

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6552383号
(P6552383)

(45) 発行日 令和1年7月31日 (2019.7.31)

(24) 登録日 令和1年7月12日 (2019.7.12)

(51) Int. Cl.	F I				
GO 1 N 1/28 (2006.01)	GO 1 N 1/28	G			
HO 1 J 37/317 (2006.01)	GO 1 N 1/28	F			
HO 1 L 21/66 (2006.01)	HO 1 J 37/317	D			
HO 1 L 21/302 (2006.01)	HO 1 L 21/66	N			
	HO 1 L 21/302	2 O 1 B			
請求項の数 19 外国語出願 (全 33 頁)					

(21) 出願番号	特願2015-215353 (P2015-215353)	(73) 特許権者	501419107
(22) 出願日	平成27年11月1日 (2015.11.1)		エフ・イー・アイ・カンパニー
(65) 公開番号	特開2016-105077 (P2016-105077A)		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
(43) 公開日	平成28年6月9日 (2016.6.9)	(74) 代理人	100103171
審査請求日	平成30年10月31日 (2018.10.31)		弁理士 雨貝 正彦
(31) 優先権主張番号	62/077, 148	(72) 発明者	ヴァレリー・ブローデン
(32) 優先日	平成26年11月7日 (2014.11.7)		アメリカ合衆国 97212 オレゴン州
(33) 優先権主張国	米国 (US)		ポートランド エヌイー クリーヴランド・アヴェニュー 4076
早期審査対象出願		(72) 発明者	ジェフリー・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
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 自動化されたTEM試料調製

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

荷電粒子ビーム・システム内での自動化された試料調製の方法であって、

集束イオン・ビームを含む複数の荷電粒子ビーム・システムおよび試料操作プローブを有する真空室内に加工物を装填することと、

前記加工物の薄い切片の周囲の材料を、前記集束イオン・ビームを使用して、小さな取付け構造体によって大きな加工物に取り付けられた前記薄い切片を残して除去することと、

前記集束イオン・ビームを使用して前記試料操作プローブの先端の材料を除去することによって、前記試料操作プローブの前記先端を機械認識が可能な形状に整形することと、

前記薄い切片に対する前記先端の位置を決定するために、前記先端の機械認識が可能な形状および前記複数の荷電粒子ビーム・システムのうちの2つからの画像を使用することと、

前記薄い切片に対する前記先端の位置を使用し、荷電粒子ビーム誘起付着を使用して前記試料操作プローブを取り付けるために、前記試料操作プローブを前記薄い切片に近接して自動的に移動させることと、

前記試料操作プローブを前記薄い切片に取り付けることと、

前記薄い切片が前記試料操作プローブだけによって支持されるように、前記小さな取付け構造体を切り離すことと、

前記薄い切片が、荷電粒子ビーム誘起付着を使用して前記薄い切片を試料グリッドに取

10

20

り付けるために、薄い試料を保持する前記試料グリッドの近くにくるように、前記試料操作プローブを自動的に移動させることと、

前記薄い切片を前記試料グリッドに取り付けることと、

前記薄い切片から前記試料操作プローブの前記先端を取り外すこととを含む方法。

【請求項 2】

前記薄い切片が断面観察用の切片である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記試料操作プローブの移動を誘導するために、画像解析を使用することをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

10

【請求項 4】

前記先端を鑿形に整形することをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

前記試料操作プローブを前記薄い切片または前記試料グリッドまで移動させるための軌道を決定するために、前記試料操作プローブの位置を画像解析を使用して特定することをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 6】

前記画像解析が画像減算を使用する、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

前記試料操作プローブと前記薄い切片の間の X Y ベクトルを、第 1 の荷電粒子ビーム・システムによる画像に基づいて計算し、前記試料操作プローブと前記薄い切片の間の Z ベクトルを、第 2 の荷電粒子ビーム・システムによる画像に基づいて計算することをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

20

【請求項 8】

前記試料操作プローブから前記薄い切片が取り外された後に前記先端を再整形することをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 9】

前記薄い切片の側面の関心領域から離れた位置に前記試料操作プローブを取り付けることをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 10】

30

前記薄い切片が前記試料グリッドに取り付けられた後に前記薄い切片をさらに薄くすることをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 11】

