

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5112181号
(P5112181)

(45) 発行日 平成25年1月9日(2013.1.9)

(24) 登録日 平成24年10月19日(2012.10.19)

(51) Int.Cl.

H01L 21/3065 (2006.01)

F 1

H01L 21/302 105A

請求項の数 20 外国語出願 (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願2008-153992 (P2008-153992)
 (22) 出願日 平成20年6月12日 (2008.6.12)
 (65) 公開番号 特開2009-4778 (P2009-4778A)
 (43) 公開日 平成21年1月8日 (2009.1.8)
 審査請求日 平成23年6月3日 (2011.6.3)
 (31) 優先権主張番号 11/766,680
 (32) 優先日 平成19年6月21日 (2007.6.21)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(73) 特許権者 501419107
 エフ・イー・アイ・カンパニー
 アメリカ合衆国オレゴン州97124, ヒ
 ルズバラ, ノースイースト・ドーソンクリ
 ーク・ドライブ5350
 (74) 代理人 100103171
 弁理士 雨貝 正彦
 (72) 発明者 ミロス・トス
 アメリカ合衆国 オレゴン州 97209
 ポートランド ノースウェスト 9番ア
 ベニュー ナンバー606 333
 (72) 発明者 ノエル・スミス
 アメリカ合衆国 オレゴン州 97035
 レイク・オスウェイゴ アクイナス・ス
 トリート 38

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】高解像度プラズマ・エッチング

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基板をエッチングして微視的構造を形成する方法であって、
 集束ビームが前駆ガスを分解することによりビームの衝突地点近傍にマスク材料を堆積するか、または、前記ビームの前記衝突地点近傍の前記マスク材料をエッチングすることによって前記マスク材料の既存の層をパターン化する集束ビーム法を用いて、前記基板の表面の1つまたは複数の部分上に保護マスクを形成することと、

前記基板と接触したときに非マスク部分を化学的にエッチングすることができるエネルギーを有するが、前記非マスク部分をスパッタリングすることができるエネルギーよりも低いエネルギーを有するイオン化粒子ビームを、プラズマ源からイオン光学カラムを通してサンプルの方に誘導して前記基板の非マスク部分を選択的にエッチングすることにより前記基板に前記微視的構造を形成することと、

第2のイオン化粒子ビームを誘導して、基板材料よりも前記マスク材料をより迅速に選択的にエッチングすることにより前記マスク材料を除去することとを含む、方法。

【請求項 2】

イオン化粒子ビームをプラズマ源からイオン光学カラムを通して前記サンプルの方に誘導して前記基板の非マスク部分を選択的にエッチングすることにより前記基板に前記微視的構造を形成することが、前記マスク材料の少なくとも一部を残したままで、イオン化粒子ビームを誘導して前記微視的構造を形成することを含む、請求項1に記載の方法。

【請求項 3】

10

20

基板をエッティングして微視的構造を形成する方法であって、
前記基板の非マスク領域を残す保護マスクを前記基板の表面の1つまたは複数の部分上に形成することと、

プラズマ・チャンバ内でイオン化粒子を発生させることと、

前記イオン化粒子を、前記プラズマ・チャンバからビーム内に形成することと、

イオン化粒子ビームを前記プラズマ・チャンバからイオン光学カラムを通して前記基板の方に誘導して前記基板の非マスク領域を選択的にエッティングすることであり、前記イオン光学カラムは、前記ビームを形成するイオン光学素子を含み、前記イオン化粒子は化学反応を誘起して、前記非マスク領域から基板材料を選択的に除去することができるエネルギーを有し、スパッタリングによる前記基板材料の除去が前記化学反応による前記基板材料の除去よりも小さいように前記イオン化粒子のエネルギーを調整することと、

前記基板材料よりもマスク材料をより迅速に選択的に除去する第2のビームを前記基板の方に誘導することとを含む、方法。

【請求項4】

前記イオン化粒子ビームを前記プラズマ・チャンバから前記基板の方に誘導することが、前記プラズマ・チャンバから前記イオン化粒子ビームとともに出てくる中性粒子が前記基板に到達する前に前記イオン光学カラムにおいて前記中性粒子を除去することを含む、請求項3に記載の方法。

【請求項5】

前記イオン化粒子ビームを誘導することが、前記マスク領域よりも小さい前記イオン化粒子ビームを誘導することを含む、請求項3または4に記載の方法。

【請求項6】

前記イオン化粒子ビームが、前記基板の前記非マスク領域と接触したときに前記イオン化粒子ビームの前記イオン化粒子を解離させることができるエネルギーを有する、請求項3～5のいずれかに記載の方法。

