することができ、第3の処理チャンバ806をカプセル化材料の堆積に使用することができる。別の例では、2つの処理チャンバを有する装置が使用されてもよい。図9は、開示されている実施形態による、第2の例示的な処理装置を図示する。ツール900は、第1の処理チャンバ902と、第2の処理チャンバ904とを含む。このツール900は、図8のツール800を含まない。第1の処理チャンバ902は、各々がウエハを処理することができる複数の処理ステーション、すなわち4つのステーション980A~980Dを含む。第1の処理チャンバ902は、材料の熱ALEなどの熱エッチングを含む、ウエハに対する熱エッチング動作を実施するように構成される。第2の処理チャンバ904は、ウエハ上に堆積を実施するように構成され、堆積チャンバとみなすことができる。第2の処理チャンバ904はまた、各々がウエハを処理することができる複数の処理ステーション、すなわち4つのステーション982A~Dを含む。第1および第2の処理チャンバ902および904は、マルチステーション処理チャンバとみなされてもよい。処理チャンバ902および904は、いくつかの実施形態では、図8の処理チャンバ804および806と同じであってもよい。

【0207】

ツール900はまた、ツール900内で1つまたは複数のウエハを搬送するように構成されているウエハ移送ユニットを含む。ツール900の追加の特徴については以下でより詳細に説明し、ここでは、説明される技法のいくつかに関する様々な特徴について説明する。図示の例示では、ウエハ移送ユニットは、第1のウエハ移送モジュール910内の第1のロボットアームユニット908と、第2のウエハ移送モジュール914内の第2のロボットアームユニット912とを含み、これらは、フロントオープニングユニファイドモジュール(FOUP)916など、ウエハ用の受け取られたコンテナに構成されている機器フロントエンドモジュール(EFEM)とみなされてもよい。第1のロボットアームユニット908は、第1の処理チャンバ902と第2の処理チャンバ904との間、および第2の第2のロボットアームユニット912の間でウエハを搬送するように構成される。第2のロボットアームユニット912は、FOUPと第1のロボットアームユニット908との間でウエハを搬送するように構成される。ウエハが第1の処理チャンバ902内で熱ALEなどの熱エッチングを使用してエッチングされた後、ウエハ移送ユニットは、ウエハを第1の処理チャンバ902から第2の処理チャンバ904に移送することができ、ここでカプセル化材料の1つまたは複数の層が1つまたは複数のウエハ上に堆積され得る。

【0208】

上記と同様に、第1の移送モジュール910は、真空移送モジュール(VTM)であってもよい。ロードロックまたは移送モジュールとしても知られるエアロック920が示されており、様々な製作プロセスを実施するために個々に最適化することが可能である。ツール900はまた、ツール900の圧力を真空または低圧、例えば、約1mTorr~約10Torrに低下させ、この圧力にツール900を維持するように構成されているFOUP916を含む。これには、真空または低圧に第1および第2の処理チャンバ902および904、ならびに第1のウエハ移送モジュール910を維持することが含まれる。第2のウエハ移送モジュール914は、大気圧などの異なる圧力であってもよい。したがって、ウエハがツール900全体に移送されるとき、ウエハは、真空または低圧に維持され

る。例えば、ウエハが第1の処理チャンバ902から第1のウエハ移送モジュール910に、そして第2の処理チャンバ904に移送されるとき、ウエハは真空または低圧に維持され、大気圧に曝露されない。さらなる例では、基板がF O U P 918のうちの1つに載置され、第2のロボットアームユニット912またはフロントエンドロボットが基板をF O U P 918からアライナに移送し、これにより基板は、エッチングされるか、その上に堆積されるか、または他の方法で処理される前に適切に中心に置くことが可能になる。位置合わせされた後、基板は、第2のロボットアームユニット912によってエアロック920に移動される。エアロックモジュールはA T MとV T Mとの間の環境に適合する能力を有するため、基板は、損傷を受けることなく2つの圧力環境の間を移動することができる。エアロック920から、基板は、第1のロボットアームユニット908によって、第1のウエハ移送モジュール910またはV T M 910を通して、第1の処理チャンバ902に移動される。この基板の移動を達成するために、第1のロボットアームユニット908は、そのアームの各々に対してエンドエフェクタを使用する。

