(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2012-252004
(P2012-252004A)
(43)公開日　平成24年12月20日(2012.12.20)

(51)Int.Cl.		F I			テーマコード（参考）
G01N 1/28	(2006.01)	G01N	1/28	G	2G052
		G01N	1/28	F	
		G01N	1/28	N	

審査請求 未請求　請求項の数 16　ＯＬ　外国語出願　（全 22 頁）

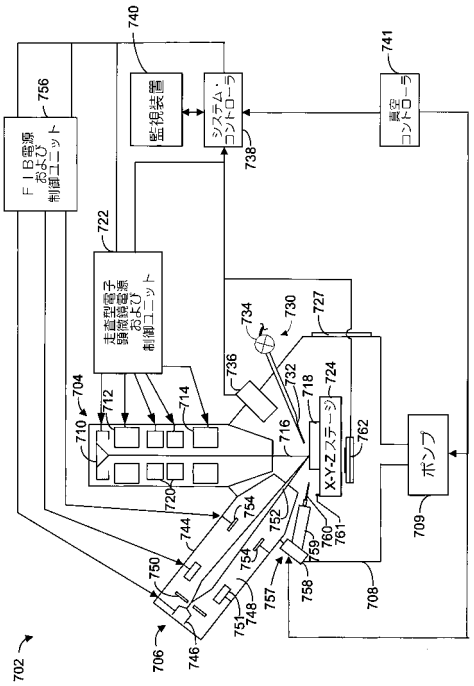
(21)出願番号　特願2012-124150 (P2012-124150)
(22)出願日　平成24年5月31日 (2012.5.31)
(31)優先権主張番号　61/493,308
(32)優先日　平成23年6月3日 (2011.6.3)
(33)優先権主張国　米国 (US)

(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
(74)代理人　100103171
弁理士　雨貝　正彦
(72)発明者　マイケル・モリアーティ
アメリカ合衆国　オレゴン州　９７２１４　ポートランド　エスイー　アンクニー・ストリート　１８３７　エイ・ピー・ティー　エイ

最終頁に続く

(54)【発明の名称】ＴＥＭ画像化用の薄い試料を作製する方法

(57)【要約】
【課題】曲りおよびカーテニングを低減させまたは防ぐような方式でＴＥＭ試料を作製する方法および装置を提供すること。
【解決手段】本発明の好ましい実施形態は、試料を作製するプロセスの最中に、ＴＥＭ試料の面に材料を付着させる。好ましいいくつかの実施形態では、反対側の面を薄くする前に、既に薄くした試料面に材料を付着させることができ、付着させた材料は、試料の構造的完全性を強化し、カーテニング現象のために薄くなりすぎたエリアを再び埋める役目を果たすことができる。好ましい実施形態では、ミリングしている面に材料を付着させることもでき、付着させた材料は、その試料面のカーテニングを低減または排除する役目を果たすことができる。
【選択図】図７



【特許請求の範囲】
【請求項１】
上記明細書に記載の発明。
【請求項２】
ＴＥＭ分析用の試料を作製する方法であって、
関心のフィーチャを含む試料切片をバルク基板から少なくとも部分的に分離するステップと、
前記試料の第１の側面を薄くして第１の試料面を露出させるステップと、
露出させた前記第１の試料面に材料の層を付着させるステップと、
前記試料の第２の側面を薄くするステップと、
付着させた前記材料の少なくとも一部を除去するステップと
を含む方法。
【請求項３】
露出させた前記第２の試料面に材料の層を付着させるステップをさらに含む、請求項２に記載の方法。
【請求項４】
前記試料の第１の側面を薄くする前記ステップと、露出させた前記第１の試料面に材料の層を付着させる前記ステップとを、所望の最終試料面が露出するまで繰り返すステップをさらに含む、請求項１から３のいずれかに記載の方法。
【請求項５】
粒子ビーム・システムを使用して前記試料を作製する、請求項２に記載の方法。
【請求項６】
集束イオン・ビーム・システムを使用して前記試料を作製する、請求項２に記載の方法。
【請求項７】
ＴＥＭ分析用の試料を作製する方法であって、
粒子ビーム・システムの真空室に試料を装填するステップと、
粒子ビーム・ミリングによって、関心のフィーチャを含む試料切片をバルク基板から少なくとも部分的に分離するステップと、
前記試料の第１の側面を前記粒子ビームを使用して薄くして、第１の試料面を露出させるステップと、
露出させた前記第１の試料面に、ビーム誘起付着を使用して材料の層を付着させるステップと、
前記試料の第２の側面を前記粒子ビームを使用して薄くして、第２の試料面を露出させるステップと、
露出させた前記第２の試料面に、ビーム誘起付着を使用して材料の層を付着させるステップと
を含む方法。
【請求項８】
付着させた前記材料の少なくとも一部を除去するステップをさらに含む、請求項７に記載の方法。
【請求項９】
付着させた前記材料の少なくとも一部を除去する前記ステップが、付着させた前記材料の少なくとも一部を、イオン・ビーム・ミリング以外の方法によって除去するステップを含む、請求項２または請求項８に記載の方法。
【請求項１０】
付着させた前記材料の少なくとも一部を除去する前記ステップが、付着させた前記材料の少なくとも一部を、ガス支援エッチングによって除去するステップを含む、請求項２または請求項７に記載の方法。
【請求項１１】

付着させた前記材料の少なくとも一部を除去する前記ステップが、前記試料を前記真空室から取り出した後に、付着させた前記材料の少なくとも一部を除去するステップを含む、請求項２または請求項７に記載の方法。

【請求項１２】

請求項１から１１のいずれかに記載の方法を実施するための装置。

【請求項１３】

コンピュータ・プログラムを含むように構成されたコンピュータ可読の非一時的記憶媒体であって、そのように構成された前記記憶媒体によって、コンピュータが、荷電粒子ビーム・システムを、請求項１から１２のいずれかに記載の方法のステップを実行するように制御する、記憶媒体。

【請求項１４】

前記試料の側面を薄くして試料面を露出させる前記ステップと、露出させた前記試料面に材料の層を付着させる前記ステップとを同時に実行する、請求項１から１３のいずれかに記載の方法。

【請求項１５】

最終的なＴＥＭ試料の厚さが３０ｎｍ以下である、請求項１から１４のいずれかに記載の方法。

【請求項１６】

付着させた前記材料が、ＴＥＭ試料の画像化を著しく妨害しない、請求項１から１５のいずれかに記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本発明は、透過電子顕微鏡用の薄い試料の作製に関し、具体的には、厚さ６０ｎｍ未満の高品質試料の作製に関する。

【背景技術】

【０００２】

集積回路の製造などの半導体製造は一般にフォトリソグラフィの使用を伴う。その表面に回路を形成する半導体基板、通常はシリコン・ウェーハを、露光すると溶解性が変化するフォトレジストなどの材料で覆う。放射源と半導体基板の間に配置したマスク、レチクルなどのリソグラフィ・ツールが影を作って、基板のどのエリアを露光するのかを制御する。露光後、露光したエリアまたは露光しなかったエリアからフォトレジストを除去して、後続のエッチング・プロセスまたは拡散プロセスの間ウェーハの部分を保護するパターン形成されたフォトレジストの層をウェーハ上に残す。

【０００３】

このフォトリソグラフィ・プロセスは、しばしば「チップ」と呼ばれる多数の集積回路デバイスまたはエレクトロメカニカル・デバイスを、それぞれのウェーハ上に形成することを可能にする。次いでこのウェーハを、単一の集積回路デバイスまたはエレクトロメカニカル・デバイスをそれぞれが含む個々のダイに切断する。最後に、これらのダイを追加の操作にかけ、パッケージングして、個々の集積回路チップまたはエレクトロメカニカル・デバイスとする。

【０００４】

この製造プロセスの間に、露光および集束は変動するため、リソグラフィ・プロセスによって現像されたパターンを絶えず監視しまたは測定して、パターンの寸法が許容範囲内にあるかどうかを判定する必要がある。しばしばプロセス制御と呼ばれるこのような監視の重要性は、パターン・サイズが小さくなるにつれて、特に、そのリソグラフィ・プロセスが使用可能な解像限界に最小フィーチャ（ｆｅａｔｕｒｅ）サイズが近づくにつれて、相当に増大する。デバイス密度を常により高いものにしていくためには、フィーチャ・サイズを絶えず小さくしていく必要がある。このようなフィーチャ・サイズには例えば、相互接続線の幅および間隔、コンタクト・ホールの間隔および直径、ならびに、さまざまな

フィーチャのコーナ、エッジなどの表面幾何形状が含まれる。ウェーハ上のフィーチャは３次元構造物であり、完全なキャラクタリゼーション（ｃｈａｒａｃｔｅｒｉｚａｔｉｏｎ）は、線の上面の幅、トレンチの上端の幅などの表面寸法だけではなく、フィーチャの完全な３次元プロフィールをも記述しなければならない。プロセス・エンジニアは、製造プロセスを微調整し、所望のデバイス幾何形状が得られることを保証するために、このような表面フィーチャのクリティカル・ディメンション（ｃｒｉｔｉｃａｌ　ｄｉｍｅｎｓｉｏｎ）（ＣＤ）を正確に測定することができなければならない。