【請求項7】

前記イオン化粒子ビームが10eVから500eVの範囲のエネルギーを有する、請求項3～6のいずれかに記載の方法。

【請求項8】

前記イオン化粒子ビームがコリメートされる、請求項3～7のいずれかに記載の方法。

【請求項9】

前記イオン化粒子ビームが収束性である、請求項3～8のいずれかに記載の方法。

【請求項10】

前記イオン化粒子ビームが前記基板の前記非マスク領域にわたって一定のイオン・フラックスを有する、請求項3～9のいずれかに記載の方法。

【請求項11】

前記イオン光学カラムは、差動ポンプを用いて複数の開口部から排気が行われる、請求項3～10のいずれかに記載の方法。

【請求項12】

化学的エッティング、物理的スパッタリング、または化学的エッティングと物理的スパッタリングとの組合せを用いて、前記第2のビームによって前記マスク材料および前記基板材料の両方を除去する、請求項3～11のいずれかに記載の方法。

【請求項13】

前記基板の表面の1つまたは複数の部分上に前記保護マスクを形成することが、ガスを1つまたは複数の部分の方に誘導しながら荷電粒子ビームを前記1つまたは複数の部分の方に誘導することであって、前記荷電粒子ビームは前記ガスを分解して保護層を堆積させることを含む、請求項3～12のいずれかに記載の方法。

【請求項14】

荷電粒子ビームを前記1つまたは複数の部分の方に誘導することが、電子ビームを誘導することを含む、請求項1～3に記載の方法。

10

20

30

40

50

【請求項 15】

荷電粒子ビームを前記1つまたは複数の部分の方に誘導することが、イオン・ビームを誘導することを含む、請求項1_3に記載の方法。

【請求項 16】

荷電粒子ビームを前記1つまたは複数の部分の方に誘導することが、レーザ・ビームを誘導することを含む、請求項1_3に記載の方法。

【請求項 17】

プラズマ・チャンバ内でイオン化粒子を発生させることが、磁気強化型誘導結合プラズマ・イオン源において複数のイオンを発生させることを含む、請求項3 ~ 1_3のいずれかに記載の方法。 10

【請求項 18】

前記基板の表面の1つまたは複数の部分上に保護マスクを形成することが、前記基板の表面上に前記マスク材料を塗布することと、続いて、集束ビーム法を用いて、前記1つまたは複数の部分以外の表面領域から前記マスク材料を除去することとを含む、請求項3 ~ 1_2のいずれかに記載の方法。

【請求項 19】

基板をエッティングして微視的構造を形成する装置であって、

ガス注入システムと、

ビームの衝突地点近傍の前記基板の方にガスを誘導してマスク材料のあるパターンで前記基板の表面上に堆積させるようにプログラムされた、微細ビームを発生させるビーム発生カラムを含む第1のシステムと、

プラズマ・チャンバと、前記プラズマ・チャンバからのイオンをビームに集束またはコリメートすることによりイオン・ビームを形成する1つまたは複数のレンズを有する、前記プラズマ・チャンバから前記イオンを受け取るイオン・カラムとを含む第2のシステムと、

前記基板の表面との化学反応を誘起して前記基板の表面を除去することができるエネルギーを前記イオンに与えるためにある電圧に維持された、1つまたは複数の加速電極と、を備え、前記イオンの前記エネルギーは、スパッタリングによる前記基板の表面の除去が前記化学反応による前記基板の表面の除去よりも小さいように調整されている、装置。

【請求項 20】

前記第1のシステムが電子ビーム・システム、集束イオン・ビーム・システム、またはレーザ・システムを含む、請求項1_9に記載の装置。 30

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0 0 0 1】**

本発明は微視的スケールの材料処理に関する。

【背景技術】**【0 0 0 2】**

現代の科学技術は電子回路、光学部品、微小電気機械構造体（MEMS）および他の用途のためのこれまでより小型でより正確な構造体を製造することを要求している。マイクロメートルまたはナノメートルスケールのそいうった構造体およびデバイスの多くは、フォトリソグラフィ法を用いてシリコン・ウェハ上に製造される。 40

【0 0 0 3】

典型的なフォトリソグラフィ技術は、「フォトレジスト」と呼ばれる感光性材料の薄層を「キャスティング」と呼ばれる方法によってシリコン・ウェハなどの半導体基板の表面上に付着させることを含む。次いで、フォトリソグラフィ・イメージング（photolithographic imaging）を用いて、光などの放射線源への選択的露光によって、フォトリソグラフィ・マスク上にデザインされた所望のパターンをフォトレジストに転写する。次いで、フォトレジストを化学的に現像して（ポジ型レジストにおける）放射線露光領域または（ネガ型レジストにおける）非露光領域を除去し、エッティング（