荷電粒子システム内での自動化された試料調製のための装置であって、
加工物を収容する真空室と、
前記真空室内の前記加工物を画像化し、前記加工物に対して作用する荷電粒子ビームを生成する少なくとも 2 つの荷電粒子ビーム・カラムと、
前記真空室内の前記加工物を保持し、前記加工物を移動させる可動試料ステージと、
前記荷電粒子ビームが衝突したときに試料から放出された荷電粒子から画像を形成する荷電粒子検出器と、

40

サブミクロンの位置決めが可能な試料操作プローブと、
荷電粒子ビーム誘起付着用の前駆体ガスを供給するガス噴射システムと、
前記装置の動作を制御する制御装置と、
前記制御装置によって実行される、請求項 1 に記載の方法を実行するためのコンピュータ命令を記憶するコンピュータ可読の記憶装置と
を備える装置。

【請求項 12】

2 つの荷電粒子ビーム・カラムを含む、請求項 11 に記載の装置。

【請求項 13】

前記加工物を画像化し、前記加工物に対して作用する荷電粒子ビームを生成する前記少

50

なくとも2つの荷電粒子ビーム・カラムが、電子ビーム・カラムおよびイオン・ビーム・カラムを含む、請求項11に記載の装置。

【請求項14】

前記コンピュータ記憶装置が、前記荷電粒子ビームによって形成された画像を解析するためのコンピュータ命令を含み、この画像解析が、薄い切片が取り付けられた前記試料操作プローブの位置または薄い切片が取り付けられていない前記試料操作プローブの位置を特定するようにプログラムされている、請求項11に記載の装置。

【請求項15】

前記画像解析が画像減算を使用して実行される、請求項14に記載の装置。

【請求項16】

前記集束イオン・ビームが前記試料操作プローブの先端を鑿形に形成するようにするコンピュータ命令を前記コンピュータ記憶装置を含む、請求項14に記載の装置。

【請求項17】

前記荷電粒子ビームのうちの少なくとも1つが集束イオン・ビームである、請求項11に記載の装置。

【請求項18】

荷電粒子ビーム・システム内での自動化された試料調製の方法であって、

複数の荷電粒子ビーム・システムおよび試料操作プローブを含む真空室内に加工物を装填することと、

前記試料操作プローブを、新たな形状へと自動的に物理的に再整形することと、

画像認識ソフトウェアおよび前記複数の荷電粒子ビーム・システムのうちの2つからの画像を使用して、再整形後の前記試料操作プローブの位置を自動的に決定することと、

前記加工物の一部分から試料を形成するために、荷電粒子ミリング操作を自動的に実行することと、

前記加工物から前記試料を取り出すために、再整形後の前記試料操作プローブを使用することと

を含む方法。

【請求項19】

前記試料操作プローブを再整形することが、プローブ先端を直方柱の形状にすることを含む、請求項18に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、荷電粒子ビーム・システムで観察するための試料の自動化された調製に関する。

【背景技術】

【0002】

半導体回路製造法ならびに他のマイクロスコピックおよびナノスコピック製造技法は、改良された分解能を有する新しい画像化技法の開発を必要としている。改良された画像化技法は生命科学でも必要とされている。電子顕微鏡法、イオン顕微鏡法などの荷電粒子ビーム顕微鏡法は、光学顕微鏡法よりもかなり高い分解能および大きな焦点深度を提供する。走査電子顕微鏡（SEM）では、1次電子ビームを微小なスポットに集束させ、観察しようとする表面をそのスポットで走査する。表面に1次電子ビームが衝突すると、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、画像を形成する。このとき、画像のそれぞれの点の輝度は、その表面の対応するスポットに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される。SEMは、2次電子の代替として後方散乱電子からも画像を形成することができる。走査イオン顕微鏡法（SIM）は、走査電子顕微鏡法と似ているが、表面を走査し、2次電子を放出させる目的にイオン・ビームを使用する。イオン顕微鏡は、2次イオンを使用して画像を形成することもできる。

【0003】

10

20

30

40

50

透過電子顕微鏡（TEM）では、幅の広い電子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、反対側から出てくることを可能にするため、試料は十分に薄くなければならない。試料の厚さは通常200nm未満であるが、それよりもずっと薄いこともしばしばである。