10

【0209】

実験

実験1

実験は、250℃の基板温度を使用して60mTorrで20サイクルの原子層エッチング曝露を行って実施された。酸化ハフニウム、酸化アルミニウム、および酸化インジウムガリウム亜鉛（IGZO）を含むブランケットウエハを、フッ化水素を含む三塩化ホウ素、およびフッ化水素を含まない三塩化ホウ素に曝露した。酸化ハフニウム、酸化アルミニウム、および酸化インジウムガリウム亜鉛を含むブランケットウエハを、塩化ジメチルアルミニウム（DMAC）に曝露した。三塩化ホウ素を使用する場合のサイクル当たりのエッチング速度は、酸化ハフニウムおよびIGZOに対してDMACのエッチング速度よりも大きく、三塩化ホウ素を使用する場合のサイクル当たりのエッチング速度は、酸化アルミニウムに対してDMACのエッチング速度よりも小さかった。三塩化ホウ素を単独で使用しても、酸化アルミニウムおよび酸化ハフニウムは実質的にエッチングされなかった。三塩化ホウ素を単独で使用する、IGZOは若干エッチングされるが、HF/BCl₃を使用した場合と比較してエッチング速度がおおよそ1桁小さい（図10）。

20

【0210】

実験2

実験は、275℃、110mTorrで5、10、20、および40サイクルの原子層エッチング曝露を行って実施された。酸化ハフニウム、酸化アルミニウム、ケイ素、二酸化ケイ素、窒化ケイ素、窒化チタン、およびタングステンを含むブランケットウエハを、サイクリックALEにおいてフッ化水素および塩化ジメチルアルミニウム（DMAC）に曝露した。エッチング量は、5、10、20、および40サイクル後に測定され、図11Aにグラフ化されている。酸化ハフニウム、酸化アルミニウム、ケイ素、二酸化ケイ素、窒化ケイ素、窒化チタン、およびタングステンを含むブランケットウエハを、サイクリックALEにおいて三塩化ホウ素に曝露した。エッチング量は、5、10、20、および40サイクル後に測定され、図11Bにグラフ化されている。

30

【0211】

三塩化ホウ素を使用すると、5、10、20、および40サイクルのALEで酸化アルミニウムに対してより大きなエッチングが達成された。三塩化ホウ素を使用すると、酸化ハフニウムに対して比較的同様のエッチングが達成されたが、そのような結果はまた、エッチング中に三塩化ホウ素を使用することが可能であることも示した。三塩化ホウ素を使用したエッチングは、示すようにいくつかの他の材料に対しても効果的であった。

40

【0212】

表1は、DMAC対BCl₃を使用したALEについてのエッチング量を要約する。表2は、DMAC対BCl₃を使用したALEについて、サイクル当たりのエッチングおよび酸化ハフニウムに対する選択性を要約する。

50

【表 1】

[Table 1]

表 1. DMACおよびBCl₃のALEについての5、10、20、および40
サイクル当たりのエッチング量

エッチャント	サイクル	エッチング量 (Å)						
		HfO ₂	Al ₂ O ₃	Si	SiO ₂	SiN	TiN	W
DMAC	5*	4.2	44.7	-0.1	3	0.6	6.8	6.2
	10	11	68.3	0	3.6	0.8	7.3	7
	20	25.5	88.9	0.1	4.1	1.1	5.8	7.1
	40	56.2	93.3	0.3	4.3	1.5	3.3	6.7
BCl ₃	5*	3.4	28.3	0	1.5	0.4	11.7	22.9
	10	10.2	39.3	0	1.4	0.5	12.8	25
	20	26.6	55.1	0	1.4	0.7	13.9	27.2
	40	63.7	72.6	0.2	1.4	0.8	15.1	29.8

*は、初期損失を表す

【表 2】

[Table 2]