材料の除去)、堆積(基板表面への材料付加)、または拡散(基板内への原子拡散)などの次の工程中に基板の特定の部分を保護するためにフォトレジストのパターンを残す。例えば、場合によってはプラズマ形態の反応性化学物質を用いてエッティングを行うことができる。プラズマを用いて、表面分子を移動させるのに十分な運動量でプラズマからの荷電粒子を表面に衝突させることによって、表面から材料をスパッタリングすることもできる。堆積は、例えば化学的または物理的蒸着、あるいはプラズマ化学蒸着によって実行可能である。処理後、パターン化されたフォトレジストが除去される。リソグラフィ法は時間がかかり、完全なウェハを処理するには効果的であるが、局所的処理にはあまり有用ではない。

【0004】

10

集束イオン・ビーム(FIB)、電子ビーム、およびレーザ・ビームなどの集束ビームも小さな構造体を形成するのに用いられる。非常に正確な構造体を形成することができるが、そのようなビームによる処理は一般には非常にゆっくりであるため、微細構造体の大量生産には用いることができない。FIBを用いて基板表面をスパッタリングすることができる。これはFIBが、例えば容易に加速させて基板の分子を移動させるのに必要な運動量を達成することができるガリウム・イオン(Ga⁺)などの比較的大きなイオンを用いるためである。FIBを前駆ガスと一緒に用いて、エッティングを化学的に強化することもでき、材料を表面上に堆積することもできる。電子ビームをアシスト前駆ガスと一緒に用いて、エッティング工程または堆積工程を行うこともできる。

【0005】

20

電子ビーム法、FIB法、反応性ガス法、およびプラズマ法を単独で、または互いに組み合わせて用いて、基板表面を処理して、例えばフォトリソグラフィ・マスクを形成および補修することができる。反応性ガスは一般に材料選択性も示す。これらの方法は種々の程度の製造公差、材料特性、処理時間、および機械加工に対する柔軟性を提供することができる。

【0006】

しかし、現在用いられている、上記のような製造方法に関しては多くの問題がある。例えば、高アスペクト比の孔、すなわち、その幅よりも非常に大きい深さを有する孔を正確に作製することは困難である。現在の製造法では、孔あるいはトレンチは深くエッティングされるにつれて幅が広くなるので、隣接する深いフィーチャ(features)は、所望の距離よりさらに離間させなければならない。時間のかかるフォトリソグラフィ法は、ウェハ全体を処理するには効率的であるが、ウェハの局所的領域を処理するには有用ではない。逆に、ナノ・プロトタイピング、回路編集、およびフォトリソグラフィ・マスク補修において利用される高度に局所的な処理には直接書き込みFIB法および電子ビーム誘起法が効率的であるが、ウェハ全体を処理するには有用ではない。

30

【特許文献1】米国特許第6753538号

【特許文献2】米国特許第4609809号

【非特許文献1】Handbook of Charged Particle Beam Optics, Ed. Jon Orloff, CRC Press (1997)

【特許文献3】米国特許第6977386号

40

【特許文献4】米国特許出願第11/590570号

【特許文献5】米国特許出願公開第2005/0183667号

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

本発明の目的は、マイクロスケールおよびナノスケールの構造体を製造する方法および装置を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0008】

上記目的によれば、本発明は、好ましくは集束ビーム法を用いて基板の各部分上に保護

50

コーティングを形成することと、次いで、プラズマ・チャンバと基板との間に配置されたイオン集束カラムを用いて形成された材料選択性プラズマ・ビームを用いて、基板のマスクされていない各部分をエッティングすることとを含む。

【0009】

最後に、特に上記考査ならびに以下の添付図面、例示的な詳細な説明および添付の特許請求の範囲を考慮すれば、本発明の他の多くの特徴、目的および利点は当業者には明白となろう。

【0010】

本発明の範囲はどのような具体的な実施形態よりも非常に広いものであるが、好適な実施形態の詳細な説明が例示的な図面と共に以下に続く。同様の参照番号は同様の構成要素を指すものとする。10

【0011】

当業者であれば、特に本明細書に示した実施例を考慮して多数の代替実施形態があることを理解できようが、この詳細な説明は本発明の好適な実施形態の例示的なものであり、本発明の範囲は添付の特許請求の範囲によってのみ限定される。

【0012】

本発明の好適な実施形態は、保護マスクを局所的に作製するために用いられるビームを用い、次いでプラズマ・ビーム・エッティング法を用いることにより、集積回路または微小電気機械システムなどのナノスケール構造体およびマイクロスケール構造体を製造する方法に関する。20

【0013】

リソグラフィが微細な機械加工 (micromachining) におけるパターン画定に一般に用いられる場合、本発明の好適な実施形態において用いられるビーム法が、正確に画定された保護マスクを基板表面上に形成し、次いで、プラズマ・ビームを用いてエッティングすることによって、優れた構造的公差および機械加工に対する柔軟性が得られる。例えば、ビーム蒸着法は線幅が約 10 nm 未満などの表面フィーチャを生じができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0014】

ここで各図面を参照すると、図 1 は本発明の方法の各ステップの好適な順番を示すフローチャートである。図 2 から 4 および図 6 は図 1 に示す方法による基板処理の種々の段階を示す。図 2 は処理開始前の表面 202 を有するサンプル基板 200 を示す。30