【0004】

走査透過電子顕微鏡（STEM）では、1次電子ビームを微小なスポットに集束させ、そのスポットで試料表面を走査する。加工物を透過した電子を、試料の向こう側に置かれた電子検出器によって集める。画像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。本明細書で使用する用語「TEM試料」はTEMまたはSTEM用の試料を指し、TEM用の試料を調製するときには、STEMで観察するための試料を調製することも含まれると理解される。

10

【0005】

TEM試料は非常に薄いため、試料の調製は、繊細で時間のかかる作業となる。薄い試料、特に厚さ100nm未満の試料の厚さに変動があると、試料が曲がったり、過剰にミリング（milling）してしまったり、または他の致命的な欠陥が生じたりすることがある。調製技法が、構造の特性評価の質、および最も小さく最も決定的な構造体の分析能力を決定する。

【0006】

加工物上で試料がどのような向きにあるかによって、TEM試料を、「断面視（cross-sectional view）」試料または「平面視（planar view）」試料に大まかに分類することができる。試料の観察しようとする面が加工物の表面に対して平行である場合、その試料は「平面視」試料と呼ばれる。観察しようとする面が加工物表面に対して直角である場合、その試料は「断面視」試料と呼ばれる。

20

【0007】

TEM試料を調製するいくつかの技法が知られている。いくつかの技法は、クリーピング（cleaving）、化学研磨、機械研磨、またはブロード・ビーム低エネルギー・イオン・ミリング（broad beam low energy ion milling）を含むことができる。これらの技法の組合せも可能である。これらの方法は、出発材料を次第に小さな材料片に切断していくことをしばしば必要とし、それによって原試料の多くの部分が破壊されるため、不利である。これらの方法は一般に、特定の部位だけを処理する（site specific）のではない。

30

【0008】

「リフトアウト（lift-out）」手順と一般に呼ばれている他の技法は、集束イオン・ビーム（FIB）を使用して基板から試料を切り出し、その間、基板の周囲のエリアに対する損傷を大幅に限定しまたは排除する。この技法は、例えば半導体製造の結果を分析するのに役立つ。リフトアウト技法を使用して、断面視、平面視など、任意の向きに試料を分析することができる。いくつかの技法は、追加の調製なしでTEMにおいて使用することができる十分な薄さの試料を抜き取る。他の技法では、抜き取った試料を、観察する前にさらに薄くする。

【0009】

40

FIB真空室内で基板から試料を抜き取り、試料ホルダに移動させる技法は、「原位置（in-situ）」技法と呼ばれる。真空室から加工物を取り出した後に加工物から試料を取り出し、試料ホルダに移動させる技法は、「外位置（ex-situ）」技法と呼ばれる。

【0010】

断面試料は通常、イオン・ビームを用いたミリングによって材料を除去して、関心の領域の両側にトレンチを形成し、それによって「薄片（lamella）」と呼ばれる薄い切片を残すことによって、より大きなバルク（bulk）試料から調製される。少量の材料のみで薄片が基板に接続されるようになるまで、薄片の底部および側部の周囲をイオン・ビーム・ミリングすることによって、薄片は試料基板から部分的に切り離される。いく

50

つかのケースでは、この接続材料が、両側部の「タブ (t a b) 」である。原位置プロセスでは、次いで、この薄い試料のすぐ近くに試料操作プローブを置く。このプローブは通常、前駆体ガスからの材料のビーム誘起付着によってこの薄い試料に取り付けられるが、静電取付けなど、他の方法を使用することもできる。ビーム付着は、F I BまたはS E Mによって実行することができる。次いで、この薄い試料を加工物に接続している材料をミリングによって除去して（または機械的に破壊して）、操作プローブだけに接続した試料を残す。次いで、このプローブを、取り付けられた試料とともに、異なる位置へ移動させることができ、そこで、「グリッド (g r i d) 」と呼ばれるT E M試料ホルダに試料を取り付けることができる。T E Mグリッドの選択された部分のすぐ近くにプローブを置き、通常はビーム誘起付着によって、薄片をグリッドに取り付ける。試料をグリッドに取り付けた後、例えばF I Bを用いて接続を切ることによって、または単にプローブおよび/または試料を移動させて接続を破壊することによって、試料プローブを試料から取り外すことができる。グリッドに取り付けた後に薄片をさらに処理することができる。