表 2. ALEにおけるDMACおよびBCl₃エッチャントについてのサイクル
当たりのエッチングおよび選択性

性質	エッチャント	HfO ₂	Al ₂ O ₃	Si	SiO ₂	SiN	TiN	W
エッチング/ サイクル (Å)	DMAC	1.5	0.7	0	0	0	0	0
	BCl ₃	1.8	1.1	0	0	0	0.1	0.2
HfO ₂ に対する 選択性	DMAC	x	2	>200	78	65	>100	>100
	BCl ₃	x	1.7	>200	>100	>100	24	11

【0213】

結論

本出願では、「半導体ウエハ」、「ウエハ」、「基板」、「ウエハ基板」、および「部分的に製作された集積回路」という用語は、互換的に使用され得る。当業者は、「部分的に製作された集積回路」という用語が、集積回路製作の多くの段階のいずれかにあるケイ素ウエハを指すことができることを理解するであろう。半導体デバイス業界で使用されるウエハまたは基板は、典型的には、200mm、または300mm、または450mmの直径を有する。以下の詳細な説明は、特定の開示されている実施形態がウエハ上に実装さ

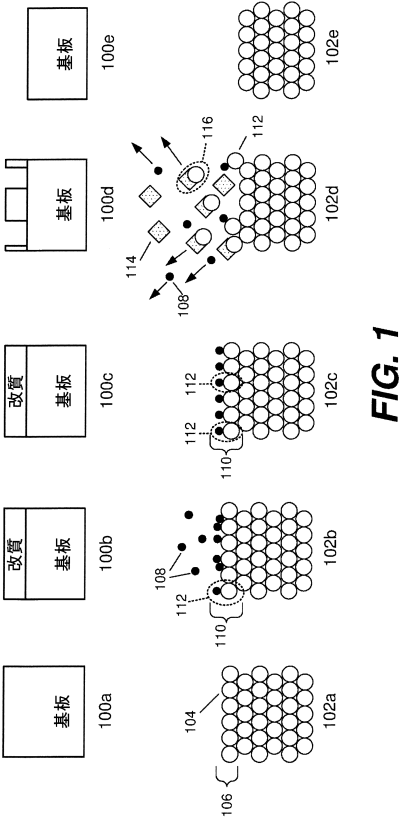
れることを想定している。しかし、特定の開示されている実施形態はそのように限定されない。ワークピースは、様々な形状、サイズ、および材料のものであり得る。半導体ウエハに加えて、本発明を利用することができる他のワークピースには、プリント回路基板、磁気記録媒体、磁気記録センサ、ミラー、光学素子、マイクロ機械デバイスなどの様々な物品が挙げられる。特定の開示されている実施形態はまた、廃棄物の混合物から特定の材料をリサイクルすることにも関連し得る。例えば、いくつかの実施形態では、特定の開示されている実施形態を使用して、他の材料を実質的に除去することなく特定の貴金属を除去することが可能である。

【0214】

前述の実施形態は、明確な理解のために多少詳しく説明されてきたが、一定の変更および修正が添付の特許請求の範囲の範囲内で実践されてもよいことは明らかであろう。本実施形態のプロセス、システム、および装置の実施には多くの別の方法があることに留意されたい。したがって、本実施形態は、限定ではなく例示とみなされるべきであり、それらの実施形態は本明細書に述べられる詳細に限定されるべきではない。