【0015】

ステップ 102 では、集束ビーム（例えば、1 nm から 100 μm の範囲、より一般的には 1 nm から 10 nm の範囲のビーム径を有する）を用いて、基板表面の一部をマスクしてマスクされた部分を次のエッティング・ステップ中に保護するための保護層を作製する。例えば、ビームを用いて、ビームアシスト堆積を用いてマスク材料を堆積することもでき、ビームを用いて、他の周知の方法によって先に堆積されたマスク材料の層にあるパターンをエッティングすることもできる。好適な一実施形態において、露出したあるいはマスクされていない基板材料の表面より、次の処理による堆積した材料のエッティングの度合いが少ない場合は、ビームを用いて次のエッティングの工程に適した材料を堆積させる。好適なステップ 102 で用いられるようなビーム法は一般に、フォトリソグラフィ手段を通して利用可能な保護層よりも高度に画定された保護層を作る。さらに、ビーム法は従来のフォトリソグラフィ・マスクを作製しなくても、集束ビームを用いた検査の直後に基板の任意の領域を処理することができる。このことにより、ビーム法はフォトリソグラフィ・マスク補修、回路編集、およびナノ構造プロトタイピングにおいて遭遇するような特定の修正 (one-off modifications) にとって特に有用なものとなる。ビーム法は一般に、堆積の局所化に特に適している。堆積の局所化とは基板全体よりも著しく小さい基板の一部分上の堆積を意味する。40

【0016】

10

20

30

40

50

図3はビーム302を用いて表面202の1つまたは複数の部分306の上に保護層またはマスク304を堆積し、ここでさらによく理解されるように、プラズマ・ビームによって処理される非マスク領域308を残す工程を示す。好適な実施形態では、ビーム302は電子ビームなどの荷電粒子ビームを含む。電子ビーム蒸着法は、例えば、「*E lectron Beam Processing*」と題されたMusilらの米国特許第6753538号に記載されている。Musilは、電子ビームを用いて、電子ビームの存在下で分解して表面上に適した材料を残す前駆ガス中で化学反応を誘起することによって材料を堆積させる工程を記載している。好適な堆積前駆ガスには、例えば、 XeF_2 エッチング法によってゆっくりと除去される炭素保護マスクを堆積するためのスチレン($C_6H_5CH=CH_2$)および H_2O などの酸素ベースのカーボン・エッチング前駆体に抵抗性のあるタンゲステンが豊富な保護マスクを堆積するための WF_6 (六フッ化タンゲステン)または $W(CO)_6$ (タンゲステンヘキサカルボニル)が挙げられる。結果的に酸化物層の堆積を生じさせる前駆ガスには、例えば、酸化珪素保護マスクを堆積させるTEOS(テトラエチルオルソシリケート)が挙げられる。電子ビーム堆積用の他の前駆体は周知であり、同様に用いてもよい。 GaN および Pt がそれぞれ豊富に存在するマスクを堆積させるための重水素化ガリウムアジド(D_2GaN_3)および $Pt(PF_3)_4$ (tetraakis(trifluorophosphane)platinum)が挙げられる。

【0017】

荷電粒子ビーム堆積の当業者であれば、堆積は必要な堆積速度および解像度に応じてある範囲の電子ビーム・エネルギーおよび電流にわたって行うことができるることを理解できよう。一般に、ビーム電流が高く、ビーム・エネルギーが低いと、堆積速度は速くなり、最適なビーム・エネルギーは約100eVである。一般に、エネルギーがこの値以下であれば、堆積速度は遅くなる。しかし、堆積物の解像度を最適にするには、より小さい電子ビームを生じるためにより高いビーム・エネルギーが典型的には必要となる。したがって、本発明の譲受人であるFEI社から入手可能なものなど従来の走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた場合には、エネルギーは約1KeVから約30keVの範囲にあるのが妥当であると思われる。透過型電子顕微鏡(TEM)に一般に用いられる300keVもの高さのエネルギーを用いてもよい。

【0018】

好適なビーム電流はピコアンペアからナノアンペアの範囲である。しかし、例えば、いくつかのMEMS製造における用途が考えられ、ここでは非常に高い堆積速度が必要とされ、低解像度が受容可能であるときには非常に高いマイクロアンペア範囲の電流が好ましい。典型的な電子ビーム・スポット・サイズは1nmから100nmの範囲とができるが、TEMシステムおよび非常に高い電子電流のSEMカラムに及ぶ、いくつかの用途においては0.1nmから10μmの範囲のスポット・サイズが有用となり得る。