10

【 0 0 1 1 】

薄片を形成し、抜き取り、それを試料グリッドに移すプロセスは繊細で時間のかかる手順であり、しばしば1試料あたり約45から90分を要し、熟練したオペレータの不断の注意を必要とする。半導体ウェーハ上の関心領域を完全に分析するためには、例えば15から50またはそれ以上のT E M試料を分析することが望ましいことがある。このような多くの試料を抜き取り測定しなければならないときには、1つのエリアの試料を処理する総時間が数時間から数日にもなることがある。このように、T E M分析によって得ることができる情報が非常に価値の高いものであることがあるにしても、このプロセスは、製造プロセス制御および他のルーチンの手順に膨大な時間を消費する。

20

【 0 0 1 2 】

したがって、画像化用に薄片を調製する速度を高めると、分析用に選抜した加工物を生産ラインにより早く戻すことが可能になることにより、時間と潜在的な収益の両面でかなりの利点が提供される。この薄片調製プロセスを自動化すると、プロセスの速度が上がるだけでなく、オペレータに対して求められる専門技能のレベルが低下する。このことは製造業者にとって有利である。それに加えて、熟練したオペレータは、自動操作が実行されている間に別の作業を実行することができ、それによって手順のスループットが増大する。

30

【 0 0 1 3 】

薄片をミリングし、抜き取り、移し、試料グリッド上に置くのに必要な精度のため、このプロセスは自動化に適合しなかった。薄片が薄くなるにつれて、薄片から関心領域が除外される可能性は高くなる。厚さ100nm未満の薄片、特に70nm未満の薄片は、手動でもまたは自動でも形成するのが難しい。

【 0 0 1 4 】

薄片は、薄くなると、熱応力または機械的応力によりゆがむことがあり、それによってビームに対する薄片の位置が変化することがある。薄片の位置が変化すると、ビームが関心領域に衝突することが可能になることにより、薄片が使い物にならなくなることがある。薄片の厚さに変動があると、試料が曲がったり、過剰にミリングしてしまったり、または他の致命的な欠陥が生じたりすることがあり、これらは試料を使用不能にする。それに加えて、薄片を操作する試料プローブは、薄片を基板から抜き取る準備をするとき、および試料グリッド上に薄片を降着させるときに、極めて高い精度で配置されなければならない。これらの因子が相まって、分析用の薄片の調製は、自動化が著しく困難なプロセスとなっている。

40

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 1 5 】

【 特許文献 1 】 米国特許出願公開第 2 0 1 3 / 0 2 4 8 3 5 4 号明細書

【 特許文献 2 】 米国特許第 6 , 8 8 9 , 1 1 3 号明細書

【 発明の概要 】

50

【発明が解決しようとする課題】

【0016】

本発明の目的は、試料調製手順の一部または全部の自動化である。

【課題を解決するための手段】

【0017】

既存の手動ワークフローは自動化するのが困難であるため、本発明は、自動化を可能にするように特に設計された新しい方法論を含む。試料調製はいくつかのステップを含み、本明細書は、いくつかのステップの改良を記載する。本発明のいくつかの実施形態は、薄片、プローブおよび/またはTEMグリッドの位置を、マシンビジョンを使用して決定して、薄片へのプローブの取付けおよびTEMグリッドへの薄片の取付けを誘導することを含む。いくつかの実施形態では、薄片および/またはプローブ上に荷電粒子ビームによって形成された「基準マーク (fiducial)」として知られる基準構造体を使用して、薄片の近傍に先端を誘導すること、ならびに薄片へのプローブの取付けおよびTEMグリッドへの薄片の取付けを誘導することができる。基準マークは、表面に構造体をミリングすることによってまたは表面に材料を付着させることによって形成することができる。いくつかの実施形態は、減算画像化 (subtractive imaging) ルーチンを使用して、薄片および先端の位置を、画像解析を使用することによって特定する。薄片に取り付ける前にプローブ先端を自動的に終始一貫した形状に形成することによって、プローブ先端の機械識別を支援することができる。次いで、薄片を加工物から切り離し、プローブと一緒に持ち上げることができる。厚さ、位置などの薄片特性の計測値をフィードバック機構として使用して、自動化の性能を改良することもできる。