【図面】

【図1】



【図2】

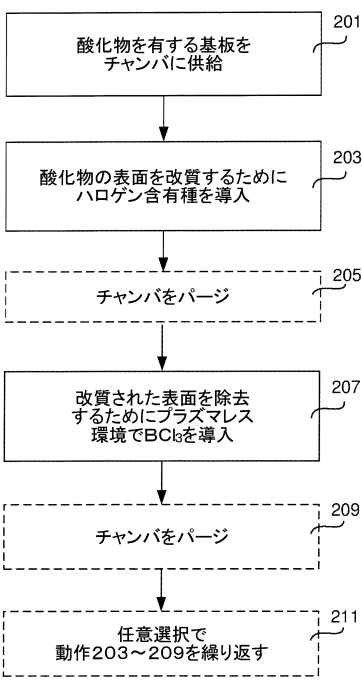
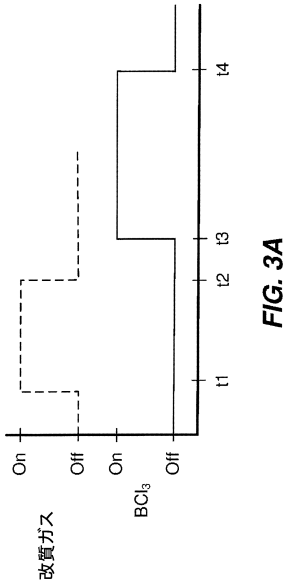
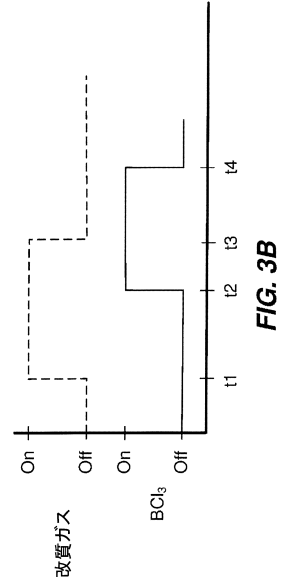


