

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2015-29072
(P2015-29072A)

(43) 公開日 平成27年2月12日(2015.2.12)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO 1 L 21/302 (2006.01)	HO 1 L 21/302 2 O 1 B	5 C O 3 3
HO 1 J 37/28 (2006.01)	HO 1 J 37/28 B	5 C O 3 4
HO 1 J 37/305 (2006.01)	HO 1 J 37/305 A	5 F O O 4

審査請求 未請求 請求項の数 28 O L 外国語出願 (全 20 頁)

(21) 出願番号 特願2014-118874 (P2014-118874)	(71) 出願人 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
(22) 出願日 平成26年6月9日(2014.6.9)	(74) 代理人 100103171 弁理士 雨貝 正彦
(31) 優先権主張番号 13/914, 312	(72) 発明者 エイデン・マーティン オーストラリア ニュー・サウス・ウェールズ州 2065 クロウズ・ネスト ウィロビー・ロード 25/118
(32) 優先日 平成25年6月10日(2013.6.10)	(72) 発明者 ミロス・トス オーストラリア ニュー・サウス・ウェールズ州 2016 レッドフェルン パブティスト・ストリート 94
(33) 優先権主張国 米国 (US)	最終頁に続く
(特許庁注: 以下のものは登録商標)	
1. T E F L O N	

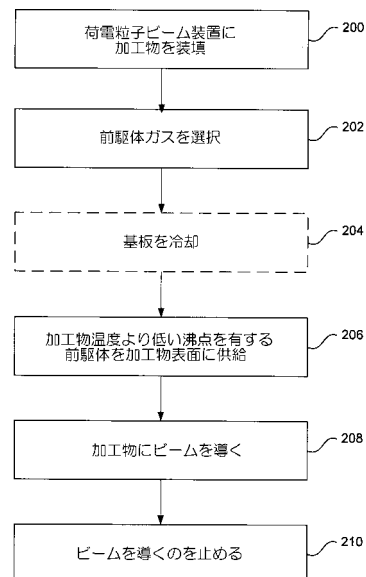
(54) 【発明の名称】 電子ビーム誘起エッチング

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 改良した電子ビーム誘起エッチングを提供する。

【解決手段】 前駆体ガスを選択202し、基板を、前駆体分子の沸点に近い温度に冷却204する。基板表面の温度よりも低い沸点を有する選択した前駆体ガスを基板表面に供給206する。加工物室内の圧力は、ガス注入システムを備える超高真空システムで使用されるとき約10⁻⁸トルから、環境制御型走査電子顕微鏡型のシステムで使用されるとき約10⁻¹⁰トルまでの範囲とする。前駆体ガスの存在下で、電子ビーム、イオン・ビーム、クラスター・ビーム、中性ビームなどのビームをあるパターンで基板表面に照射208して、この粒子ビームの存在下で前駆体ガスが反応して基板表面から材料を除去する。

【選択図】 図2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

荷電粒子ビーム・エッチングの方法であって、
 基板表面を室温よりも低い温度に冷却するステップと、
 前記基板表面を前駆体ガスにさらすステップであり、前記前駆体ガスが、前記基板表面の温度よりも低い沸点を有する一群の化合物の中から選択されるステップと、
 前記前駆体ガスの存在下で前記基板表面に荷電粒子ビームを照射するステップであり、
 前記粒子ビームの存在下で前記前駆体ガスが反応して、前記基板表面から材料を除去するステップと
 を含む方法。

10

【請求項 2】

前記基板表面を前駆体ガスにさらすステップが、前記基板表面を NF_3 を含む前記前駆体ガスにさらすステップを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記基板がシリコンを含む、請求項 2 に記載の方法。

【請求項 4】

前記基板表面を前駆体ガスにさらすステップが、前記基板表面を、 NF_3 と酸化物の成長を抑制するガスとの混合物にさらすステップを含む、請求項 2 または 3 に記載の方法。

【請求項 5】

前記基板表面を前駆体ガスにさらすステップが、前記基板表面を、 NF_3 と炭素エッチング・ガスとの混合物にさらすステップを含む、請求項 2 または 3 に記載の方法。

20

【請求項 6】

前記基板表面を前駆体ガスにさらすステップが、前記基板表面を、 NF_3 と酸化物の成長を促進するガスとの混合物にさらすステップを含む、請求項 2 または 3 に記載の方法。

【請求項 7】

前記基板表面を前駆体ガスにさらすステップが、前記基板表面を、 NF_3 と NH_3 との混合物にさらすステップを含む、請求項 2 または 3 に記載の方法。

【請求項 8】

前記基板表面を前駆体ガスにさらすステップが、前記基板表面を、 NF_3 と N_2O との混合物にさらすステップを含む、請求項 2 または 3 に記載の方法。

30

【請求項 9】

基板表面を室温よりも低い温度に冷却するステップが、前記加工物表面を、前記前駆体の沸点から 50°C 以内の温度に冷却するステップを含む、請求項 1 から 8 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 10】

基板表面を室温よりも低い温度に冷却するステップが、前記加工物表面を、前記前駆体の沸点から 20°C 以内の温度に冷却するステップを含む、請求項 1 から 9 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 11】

基板表面を室温よりも低い温度に冷却するステップが、前記加工物表面を、マイナス 100°C よりも低い温度に冷却するステップを含む、請求項 1 から 10 のいずれか一項に記載の方法。

40

【請求項 12】

基板表面を室温よりも低い温度に冷却するステップが、前記加工物表面を、前記前駆体ガスのケルビン目盛上の沸点から 15 パーセント以内の温度に冷却するステップを含む、請求項 1 から 11 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 13】

前記基板表面に吸着し、前記粒子ビームの存在下で解離し、それによって反応性のフラグメントを形成する分子を有する化合物を前記前駆体ガスが含み、前記反応性のフラグメントが前記基板表面と反応して、前記基板表面から脱離する反応生成物を形成する、請求

50

項 1 から 1 2 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 1 4】

前記前駆体ガスが、酸素、一酸化二窒素、水素、アンモニア、塩素または塩化水素を含む、請求項 1 から 1 3 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 1 5】

前記基板が、ホウ素、炭素、シリコン、ゲルマニウム、ヒ素、リン、スズ、アンチモン、セレンまたは硫黄を含む、請求項 1 から 1 4 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 1 6】

加工物の画像を形成する方法であって、
前記加工物に向かって電子ビームを導くステップであり、前記電子ビームの衝突によって 2 次電子が放出されるステップと、
N F₃を含むガス中で前記 2 次電子を加速させて、2 次電子信号を増幅するイオン化カスケードを生じさせるステップと、
増幅された前記 2 次電子信号を検出するステップと、
増幅された前記 2 次電子信号を使用して前記加工物の画像を形成するステップとを含む方法。

【請求項 1 7】

前記加工物を室温よりも低い温度に冷却するステップをさらに含む、請求項 1 6 に記載の方法。

【請求項 1 8】

前記加工物を室温よりも低い温度に冷却するステップが、前記加工物を、マイナス 1 0 0 ° C よりも低い温度に冷却するステップを含む、請求項 1 7 に記載の方法。

【請求項 1 9】

前記加工物がシリコンを含む、請求項 1 6 から 1 8 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 2 0】

前記加工物が、ホウ素、炭素、シリコン、ゲルマニウム、ヒ素、リン、スズ、アンチモン、セレンまたは硫黄を含む、請求項 1 6 から 1 9 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 2 1】