【0018】

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大まかに概説した。以下では、本発明の追加の特徴および本発明の利点を説明する。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。

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】薄片の原位置形成および抜取りの概要を示す流れ図である。

【図2】計画された薄片形成操作を示す図である。

【図3】図2の操作に従って形成された、加工物からまだ抜き取られていない薄片を示す図である。

【図4】プローブを薄片に取り付ける自動化された方法を示す流れ図である。

【図5】図3の薄片に取り付けられているプローブを示す図である。

【図6】プローブ先端の自動化された整形方法を示す流れ図である。

【図7】プローブ針の上縁を見つけるために用いられたエッジ・ファインダ (edge finder) を示す図である。

【図8】図7のプローブ針の下縁を見つけるために用いられたエッジ・ファインダを示す図である。

【図9】図7の針の上縁の端を見つけるために使用されたエッジ・ファインダを示す図である。

【図10】針上でのミリング操作を指示するために針上に置かれたミリング・ボックス (mill box) を示す図である。

【図11】図10のミリング・ボックスによってミリングされた表面に対して断面クリーニング (cleaning cross section) を適用するためのミリング・ボックスを示す図である。

【図12】図11の断面クリーニングを適用した後の針を示す顕微鏡写真である。

【図 1 3】斜めに切られたプローブ先端を示す図である。

【図 1 4】図 1 3 の斜めの先端が薄片とどのように係合するのかを示す図である。

【図 1 5】図 1 3 の斜めの先端を切削するのに使用するミリング・ボックスを示す図である。

【図 1 6】リフトアウトのために薄片に接近しているプローブ先端の形状と配置を示す図である。

【図 1 7 a】薄片に対するプローブ先端の位置を決定するための画像減算 (i m a g e s u b t r a c t i o n) 法で使

用される画像化の図である。

【図 1 7 b】薄片に対するプローブ先端の位置を決定するための画像減算法で使

用される画像化の図である。

【図 1 7 c】薄片に対するプローブ先端の位置を決定するための画像減算法で使

用される画像化の図である。

【図 1 7 d】薄片に対するプローブ先端の位置を決定するための画像減算法で使

用される画像化の図である。

【図 1 7 e】薄片に対するプローブ先端の位置を決定するための画像減算法で使

用される画像化の図である。

【図 1 7 f】薄片に対するプローブ先端の位置を決定するための画像減算法で使

用される画像化の図である。

【図 1 8】薄片上にミリングされた基準マークを示す図である。

【図 1 9】プローブ先端にミリングされた基準マークを示す図である。

【図 2 0 a】プローブ先端の位置を決定する画像減算法を示す流れ図である。

【図 2 0 b】プローブ先端の位置を決定する画像減算法を示す流れ図である。

【図 2 1】薄片をプローブに取り付ける方法を示す流れ図である。

【図 2 2 a】薄片の位置を決定する画像減算法を示す流れ図である。

【図 2 2 b】薄片の位置を決定する画像減算法を示す流れ図である。

【図 2 3 a】上面画像 (t o p d o w n v i e w) 内の薄片および T E M グリッドの位置を決定するための画像減算で使

用される画像を示す図である。

【図 2 3 b】上面画像内の薄片および T E M グリッドの位置を決定するための画像減算で

使用される画像を示す図である。

【図 2 3 c】上面画像内の薄片および T E M グリッドの位置を決定するための画像減算で

使用される画像を示す図である。

【図 2 3 d】上面画像内の薄片および T E M グリッドの位置を決定するための画像減算で

使用される画像を示す図である。

【図 2 4】T E M グリッドに接近している薄片の形状と配置を示す図である。

【図 2 5 a】薄片と T E M グリッド上の取付け点の間の z 座標の差を決定するための画像

減算の使用を示す図である。

【図 2 5 b】薄片と T E M グリッド上の取付け点の間の z 座標の差を決定するための画像

減算の使用を示す図である。

【図 2 6 a】角度のついた画像内の薄片と T E M グリッドの z 座標の差を決定するための

画像減算で使

用される画像を示す図である。

【図 2 6 b】角度のついた画像内の薄片と T E M グリッドの z 座標の差を決定するための