FIG. 2

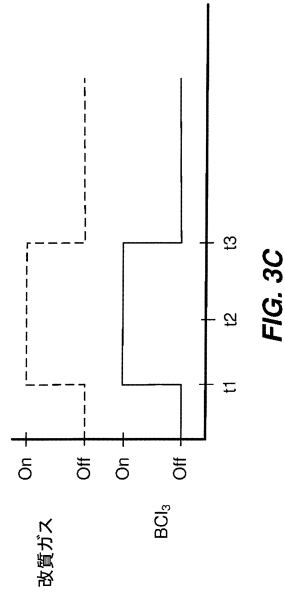
【図 3 A】



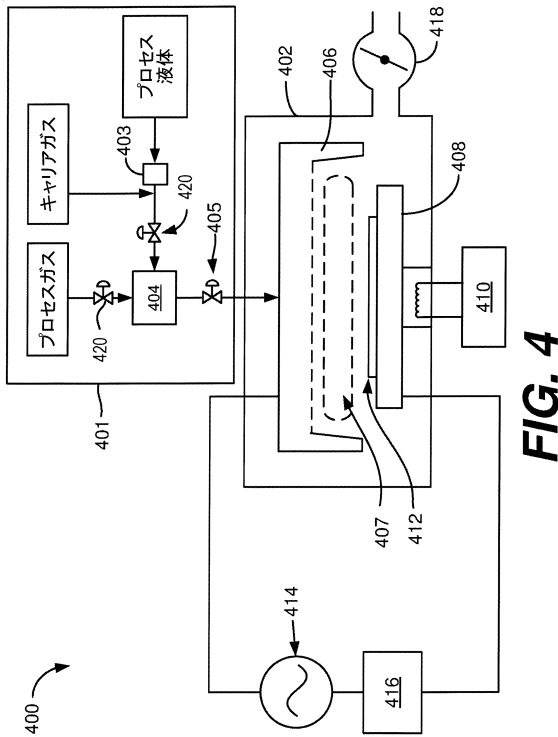
【図 3 B】



【図 3 C】



【図 4】



10

20

30

40

50

【図 5】

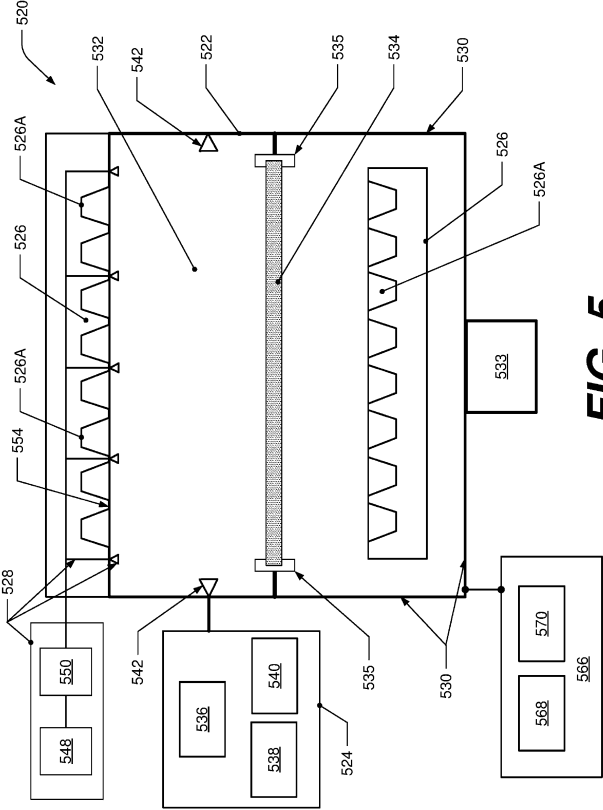


FIG. 5

【図 6】

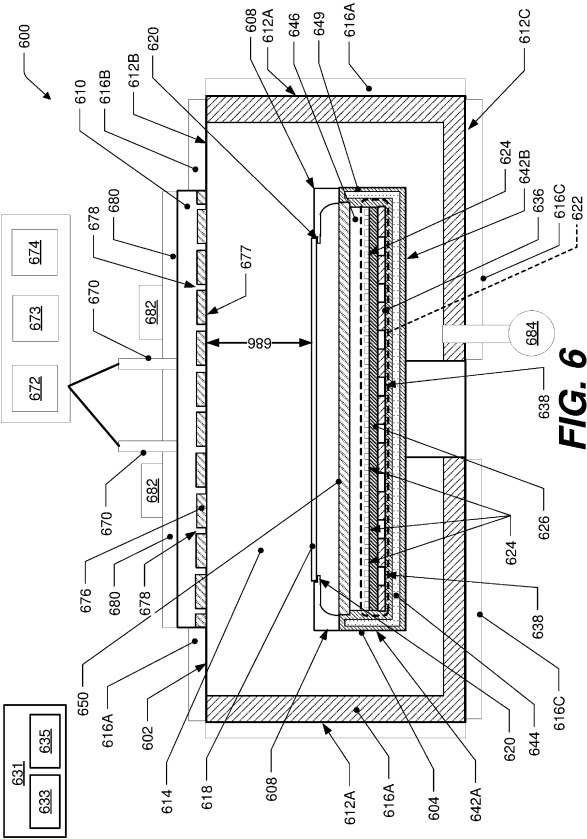


FIG. 6

【図 7】

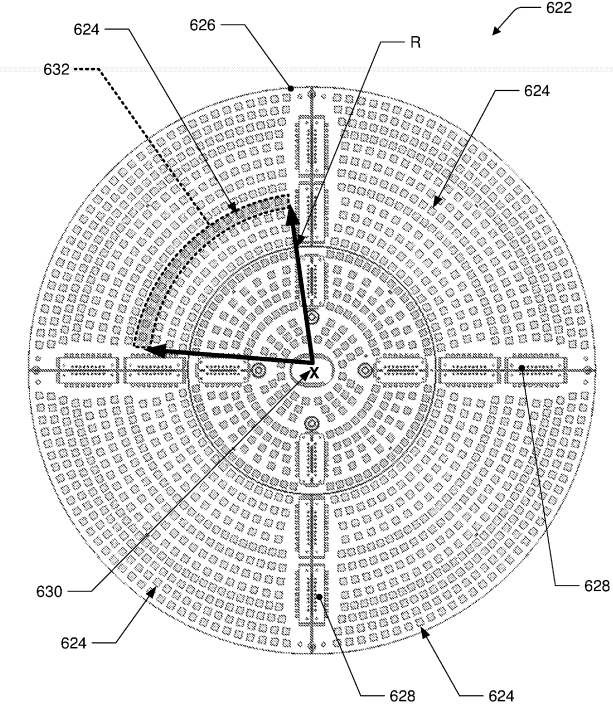


FIG. 7

【図 8】

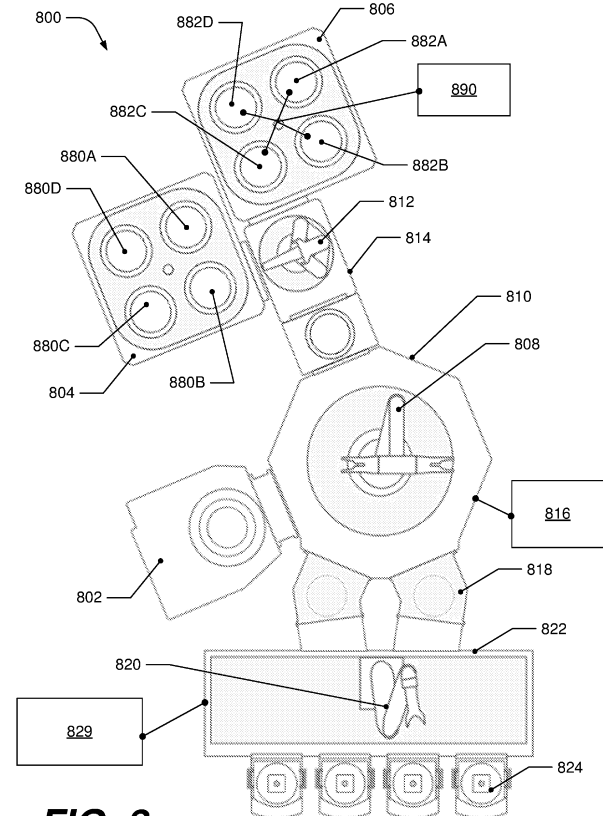


FIG. 8

10

20

30

40

50

【図 9】

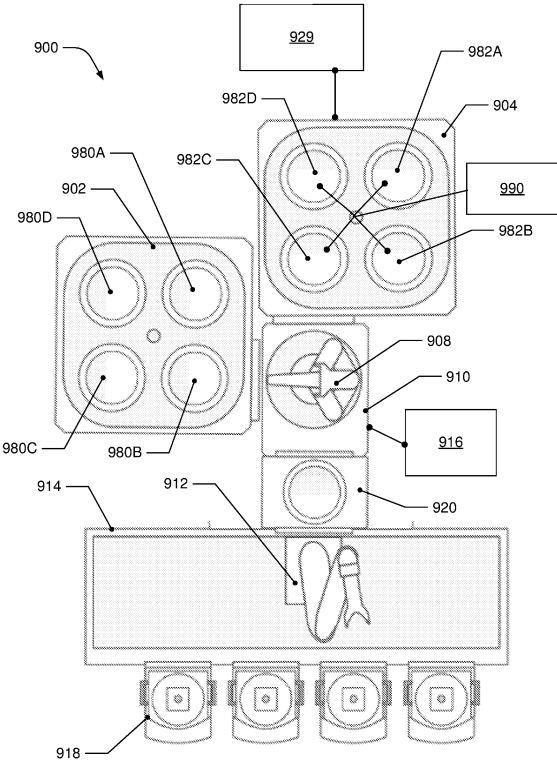


FIG. 9

【図 10】

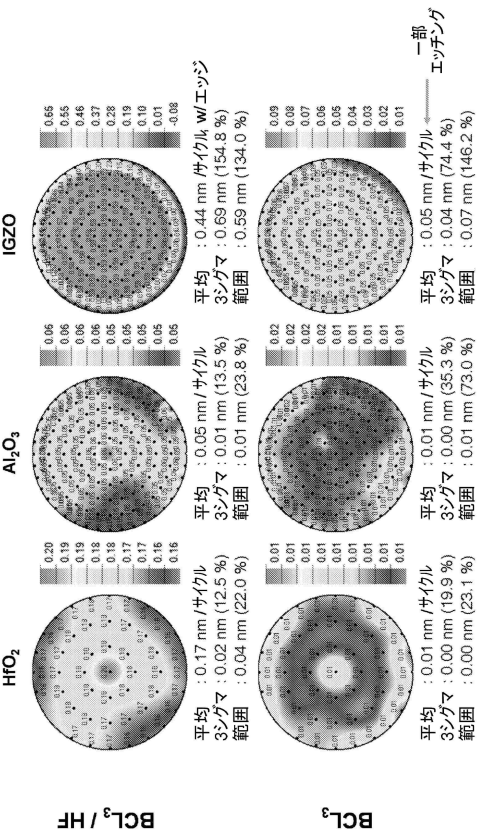


FIG. 10

【図 11 A】

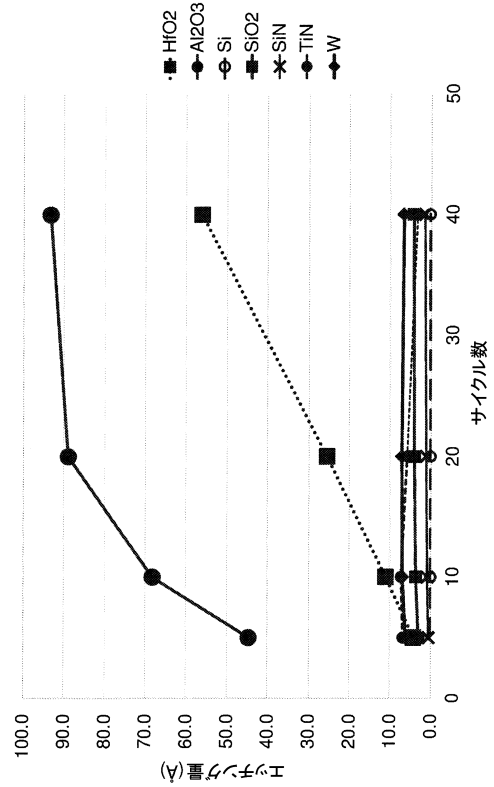


FIG. 11A

【図 11 B】

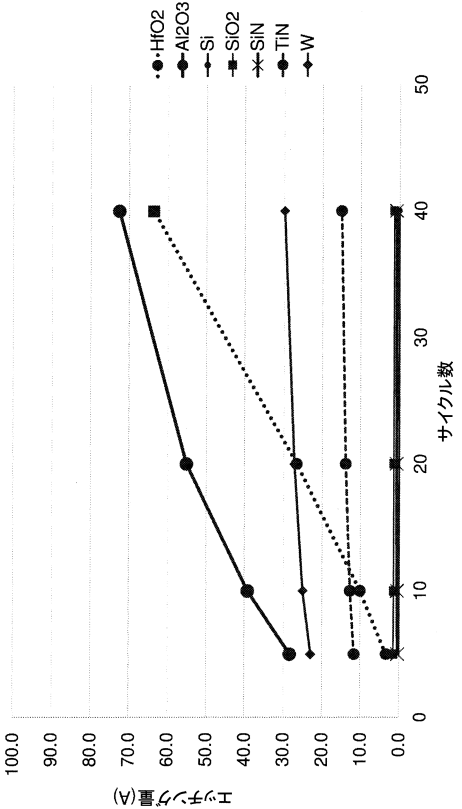


FIG. 11B

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/US2022/075996
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H01L 21/311(2006.01); H01L 21/67(2006.01); According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H01L 