荷電粒子ビーム・エッチングの方法であって、
基板のビーム誘起エッチング用の前駆体ガスを選択するステップと、
前記基板の表面を、前記前駆体ガスの沸点よりも高い、前記前駆体ガスの沸点から 1 0 0 ° C 以内の温度に維持するステップと、
前記基板表面を、前記前駆体ガスにさらすステップであり、前記前駆体ガスが、前記基板表面の温度よりも低い沸点を有する一群の化合物の中から選択されるステップと、
前記前駆体ガスの存在下で前記基板表面に荷電粒子ビームを照射するステップであり、前記粒子ビームの存在下で前記前駆体ガスが反応して、前記基板表面から材料を除去するステップとを含む方法。

【請求項 2 2】

前記前駆体ガスが N F₃を含む、請求項 2 1 に記載の方法。

【請求項 2 3】

前記前駆体ガスが、N H₃または N₂O と混合された N F₃を含む、請求項 2 2 に記載の方法。

【請求項 2 4】

前記基板がシリコンを含む、請求項 2 2 または 2 3 に記載の方法。

【請求項 2 5】

加工物を処理する荷電粒子ビーム・システムであって、
前記サンプルに照射する荷電粒子の 1 次ビームを生成する荷電粒子源と、
加工物の表面に前記荷電粒子を焦点させる集束レンズと、
前記荷電粒子ビームの衝突によって生成された 2 次電子を加速させる電極と、

NF₃を封入する容器と
を備え、

前記電極が、前記2次電子を前記NF₃中で加速させて、前記NF₃を、検出のために2次電子の数を増幅するイオン化カスケードでイオン化する荷電粒子ビーム・システム。

【請求項26】

前記NF₃を封入する前記容器がサンプル真空室を含む、請求項25に記載の荷電粒子ビーム・システム。

【請求項27】

前記NF₃を封入する前記容器が環境セルを含む、請求項25に記載の荷電粒子ビーム・システム。

【請求項28】

前記NF₃を封入する前記容器がイオン化管を含む、請求項25に記載の荷電粒子ビーム・システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は荷電粒子ビーム処理に関し、詳細にはビーム誘起化学プロセスに関する。

【背景技術】

【0002】

「ビーム・ケミストリ (beam chemistry)」は、荷電粒子ビーム、レーザー・ビームなどのビームによって開始される化学反応を指す。「電子ビーム・ケミストリ」は、電子ビーム誘起蒸着 (electron beam-induced deposition) (EBID) および電子ビーム誘起エッチング (electron beam-induced etching) (EBIE) を含み、一般に走査電子顕微鏡 (SEM) 内で実行される。これらの両方の電子ビーム・プロセスでは、加工物表面に前駆体ガスの分子を吸着させる。加工物に電子ビームを導き、それらの電子は吸着物を解離させ、反応生成物を生成する。EBIDでは、基板表面に揮発性の反応生成物が蒸着物として残り、揮発性の反応生成物が脱離する。EBIEでは、1種または数種の前駆体分子分解生成物が加工物表面と反応し、揮発性の反応生成物を生成する。それらの揮発性反応生成物は加工物から脱離し、表面材料を除去する。同様の過程は、イオン・ビーム誘起蒸着 (ion beam-induced deposition) (IBID) およびイオン・ビーム誘起エッチング (ion beam-induced etching) (IBIE) でも起こるが、イオンのはるかに大きな質量は、スパッタリングによる、すなわち高エネルギーのイオンからの運動量移動による、化学反応を一切伴わない、基板からの材料の除去も引き起こす。イオン・ビームが吸着物と相互作用する機構は、電子ビームが吸着物と反応する機構とは異なると考えられる。

【0003】

前駆体ガスとして有用であるために、前駆体ガス分子は非常に特異な特性を有する必要がある。それらの分子は、解離するのに十分な時間、表面に張り付く必要があるが、表面をビームから遮蔽する厚い層を形成してはならず、ビームが存在しない場合には、加工物表面材料と自発的に反応すべきではない。エッチングの場合には、前駆体解離生成物が基板材料とともに揮発性化合物を形成すべきであり、蒸着の場合には、ビームの存在下で前駆体が分解して、所望の材料を蒸着させるべきである。表面に留まらず、真空ポンプによってシステムから除去することができるように、その他の反応生成物は揮発性であるべきである。

【0004】

荷電粒子ビームによって引き起こされるビーム・ケミストリは一般に、真空室内で、ビームの衝突点に向かってガスを導く毛管針を有するガス注入システムを使用して実行される。ガスは急速に膨張し、表面における局所ガス圧はビーム誘起反応を維持するのに十分

10

20

30

40

50

であるが、サンプル室の他の部分の圧力は、一般的にはエバーハート・ソーンリー (Everhart Thornley) 検出器と呼ばれているシンチレータと光電子増倍管の組合せなどの従来の検出器を使用して2次電子を検出することができる程度に十分に低い。

【0005】

加工物との電子ビーム・ケミストリも、ビーム経路の大部分が圧力制限絞りによってガス環境から分離された、前駆体ガスを豊富に含む環境中で実行することができる。そのガスの圧力が画像化のための従来の2次電子検出を許さないため、サンプルからの2次電子が加速されガス分子をイオン化するガス・カスケード増幅 (gas cascade amplification) を使用して画像化を実行することができる。イオン化されたガス分子からの電子は加速され、他のガス分子をカスケードでイオン化する。このカスケードは最初の2次電子信号を大幅に増幅する。ガス環境中にサンプルが維持されるシステムは一般に、環境制御型走査電子顕微鏡 (environmental scanning electron microscope) または高圧走査電子顕微鏡 (high-pressure scanning electron microscope) (HPSEM) と呼ばれる。容易にはイオン化されないガスは、ガス・カスケード増幅を使用した画像の形成には役立たない。絶縁破壊を起こしやすいガスも、ガス・カスケード増幅を使用した画像の形成には役立たない。

10

【0006】

XeF_2 は、これまでのところ、ビーム誘起エッチングに対して最も一般的に使用されている前駆体ガスである。しかしながら、 XeF_2 は、いくつかの好ましくない影響を有する。 XeF_2 は、シリコンおよびTa₂Nを含む多くの材料を自発的にエッチングする。 XeF_2 は、EBIE処理中に不十分な電荷安定化および低い画質を提供する点で、最適なHPSEM画像化媒体とは言えない。 XeF_2 は腐食性が高く有毒である。 XeF_2 は、残留炭素の除去および表面種の制御に使用されている一般的な多くのガスと混合することができない。さらに、キセノンの不十分なイオン・ゲッター・ポンピングのため、差動的にポンピングされる一部の電子ビーム・システムでは大量の XeF_2 が不安定の原因となる。

20

【0007】

電子ビームを電子ビーム・リソグラフィで使用することもできる。電子ビームは、あるパターンに沿って走査するときフォトレジストを露光する。次いで、レジストの特性により露光されたエリアまたは露光されなかったエリアが除去され、パターン形成されたフォトレジスト層が残る。例えばKing他、「Nanometer Patterning with Ice」、NANO Letters、第5巻、6号、1157~60ページ(2005)に記載されているように、パターン形成材料として氷(ice)を使用することができ、その場合、電子ビームによって露光されたエリアの氷が昇華する。氷が除去されたエリアは、拡散、金属被膜などの追加の処理にかけることができ、他の表面エリアは氷層によって保護される。

30

【0008】

Gardener他、「Ice-Assisted Electron Beam Lithography of Graphene」、Nanotechnology 23(2012)185302では、表面に凝縮した薄い氷の層が、氷の下にあるグラフェン層をエッチングするためのEBIE前駆体の役目を果たす。電子ビームは、グラフェン中の炭素と氷中の水素および酸素との反応を誘起し、表面を離れる揮発性炭素化合物を形成しグラフェンを除去すると考えられている。