画像減算で使

用される画像を示す図である。

【図 2 6 c】角度のついた画像内の薄片と T E M グリッドの z 座標の差を決定するための

画像減算で使

用される画像を示す図である。

【図 2 6 d】角度のついた画像内の薄片と T E M グリッドの z 座標の差を決定するための

画像減算で使

用される画像を示す図である。

10

20

30

40

50

【図26e】角度のついた画像内の薄片とTEMグリッドのz座標の差を決定するための画像減算で使用する画像を示す図である。

【図26f】角度のついた画像内の薄片とTEMグリッドのz座標の差を決定するための画像減算で使用する画像を示す図である。

【図27】TEMグリッドに取り付けられている薄片を示す図である。

【図28】TEMグリッドに取り付けられた薄片から切り離されているプローブを示す図である。

【図29】薄くされている、TEMグリッドに取り付けられた薄片を示す図である。

【図30】本明細書に記載された自動薄片調製ステップを実行するのに適したデュアル・ビーム・システムを示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0020】

本発明の好ましい実施形態は、TEM分析用の薄い薄片を製作するさまざまな態様を対象とし、これには、完全にまたは部分的に自動化された手順による薄片の抜き取り、移送およびその後の分析用試料グリッドへの取付けが含まれる。

【0021】

以下で説明する方法は、信頼性を増大させて、薄片の製作および調製におけるそれぞれのステップの自動化を容易にする。

【0022】

本発明のいくつかの実施形態は、真空室内で試料を処理するように組み合わせられた走査電子顕微鏡(SEM)と集束イオン・ビーム・システム(FIB)とを備えるデュアル・ビーム荷電粒子システムを使用する。電子ビームは高分解能画像を生成することができ、イオン・ビームは、試料をミリングして薄片を形成することができる。イオン・ビームは画像化にも使用されるが、画像化中に加工物を傷つける。これらの2つのビームは、異なる2つの視点から画像を形成することを可能にし、それにより、異なる視点からの画像を組み合わせることによって、3次元空間内の物体の位置を決定することを可能にする。SEMおよびFIBはともに材料を付着させることができる。SEMおよびFIBはともに材料を除去することもできる。

【0023】

本発明の実施形態は、半導体ウェーハの分析、品質管理および/または故障解析に使用することができ、生命科学、材料科学、および他の分野の試料の観察に使用することもできる。関心領域(ROI)が、最新のフォトリソグラフィ・プロセスでは寸法が数十ナノメートル程度である特定の1つの論理セルであることはしばしばであり、ROIが薄片に含まれていることを保証することが難しいことがある。

【0024】

薄片を製造する方法および原位置試料調製の方法は例えば、Keady他の「High Throughput TEM Preparation Processes and Hardware for Backside Thinning of Cross-Sectional View Lamella」という名称の米国特許出願公開第2013/0248354号明細書に記載されている。この出願は、本発明の譲受人に譲渡されており、参照によって本明細書に組み込まれる。本出願は、原位置試料調製のステップを実施する自動化可能な技法を記載する。

【0025】

いくつかの実施形態は、画像認識ソフトウェアを使用して、プローブを薄片に自動的に取り付けるときおよび/または薄片をTEMグリッドに取り付けるときにプローブの移動を指示する。本明細書には、画像認識を容易にする複数の技法が記載される。さまざまな実施形態は、それらの技法のうちの1つの技法またはそれらの技法の任意の組合せを使用することができる。以下に示す技法は例えば、容易に認識することができる既知の外観をプローブ先端が示すようにし、プローブ先端の位置を高い信頼性で識別することができるようにする、プローブ先端の自動ミリングを記載する。プローブ上に基準マークをミリン

10

20

30

40

50

グすることも記載される。この基準マークも、プローブ先端の位置を高い信頼性で識別することを可能にする。一連の画像を使用して、関心の物体を画像と画像の間で移動させ、次いでそれらの画像の減算を実行して、移動していない背景を排除することにより、プローブ先端、薄片、TEMグリッドなどの物体の位置を高い信頼性で識別する、画像減算技法の使用も記載される。全ての用途でこれらの全ての技法を使用する必要があるわけではない。例えば、既知の形状を有するプローブを使用すると、用途によっては、プローブ上の基準マークが必要なくなる。減算画像化を使用してプローブの位置を識別すると、プローブ上の基準マークの必要性が排除される場合がある。