21/311(2006.01); H01L 21/3213(2006.01); H01L 21/768(2006.01); H01L 31/032(2006.01); H01L 31/0392(2006.01); H01L 41/47(2013.01); H01L 43/12(2006.01) Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Korean utility models and applications for utility models Japanese utility models and applications for utility models Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) eKOMPASS(KIPO internal) & Keywords: atomic layer etching (ALE), oxygen-containing material, halogen-containing gas, boron trichloride		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2019-0267249 A1 (TOKYO ELECTRON LIMITED) 29 August 2019 (2019-08-29) See paragraph [0018], claim 2 and figures 2-6.	1-11
Y		12
Y	US 2019-0044009 A1 (RESEARCH & BUSINESS FOUNDATION SUNGKYUNKWAN UNIVERSITY) 07 February 2019 (2019-02-07) See claim 10.	12
A	US 2017-0243755 A1 (TOKYO ELECTRON LIMITED) 24 August 2017 (2017-08-24) See paragraphs [0019]-[0021] and figures 2-3D.	1-12
A	US 9837312 B1 (LAM RESEARCH CORPORATION) 05 December 2017 (2017-12-05) See column 6, line 54 - column 11, line 40 and figure 3.	1-12
☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "D" document cited by the applicant in the international application "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 06 January 2023		Date of mailing of the international search report 06 January 2023
Name and mailing address of the ISA/KR Korean Intellectual Property Office 189 Cheongsa-ro, Seo-gu, Daejeon 35208, Republic of Korea Facsimile No. +82-42-481-8578		Authorized officer HONG, Kee Wan Telephone No. +82-42-481-5003

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2022)

International application No.