【０００５】

ＣＤの測定は一般に、走査型電子顕微鏡（ｓｃａｎｎｉｎｇ　ｅｌｅｃｔｒｏｎ　ｍｉｃｒｏｓｃｏｐｅ）（ＳＥＭ）などの機器を使用して実施される。走査型電子顕微鏡（ＳＥＭ）では、１次電子ビームを微細なスポットに集束させ、このスポットが、観察する表面を走査する。この１次ビームが表面に衝突すると、その表面から２次電子が放出される。その２次電子を検出し、画像を形成し、その画像のそれぞれの点における明るさを、その表面の対応するスポットに１次ビームが衝突したときに検出された２次電子の数によって決定する。しかしながら、フィーチャが小さくなり続けると、測定対象のフィーチャがあまりに小さすぎて、通常のＳＥＭが提供する解像力では解像できない点に到達する。

【０００６】

透過電子顕微鏡（ｔｒａｎｓｍｉｓｓｉｏｎ　ｅｌｅｃｔｒｏｎ　ｍｉｃｒｏｓｃｏｐｅ）（ＴＥＭ）では、観察者が数ナノメートル程度の極めて小さなフィーチャを見ることができる。材料の表面だけを画像化するＳＥＭとは対照的に、ＴＥＭでは、試料の内部構造をも分析することもできる。ＴＥＭでは、幅の広いビームが試料に衝突し、試料を透過した電子を集束させて試料の画像を形成する。１次ビーム中の電子の多くが試料を透過し、反対側へ出ることができるように、試料は十分に薄くなければならない。試料の厚さは一般に１００ｎｍ未満である。

【０００７】

走査型透過電子顕微鏡（ｓｃａｎｎｉｎｇ　ｔｒａｎｓｍｉｓｓｉｏｎ　ｅｌｅｃｔｒｏｎ　ｍｉｃｒｏｓｃｏｐｅ）（ＳＴＥＭ）では、１次電子ビームを微細なスポットに集束させ、そのスポットを、試料表面にわたって走査する。基板を透過した電子を、試料の向こう側の電子検出器によって集める。画像上のそれぞれの点の強度は、その表面の対応する点に１次ビームが衝突したときに集められた電子の数に対応する。

【０００８】

半導体の幾何形状が縮小し続けると、製造業者はますます透過電子顕微鏡（ＴＥＭ）に依存して、プロセスを監視し、欠陥を分析し、界面層の形態を調べるようになる。本明細書で使用するとき、用語「ＴＥＭ」はＴＥＭまたはＳＴＥＭを指し、ＴＥＭ用の試料を作製すると言うときには、この作製が、ＳＴＥＭで見るための試料の作製をも含むことを理解すべきである。ＴＥＭでは、幅の広いビームが試料に衝突し、試料を透過した電子を集束させて試料の画像を形成する。１次ビーム中の電子の多くが試料を透過し、反対側へ出ることができるように、試料は十分に薄くなければならない。

【０００９】

バルク試料材料（ｂｕｌｋ　ｓａｍｐｌｅ　ｍａｔｅｒｉａｌ）から切り出された薄いＴＥＭ試料は「ラメラ（ｌａｍｅｌｌａ）」として知られている。ラメラの厚さは一般に１００ｎｍ未満であるが、用途によってはこれよりもかなり薄くしなければならない。３０ｎｍ以下である先進の半導体製造プロセスでは、小規模構造物間の重なりを防ぐために、ラメラの厚さを２０ｎｍ未満にする必要がある。現在のところ、６０ｎｍよりも薄くすることは困難であり、堅牢でない。試料の厚さに変動があると、その結果、ラメラに、曲り（ｂｅｎｄｉｎｇ）、オーバーミリング（ｏｖｅｒ－ｍｉｌｌｉｎｇ）または他の破局的欠陥が生じる。このような薄い試料に関して、ラメラの作製は、最も小さく最も決定的に重要な構造物の構造キャラクタリゼーションおよび構造分析の質のかなりの部分を決定する、ＴＥＭ分析の決定的に重要なステップである。

【００１０】

ＴＥＭ顕微鏡法用のラメラを形成する目的に集束イオン・ビーム（ｆｏｃｕｓｅｄ　ｉｏｎ　ｂｅａｍ）（ＦＩＢ）システムを使用することは、当技術分野において知られている。ＦＩＢシステムは、ＴＥＭシステムで使用するのに十分な薄さまでラメラをミリング（ｍｉｌｌｉｎｇ）する能力を有する。ＴＥＭ試料を作製する目的にデュアル・ビーム・システムを使用することは、当技術分野において知られている。デュアル・ビーム・システムは、バルク試料からラメラをミリングするＦＩＢカラムと、一般にラメラをミリングしている最中にラメラを画像化するＳＥＭカラムとを有する。デュアル・ビーム・システムは、ＴＥＭ分析用試料の作製にかかる時間を改善する。試料作製におけるＦＩＢ法の使用は、ＴＥＭ分析用試料の作製にかかる時間をわずか数時間に短縮したが、所与の１枚のウェーハから得た１５ないし５０のＴＥＭ試料を分析することは珍しいことではない。結果として、試料作製の速度は、ＴＥＭ分析を使用する際、特にＴＥＭ分析を半導体プロセス制御に使用する際の非常に重要な因子である。

【００１１】

図１は、初期の向きに配置された、ＴＥＭ分析用の試料ラメラをバルク試料材料から作製する先行技術のＦＩＢシステムを示す。バルク試料材料１０８を試料ステージに載せ、ＦＩＢカラムから発射された集束イオン・ビーム１０４に対してバルク試料材料１０８の上面が垂直になるような向きに、バルク試料材料１０８を配置する。大きなビーム電流を使用し、それに対応した大きなビーム・サイズを有する集束イオン・ビームを使用して、関心領域の前方部分および後方部分から大量の材料をミリングによって除去する。ミリングされた２つの長方形１４と長方形１５の間に残った材料は、関心領域を含む垂直な薄い試料切片（ｓａｍｐｌｅ　ｓｅｃｔｉｏｎ）１０２を形成する。バルク試料の薄化（ｂｕｌｋ　ｔｈｉｎｎｉｎｇ）の後、所望の厚さ（一般に１００ｎｍ未満）に達するまで試料切片を薄くする（一般に次第に細くなるビーム・サイズおよび次第に小さくなるビーム・エネルギーを使用する）。ラメラ１１０を形成するために実施される大部分のイオン・ビーム機械加工は、バルク試料材料１０８およびＦＩＢカラムをこの向きに配置して実行される。

【００１２】

標本（ｓｐｅｃｉｍｅｎ）が所望の厚さに達したら、一般にステージを傾け、試料切片１０２の底面および側面に部分的に沿ったＵ字形の切断を斜めに実施して、試料上面の両側のタブ（ｔａｂ）によって懸垂した試料を残す。この小さなタブは、試料を完全にＦＩＢ研磨した後にミリングによって除去する材料の量を最少にすることを可能にし、薄い標本の表面に再付着アーチファクトが蓄積する可能性を低下させる。次いで、次第に細くなるビーム・サイズを使用して、この試料切片をさらに薄くする。最後に、タブを切断して、薄くしたラメラ１１０を完全に分離する。薄化の後、試料を、側面および底面のバルク材料から分離し、薄くしたＴＥＭ試料を抜き取ることができる。

【００１３】

残念なことに、上述の先行技術の方法を使用して形成した極薄の（ｕｌｔｒａ　ｔｈｉｎ）ラメラは、「曲り」および「カーテニング（ｃｕｒｔａｉｎｉｎｇ）」として知られている望ましくない副次的作用を受ける。極薄の試料（例えば厚さ３０ｎｍ以下）を生成しようとすると、試料は、構造的完全性（ｓｔｒｕｃｔｕｒａｌ　ｉｎｔｅｇｒｉｔｙ）を失い、試料に作用する力の下で、一般に一方の試料面またはもう一方の試料面に向かってたわんだり湾曲することによって変形することがある。ＦＩＢ薄化ステップの最中またはＦＩＢ薄化ステップの前にこの変形が生じた場合には、そのビームに近づく方向またはビームから遠ざかる方向への関心領域の変形が、試料に対する容認できない損傷の原因になることがある。

【００１４】

「カーテニング」として知られているミリング・アーチファクトによって生じる厚さの変動も、ＴＥＭ試料の品質に重大な影響を与えうる。不均質な構造体（例えば金属ゲートおよびシールドとシリコンおよび二酸化シリコン）からバルク試料材料１０８が形成されているとき、イオン・ビーム１０４はより軽い元素をより大きなミリング速度で優先的に