40

【0009】

EBIDでは、解離生成物を材料上に残す。そのため、前駆体ガスがより容易に吸着する低温でこのプロセスを実施することができる。しかしながら、EBIEでは、揮発性の反応副生物が表面から脱離しなければならない。低温は、反応生成物の熱脱離速度を低下させ、したがって低温は望ましくないと考えられている。

50

【0010】

Bozso他、「Electronic Excitation - Induced Surface Chemistry and Electron - Beam - Assisted Chemical Vapor Deposition」、Mat. Res. Soc. Symp. Proc.、第158巻、201~209ページ(1990)は、約100K(-173°C)の温度での低エネルギーEBIDを使用して、シリコン膜、窒化シリコン膜、酸化シリコン膜および酸窒化シリコン膜をシリコン基板上に蒸着させる方法を記載している。このBozsoの蒸着法は、電子に起因する解離反応を熱に起因する解離反応から分離して、空間成長および材料組成をより正確に制御する目的に使用される。

【0011】

本発明の譲受人に譲渡されたMulders他の「Beam - Induced Deposition at Cryogenic Temperatures」という名称の米国特許出願公開第2012/0003394号明細書は、基板の極低温(cryogenic temperature)よりも低い融点、および所望の極低温における0から1の間の付着係数(sticking coefficient)を有する一群の化合物の中から前駆体ガスを選択することを教示している。これによって、前駆体ガスは、少数ではないガスの単層が形成される前に、所望の極低温における、基板表面に吸着する前駆体分子と基板表面から脱離する前駆体ガス分子との間の平衡に達すると考えられる。適当な前駆体ガスには、アルカン、アルケンもしくはアルキン、またはそれらの化合物の分枝誘導体が含まれる。

【0012】

上述の問題を伴わないEBIEのための方法を見出すことは有用であろう。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0013】

【特許文献1】米国特許出願公開第2012/0003394号明細書

【特許文献2】米国特許第5,851,413号明細書

【特許文献3】米国特許第5,435,850号明細書

【特許文献4】米国特許第4,785,182号明細書

【特許文献5】米国特許第6,972,412号明細書

【非特許文献】

【0014】

【非特許文献1】King他、「Nanometer Patterning with Ice」、NANO Letters、第5巻、6号、1157~60ページ(2005)

【非特許文献2】Gardener他、「Ice - Assisted Electron Beam Lithography of Graphene」、Nanotechnology 23(2012)185302

【非特許文献3】Bozso他、「Electronic Excitation - Induced Surface Chemistry and Electron - Beam - Assisted Chemical Vapor Deposition」、Mat. Res. Soc. Symp. Proc.、第158巻、201~209ページ(1990)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0015】

したがって、本発明の目的は、改良されたビーム誘起エッチング方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0016】

10

20

30

40

50

前駆体ガスの沸点に近い温度に維持された加工物表面に前駆体ガスを供給する。この温度は、凝縮を引き起こすことなく高い前駆体表面被覆率 (precursor surface coverage) を提供する。この温度はさらに、反応副生物の脱離を妨げない十分に高いものでなければならない。好ましい一実施形態では、前駆体が NF_3 、加工物がシリコンであり、加工物は、室温よりもかなり低い温度、好ましくは -100°C よりも低い温度に冷却される。

【0017】

以上では、以下の本発明の詳細な説明をより十分に理解できるように、本発明の特徴および技術上の利点をかなり広く概説した。以下では、本発明の追加の特徴および利点を説明する。開示される着想および特定の実施形態を、本発明の同じ目的を達成するために他の構造体を変更または設計するベースとして容易に利用することができることを当業者は理解すべきである。さらに、このような等価の構造体は、添付の特許請求の範囲に記載された本発明の趣旨および範囲を逸脱しないことを当業者は理解すべきである。

10

【0018】

次に、本発明および本発明の利点のより完全な理解のため、添付図面に関して書かれた以下の説明を参照する。

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】 NF_3 の蒸気圧を温度に対して示したグラフである。

【図2】 本発明の好ましい一実施形態の諸ステップを示す流れ図である。

20

【図3】 NF_3 環境での30分の電子ビーム・エッチングに関して、エッチングの深さを基板温度に対して示したグラフである。

【図4】 NF_3 環境中にサンプルを置きガス・カスケード増幅を使用して形成した画像を示す図である。

【図5】 本発明のいくつかの実施形態を実施する目的に使用することができる一般的なデュアル・ビーム・システムを概略的に示す図である。

【図6】 環境セル (environmental cell) を有する、本発明のいくつかの実施形態を実施する目的に使用することができるシステムを概略的に示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0020】

30

E B I E は、1ミクロン未満の正確さを有する正確なパターンで基板から材料を除去することを可能にする。E B I E は、前駆体が表面を覆い、反応生成物が表面から容易に脱離して、再蒸着および表面部位をめぐる前駆体分子との競合を回避するとき最も生産性が高い。基板の冷却は、前駆体ガスによる表面の被覆率を向上させることによって E B I D の蒸着速度を増大させることが知られているが、表面の冷却は、反応生成物の脱離速度を低下させることによって E B I E 速度を低下させるかまたはエッチングを完全に停止させると考えられた。本出願の出願人は、予想外にも、ある種のガスでは正反対のことが起こることを見出した。

【0021】

本発明のいくつかの実施形態では、基板を冷却して表面における前駆体分子の滞留時間を長くすることによって、表面の最大前駆体被覆率を達成する。すなわち、基板を冷却すると、前駆体分子は表面に吸着し、より長い時間そこに留まる。すなわちより長い時間、熱によって脱離しない。しかしながら、この温度は、反応生成物の脱離を抑制するほど低くはならない。この温度は前駆体ガスの凝縮点以下であってもならない。基板表面に集まった凝縮した材料は、その同じ表面からの反応生成物の脱離を妨害する。脱離が進まない場合には、材料の再蒸着および表面部位をめぐる競合が起こることがあり、このことは新たな前駆体分子が表面に到達することを妨げる。基板表面の凝縮した材料はさらに、その表面の特徴部分 (feature) の画像化を妨げ、エッチングが十分に進行したときにそれを見ることを難しくする。さらに、一部のエッチング前駆体ガスは非常に反応性であり、それらのガスを凝縮させると激しい反応が起こることがある。

40

50

【0022】

本発明のいくつかの実施形態では、基板を冷却して吸着物脱離速度を最小化することにより前駆体被覆率を最大化する。最低有効温度は、前駆体の凝縮点よりもわずかに高い温度である。しかしながら、この温度が、反応生成物の脱離を抑制するほど低くはならない。脱離は、熱的過程と非熱的過程の両方によって起こる。このような電子刺激脱離は、反応生成物が脱離する最低温度を理論的に決定することを難しくする。この最低温度は実験に基づいて決定することができる。

【0023】

いくつかの実施形態では、基板を、前駆体ガスの沸点から60°C以内、40°C以内、20°C以内または10°C以内の温度に冷却する。いくつかの実施形態では、基板を、室温よりも低い温度、-50°Cよりも低い温度、-100°Cよりも低い温度または-125°Cよりも低い温度に冷却する。いくつかの実施形態では、加工物表面の温度(ケルビン目盛)を、前駆体ガスの沸点の温度(ケルビン目盛)から20パーセント以内、10パーセント以内または5パーセント以内の温度に維持する。重要なのは、基板と前駆体の沸点との温度差であり、絶対温度ではない。高い沸点を有する一部の前駆体については、基板を冷却する必要がないことがある。