【0019】

あるいは、保護マスク304を形成する材料を堆積させるのに用いるビーム302はFIBであり得る。堆積に用いられるFIB法では、ガスが表面の方に誘導され、(典型的にはガリウム・イオンを含んだ)微細集束オン・ビームがターゲット表面に吸収されたそのガス分子を分解し、金属生成物を堆積させる。FIBを用いて金属材料を堆積させる方法は、Yamaguchiらに付与された「*Method And Apparatus For Correcting Delicate Wiring of IC Device*」についての米国特許第4609809号に記載されており、この特許はFIBの存在下でタンゲステン前駆ガス化合物を用いて基板表面上にタンゲステンを堆積させることを記載している。FIB存在下で分解して材料を堆積させ、本発明と一緒に用いることのできる他の前駆ガスは、例えば、*Handbook of Charged Particle Beam Optics*, Ed. Jon Orloff, CRC Press (1997)に記載されている。例えば本発明の譲受人に譲渡されたGerlachらに付与された「*Angular Aperture Shaped Beam System and Method*」についての米国特許第6977386号に記載されたよう

10

20

30

40

50

に、イオン・ビームはある地点に集束させることもでき、成形することもできる。

【0020】

レーザ・ビーム誘起堆積を用いてもよい。ビームは、エネルギーを提供して上記のような前駆体を分解することによって材料を堆積させることもでき、ビームは、例えば「Charged-Particle Beam Processing Using a Cluster Source」についての米国特許出願第11/590570号に記載のように、表面上に堆積されるフラーレンなどの粒子を含むこともできる。

【0021】

いずれの場合でも、堆積法および堆積される材料は、以下で説明するように、結果的に保護マスク304が次のマスク除去ステップにおいて選択的に除去され得るようなものであることが好ましい。上記のように、マスクは対象領域をマスク材料層で被覆し、次いでビームを用いてマスク層から材料を除去して所望のパターンを形成することによって形成することもできる。

10

【0022】

図1はコリメートされた第1のプラズマ・ビームを基板表面に向けて誘導することを含む第2のステップ104を示しており、ビームは保護マスクをエッティングする速度よりも非常に速い速度で、マスクで被覆されていない基板表面を選択的にエッティングする。第1のプラズマ・ビーム402は、マスクされていない材料が好ましくは保護マスク304材料のエッティング速度の少なくとも2倍の速さで、より好ましくは5倍の速さで、さらに好ましくは10倍の速さで、そして最も好ましくは100倍の速さでエッティングされるような選択的特性を示すのが好ましい。

20

【0023】

図4を参照すると、コリメートされた第1のプラズマ・ビーム402が基板サンプル200の表面202の方に誘導されてマスクされていない（保護されていない）領域をエッティングする。コリメートの好適な程度はエッティングされたフィーチャの所望の特性およびビームの所望のサイズに依存する。より高度にコリメートされたビームは、エッティングされたフィーチャにおいてより垂直の側壁を生み出す。コリメートの程度はビーム・スポット・サイズにも影響を及ぼす。第1のプラズマ・ビーム402は、ビーム・スポット領域が好ましくは基板表面の非マスク領域よりも大きいが、マスクの領域よりも小さくなるようにコリメートされ、実質的には非集束化されることが好ましい。すなわち、プラズマ・ビームは非マスク領域308全体をエッティングするのに十分に広いものであることが好ましいが、実施形態によっては、プラズマ・ビームまたはサンプルを動かして必要な領域全部を走査してエッティングすることができる。プラズマ・ビームは領域を均一にエッティングするためにマスクされていないエッティング領域308全体にわたって一定のイオン・フラックス・プロフィール（ion flux profile）を有することが好ましい。イオン・フラックスは好ましくは基板表面の非マスク領域の約20%以内、より好ましくは約1%以内、さらに好ましくは約0.1%以内、そして最も好ましくは約0.001%以内で一定である。プラズマ・ビーム402は局所的である。すなわち、プラズマ・ビーム402はサンプル全体よりも非常に小さい領域を覆う。プラズマ・ビーム402は、高アスペクト比の孔をエッティングするために使用される場合、孔のエッティングがテーパー状になるのを避けるために高度にコリメートされるのが好ましい。低アスペクト比の孔などいくつかのフィーチャを形成する際には、コリメートはそれほど重要ではない。

30

【0024】

第1のプラズマ・ビーム402は、表面202と接触したときにプラズマ・ビーム中のイオンを解離させるのに十分に高いエネルギーであって、かつ、表面202の著しいスパッタリングを防ぐに十分な低いエネルギーを有することが好ましい。すなわち、プラズマ・ビーム中のイオンから表面への運動量移動によって除去される材料ではなく、非マスク領域308中の材料は主に、サンプル表面と接触したときにプラズマ・ビーム中のイオンが解離することによって形成される反応性分子間の化学反応によって除去される。この化学反応は真空チャンバから排出される揮発性副生成物を形成する。イオン化された粒子の