ミリングする。より重い金属元素は、その下のより軽い材料を覆って、より軽い材料を陰にする傾向がある。その結果生じる影響は、金属のエリアから遠い裏側でミリングされず、金属を含まないエリアでミリングされた波打ったラメラ面となる。図２は、１つの試料面のカーテニングを示す、薄くしたＴＥＭ試料１０２の顕微鏡写真であり、ラメラ面の波打ったフィーチャは、吊り下がったカーテンに似ている。カーテニング・アーチファクトはＴＥＭ画像化の質を低下させ、標本の最小有効厚さを制限する。極薄のＴＥＭ試料では、２つの断面が非常に近接し、そのため、カーテニングの影響による厚さの変動により試料ラメラが使用不能になることがある。したがって、ＴＥＭ試料ラメラの作製時にはカーテニング・アーチファクトを低減させることが望ましい。

【００１５】

カーテニング問題に対する代替策も存在し、最も効果的で広範囲に証明されている代替策であるバックサイド・ミリング（ｂａｃｋｓｉｄｅ　ｍｉｌｌｉｎｇ）は、厚さが５０から１００ｎｍのＴＥＭ試料に対しては適度によく機能するものの、厚さ３０ｎｍ以下の極薄試料に対しては機能せず、バックサイド・ミリングによって作製した試料であっても、しばしば、望ましくない不均一な試料面を与えるミリング・アーチファクトを示す。さらに、より厚い試料に対してであっても、バックサイド・ミリングは、非常に長い時間がかかる取り出しおよび反転操作を必要とする。さらに、現行のバックサイド・ミリング技法は手動で実行されており、自動化には適さない。

【先行技術文献】

【特許文献】

【００１６】

【特許文献１】米国特許第６，０３９，０００号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【００１７】

したがって、極薄のＴＥＭ試料を作製する改良された方法であって、曲りおよびカーテニングを低減させまたは排除することができ、自動化された試料作製プロセスに適した方法が依然として求められている。

【課題を解決するための手段】

【００１８】

本発明の目的は、厚さ６０ナノメートル未満、より好ましくは厚さ３０ｎｍ以下のＴＥＭ試料を、曲りおよびカーテニングを低減させまたは防ぐような方式で作製する方法および装置を提供することにある。本発明の好ましい実施形態は、試料を作製するプロセスの最中に、ＴＥＭ試料の面に材料を付着させる。好ましいいくつかの実施形態では、反対側の面を薄くする前に、既に薄くした試料面に材料を付着させることができ、付着させた材料は、試料の構造的完全性を強化し、カーテニング現象のために薄くなりすぎたエリアを再び埋める役目を果たすことができる。好ましい実施形態では、ミリングしている面に材料を付着させることもでき、付着させた材料は、その試料面のカーテニングを低減または排除する役目を果たすことができる。

【００１９】

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を変更し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。

【００２０】

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】

【００２１】
【図１Ａ】バルク基板からＴＥＭ試料を作製する先行技術に基づくバルク・ミリング・プロセスを示す図である。
【図１Ｂ】先行技術に従って薄くしたＴＥＭ試料の顕微鏡写真である。
【図２】１つの試料面のカーテニングを示す、薄くしたＴＥＭ試料の顕微鏡写真である。
【図３】ＴＥＭ試料を形成するステップを示す本発明の好ましい一実施形態に基づく流れ図である。
【図４】抜き取る試料の、より大きなバルク基板内における位置を示す略図である。
【図５Ａ】図３の方法を実施する際のステップを示す図である。
【図５Ｂ】図３の方法を実施する際のステップを示す図である。
【図５Ｃ】図３の方法を実施する際のステップを示す図である。
【図５Ｄ】図３の方法を実施する際のステップを示す図である。
【図５Ｅ】図３の方法を実施する際のステップを示す図である。
【図５Ｆ】図３の方法を実施する際のステップを示す図である。
【図５Ｇ】図３の方法を実施する際のステップを示す図である。
【図５Ｈ】図３の方法を実施する際のステップを示す図である。
【図５Ｉ】図３の方法を実施する際のステップを示す図である。
【図６】あるガリウム集束イオン・ビームのイオン電流密度を、ある半径方向軸に沿った位置に対して示したグラフである。
【図７】本発明の実施形態を実施するように機器が装備された典型的なデュアル・ビームＳＥＭ／ＦＩＢシステム７１０の一実施形態を示す図である。
【発明を実施するための形態】
【００２２】
好ましい実施形態は、試料を作製するプロセスの最中に試料に材料を追加することによって、ＴＥＭ試料の作製中の曲りおよびカーテニングの問題に対処する。試料から材料を除去することだけに集中する先行技術の方法とは対照的に、本発明の好ましい実施形態は実際に、作製中の試料に追加の材料を付着させる。
【００２３】
好ましいいくつかの実施形態では、後により詳細に説明するように、第１のＴＥＭ試料面を薄くした後、第２のＴＥＭ試料面を薄くする前に、第１のＴＥＭ試料面に材料を付着させることができる。いくつかの実施形態では、第２の試料面を薄くする間、薄くした第１の試料面に、付着させた材料の全てを残しておくことができる。他の実施形態では、第２の側面を薄くする前に、薄くした第１の側面から、付着材料の大部分を除去することができる。後に残った付着材料は、カーテニング効果のために薄くなりすぎたエリアを埋める役目を果たすことができる。いずれにせよ、ＦＩＢミリングしている面とは反対側の試料面に存在する付着材料は、試料の構造的完全性を強化する役目を果たすことができる。
【００２４】
好ましいいくつかの実施形態では、試料面を薄くしているときに、その試料面に材料を付着させることができる。上述のとおり、試料が、より速くミリングされる材料とよりゆっくりとミリングされる材料の混合物からなるときには、しばしば、望ましくないカーテニング効果が生じる。本出願の出願人は、適当な前駆体ガスの存在下でミリング・プロセスを実施することにより、試料表面のある部分をミリングによって除去している間に、それと同時に、試料表面の他の部分に材料を付着させることができることを見出した。他の実施形態では、ＦＩＢ薄化の一部分を試料面に実行した後に、その試料面をコーティングすることができる。これらの一方または両方の方法によって、薄化プロセスの間、試料面のより速いミリング速度を有するエリアを付着材料によって保護し、または薄化プロセスの間に、そのようなエリアを付着材料によって再び埋めることができ、したがって試料面のカーテニングを低減させまたは防ぐことができる。
【００２５】
本発明の好ましい実施形態によれば、試料を画像化する前に、付着材料の一部または全

部を除去する。他の実施形態では、所望の画像化パラメータにおいて、付着材料が、電子に対して十分に透過性であり、そのため、試料ＴＥＭ分析の間、付着材料をその場に残しておくことができる。付着材料の一部または全部を除去する場合には、公知の適当な任意の方法を使用して材料を除去することができる。当業者なら理解するとおり、適当な材料除去法は、付着材料、試料の構造的完全性など、いくつかの因子によって決まる。選択する材料除去法は、付着材料を選択的に除去し、ＴＥＭ試料からの試料材料の追加の除去を全くまたはほとんど引き起こさないことが好ましい。

【００２６】

上述の実施形態を、一緒に、別々に、または所望の組合せで使用することができることに留意すべきである。例えば、いくつかの実施形態では、試料面を薄くした後にのみ試料面に材料を付着させ、他の実施形態では、試料面を薄くしている最中と試料面を薄くした後の両方の時期に材料を付着させることができる。本発明の好ましい方法または装置は多くの新規の態様を有する。本発明は、異なる目的に対して異なる方法または装置で実施することができるため、全ての実施形態に全ての態様が存在する必要はない。さらに、記載された実施形態の態様の多くは別個に特許を受けることができる。

【００２７】

図３は、ＴＥＭ試料を形成するステップを示す本発明の好ましい一実施形態に基づく流れ図である。最初に、ステップ３０１で、ＦＩＢカラムとＳＥＭカラムの両方を有するデュアル・ビームＦＩＢ／ＳＥＭシステムなどの適当な処理ツールに、半導体ウェーハ、凍結生体材料または鉱物試料などの基板を装填する。このような適当な１つのデュアル・ビームＦＩＢ／ＳＥＭシステムは、本発明の譲受人である米オレゴン州ＨｉｌｌｓｂｏｒｏのＦＥＩ　Ｃｏｍｐａｎｙから販売されているＨｅｌｉｏｓ１２００またはＥｘｐｉｄａ（登録商標）　１２５５　ＤｕａｌＢｅａｍ（登録商標）　Ｓｙｓｔｅｍである。

【００２８】

図７も参照すると、デュアル・ビーム・システム７０２の一般的な構成は、垂直軸を有する電子カラム７０４と、この垂直軸に対して（通常は約５２度）傾いた軸を有するイオン・カラム７０６とを備える。ウェーハは、当技術分野ではよく知られているように、多ウェーハ搬送／自動装填ロボット（図示せず）を経由して移送することが好ましいが、手動でウェーハを移動させることもできる。