10

【0024】

冷却された基板上でよく機能することを本出願の出願人が見出した1つの前駆体ガスが NF_3 であり、 NF_3 は、 XeF_2 よりもはるかに低い毒性を有する比較的の不活性のガスである。 NF_3 はシリコンを自発的にはエッチングしないが、電子ビームによって活性化されると、シリコン基板と反応して反応生成物 SiF_4 を形成する。 NF_3 は、200°Cよりも低い温度で酸素に似た酸化特性を有し、そのため、処理中に NH_3 、 N_2O などの他のガスと混合することができる。 NH_3 は、エッチング・プロセス中に残留炭素を効果的に除去することができ、エッチング・ストップの働きをすることがある酸化物の形成を妨げることができる。酸化物がエッチングを仲介し、したがってその酸化物がエッチング・プロセスにとって望ましい場合に、 N_2O を NF_3 と混合して、その酸化物層を再生成させることができる。より反応性の高いガスでは必要な第2のガスを導入する前の1つのガスの完全な排気、すなわちガス・サイクリングを必要とすることなく、有用な多くのガスを NF_3 と混合することができる。 NF_3 は室温で気体であり、加圧された容器に入れて保管することができるため、ガス源を汚染するガス混合物の逆拡散は無視することができる。 NH_3 および N_2O を含む大部分のガスと室温で反応する XeF_2 とは違い、 NF_3 は、これらのガスと反応して不必要な生成物を生成することがない。 NF_3 はまた、 CF_4 、 SiF_4 、 BF_3 などの他の源とは違い、基板表面に不揮発性の解離副生物を残さない。

20

30

【0025】

NF_3 はさらに、 NF_3 を、ガス・カスケード増幅画像化を使用する環境制御型走査電子顕微鏡型の画像化に対する有望な候補にする形状寸法およびイオン化断面積を有する。帯電したガス粒子が加工物まで拡散して電荷を中和するため、ガス・カスケード増幅画像化は、加工物の効率的な電荷安定化を提供する。これは特に、 SiO_2 などの絶縁材料をエッチングするとき有利である。ガス・カスケード画像化は、加工物がエッチングされている間の加工物の確実な監視を可能にする。

40

【0026】

E B I Eで一般に使用される条件におけるガスの蒸気圧、すなわち約10トルから0.01トルの間の圧力におけるガスの蒸気圧については文献にあまり記載されていない。大気圧よりもわずかに低い圧力におけるデータはより容易に入手可能であり、そのデータをガイドとして使用することができる。図1は、約-129°C、760トルで NF_3 が気体であることを示している。SEMで使用されるはるかに低い圧力では、より低い温度で凝縮が起こると予想される。本出願の出願人は、実験に基づいて、 NF_3 を使用したシリコンのE B I Eは、-159°Cの加工物温度および約0.04トルの圧力でよく機能することを見出した。

【0027】

50

シリコンは NF_3 と反応して SiF_4 および窒素を生成すると考えられている。反応生成物 SiF_4 に対して容易に入手可能な唯一の蒸気圧データは760トルであり、凝縮は -86°C で起こる。 NF_3 に比べて SiF_4 の沸点は高いため、 -159°C ではプロセス中に揮発が生じることはないように思われるが、それでもエッチング・プロセスは進行し、このことは、電子刺激脱離が脱離においてある役割を果たす可能性があることを示している。

【0028】

他の実施形態では、 NF_3 は、炭化シリコンをエッチングする前駆体ガスとして使用される。この反応は、シリコンに関して上で説明したプロセスと同じプロセスであると考えられるが、反応生成物 SiF_4 の他に、炭素、したがって追加の反応生成物 CF_4 が加わる。 CF_4 の沸点は760トルで -130°C であり、この温度は SiF_4 の沸点よりも低い。反応生成物の凝縮に対する制限因子は SiF_4 になると予想されるであろう。前駆体と同じであり、 CF_4 の脱離温度の方が低いため、加工物表面は、シリコンに対する温度と同じ温度に維持されることになろう。

10

【0029】

他の実施形態では、 O_2 を前駆体ガスとして使用してダイヤモンドをエッチングする。ダイヤモンド中の炭素は酸素と結合して CO_2 および/または CO を生成する。酸素の凝縮は4トルにおいて約 -215°C で起こる。 CO_2 の凝縮は4トルにおいて約 -130°C で起こる。 CO の凝縮は25トルにおいて約 -210°C で起こる。 O_2 を前駆体ガスとして使用してダイヤモンドまたは他の炭素をエッチングするときには、EBIEプロセスを最適化するために、加工物を好ましくは -130°C まで、おそらくはそれよりも低い温度まで冷却することになろう。

20

【0030】

図2は、好ましいEBIEプロセスの諸ステップを示す。このプロセスは、ステップ200で、SEM、透過電子顕微鏡(TEM)、レーザ・システムなどの装置に基板を装填することから始まる。ステップ202で、前駆体ガスを選択する。任意選択のステップ204で、基板を、選択した前駆体ガスおよび加工物材料の特性によって決定される温度に冷却する。基板を冷却するか否かは、前駆体分子の沸騰温度および反応副生物を脱離させるのに必要な最低温度に依存する。表面の前駆体被覆率を最大にし、同時に凝縮を防ぎ、反応生成物の脱離を依然として可能にするために、基板を、前駆体分子の沸点に近い温度に冷却する。ステップ206で、基板表面の温度よりも低い沸点を有する選択した前駆体ガスを基板表面に供給する。加工物室内の圧力は、ガス注入システムを備える超高真空システムで使用されるとき約 10^{-8} トルから、環境制御型走査電子顕微鏡型のシステムで使用されるとき約10トルまでの範囲とすることができる。ステップ208で、前駆体ガスの存在下で、電子ビーム、イオン・ビーム、クラスタ・ビーム、中性ビームなどのビームをあるパターンで基板表面に照射して、この粒子ビームの存在下で前駆体ガスが反応して基板表面から材料を除去するようにする。加工物のビームが衝突したところだけがエッチングされ、そのため、そのビームのスポット・サイズに相当する分解能を有するパターンをエッチングすることができる。電子ビームでは、ビーム・エネルギーが、1keVから30keVの間(SEM)および最高約300keV(TEM)であることが好ましい。電子ビーム電流は1pAから1 μ Aの間であることが好ましく、加工物位置における電子ビーム直径すなわちスポット・サイズは約1nmから10ミクロンの間であることが好ましい。IBIEのためにイオン・ビームを使用することもできる。例えば、液体金属イオン源からのガリウム・イオンのビーム、およびFEI CompanyのVionプラズマ・イオン源などのプラズマ・イオン源からのアルゴンまたは他のイオンのビームを使用することができる。イオン・エネルギーは約1keVから50keVの間であることが好ましく、20keVから40keVの間であるとより好ましく、約30keVであると最も好ましく、電流は約1pAから1マイクロアンペアの間であることが好ましい。ステップ210で、ビームを基板に導くのをやめる。

30

40

【0031】

50

図3は、液体窒素によって冷却されたサンプル・ステージを有するSEMを使用して実行したEBIEの実験結果を示す。線302は、室温である302Kから98Kまでのさまざまな温度の NF_3 環境中のシリコンに向かって電子ビームを30分間導くことによって形成された穴の深さを示す。このグラフは、基板を冷却することによってエッチング速度が約40倍になることを示している。エッチング速度のこの増大は、表面の利用可能な NF_3 が物理吸着によって増えた結果であると考えられる。エッチング速度は、電子が照射された領域の NF_3 の表面被覆率に比例するはずであり、被覆率は温度に反比例する。一方、先行技術は、基板を、例えばパルス・レーザ・ビームによる限局された加熱を使用して加熱して反応生成物の脱離を保證することにより、エッチングを強化することを含む。したがって、この実施形態は従来の考えとは逆である。