40

50

エネルギーは、スパッタリングによる材料除去速度が化学的エッチングによるものよりも少なくとも5分の1、好ましくは10分の1、より好ましくは100分の1、最も好ましくは1000分の1となるようなものであることが好ましい。この選択性はエッチング工程が完了したときにマスクが好ましくは完全には除去されないか、あるいは少なくともマスクはマスク領域が受容可能な量のエッチングに晒されるのに十分長く適所に存在するようなものになる。イオン解離とスパッタリング保護との組合せは、イオンが表面と接触するエネルギーを細かく調整することによって達成される。一般的なエネルギーは1eVから10keVの範囲、より好ましくは10eVから500eVの範囲にある。プラズマからのイオンは表面202と接触すると解離し、保護マスク304を殆どまたは全くエッチングしないが、主に非マスク領域308をエッチングする。

10

【0025】

使用できる反応性プラズマ前駆体には、例えば、SF₆およびXeF₂が挙げられ、これを用いて、例えばSF₆⁺およびXeF₂⁺からそれぞれ構成されるプラズマ・ビームを形成することができる。

【0026】

図4は側壁412を有するトレンチ410を形成する工程中のプラズマ・ビーム402を示す。当業者であれば、上記プラズマ・エッチング法が非常に平行な側壁を有する高アスペクト比のトレンチをエッチングする傾向があることが理解されよう。これは(i)プラズマ・ビームがコリメートされ、(ii)揮発性副生成物がピット側壁上に再付着せず、(iii)サンプル200をプラズマ・チャンバの外部に位置決めすることによって、サンプル200が入っているチャンバ内部では中性ガス分子が低減または除去されることによる。プラズマ・ビームはサンプルから二次電子放出を生じるため、この最後のポイントは重要である。前記電子は側壁412に衝突し、そこで電子は吸収されたエッチング前駆ガス分子を解離させて、(一般には望ましくない)側壁の側方エッチングを生じさせる可能性がある。このような側方エッチングは、中性のエッチング前駆体分子が試料チャンバ内部に存在しないときには生じない。理想的なプラズマ源においては、イオン化されたガス分子のみが抽出され、プラズマ・ビームを形成するのに用いられる。実際、中性ガス分子はプラズマ・ビーム集束カラムおよび試料チャンバ内に拡散する。本発明の好適な実施形態では、差動ポンプ式プラズマ集束カラムを用いることにより、中性分子が試料チャンバ内に入るのを防ぐことができる。

20

【0027】

図5は本発明のデュアルビーム・システム500の装置を概略的に示す。システム500はイオン・ビーム・カラム502および電子ビーム・カラム504を備える。イオン・ビーム・カラム502は垂直に配向され、電子ビーム・カラム504は垂直に対してある角度を成して配向されているが、他の実施形態は垂直の電子ビーム・カラム504および傾斜したイオン・ビーム・カラム502を用いてよい。イオン・ビーム・カラム502はガス注入口506を介して単独のガスまたは複数のガスが供給されるプラズマ・チャンバ504を含む。プラズマ・チャンバ504は、例えば磁気強化型誘導結合プラズマ源を用いてプラズマを発生することができる。イオン化されたガス分子および一部の中性ガス分子は開口部508を通って出て行く。イオンは位置決め可能ステージ512上に位置決めされたワーク・ピース510に向けて加速される。プラズマ・チャンバ504を出て行く中性分子の大半がカラム502に沿った種々のガス出口522によってイオン・カラムから除去されるように、一連の開口部520がイオン・カラム502に沿って差動真空ポンピングの稼働を可能にする。

30

【0028】

イオン・カラム502はイオン・ビームを遮断するビーム・ブランカ530と、ワーク・ピース510上にビームを位置決めし、ビームを走査するためのビーム偏向器532とを含む。レンズ534がイオン化されたガス分子ビームをコリメートまたは集束する。ワーク・ピースがプラズマ・チャンバ内に位置決めされる一般的な半導体プラズマ処理システムとは異なり、本発明の実施形態はワーク・ピース510からプラズマ・チャンバ50

40

50

4を分離する。この分離により、ビームがイオン・カラム内のイオン光学素子を通過するときにビームをコリメートまたは集束し、中性分子の大半を除去して、それらがワーク・ピースに到達しないようにし、かつワーク・ピースにおけるイオン・ビームの衝突エネルギーを制御する機会が得られる。

【0029】

当業者であれば、上記プラズマ・エッチング法は非常に高い材料除去速度および非常に高い側方処理解像度を達成することができるこを理解できよう。材料除去速度はプラズマ・ビーム電流によって決定され、ビームが照射された表面領域の吸着質欠乏によって限定されない。吸着質欠乏とは、ガスアシスト荷電粒子ビーム・エッチングおよび蒸着法の処理速度を制限することの多い周知の現象である。