【００２９】

ステップ３０２で、（関心のフィーチャを含む）ＴＥＭ試料を基板から抜き取る位置を決定する。例えば、この基板は、シリコン半導体ウェーハまたはシリコン半導体ウェーハの部分であり、抜き取る部分は、そのシリコン・ウェーハ上に形成された集積回路の一部分であって、ＴＥＭを使用して観察する部分を含む。他の例では、基板はアルミナチタンカーバイト（ＡｌＴｉＣ）・ウェーハでよく、抜き取る部分は記憶媒体にデータを読み書きするために用いられる構造を含んでもよい。他の例では、基板は天然資源を含む試料であってよく、試料中の資源の性質を分析するために抜き取りを行ってもよい。図４は、抜き取る試料１０２の、より大きな基板１０８内における位置を示す略図である。

【００３０】

ステップ３０４で、好ましくは、ＦＩＢカラム７０６から発射された集束イオン・ビームに対して基板の上面が垂直になるような向きに、基板を配置する。次いで、ステップ３０６で、大きなビーム電流を使用し、それに対応した大きなビーム・サイズを有する集束イオン・ビームを使用して、所望のＴＥＭ試料を含む試料切片の前方部分および後方部分から大量の材料をミリングによって除去する。バルク材料をできるだけ速く除去するため、バルク材料の除去は、大きなビーム電流、好ましくは使用可能な最も大きな制御可能電流で実行することが好ましい。バルク材料の除去は例えば、加速電圧が３０ｋＶの１３ｎＡのガリウム・イオン・ビームを使用して実行することができる。状況によっては、ＴＥＭ試料が基板表面に対して鋭角をなす向きを有するように、基板をミリングした方が望ましいこともある。例えば、参照によって本明細書に組み込まれる、本発明の譲受人に譲渡されたＬｉｂｂｙ他の「Ｆｏｃｕｓｅｄ　Ｐａｒｔｉｃｌｅ　Ｂｅａｍ　Ｓｙｓｔｅｍｓ

ａｎｄ Ｍｅｔｈｏｄｓ Ｕｓｉｎｇ ａ Ｔｉｌｔ Ｃｏｌｕｍｎ」という名称の米国特許第６，０３９，０００号（２０００年）は、試料表面に対してある角度に向けられたＦＩＢを使用し、所望のＴＥＭ試料の両側に空洞をエッチングすることにより、ＴＥＭ試料を形成することを記載している。

【００３１】

図１に示した先行技術の方法と同様に、バルク・ミリングが完了した後、ミリングされた２つの長方形１４と長方形１５の間に残った材料は、垂直な試料切片１０２を形成しており、試料切片１０２は依然として、側面および底面のところでバルク基板とつながっている。図５Ａは、このような垂直な試料切片１０２を示す。分かりやすくするため、周囲のバルク基板は一切示されていない。

【００３２】

バルク試料の薄化の後、次いで、ステップ３０８で、所望の第１の試料面に到達するまで、試料切片１０２の第１の側面５１Ａをさらに薄くする（次第に細くなるビーム・サイズおよび次第に小さくなるビーム・エネルギーを使用することが好ましい）。例えば、薄化の第１の段階では、ビーム電流が１ｎＡのイオン・ビームを使用し、続く第２の段階では１００ｐＡのビームを使用する。図５Ｂに示すように、露出した第１の試料面は一般に、ある程度のカーテニングを示し、このカーテニングの結果、オーバーミリングされたエリア５２が生じる。試料は、試料の上面に対して直角方向または垂直方向を向いた軸を有するイオン・ビームを使用して薄くすることが好ましいが、ビーム軸が、所望のＴＥＭ試料面の側に向けられているならば、直角以外の角度を使用することもできる。

【００３３】

図５Ｂに示した材料の厚さの違いは単に例示を目的したものであり、加工面とカーテニングによって生じた谷部との間の厚さの違いを正確なスケールで示すこと、または表面の変動が必ず均一になることを示すことを意図したものではない。図５Ｂ～５Ｉに図式的に示したＦＩＢ７０６およびＳＥＭビーム７０４を指示する矢印または他の処理を指示する矢印は単に、その処理が加えられていることを示すことを意図したものであり、ビームの角度もしくは向きまたは付着もしくはエッチングの正確な位置を示すことを意図したものではない。

【００３４】

所望の試料面を露出させた後、ステップ３１０で、露出させた試料面に材料５６を付着させる。材料５６の層は、例えば前駆体ガス５４と、イオン・ビームまたは電子ビームを使用（付着させる材料に部分的に応じた）した化学蒸着とを使用することによって、試料面全体に付着させることが好ましい。前駆体を活性化する機構は、ＳＥＭ、ＦＩＢ、２次粒子の間接送達または他の技法とすることができる。さらに、この付着技法は、前駆体をビームによって活性化させる付着だけに限定されない。

【００３５】

付着材料は、ＴＥＭ試料材料（１種または数種）とは異なる組成を有することが好ましい。付着させる材料は、ＴＥＭ試料の具体的な用途に応じて選択することができる。適当な付着材料は例えば、タングステン、白金、金、炭素、酸化シリコンまたは他の適当な材料を含む。これらの材料を付着させるための前駆体ガスは先行技術においてよく知られている。

【００３６】

さらに、後により詳細に論じるとおり、付着材料は、薄化プロセスの最中に除去するか、またはＴＥＭ試料の決定的に重要なミリングが完了した後に容易に除去することができる。例えば、付着材料が、炭素蒸着によって付着させることができる炭素である場合には、炭素以外のＴＥＭ試料に対する追加の損傷を生じさせない非常に選択的なエッチング・プロセスである水蒸気エッチングによって、付着材料を除去することができる。好ましいいくつかの実施形態では、付着材料を、ＴＥＭ試料の画像化をあまり妨害しない材料とすることができ、その場合には、その材料をその場に残しておくことができる。例えば、試料の化学分析を含む用途では、付着材料中に存在する既知の化合物を無視することができ

る。
【００３７】
図５Ｃに示す実施形態では、元の試料切片１０２の全厚が増大するように材料５６を追加する。言い換えると、薄化プロセス中に除去された材料よりも多くの材料を追加する。しかしながら、追加する材料が、試料の構造的完全性を適切に増大させ、または十分な量のカーテニング・オーバーミリングを埋めるのに十分である限りにおいて、そのような量の材料を追加する必要はない。付着層の厚さは、ビーム照射をどの程度見込むかとどの材料を付着するかによる。例えば、構造的完全性のために主に炭素ベースの材料が付着される場合、および、ビーム照射で受ける浸食が極小であろう場合、約２０ｎｍの付着層が適当であろう。１ｎＡでのミリングステップ中にカーテニングを減少させるために用いられる場合は、厚さ１００ｎｍ以上の層を付着させても良い。
【００３８】
ステップ３１２において、任意選択で、追加した材料５６の一部を除去する。付着材料は単一の化合物からなるため、材料を除去するときにカーテニングはほとんどまたは全く起こらない。もう一方の試料面５１Ｂをミリングするときに追加の構造的完全性を提供するため、試料面５１Ａに十分な付着材料５６を残すことが好ましいが、試料の曲りの優先度が低く、カーテニングの低減だけが実際の懸念事項である状況では、第２の試料面に取りかかる前に全ての付着材料を除去することができる。後に論じるように、好ましいいくつかの実施形態では、最終的な試料面を露出させる前に、試料に材料を付着させることができる。次いで、後続の追加の薄化の間に、この付着材料を除去することができる。この薄化ステップ、材料追加ステップおよび再薄化ステップを、最終的な試料面が露出するまで、繰り返し反復することができる。この反復技術はカーテニングの影響を最小化するのに有効であり、または、もしそれが望ましい場合には、薄化ステップのエンドポインティング技法（ｅｎｄ－ｐｏｉｎｔｉｎｇ　ｔｅｃｈｎｉｑｕｅ）として採用することができる。
【００３９】
次いで、ステップ３１４で、試料１０２の第２のＴＥＭ試料面５１Ｂ（背面）にＦＩＢを導いて、試料を薄くする。この場合も、次第に細くなるビーム・サイズおよび次第に小さくなるビーム・エネルギーを使用して、所望の試料面を露出させる。例えば、薄化の第１の段階では、ビーム電流が１ｎＡのイオン・ビームを使用し、続く第２の段階では１００ｐＡのビームを使用する。図５Ｆに示すように、露出した第２の試料面５１Ｂも一般に、ある程度のカーテニングを示し、このカーテニングの結果、オーバーミリングされたエリア５２が生じる。
【００４０】
ステップ３１６で、化学蒸着などの適当なプロセスを使用して、第２の試料面５１Ｂにも材料５６を付着させる。ステップ３１８で、第２の面の付着材料の一部または全部を、例えばＦＩＢミリングによって除去する。背面に付着させる材料も、複数のステップで繰り返し追加され、除去され、最後の薄化ステップで全ての材料が除去されることもある。
【００４１】
任意選択で、ステップ３２０において、完成したＴＥＭ試料１１０から全ての付着材料５６を除去することができる。この材料除去は、ＦＩＢミリングによって、またはＴＥＭ試料材料に、より害のない、イオン・ビームまたは電子ビームを用いた選択的ガス支援エッチングなどの方法によって達成することができる。好ましい他の実施形態では、ＴＥＭ試料を真空室から取り出した後に、付着材料を、エッチング、例えば酸浴中でのエッチングによって除去することができる。本発明はこれらの例だけに限定されず、適当な任意のタイプのビーム・ベース除去または化学除去、またはプラズマ誘起除去を利用することができる。基板から抜き取る試料が他にある場合には（ステップ３２２）、プロセスはステップ３０２へ戻り、次の試料位置を決定する。基板から抜き取る試料が他にない場合には、ステップ３２４でプロセスは停止する。
【００４２】