10

【0032】

その沸点および蒸気圧を基にすれば、以下の前駆体ガスも、室温よりも低い温度への冷却によって大きな利益を得る可能性が高い：酸素(O_2)、一酸化二窒素(N_2O)、水素(H_2)、アンモニア(NH_3)、塩素(Cl_2)、塩化水素(HCl)。冷却が有効である可能性がある基板成分には、ホウ素(BF_3 、 B_2H_6)、炭素(CO 、 CO_2 、 CF_4 、 CH_4)、シリコン(SiF_4 、 SiH_4)、ゲルマニウム(GeH_4 、 GeF_4)、ヒ素(AsH_3)、リン(PF_3 、 PH_3)、スズ(SnH_4)、アンチモン(SbH_3)、セレン(SeF_6)および硫黄(SF_6 、 SO_2)などがある。括弧内の分子は、揮発性が高く、EBIEを加速させるために使用されるより低い温度でおそらくは脱離する潜在的なエッチング反応生成物である。上記の成分が関係する加工物は、シリコン、ダイヤモンド、ホウ素がドーブされたダイヤモンド、ゲルマニウム、炭化シリコン、窒化シリコン、シリコン-ゲルマニウム合金、窒化ホウ素、リン化ホウ素、ヒ化ホウ素などの範囲の組成物を含む。

20

【0033】

アイス・リソグラフィ(ice lithography)で使用される凝縮法では、前駆体ガスが「パルス」の形態で供給される。これは、真空室内に前駆体ガスが存在する間は、凝縮物(氷)の厚さが絶え間なく増大するためである。本発明の好ましい実施形態では、前駆体が絶え間なく送達され、条件が、凝縮を防ぐような条件である。従来の室温EBIEの場合と同様に、前駆体吸着物の厚さは、吸着/脱離速度論(adsorption/desorption kinetics)によって自動的に制限される。複数の追加のステップおよび凝縮物の厚さの較正が必要となるため、凝縮法は好ましくない。ESSEMビーム・ケミストリの場合には、気相前駆体をESSEM画像化ガスとして使用することができるように、気相前駆体が好ましい。「アイス・リソグラフィ」での画像化は、電子ビームと凝縮した H_2O 層との相互作用により制限される。このことは、基板表面特徴部分を画像化するSEMの能力を大幅に低下させる。

30

【0034】

室の清浄度を増大させ、したがってプロセスの再現性/質を向上させるために、任意選択で、サンプルの上方またはサンプルの近くでコールド・トラップ(cold trap)を使用して、残留 H_2O または炭化水素を凝縮によって除去することもできる。

【0035】

図4は、 NF_3 をガス・カスケード増幅用のガスとして使用して形成された、絶縁シリカ・エーロゲルの画像の一例を示す顕微鏡写真である。エーロゲルは一般に、極端な長期にわたる帯電アーチファクトを示す。この画像を形成するのに最適化はほとんど必要なかった。このことは、帯電の安定化においてこのガスがいかに有効かを示している。 NF_3 は、信号増幅と電荷安定化の両方に関して優れた画像化媒体である。 NF_3 は XeF_2 よりもはるかに優れており、画質においては、 H_2O よりも優れていることが以前から示されている NH_3 と同等である。図4のエーロゲルは、電子ビームを使用して、 NF_3 仲介EBIEの存在下で約5から10分間エッチングしたものである。サンプルの温度は約 -159°C 、 NF_3 の圧力は約0.04トルであった。

40

【0036】

50

本発明は、加工物表面に前駆体ガスを供給する手段を有する任意のビーム生成システムで実施することができる。例えば電子ビーム・システム、イオン・ビーム・システムまたはレーザ・システムを使用することができる。図5は、垂直に装着されたSEMカラムと垂直線から約52度の角度に装着された集束イオン・ビーム(FIB)カラムとを備える、本発明を実施するのに適した一般的なデュアル・ビーム・システム510を示す。適当なデュアル・ビーム・システムは例えば、本出願の譲受人である米オレゴン州HillsboroのFEI Companyから市販されている。適当なハードウェアの一例を以下に示すが、本発明は、特定のタイプのハードウェアで実現されることに限定されない。

【0037】

デュアル・ビーム・システム510は、走査電子顕微鏡541、電源および制御ユニット545を備える。陰極552と陽極554の間に電圧を印加することによって、陰極552から電子ビーム543が放出される。電子ビーム543は、集光レンズ556および対物レンズ558によって微細なスポットに集束する。電子ビーム543は、偏向コイル560によって試料の表面を2次元的に走査する。集光レンズ556、対物レンズ558および偏向コイル560の動作は電源および制御ユニット545によって制御される。

10

【0038】

電子ビーム543は、下室526内の可動式X-Yステージ525上にある基板522の表面に焦束させることができる。ステージ525は、熱導管528によってステージ525に接続された液体窒素源、ペルチェ冷却器(Peltier cooler)などの冷却器527に接続されていることが好ましい。電子ビーム中の電子が基板522に衝突すると、2次電子が放出される。この2次電子は、後に論じる2次電子検出器540によって検出される。TEMサンプル・ホルダ524およびステージ525の下に位置するSTEM検出器562は、TEMサンプル・ホルダ上に下で論じるように装着されたサンプルを透過した電子を集めることができる。

20

【0039】

デュアル・ビーム・システム510は集束イオン・ビーム(FIB)システム511をさらに含み、FIBシステム511は、上部ネック部分512を有する排気された室を含み、上部ネック部分512内にはイオン源514および集束カラム516が位置し、集束カラム516は、引出し電極および静電光学系を含む。集束カラム516の軸は、電子カラムの軸から52度傾いている。イオン・カラム512は、イオン源514、引出し電極515、集束要素517、偏向要素520および集束イオン・ビーム518を含む。イオン源514を出たイオン・ビーム518は、カラム516を通過し、520に概略的に示されている静電偏向手段間を通り抜けて、下室526内の可動X-Yステージ525上に配置された基板522、例えば半導体デバイスを含む基板522に向かって進む。

30

【0040】

半導体デバイスからサンプルを抜き取り、TEMサンプル・ホルダへ移動させることができるように、ステージ525はさらに、1つまたは複数のTEMサンプル・ホルダ524を支持することができる。ステージ525は、水平面(XおよびY軸)内で移動することができ、かつ垂直に(Z軸)移動することができることが好ましい。ステージ525はさらに約60度傾くことができ、Z軸を軸に回転することができる。いくつかの実施形態では、別個のTEMサンプル・ステージ(図示せず)を使用することができる。このようなTEMサンプル・ステージもX、YおよびZ軸に沿って可動であることが好ましい。X-Yステージ525上に基板522を挿入するため、および内部ガス供給リザーバが使用される場合には内部ガス供給リザーバの整備作業のために、扉561が開かれる。システムが真空状態にある場合に開かないように、この扉はインタロックされる。

40

【0041】

ネック部分512を排気するためにイオン・ポンプ568が使用される。室526は、真空コントローラ532の制御の下、ターボ分子および機械ポンピング・システム530によって排気される。この真空システムは、室526に、約 1×10^{-7} トルから 5×10^{-4} トルの間の真空を提供する。エッチング支援ガス、エッチング遅延ガスまたは蒸着前駆