10

【0030】

第1のプラズマ・ビーム402の他の属性は、ビーム径が一般的な液体金属イオン源FIBの1つよりも比較的大きいが、一般的な誘導結合プラズマ（「ICP」）に比して小さいことである。ビーム径はサイズが数十ナノメートルから数ミリメートルの範囲にあることが意図される。すなわち、プラズマ・ビームは一般に、保護層を生成するのに用いられビーム径よりも、1桁、より好ましくは2桁以上大きい。したがって、保護層をパターン化するビームは複雑なフィーチャのパターンを形成することができ、プラズマ・ビームはパターン全体を包含して、1ステップでそのパターンをエッチングすることができる。プラズマ・ビーム径は一般に、基板径の1/2未満、より好ましくは、基板径の1/10未満である。したがって、この方法はウェハ全体のプロセスではなく、局所的エッチング法として用いられる。第1のプラズマ・ビーム402の電流は数ピコアンペアから数ミリアンペアの範囲であり得るが、一般的なビーム電流は1ナノアンペアから数マイクロアンペアの範囲になる可能性が高い。

20

【0031】

この方法のために、磁気強化型誘導結合プラズマ源は高輝度が特に優れているので好ましい。このようなICP源はKellerらに付与された「Magnetically Enhanced, Inductively Coupled Plasma Source for a Focused Ion Beam System」についての米国特許出願公開第2005/0183667号に記載されている。当業者であれば、この源の輝度が高くなるほど、ビームは所与のビーム電流に対してますますコリメートされ、したがって、エッチングはずっと正確になることが理解できよう。しかし、このステップのために、例えばデュオプラズマトロン、ペニング・イオン源、または容量結合プラズマ源などの他のプラズマ・イオン源を用いることもできる。

30

【0032】

使用できる反応性プラズマ前駆体には、例えば、SF₆およびXeF₂が挙げられる。好適な実施形態は、タンクステンを覆うシリコンをエッチングするXeF₂の選択性に起因して保護層がタンクステンから形成されたときに、第2のステップにおいてXeF₂を用いることを意図している。

【0033】

ワーク・ピース510近傍に位置決めされたノズル542を有するガス注入システム540によって真空チャンバ内に導入されるエッチャント前駆ガスと一緒に、非反応性プラズマ・ガスを用いることもできる。このような場合、プラズマの分子がサンプルと反応するよりはむしろ、プラズマ分子およびサンプルにイオンが衝突する結果放出される二次電子が、サンプルとサンプル近傍の真空チャンバ内に導入されるエッチング前駆体との間に反応を誘起させるためのエネルギーを提供する。いくつかの実施形態では、プラズマの場合のようにアルゴンを用いることができる。これはアルゴンのイオン化ポテンシャルが低く、したがって、分解し、プラズマ・ビームとして持続するためのエネルギーをあまり必要としないためである。アルゴンは前駆ガスと一緒に用いることもでき、アルゴンはプラズマ・チャンバ内で反応性ガスと混合することもできる。いずれの場合でも、保護マスク304ではなく露出している非マスク領域308をエッチングするために、プラズマ・ビ

40

50

ームおよび／またはプラズマ・ビームとアシストガスとの組合せを、このステップにおいて選択することが好ましい。

【0034】

第3のステップ106では、マスク材料が除去される。図6を参照すると、第2のプラズマ・ビーム602がサンプルの方に誘導される。いくつかの実施形態では、ビームは走査を行わずにマスクを除去できるのに十分な大きさである。プラズマ・ビーム602は、基板サンプル200をエッティングせずに、あるいは非常に遅い速度でエッティングしながら、保護マスク304の材料をエッティングするために選択される。マスク材料は好ましくは、基板材料のエッティング速度の少なくとも2倍の速度で、より好ましくは少なくとも5倍の速度で、さらに好ましくは少なくとも10倍の速度で、そして最も好ましくは少なくとも100倍の速さでエッティングされる。10

【0035】

例えば、酸素イオン・プラズマ・ビームを用いて炭素質マスクを揮発させることができ、 XeF_2 プラズマ・ビームを用いてタンゲステン・マスクを除去することができる。他の実施形態では、多数のガスを混合して、特定のエッティング特性を有するプラズマ・ビームを生成することができる。例えば、酸素をプラズマ中で SF_6 と混合していくつかの基板のエッティング速度を強化することができる。例えば、 SF_6 と5%酸素との混合物は純粋な SF_6 に比してシリコンのエッティング速度を低減させるが、タンゲステンなどの金属は依然として非常に迅速にエッティングする。このガス混合物は露出された基板が $W : SiO_2$ の比が10:1またはほぼ10:1の SiO_2 であるときに、タンゲステンを良好に選択的にエッティングする。あるいは、純粋な酸素プラズマ・ビームを用いて最初に表面全体を酸化させ、次いで上記の SF_6 と5%酸素とを用いることができる。他の実施形態では、保護層は集束イオン・ビーム・ミリング、選択的化学的エッティング法または、化学的機械的研磨などの従来の任意の方法によって除去することもできる。図6のビーム602の径はマスクされた領域よりも小さいので、ビーム602がマスク領域の上を走査する。20