本発明の好ましいいくつかの実施形態では、薄化プロセスの間にＴＥＭ試料面に材料を付着させることもできる。好ましいいくつかの実施形態によれば、２つの荷電粒子ビームを一度に使用することができる。例えば、後述する図７に示したシステムなどのデュアル・ビーム・システムでは、電子ビームを適当な前駆体ガスとともに使用して試料面に材料を付着させ、同時に、ＦＩＢを使用してミリングを実施することができる。

【００４３】

他の実施形態では、イオン・ビームを使用して、材料の付着と材料の除去を同時に実施することができる。集束イオン・ビーム・システムは一般に、図６に示すような循環対称の（ｃｉｒｃｕｌａｒｌｙ　ｓｙｍｍｅｔｒｉｃ）、実質的にはガウス電流密度分布を有する。図６は、イオン電流密度を、ある半径方向軸に沿った位置に対して示したグラフである。図６に示すように、ビームの中心の電流密度が最も大きく（したがってより速くミリングし）、ビームの中心から離れるにつれてビーム電流は次第に小さくなる。

【００４４】

このビーム電流の広がりは、カーテニングの主な誘因の１つである。ビームが、ビームの中心を用いてラメラ面をミリングしているとき、ガウスの分布の尾部のイオンは、ビームの中心よりも先に（およびビームの中心よりも後に）試料材料に到達する。ビームの小電流部分は、小さなミリング速度を有するより重い金属試料構造物に対してほとんど影響しない可能性があるが、より大きなミリング速度を有するより軽い材料はかなりミリングされる可能性がある。

【００４５】

本出願の出願人らは、ビームの存在下で適当な前駆体ガスを試料表面に向かって導くことによって、この「事前」ミリングを低減または排除することができることを見出した。先行技術ではよく知られているように、前駆体ガスの吸着層を有する基板に荷電粒子ビームを照射すると、基板から２次電子が放出される。これらの２次電子は、吸着した前駆体ガス分子の解離を引き起こす。解離した前駆体材料の一部は基板表面に付着物を形成し、残りの前駆体ガス粒子は揮発性の副生物を形成し、装置の真空システムによって排出される。

【００４６】

適当な前駆体ガスが存在すると、中心から離れたビームの小電流部分は、解離した前駆体材料の付着を引き起こす２次電子を提供することができる。この付着材料は、その下の基板をミリングする前に、スパッタリングによって除去しなければならない。ビームの中心のビーム電流は、優勢な反応が付着反応からミリング反応に切り替わる十分に大きなものであることが好ましい。このようにすると、この付着材料は、より大きなミリング速度を有するより軽い材料がビームの中心が到達する前に相当にミリングされることを防ぐ保護層の役目を果たすことができ、一方、ビームの中心は、新たに付着した保護層とその下の基板の両方をだいたい同じ速度でミリングする。中心から離れたビームの縁のビーム電流はより小さいため、保護層によって覆われたより軽い材料はあまりエッチングされず、カーテニングは防止され、または少なくとも実質的に低減する。当業者は、適当な前駆体ガスを選択することができ、また、中心から離れたビームの小電流部分において優勢な反応が付着反応となり、ビームの中心において優勢な反応がエッチング（ミリング）反応となるように、ガス圧およびビーム電流を調整することができる。

【００４７】

好ましいいくつかの実施形態では、表面全体に保護層が付着するように、ビームの中心についても、付着速度がエッチング速度よりも大きくなるようにすることができる。次いで、ビーム全体について、またはビームの中心の大電流部分だけについてエッチングが優勢になるように、ビーム・パラメータまたはガス圧を調整することができる。さらに、いくつかの実施形態によれば、試料をミリングしている最中にカーテニングがある程度形成し始めると、より軽い材料がオーバーミリングされた試料面の空隙は、湾曲したお椀形の形状を示す傾向がある。そのお椀の壁の湾曲のため、前駆体材料は、試料面の他の部分よりも速い速度でこの領域に付着する傾向を示す。その結果として、付着材料がこの低いエ

リアを埋める傾向を示すように、したがって付着材料がカーテニングをある程度埋め、この低いエリアをさらなるオーバーミリングから保護するように、ビーム・パラメータおよび前駆体ガス圧を調整することができる。

【００４８】

したがって、本発明の実施形態は、試料の曲り（および応力に基づく他のタイプの試料損傷）および／または試料面のカーテニングを低減させまたは防ぐ手段を提供する。このことは、極薄の試料（本明細書では厚さ３０ｎｍ以下の試料と定義する）に関して特に重要である。材料を付着させていないあるシリコンＴＥＭ試料が、厚さ３０ｎｍに達するずっと前にかなりの曲りを示すときに、一方の試料面に適当な付着材料層を付着させると、同様の試料を、曲りを生じさせることなく、約３０ｎｍまで薄くすることができることを、本出願の出願人らは実験によって確認した。

【００４９】

試料のタイプによっては、これらのタイプの試料損傷のうちの一方の損傷を回避することが、もう一方の損傷を回避することよりも重要なことがある。例えば、着目している構造の全幅が１００ｎｍ未満だがミリング速度の速い材料と遅い材料の間の鉛直境界の真下に位置する試料の場合、試料の曲りは問題とならないかもしれないがカーテニングは決定的な種類の損傷である。このような、一方のタイプの損傷のみが重要となる場合において、上述の方法の全てのステップを使用する必要がないことがある。また試料の両面に付着材料を付着させる必要もない。例えば、曲りが主たる懸念事項である試料を作製するときには、第１の試料面を薄くした後に第１の試料面にだけ材料を付着させ、次いで、第２の試料面を露出させた後でその付着材料を除去するだけで十分なことがある。いくつかの実施形態では、試料面に材料を付着させるステップ、試料面を薄くするステップ、および次いで試料面により多くの材料を付着させるステップを、試料の所望の厚さに到達するまで繰り返し実施することができる。

【００５０】

薄化中の試料の構造的完全性の向上はさらに、本発明に基づくＴＥＭ試料の製造法を、自動化された操作および処理に対してより適したものにする。自動化された操作および処理は、使いやすさを増大させ、顧客のために、１試料当たりの費用を低下させることができる。カーテニングの影響の低減は、先行技術のシリコン面のミリング技法（ｓｉｌｉｃｏｎ－ｓｉｄｅ　ｍｉｌｌｉｎｇ　ｔｅｃｈｎｉｑｕｅｓ）よりも短いサイト時間（ｓｉｔｅ　ｔｉｍｅ）で、および／またはより大変使いやすく、高品質の試料を製造することを可能にする。

【００５１】

さらに、上述のステップは所望の順序で適用することができる。例えば、状況によっては、薄化を実施する前に材料を付着させた方が望ましいことがある。さらに、プロセス中の任意の時点で試料を画像化することができる。さらに、例えば、試料を十分に薄くし、画像化を実行して、最終的なＴＥＭ試料面においてターゲットとなる試料内の所望のフィーチャを認識するまで、試料面への材料の付着を開始しなくてもよい。好ましいいくつかの実施形態では、材料付着操作と材料除去操作が異なる連続ステップである。他の実施形態では、試料作製の少なくとも一部の最中に、同じ面または異なる面において、付着プロセスと材料除去プロセスを同時に実施することができる。

【００５２】

図７は、本発明の実施形態を実施するように機器が装備された例示的なデュアル・ビームＳＥＭ／ＦＩＢシステム７０２の一実施形態を示す。本発明の実施形態は、基板のターゲット表面に低抵抗率材料を付着させる多種多様な用途に使用することができる。このような試料の作製および分析は一般に、以下で説明するシステムなどのデュアル・ビーム電子ビーム／集束イオン・ビーム・システムで実行される。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ＦＥＩ　Ｃｏｍｐａｎｙ（米オレゴン州Ｈｉｌｌｓｂｏｒｏ）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することに限定されない。