50

体ガスを使用する場合、室のバックグラウンド圧力は典型的には約 1×10^{-5} トルまで上昇することがある。

【0042】

イオン・ビーム518にエネルギーを与え集束させるため、高電圧電源は、イオン・ビーム集束カラム516内の電極に適当な加速電圧を印加する。イオン・ビームが基板522に当たると、材料がスパッタリングされる。すなわちサンプルから材料が物理的に追い出される。あるいは、イオン・ビーム518が前駆体ガスを分解して、材料を蒸着させることもできる。

【0043】

液体金属イオン源514と、約1keVから60keVのイオン・ビーム518を形成しそれをサンプルに向かって導くイオン・ビーム集束カラム516内の適当な電極とに高電圧電源534が接続されている。パターン発生器538によって提供される所定のパターンに従って動作する偏向コントローラおよび増幅器536が偏向板520に結合されており、それによって、対応するパターンを基板522の上面に描くようにイオン・ビーム518を手動または自動で制御することができる。いくつかのシステムでは、当技術分野ではよく知られているように、偏向板が、最後のレンズの前に配置される。イオン・ビーム集束カラム516内のビーム・ブランキング (blanking) 電極 (図示せず) は、ブランキング・コントローラ (図示せず) がブランキング電極にブランキング電圧を印加したときに、イオン・ビーム518を、基板522ではなくブランキング絞り (図示せず) に衝突させる。

10

20

【0044】

液体金属イオン源514は一般にガリウムの金属イオン・ビームを提供する。イオン・ミリング、強化されたエッチングもしくは材料蒸着によって基板522を改変するため、または基板522を画像化するために、源を一般に、基板522の位置における幅が1/10マイクロメートル未満のビームに集束させることができる。

【0045】

2次イオンまたは2次電子の放出を検出する目的に使用されるエバーハート・ソーンリー検出器、マルチチャンネル・プレートなどの荷電粒子検出器540がビデオ回路542に接続されており、ビデオ回路542は、ビデオ・モニタ544に駆動信号を供給し、コントローラ519から偏向信号を受け取る。下室526内における荷電粒子検出器540の位置は実施形態によって変更することができる。例えば、荷電粒子検出器540はイオン・ビームと同軸とすることができ、イオン・ビームが通り抜けることを可能にする穴を含むことができる。他の実施形態では、最終レンズを通過させ、次いで集めるために軸から逸らした2次粒子を集めることができる。

30

【0046】

米テキサス州DallasのOmniProbe, Inc.のAutoProbe 200 (商標)、ドイツReutlingenのKleindiek NanotechnikのModel MM3Aなどのマイクロマニピュレータ (micromanipulator) 547は、真空室内の物体を正確に移動させることができる。真空室内に配置された部分549のX、Y、Zおよび制御を提供するため、マイクロマニピュレータ547は、真空室の外側に配置された精密電動機548を備えることができる。小さな物体を操作するため、マイクロマニピュレータ547に別のエンド・エフェクタを取り付けることができる。本明細書に記載した実施形態では、このエンド・エフェクタが細いプローブ550である。

40

【0047】

ガス蒸気を導入し基板522に向かって導くためにガス送達システム546が下室526内へ延びている。本発明の譲受人に譲渡されたCasella他の「Gas Delivery Systems for Particle Beam Processing」という名称の米国特許第5,851,413号明細書は適当なガス送達システム546を記載している。別のガス送達システムが、やはり本発明の譲受人に譲渡されたRas

50

mussenの「Gas Injection System」という名称の米国特許第5,435,850号明細書に記載されている。例えば、エッチングを強化するためにヨウ素を送達することができ、または金属を蒸着させるために金属有機化合物を送達することができる。

【0048】

システム・コントローラ519は、デュアル・ビーム・システム510のさまざまな部分の動作を制御する。従来のユーザ・インタフェース(図示せず)にコマンドを入力することにより、ユーザは、システム・コントローラ519を介して、イオン・ビーム518または電子ビーム543で所望の通りに走査することができる。あるいは、システム・コントローラ519は、プログラムされた命令に従って、デュアル・ビーム・システム510を制御することができる。いくつかの実施形態では、デュアル・ビーム・システム510が、関心の領域を自動的に識別する米マサチューセッツ州NatickのCognex Corporationから市販されているソフトウェアなどの画像認識ソフトウェアを含み、システムは、本発明に従ってサンプルを手動でまたは自動的に抜き取ることができる。例えば、システムは、複数のデバイスを含む半導体ウェーハ上の類似した特徴部分の位置を自動的に検出し、異なる(または同じ)デバイス上のそれらの特徴部分のサンプルを採取することができる。

10

【0049】

本発明の実施形態は、ガス・カスケード増幅を使用する高圧SEMを使用して実現することもできる。そのようなシステムは例えば、Mancuso他の「Secondary Electron Detector for Use in a Gaseous Atmosphere」という名称の米国特許第4,785,182号明細書に記載されている。

20

【0050】

図6は、前駆体ガスを満たすことができる環境セルを使用するシステムであって、ピンホール磁気対物レンズ602と、ステージ608上のサンプル606を比較的の高い圧力に維持するためのサンプル・セル604をその内部に有するサンプル室603とを有する粒子-光学装置600を備えるシステムを示す。粒子源(図示せず)が1次電子ビーム610を供給し、1次電子ビーム610は、上部圧力制限絞り(upper pressure limiting aperture)(PLA)612および錐体616の底の下部PLA614を通過する。錐体616は、セル604内のガスの中を通過する電子ビーム610の経路を減少させる。サンプルから放出された2次電子620は、セル604内に構築され、セル604内での検出を可能にするように配置された2次電子検出器622によって検出される。

30

【0051】

このシステムは、試料ステージから離れて配置された検出器622を使用する。検出器622とサンプルの間の距離は、サンプルを出た電子とガスとの衝突によって電子電流が大幅に増幅される十分な電子経路を提供する。例えば、サンプルを出たそれぞれの電子について、一般に300個超、500個超または1000個超の電子が検出器622に到達する。検出器622は、ガス・カスケード内の電荷の流れによって誘起された電流を検出して画像を形成する。他の実施形態では、カスケードから放出された光子を光子検出器を使用して検出して、画像を形成することができる。光子は、ガス中の、またはサンプル・セルの内側もしくはサンプル室の内側の表面と接触した励起したイオン、フラグメント(fragment)または中性粒子(neutral)によって放出される。

40

【0052】

ガス入口624およびガス出口626が、サンプル・セル604内の処理ガスまたは画像化ガスの流量および圧力を調節する。ガス入口624を通して、 NF_3 などの前駆体ガスまたは画像化ガスの源を供給することができる。ガス出口626は、リーク弁628を介して粗引きポンプ(図示せず)に接続される。弁628による制御された漏出およびサンプル室603の容積に比べて相対的に小さなセル604の容積は、例えばHPSEMピ

50

ーム・ケミストリ・モードとHPSEM画像化モードとを切り換える、異なる処理ガス間の高速切換えを提供する。粒子-光学装置600は、比較的の高い圧力、すなわち20トル(26ミリバール)よりも高い圧力で機能することができる。粒子-光学装置600は、50トル(65ミリバール)以上の圧力でも機能することができる。いくつかの実施形態では、セル604内の圧力が10ミリトルよりも高く、サンプル室603内の圧力が10ミリトルよりも低い。