【0036】

本発明の他の実施形態では、マスクは(Ga液体金属イオン源FIBツールに用いられるものなどの)標準的な集束イオン・ビーム・スパッタリング法によって、または化学的エッティングと物理的スパッタリングとの組合せによって除去されてもよい。本発明者らはそういったプロセスが非マスク領域を「オーバーエッティング」させるが、ステップ104の後に、マスク厚がステップ104中に生成されたエッティング孔(etch pits)の深さに対して小さい場合には無視できることに注目している。30

【0037】

上記説明は本発明の好適な実施形態の例示であって、当業者であれば、特にこの説明、添付図面、およびそこに引き出された特許請求の範囲を考慮すれば、多数の変形例、改変例、修正例、置換例、等を理解できよう。例えば、トレンチ410はステップ106においてマスク材料304を除去する前または後で、ガス媒介荷電粒子ビーム誘起蒸着法によって充填することができる。いずれの場合にも、本発明の範囲はあらゆる特定の実施形態よりも非常に広いので、上記の詳細な説明は本発明の範囲を限定するものと解釈してはならず、本発明の範囲は添付の特許請求の範囲によってのみ限定されるものである。40

【図面の簡単な説明】

【0038】

【図1】本発明の処理の好適な順序を示すフローチャートである。

【図2】上部表面を有する基板サンプルを示す立面側面図である。

【図3】表面上の保護マスクの各部分をさらに示す図2の基板の図である。

【図4】コリメートされたプラズマ・ビームが図2および3の基板の保護されていない部分を選択的にエッティングする工程を示す図である。

【図5】電子カラムと、プラズマ・ビームを発生するためのプラズマ・チャンバおよび差動ポンプ式イオン集束カラムの組合せとを備えたデュアルビーム・システムを示す図である。50

【図6】図2および3の保護マスクを選択的にエッティングする段階を示す図である。

【符号の説明】

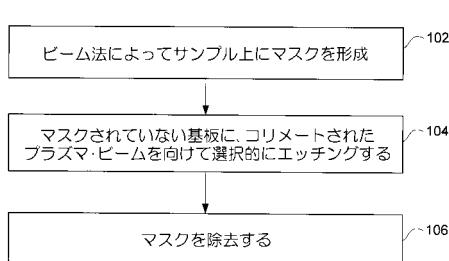
【0039】

- 200 サンプル基板
- 202 表面
- 302 ビーム
- 304 マスク
- 308 非マスク領域
- 402、602 プラズマ・ビーム
- 410 トレンチ
- 412 側壁
- 500 デュアルビーム・システム
- 502 イオン・ビーム・カラム
- 504 電子ビーム・カラム
- 506 ガス入口
- 508、520 開口部
- 510 ワーク・ピース
- 512 位置決め可能ステージ
- 522 ガス出口
- 530 ビーム・プランカ
- 532 ビーム偏向器
- 534 レンズ
- 540 ガス注入システム
- 542 ノズル

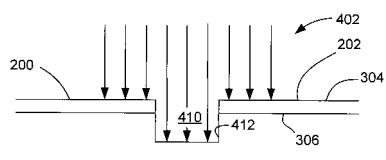
10

20

【図1】



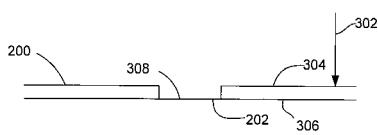
【図4】



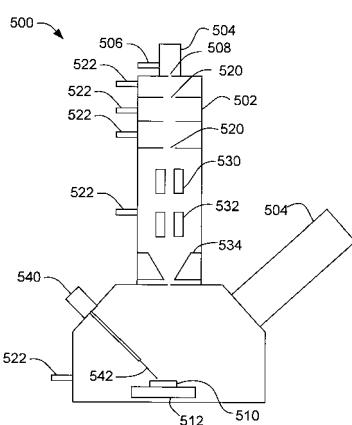
【図2】



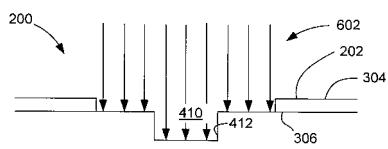
【図3】



【図5】



【図6】



フロントページの続き

審査官 粟野 正明

(56)参考文献 特開2006-005110(JP,A)

米国特許第04874459(US,A)

特開平04-272640(JP,A)

特開平09-199475(JP,A)

特開2007-018928(JP,A)

特開平02-062039(JP,A)

特開2006-128068(JP,A)

特開平09-045639(JP,A)

特開平05-017300(JP,A)

特開2000-183045(JP,A)

特開2005-174591(JP,A)

特開昭59-132132(JP,A)

特表平07-502863(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 21/3065

H01L 21/302

H01J 37/30 - 37/36