【００５３】
デュアル・ビーム・システム７０２は、垂直に取り付けられた電子ビーム・カラム７０４と、垂直線から約５２度の角度に取り付けられた集束イオン・ビーム（ＦＩＢ）カラム７０６とを、排気可能な標本室７０８上に有する。標本室は、ポンプ・システム７０９によって排気することができる。ポンプ・システム７０９は一般に、ターボ分子ポンプ、油拡散ポンプ、イオン・ゲッタ・ポンプ、スクロール・ポンプおよび知られている他のポンピング手段のうちの１つもしくは複数のポンプ、またはこれらのポンプの組合せを含む。
【００５４】
電子ビーム・カラム７０４は、ショットキ放出器、冷陰極電界放出器などの電子を発生させる電子源７１０、ならびに微細集束電子ビーム７１６を形成する電子－光学レンズ７１２および７１４を含む。電子源７１０は一般に、一般に接地電位に維持される加工物７１８の電位よりも５００Ｖから３０ｋＶ高い電位に維持される。
【００５５】
したがって、電子は、約５００ｅＶから３０ｋｅＶの入射エネルギー（ｌａｎｄｉｎｇ　ｅｎｅｒｇｙ）で加工物７１８に衝突する。電子の入射エネルギーを低減させることで電子と加工物表面との相互作用体積を小さくし、それによって核生成部位のサイズを小さくするために、加工物に負の電位を印加することができる。加工物７１８は例えば、半導体デバイス、マイクロエレクトロメカニカル・システム（ＭＥＭＳ）、データ記憶装置、またはその材料特性あるいは組成が分析されている材料の試料を含むことができる。加工物７１８の表面に電子ビーム７１６の衝突点を配置することができ、偏向コイル７２０によって電子ビーム７１６の衝突点を加工物７１８の表面全体にわたって走査することができる。レンズ７１２および７１４および偏向コイル７２０の動作は、走査型電子顕微鏡電源および制御ユニット７２２によって制御される。レンズおよび偏向ユニットは、電場、磁場またはこれらの組合せを使用することができる。
【００５６】
加工物７１８は、標本室７０８内の可動ステージ７２４上にある。ステージ７２４は、水平面（Ｘ軸およびＹ軸）内で移動し、垂直に（Ｚ軸）移動し、約６０度傾き、Ｚ軸を軸に回転することができることが好ましい。Ｘ－Ｙ－Ｚステージ７２４上に加工物７１８を挿入するため、および内部ガス供給リザーバ（図示せず）が使用される場合にはそれを使用するために、扉７２７を開くことができる。標本室７０８を排気する場合に開かないように、この扉はインタロックされる。
【００５７】
真空室には、１つまたは複数のガス注入システム（ｇａｓ　ｉｎｊｅｃｔｉｏｎ　ｓｙｓｔｅｍ）（ＧＩＳ）７３０が取り付けられる。ＧＩＳはそれぞれ、前駆体または活性化材料を保持するリザーバ（図示せず）、および加工物の表面にガスを導くための針７３２を備えることができる。ＧＩＳはそれぞれさらに、加工物への前駆体材料の供給を調節する手段７３４を備える。この例では、この調節手段が調整可能な弁として示されているが、調節手段は例えば、前駆体材料を加熱して前駆体材料の蒸気圧を制御する調節された加熱器を含むこともできる。
【００５８】
電子ビーム７１６中の電子が加工物７１８に当たると、２次電子、後方散乱電子およびオージェ電子が放出され、これらの電子を検出して、画像を形成し、または加工物についての情報を決定することができる。例えば２次電子は、エバーハート－ソーンリー（Ｅｖｅｒｈａｒｄ－Ｔｈｏｒｎｌｅｙ）検出器、低エネルギーの電子を検出することができる半導体検出デバイスなどの２次電子検出器７３６によって検出される。ＴＥＭ試料ホルダ７６１およびステージ７２４の下に位置するＳＴＥＭ検出器７６２は、ＴＥＭ試料ホルダ上に取り付けられた試料を透過した電子を集めることができる。検出器７３６、７６２からの信号はシステム・コントローラ７３８へ送られる。前記コントローラ７３８はさらに、偏向器信号、レンズ、電子源、ＧＩＳ、ステージおよびポンプ、ならびにこの機器の他の構成要素を制御する。監視装置７４０は、ユーザ制御を表示し、検出器からの信号を使

用して加工物の画像を表示するために使用される。

【００５９】

室７０８は、真空コントローラ７４１の制御の下、ポンプ・システム７０９によって排気される。この真空システムは、室７０８に約7×10^{-6}ミリバールの真空を提供する。適当な前駆体ガスまたは活性化剤ガスを試料表面に導入すると、室のバックグラウンド圧力は一般に約5×10^{-5}ミリバールまで上昇することがある。

【００６０】

集束イオン・ビーム・カラム７０６は、イオン源７４６および集束カラム７４８がその内部に位置する上ネック部分７４４を備え、集束カラム７４８は、引出し電極７５０および静電光学系を含み、静電光学系は対物レンズ７５１を含む。イオン源７４６は、液体金属ガリウム・イオン源、プラズマ・イオン源、液体金属合金源または他の任意のタイプのイオン源を含むことができる。集束カラム７４８の軸は、電子カラムの軸から５２度傾いている。イオン・ビーム７５２は、イオン源７４６から、集束カラム７４８を通り、静電偏向器７５４と静電偏向器７５４の間を通過して、加工物７１８に向かって進む。

【００６１】

ＦＩＢ電源および制御ユニット７５６は、イオン源７４６で電位を供給する。イオン源７４６は一般に、一般に接地電位に維持される加工物の電位よりも１ｋＶから６０ｋＶ高い電位に維持される。したがって、イオンは、約１ｋｅＶから６０ｋｅＶの入射エネルギーで加工物に衝突する。ＦＩＢ電源および制御ユニット７５６は偏向板７５４に結合される。偏向板７５４は、イオン・ビームが、加工物７１８の上面に、対応するパターンをトレースすることを可能にする。当技術分野ではよく知られているとおり、システムによっては、最後のレンズよりも前に偏向板が置かれる。イオン・ビーム集束カラム７４８内のビーム・ブランキング（ｂｌａｎｋｉｎｇ）電極（図示せず）は、ＦＩＢ電源および制御ユニット７５６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７５２を、加工物７１８ではなくブランキング開口（図示せず）に衝突させる。

【００６２】

イオン源７４６は一般に、一価の正のガリウム・イオンのビームを発生させ、このビームは、イオン・ミリング、強化エッチング、材料付着によって加工物７１８を変更するため、または加工物７１８を画像化するために、加工物７１８位置において幅１／１０マイクロメートル以下のビームに集束させることができる。

【００６３】

Ｏｍｎｉｐｒｏｂｅ，Ｉｎｃ．（米テキサス州Ｄａｌｌａｓ）のＡｕｔｏＰｒｏｂｅ２００（登録商標）、あるいはＫｌｅｉｎｄｉｅｋ Ｎａｎｏｔｅｃｈｎｉｋ（ドイツＲｅｕｔｌｉｎｇｅｎ）のＭｏｄｅｌ MM３Ａなどのマイクロマニピュレータ（ｍａｉｃｒｏｍａｎｉｐｕｌａｔｏｒ）７５７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７５９のＸ、Ｙ、Ｚおよびθ制御を提供するため、マイクロマニピュレータ７５７は、真空室の外側に配置された精密電動機７５８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７５７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７６０である。先行技術では知られているように、分析のため、マイクロマニピュレータ（またはマイクロプローブ）を使用して、（一般にイオン・ビームによって基板から分離された）ＴＥＭ試料をＴＥＭ試料ホルダ７６１に移すことができる。

【００６４】

システム・コントローラ７３８は、デュアル・ビーム・システム７０２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７３８を介して、イオン・ビーム７５２または電子ビーム７１６を希望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７３８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７０２を制御することができる。図７は略図であり、一般的なデュアル・ビーム・システムの要

素の全ては含んでおらず、また、それらの要素の実際の外見およびサイズまたはそれらの要素間の関係の全ては反映していない。

【００６５】

本発明のいくつかの実施形態によれば、ＴＥＭ分析用の試料を作製する方法は、関心のフィーチャを含む試料切片をバルク基板から少なくとも部分的に分離するステップと、試料の第１の側面を薄くして第１の試料面を露出させるステップと、露出させた第１の試料面に材料の層を付着させるステップと、試料の第２の側面を薄くするステップと、付着させた材料の少なくとも一部を除去するステップとを含む。

【００６６】

いくつかの実施形態では、ＴＥＭ分析用の試料を作製するこの方法が、露出させた第２の試料面に材料の層を付着させるステップをさらに含む。いくつかの実施形態では、ＴＥＭ分析用の試料を作製するこの方法が、試料の第１の側面を薄くするステップと、露出させた第１の試料面に材料の層を付着させるステップとを、所望の最終試料面が露出するまで繰り返すステップをさらに含む。