【0053】

針の形態で示されているが、リング、プレートなどさまざまな形状寸法を有することもできる2次電子検出器622は、2次電子を引きつけるため、好ましくは100V超、より好ましくは300V超、最も好ましくは約500ボルトに電氣的にバイアスされる。2次電子は、サンプル606と2次電子検出器622の間のガス分子と衝突して、2次電子信号を増幅するイオン化カスケードを生じさせる。錐体616と錐体の外側に配置された2次電子検出器622の構成との組合せは、適切な2次電子信号増幅を提供する十分な2次電子経路がガスの中を通り、同時に、ガスの中を通る1次電子経路が短く維持されることを可能にする。サンプルから検出器までの2次電子経路は2mmよりも長いことが好ましい。光学的に透明な窓634によって、ユーザは、窓634とサンプル606の間に配置されたレンズ636を使用した光学顕微鏡(図示せず)を通してサンプルを観察することができる。光学窓634は、システム600が、広視野ビュー(wide field view)を提供しつつ、同時に、短いガス経路長およびカラム内へのガス漏流量を少なく維持することを可能にし、このことは、分解能および画像信号対雑音比を向上させ、腐食性のガスからカラムを保護する。

10

20

【0054】

ガス入口624は、1つまたは複数の処理ガス・フィード644、画像化ガス・フィード646などの複数のガス・フィード間の高速切換えを可能にする弁装置640を含む。ダクト650は、PLA614を通過したガスの排出を可能にし、それによって下部カラムの圧力を上部PLA612よりも高い圧力に維持するのを助ける。セル604がその中に置かれた従来のHPSEMまたは低圧SEMのステージとすることができるステージ648は、PLA614が電子ビーム610の軸と整列するようにセル604の位置を調整することを可能にし、ステージ608は、セル604内でのサンプル606の移動を可能にして、サンプル606上の関心の領域を電子ビーム610の下に配置することができるようにする。Viton Oリング、Teflonシールなどのシール652が、セル604のガスがサンプル室603に入ることを防ぐための、レンズ602とセル604の間の気密シールを提供することが好ましい。シール652を、予備室とサンプル室603の間のガス流絞りの働きをするより小さな隙間によって提供される非気密シールとすることもできる。ガス・カスケード増幅を使用することができる他のシステムは例えば、Mancuso他の「Secondary Electron Detector for Use in a Gaseous Atmosphere」という名称の米国特許第4,785,182号明細書、および本発明の譲受人に譲渡されたScholtz他の「Particle-Optical Device and Detection Means」という名称の米国特許第6,972,412号明細書に記載されている。

30

40

【0055】

本発明は、セル内でガス・カスケード検出器を使用することだけに限定されない。PLAの周囲に配置されたガス・ルミネセンス検出器、スルー・ザ・レンズ(through-the-lens)方式の検出器など従来の検出器を使用することもできる。スルー・ザ・レンズ方式の検出器では、電圧を印加して、2次粒子を最終レンズを通して引き戻す。引き戻された2次粒子は、マルチチャンネル・プレート、シンチレータ光電子増倍管などのオンアクシス(on-axis)またはオフアクシス(off-axis)の収集システムによって検出することができる。図6は、1次ビーム軸から離れる方向へ2次電子を偏向させて検出器656内へ導き、同時に1次ビーム610を偏差なしで通過させるウィーンフィルタ(Wien filter)などの任意選択の2次電子偏向器654を

50

示す。

【0056】

以上の説明では用語「エッチング前駆体」および「蒸着前駆体」を使用した。多くの前駆体および前駆体ガス混合物が、ガス流束およびビーム密度に応じてエッチングまたは蒸着を実行することができることを当業者は認識するであろう。

【0057】

本発明のいくつかの実施形態は、荷電粒子ビーム・エッチングの方法であって、基板の表面を室温よりも低い温度に冷却するステップと、基板表面を前駆体ガスにさらすステップであり、前駆体ガスが、基板表面の温度よりも低い沸点を有する一群の化合物の中から選択されるステップと、前駆体ガスの存在下で基板表面に荷電粒子ビームを照射するステップであり、粒子ビームの存在下で前駆体ガスが反応して、基板表面から材料を除去するステップとを含む方法を提供する。

10

【0058】

いくつかの実施形態では、基板表面を前駆体ガスにさらすステップが、基板表面を NF_3 を含む前駆体ガスにさらすステップを含む。前駆体ガスが NF_3 を含むいくつかの実施形態では、基板がシリコンを含む。

【0059】

前駆体ガスが NF_3 を含むいくつかの実施形態では、基板表面を前駆体ガスにさらすステップが、基板表面を、 NF_3 と酸化物の成長を抑制するガスとの混合物にさらすステップを含む。前駆体ガスが NF_3 を含むいくつかの実施形態では、基板表面を前駆体ガスにさらすステップが、基板表面を、 NF_3 と炭素をエッチングするガスとの混合物にさらすステップを含む。前駆体ガスが NF_3 を含むいくつかの実施形態では、基板表面を前駆体ガスにさらすステップが、基板表面を、 NF_3 と酸化物の成長を促進するガスとの混合物にさらすステップを含む。前駆体ガスが NF_3 を含むいくつかの実施形態では、基板表面を前駆体ガスにさらすステップが、基板表面を、 NF_3 と NH_3 との混合物にさらすステップを含む。前駆体ガスが NF_3 を含むいくつかの実施形態では、基板表面を前駆体ガスにさらすステップが、基板表面を、 NF_3 と N_2O との混合物にさらすステップを含む。

20

【0060】

いくつかの実施形態では、基板表面を室温よりも低い温度に冷却するステップが、加工物表面を、前駆体の沸点から 50°C 以内の温度に冷却するステップを含む。いくつかの実施形態では、基板表面を室温よりも低い温度に冷却するステップが、加工物表面を、前駆体の沸点から 20°C 以内の温度に冷却するステップを含む。いくつかの実施形態では、基板表面を室温よりも低い温度に冷却するステップが、加工物表面を、マイナス 100°C よりも低い温度に冷却するステップを含む。いくつかの実施形態では、基板表面を室温よりも低い温度に冷却するステップが、加工物表面を、前駆体ガスのケルビン目盛上の沸点から15パーセント以内の温度に冷却するステップを含む。いくつかの実施形態では、基板表面に吸着し、粒子ビームの存在下で解離し、それによって反応性のフラグメントを形成する分子を有する化合物を前駆体ガスが含み、反応性のフラグメントが基板表面と反応して、基板表面から脱離する反応生成物を形成する。

30

【0061】

いくつかの実施形態では、前駆体ガスが、酸素、一酸化二窒素、水素、アンモニア、塩素または塩化水素を含む。いくつかの実施形態では、加工物が、ホウ素、炭素、シリコン、ゲルマニウム、ヒ素、リン、スズ、アンチモン、セレンまたは硫黄を含む。

40

【0062】

いくつかの実施形態は、加工物の画像を形成する方法であって、加工物に向かって電子ビームを導くステップであり、電子ビームの衝突によって2次電子が放出されるステップと、 NF_3 を含むガス中で2次電子を加速させて、2次電子信号を増幅するイオン化カスケードを生じさせるステップと、増幅された2次電子信号を検出するステップと、増幅された2次電子信号を使用して加工物の画像を形成するステップとを含む方法を提供する。

【0063】

50

いくつかの実施形態では、この方法が、加工物を室温よりも低い温度に冷却するステップを含む。

【0064】

いくつかの実施形態は、荷電粒子ビーム・エッチングの方法であって、基板のビーム誘起エッチング用の前駆体ガスを選択するステップと、基板の表面を、前駆体ガスの沸点よりも高い、前駆体ガスの沸点から100°C以内の温度に維持するステップと、基板表面を、前駆体ガスにさらすステップであり、前駆体ガスが、基板表面の温度よりも低い沸点を有する一群の化合物の中から選択されるステップと、前駆体ガスの存在下で基板表面に荷電粒子ビームを照射するステップであり、粒子ビームの存在下で前駆体ガスが反応して、基板表面から材料を除去するステップとを含む方法を提供する。