PCT/US2022/075996

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2019-0312194 A1 (LAM RESEARCH CORPORATION) 10 October 2019 (2019-10-10) See paragraphs [0041]-[0076] and figures 2-4F.	1-12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/US2022/075996

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	2019-0267249	A1	29 August 2019	JP	2018-026566	A	15 February 2018
				JP	6924648	B2	25 August 2021
				KR	10-2018-0018413	A	21 February 2018
				TW	201820459	A	01 June 2018
				TW	I717544	B	01 February 2021
				US	10283369	B2	07 May 2019
				US	10790156	B2	29 September 2020
US	2019-0044009	A1	07 February 2019	US	2018-0047577	A1	15 February 2018
				KR	10-1853588	B1	30 April 2018
				US	10593819	B2	17 March 2020
				US	10916670	B2	09 February 2021
US	2017-0243755	A1	24 August 2017	US	2020-0176620	A1	04 June 2020
				TW	201738952	A	01 November 2017
				TW	I658512	B	01 May 2019
US	9837312	B1	05 December 2017	WO	2017-147254	A1	31 August 2017
				CN	107644835	A	30 January 2018
				KR	10-2018-0010990	A	31 January 2018
US	2019-0312194	A1	10 October 2019	TW	201812903	A	01 April 2018
				CN	106067513	A	02 November 2016
				CN	106067513	B	09 July 2019
				CN	109346393	A	15 February 2019
				CN	110379918	A	25 October 2019
				JP	2016-208031	A	08 December 2016
				JP	6804864	B2	23 December 2020
				KR	10-2016-0124689	A	28 October 2016
				SG	10201603090	VA	29 November 2016
				TW	201709573	A	01 March 2017
				TW	202025525	A	01 July 2020
				TW	I690097	B	01 April 2020
				TW	I762876	B	01 May 2022
				US	10374144	B2	06 August 2019
				US	10749103	B2	18 August 2020
				US	2016-0308112	A1	20 October 2016
				US	2018-0019387	A1	18 January 2018
				US	9806252	B2	31 October 2017

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 2022)

フロントページの続き

MK,MT,NL,NO,PL,PT,RO,RS,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,KM,ML,MR,N
E,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BH,BN,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CL,CN,CO,CR,CU,
CV,CZ,DE,DJ,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IQ,IR,IS,IT,J
M,JO,JP,KE,KG,KH,KN,KP,KR,KW,KZ,LA,LC,LK,LR,LS,LU,LY,MA,MD,ME,MG,MK,MN,MW,MX,MY
,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PA,PE,PG,PH,PL,PT,QA,RO,RS,RU,RW,SA,SC,SD,SE,SG,SK,SL,ST,SV,SY,T
H,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,VN,WS,ZA,ZM,ZW

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 4 5 3 8 フレモント, クッシング・パークウェイ, 4 6 5 0
, ラム・リサーチ・コーポレーション内

(72)発明者 リル・ソーステン・ベルンド

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 4 5 3 8 フレモント, クッシング・パークウェイ, 4 6 5 0
, ラム・リサーチ・コーポレーション内

F ターム (参考) 5F004 AA06 BA03 BA09 BA19 BA20 BB13 BB18 BB22 BB25 BB26
 BB29 BC03 BC06 BD04 CA02 CA03 CA04 CB02 CB06 DA00 DA11
 DA17 DA18 DA20 DA22 DA23 DA25 DA29 DB00 DB01 DB03 DB07
 DB10 DB12 DB13 DB14 EA34