【００６７】

いくつかの実施形態では、粒子ビーム・システムを使用して試料を作製する。いくつかの実施形態では、集束イオン・ビーム・システムを使用して試料を作製する。

【００６８】

本発明のいくつかの実施形態によれば、ＴＥＭ分析用の試料を作製する方法は、粒子ビーム・システムの真空室に試料を装填するステップと、粒子ビーム・ミリングによって、関心のフィーチャを含む試料切片をバルク基板から少なくとも部分的に分離するステップと、試料の第１の側面を粒子ビームを使用して薄くして、第１の試料面を露出させるステップと、露出させた第１の試料面に、ビーム誘起付着を使用して材料の層を付着させるステップと、試料の第２の側面を粒子ビームを使用して薄くして、第２の試料面を露出させるステップと、露出させた第２の試料面に、ビーム誘起付着を使用して材料の層を付着させるステップとを含む。

【００６９】

いくつかの実施形態では、ＴＥＭ分析用の試料を作製するこの方法が、付着させた材料の少なくとも一部を除去するステップをさらに含む。いくつかの実施形態では、付着させた材料の少なくとも一部を除去するステップが、付着させた材料の少なくとも一部を、イオン・ビーム・ミリング以外の方法によって除去するステップを含む。いくつかの実施形態では、付着させた材料が、ＴＥＭ試料の画像化をあまり妨害しない。

【００７０】

いくつかの実施形態では、付着させた材料の少なくとも一部を除去するステップが、付着させた材料の少なくとも一部を、ガス支援エッチングによって除去するステップを含む。いくつかの実施形態では、付着させた材料の少なくとも一部を除去するステップが、試料を真空室から取り出した後に、付着させた材料の少なくとも一部を除去するステップを含む。

【００７１】

いくつかの実施形態では、試料の側面を薄くして試料面を露出させるステップと、露出させた試料面に材料の層を付着させるステップとを同時に実行する。

【００７２】

いくつかの実施形態では、最終的なＴＥＭ試料の厚さが３０ｎｍ以下である。

【００７３】

本発明のいくつかの実施形態によれば、装置は、上述のいずれかの方法を実行する手段を備える。

【００７４】

本発明のいくつかの実施形態によれば、コンピュータ可読の非一時的（ｎｏｎ－ｔｒａｎｓｉｔｏｒｙ）記憶媒体は、コンピュータ・プログラムを含むように構成されており、そのように構成された記憶媒体によって、コンピュータが、荷電粒子ビーム・システムを

、上述のいずれかの方法のステップを実行するように制御する。

【００７５】

以上の本発明の説明は主に、極薄のＴＥＭ試料を作製する方法を対象としているが、このような方法の操作を実行する装置も本発明の範囲に含まれることを認識すべきである。さらに、コンピュータ・ハードウェア、ハードウェアとソフトウェアの組合せ、またはコンピュータ可読の非一時的記憶装置に記憶されたコンピュータ命令によって、本発明の実施形態を実現することができることも認識すべきである。本発明の方法は、標準プログラミング技法を使用し、本明細書に記載された方法および図に基づいて、コンピュータ・プログラムとして実現することができ、このコンピュータ・プログラムは、コンピュータ・プログラムを含むように構成されたコンピュータ可読の非一時的記憶媒体を含み、そのように構成された記憶媒体は、コンピュータを、予め定義された特定の方式で動作させる。コンピュータ・システムと通信するため、それぞれのプログラムは、高水準手続き型プログラミング言語またはオブジェクト指向プログラミング言語で実現することができる。しかしながら、所望ならば、それらのプログラムを、アセンブラ言語または機械語で実現することもできる。いずれにせよ、その言語は、コンパイルまたは解釈される言語とすることができる。さらに、そのプログラムは、そのプログラムを実行するようにプログラムされた専用集積回路上で実行することができる。

【００７６】

さらに、方法論は、限定はされないが、荷電粒子ツールもしくは他の画像化デバイスとは別個の、荷電粒子ツールもしくは他の画像化デバイスと一体の、または荷電粒子ツールもしくは他の画像化デバイスと通信するパーソナル・コンピュータ、ミニコンピュータ、メインフレーム、ワークステーション、ネットワーク化されたコンピューティング環境または分散コンピューティング環境、コンピュータ・プラットホームなどを含む、任意のタイプのコンピューティング・プラットホームで実現することができる。本発明の諸態様は、取外し可能であるか、またはコンピューティング・プラットホームと一体であるかを問わない、ハードディスク、光学式読取りおよび／または書込み記憶媒体、ＲＡＭ、ＲＯＭなどの記憶媒体または記憶装置上に記憶された機械可読コードであって、プログラム可能なコンピュータが、本明細書に記載された手順を実行するために、その記憶媒体または記憶装置を読んだときに、そのコンピュータを構成し、動作させるために、そのコンピュータが読むことができるように記憶された機械可読コードとして実現することができる。さらに、機械可読コードまたは機械可読コードの一部を、有線または無線ネットワークを介して伝送することができる。本明細書に記載された発明は、そのような媒体がマイクロプロセッサまたは他のデータ処理装置と連携して上述の諸ステップを実現する命令またはプログラムを含むとき、これらのさまざまなタイプのコンピュータ可読記憶媒体、およびその他のさまざまなタイプのコンピュータ可読記憶媒体を含む。本発明はさらに、本明細書に記載された方法および技法に従ってプログラムされたコンピュータ自体を含む。

【００７７】

入力データに対してコンピュータ・プログラムを適用して、本明細書に記載された機能を実行し、それによって入力データを変換して出力データを生成することができる。この出力情報は、ディスプレイ・モニタなどの１つまたは複数の出力装置に適用される。本発明の好ましい実施形態では、変換されたデータが物理的な実在する物体を表し、これには、その物理的な実在する物体の特定の視覚的描写をディスプレイ上に生成することが含まれる。

【００７８】

本発明の好ましい実施形態はさらに、粒子ビームを使用して試料を画像化するためにＦＩＢ、ＳＥＭなどの粒子ビーム装置を利用する。試料を画像化する目的に使用されるこのような粒子は、本来的に、試料と相互作用し、その結果、ある程度の物理的変化をもたらす。さらに、本明細書の全体を通じて、「計算する」、「決定する」、「測定する」、「生成する」、「検出する」、「形成する」などの用語を利用した議論は、コンピュータ・システムまたは同様の電子装置の動作および処理を指し、そのコンピュータ・システムま

たは同様の電子装置は、コンピュータ・システム内の物理量として表されたデータを操作し、そのデータを、その同じコンピュータ・システムまたは他の情報記憶装置、伝送装置もしくは表示装置内の、物理量として同様に表された他のデータに変換する。

【００７９】

本発明は幅広い適用可能性を有し、上記の例において説明し、示した多くの利点を提供することができる。本発明の実施形態は、具体的な用途によって大きく異なり、全ての実施形態が、これらの全ての利点を提供するわけではなく、本発明によって達成可能な全ての目的を達成するわけではない。本発明を実施するのに適した粒子ビーム・システムは例えば、本出願の譲受人であるＦＥＩ　Ｃｏｍｐａｎｙから市販されている。

【００８０】

上記の説明の多くの部分は半導体ウェーハを対象としているが、本発明は、適当な任意の基板または表面に対して使用することができる。さらに、本発明は、真空室内で薄くし、真空室の外で基板から取り出した試料（ｅｘ　ｓｉｔｕ型試料）、または真空室内のＴＥＭグリッドに取り付けた後で基板から抜き取り、薄くした試料（ｉｎ　ｓｉｔｕ型試料）に対して適用することができる。本明細書において用語「自動」、「自動化された」または同種の用語が使用されるときには常に、それらの用語が、自動プロセスもしくは自動ステップ、または自動化されたプロセスもしくは自動化されたステップの手動開始を含むことが理解される。以下の議論および特許請求の範囲では、用語「含む（ｉｎｃｌｕｄｉｎｇ）」および「備える（ｃｏｍｐｒｉｓｉｎｇ）」が、オープン・エンド（ｏｐｅｎ－ｅｎｄｅｄ）型の用語として使用されており、したがって、これらの用語は、「．．．を含むが、それらだけに限定されない（ｉｎｃｌｕｄｉｎｇ，ｂｕｔ　ｎｏｔ　ｌｉｍｉｔｅｄ　ｔｏ）」ことを意味すると解釈すべきである。用語「集積回路」は、マイクロチップの表面にパターン形成された一組の電子構成部品およびそれらの相互接続（ひとまとめにして内部電気回路要素）を指す。用語「半導体デバイス」は、総称的に、集積回路（ＩＣ）を指し、この集積回路（ＩＣ）は、半導体ウェーハと一体でも、またはウェーハから切り離されていても、または回路板上で使用するためにパッケージングされていてもよい。本明細書では用語「ＦＩＢ」または「集束イオン・ビーム」が、イオン光学部品によって集束させたビームおよび整形されたイオン・ビームを含む、平行イオン・ビームを指すために使用される。

【００８１】

本明細書で特に定義されていない場合、その用語は、その通常の一般的な意味で使用されることが意図されている。添付図面は、本発明の理解を助けることが意図されており、特に明記しない限り、一律の尺度では描かれていない。