10

【0065】

本発明のいくつかの実施形態は、加工物を処理する荷電粒子ビーム・システムであって、サンプルに照射する荷電粒子の1次ビームを生成する荷電粒子源と、加工物の表面に荷電粒子を焦束させる集束レンズと、荷電粒子ビームの衝突によって生成された2次電子を加速させる電極と、 NF_3 を封入する容器とを備え、前記電極が、2次電子を NF_3 中で加速させて、 NF_3 を、検出のために2次電子の数を増幅するイオン化カスケードでイオン化する荷電粒子ビーム・システムを提供する。

【0066】

いくつかの実施形態では、 NF_3 を封入する容器がサンプル真空室を含む。いくつかの実施形態では、 NF_3 を封入する容器が環境セルを含む。いくつかの実施形態では、 NF_3 を封入する容器がイオン化管(ionization tube)を含む。

20

【0067】

本発明および本発明の利点を詳細に説明したが、添付の特許請求の範囲によって定義された本発明の趣旨および範囲から逸脱することなく、本明細書に、さまざまな変更、置換および改変を加えることができることを理解すべきである。さらに、本出願の範囲が、本明細書に記載されたプロセス、機械、製造、組成物、手段、方法およびステップの特定の実施形態に限定されることは意図されていない。当業者なら本発明の開示から容易に理解するように、本明細書に記載された対応する実施形態と実質的に同じ機能を実行し、または実質的に同じ結果を達成する既存のまたは今後開発されるプロセス、機械、製造、組成物、手段、方法またはステップを、本発明に従って利用することができる。したがって、添付の特許請求の範囲は、その範囲内に、このようなプロセス、機械、製造、組成物、手段、方法またはステップを含むことが意図されている。

30

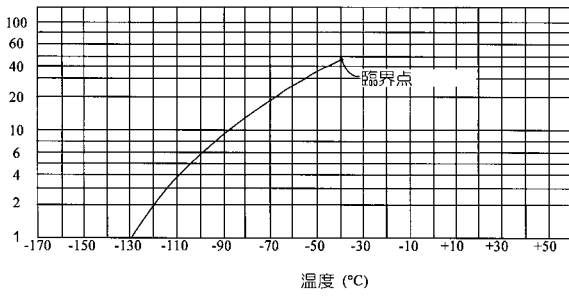
【符号の説明】

【0068】

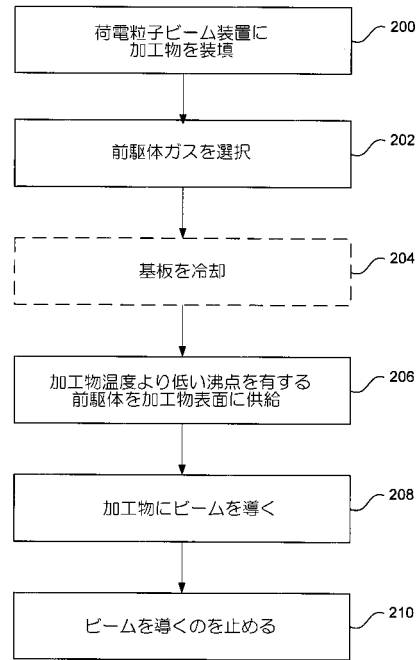
- 510 デュアル・ビーム・システム
- 511 集束イオン・ビーム(FIB)システム
- 514 イオン源
- 516 集束カラム
- 519 システム・コントローラ
- 524 TEMサンプル・ホルダ
- 525 可動式X-Yステージ

40

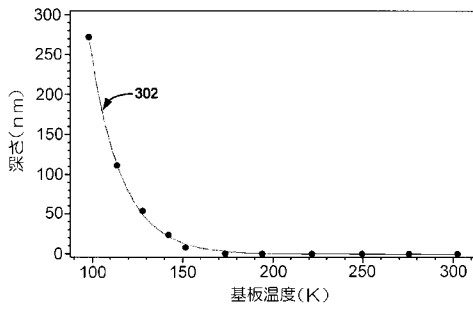
【 図 1 】



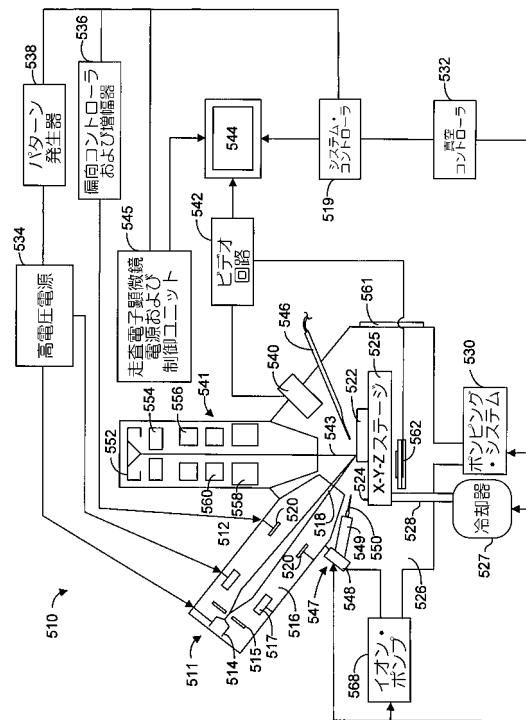
【 図 2 】



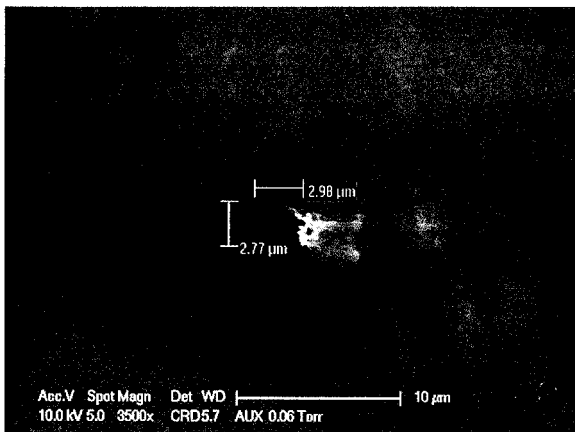
【 図 3 】



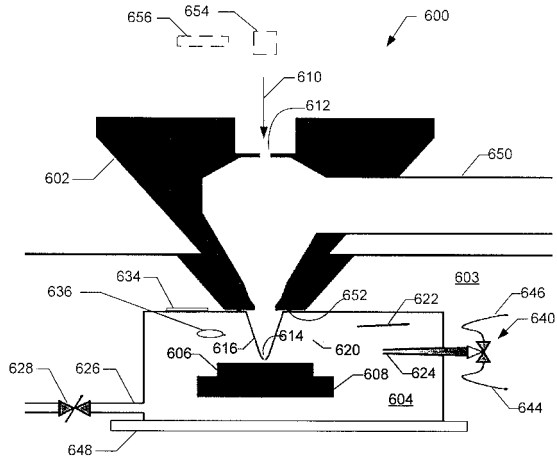
【 図 5 】



【 図 4 】



【 図 6 】



フロントページの続き

Fターム(参考) 5C033 UU03 UU04 UU10
5C034 BB06 BB10
5F004 BB01 BB03 BB25 BB32 CA02 CA04 CA05 DA00 DA04 DA17
DA26 DA29 DB00 DB01

【外国語明細書】

2015029072000001.pdf

2015029072000002.pdf

2015029072000003.pdf

2015029072000004.pdf