【００８２】

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。

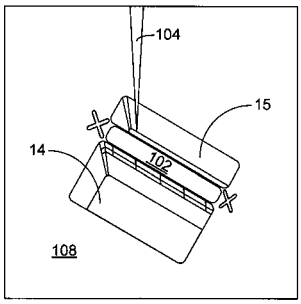
【符号の説明】

【００８３】

７０２　デュアル・ビームＳＥＭ／ＦＩＢシステム
７０４　ＳＥＭビーム
７０４　電子ビーム・カラム
７０６　ＦＩＢ

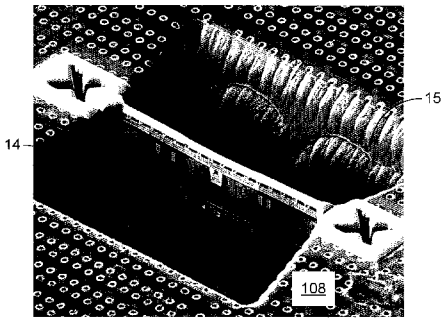
７０６　集束イオン・ビーム・カラム
７０８　標本室
７０９　ポンプ・システム
７１０　電子源
７１８　加工物
７２２　走査型電子顕微鏡電源／制御ユニット
７２４　可動ステージ
７３８　システム・コントローラ
７４０　監視装置
７５６　ＦＩＢ電源／制御ユニット

【図１Ａ】



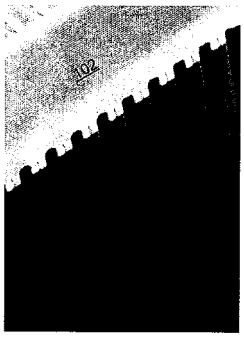
従来技術

【図１Ｂ】



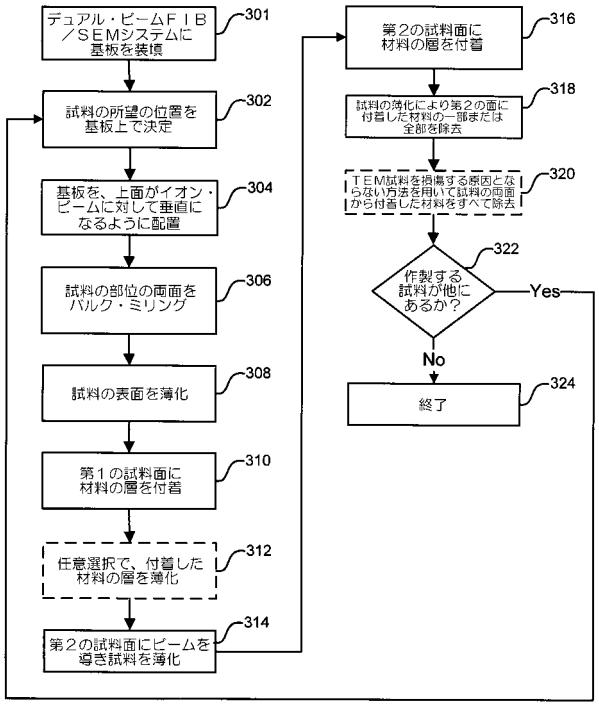
従来技術

【図２】

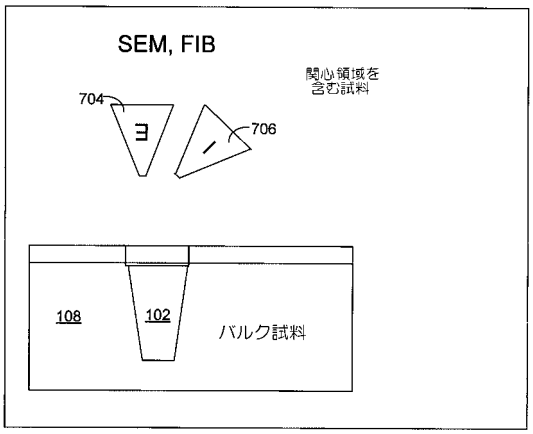


従来技術

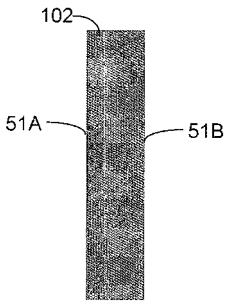
【図３】



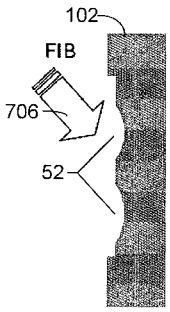
【図４】



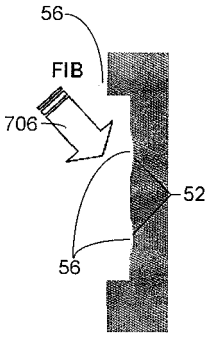
【図５Ａ】



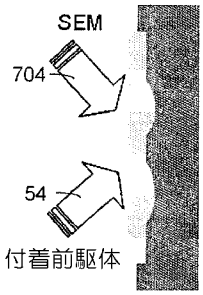
【図５Ｂ】



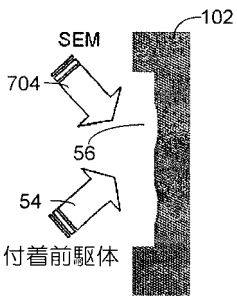
【図５Ｄ】



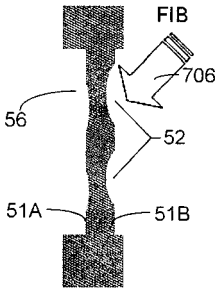
【図５Ｃ】



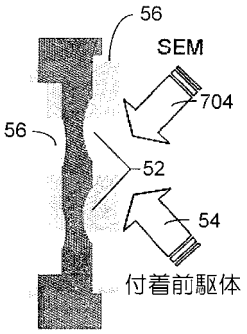
【図５Ｅ】



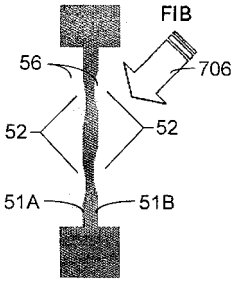
【図５Ｆ】



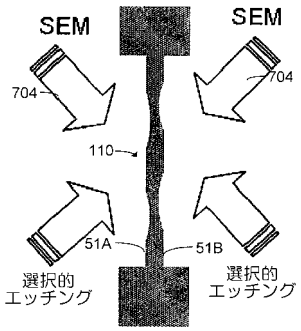
【図５Ｇ】



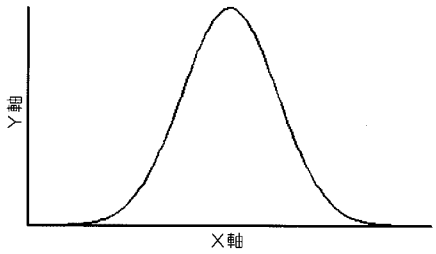
【図５Ｈ】



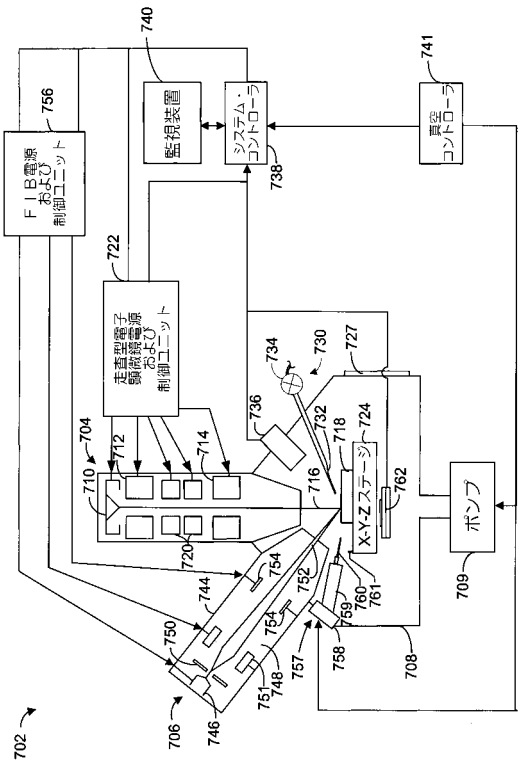
【図５Ｉ】



【図６】



【図７】



フロントページの続き

(72)発明者　ステーシー・ストーン
アメリカ合衆国　９７００６　オレゴン州　ビーバートン　エスダブリュー　ソーサ・プレイス　７９５
(72)発明者　ジェフ・ブラックウッド
アメリカ合衆国　９７２０６　オレゴン州　ポートランド　エスイー　７５番アベニュー　３２０３

Ｆターム(参考) 2G052 EC12 EC14 EC18 FD06 GA34

【外国語明細書】
2012252004000001.pdf
2012252004000002.pdf
2012252004000003.pdf
2012252004000004.pdf