【0026】

画像認識は、「エッジ・ファインダ」などの知られているソフトウェア計測ツールを使用することができる。それらのツールは、関連する機能を有するアイコン (icon) であり、荷電粒子ビーム画像上に置かれて、アイコン内または他の場所にある縁を、コントラストの変化を使用して認識する。このようなツールは、Tasker 他「Graphical automated machine control and metrology」という名称の米国特許第6,889,113号明細書の中でより詳細に説明されている。この特許は参照によって本明細書に組み込まれる。

【0027】

グラフィカル・ソフトウェアを使用してFIB操作を制御することができ、このソフトウェアでは、スクリーン上のボックスが、画像中のそのボックス内に示された試料の部分に対して実行する操作を指定することができる。以下では、このようなツールを例えば「ミリング・ボックス」と呼ぶ。ミリング・ボックスは、ミリングの位置およびビーム・パラメータを指定する。

【0028】

原位置薄片採取プロセスの概要

図1は、原位置薄片製造プロセスの諸ステップの概要を示す流れ図である。ステップ102で、半導体ウェーハなどの加工物200 (図2) をデュアル・ビーム・システムの真空室 (図示せず) に挿入する。ステップ104で、加工物の関心領域202を、例えば検査データ、試験データおよび/またはCADデータを使用して識別する。図2は、関心領域202を含む塊204を含む加工物200を示す。この体積204を、イオン・ビーム206によって薄片にする。薄片を抜き取る間および薄片を薄くする間の損傷から関心領域を保護するため、ステップ106で、保護層208を付着させる。ステップ108で、関心領域に隣接した位置に、処理用のイオン・ビーム206の位置合せまたはプローブの位置決め基準点の役目を果たす1つまたは複数の基準マーク210をミリングする。

【0029】

ステップ110で、関心領域の両側にトレンチをミリングし、図3に示されているように薄い薄片309を残す。薄片の調製中にスパッタリングされた材料が薄片に再付着しないように、いくつかの実施形態では、薄片の下に、FIBを使用して追加の切削部を形成する。図3は、関心領域202を含む薄片309を残すためにイオン・ビーム206によってトレンチ305がミリングされた加工物200の一部分を示す。しばしば、薄片の小さな領域または窓 (図示せず) がさらに薄化される。この際、薄片の残りの部分は、機械的安定性を維持するのに十分な厚さのまま残される。この薄化操作は、基板から薄片を抜き取る前に、薄片が針上にある間に、または薄片がグリッドに取り付けられた後に実行することができる。

【0030】

ステップ112で、イオン・ビームが、薄片の側部およびの底部の周囲をミリングし、取付けタブ308によって加工物に取り付けられた薄片を残す。取付けタブの位置および数は、このワークフローの必要性に応じて変更することができる。

【0031】

薄片上の基準マークの製造

任意選択のステップ114で、薄片309に基準マーク306を形成する。図18は、

10

20

30

40

50

基準マーク 306 がミリングされた薄片 309 を示す顕微鏡写真である。いくつかの実施形態では、基準マーク 306 が、X - Y 平面における薄片 309 と TEM グリッドの位置合せ、および続く Z 方向のグリッドの降着を容易にする。基準マークは、FIB を使用してミリングすることによって、または FIB もしくは SEM を使用して材料を付着させることによって形成することができる。基準マークは単なる基準ターゲットであるため、付着を使用して基準マークを形成することも、または除去を使用して基準マークを形成することもできる。基準マーク 306 が関心領域の画像化に影響を及ぼさないように、この基準マークは、表面の関心領域から十分に離れた位置に、好ましくは TEM グリッドに溶接する部分に形成する。本明細書で使用する時、用語「溶接」は、ビーム誘起付着によって材料を付加して取付け部を形成することを指し、冶金の場合のように、表面を溶かし充填材料を追加し、その材料が冷えて、金属を溶接する場合のような結合部を形成することを言うのではない。溶接部は、FIB 付着によって、SEM 付着によってまたは他のある方法によって形成することができる。この基準マークはさらに、薄化するプロセスの間に、特徴部分 (feature) が薄くなるにつれてそれらの特徴部分がどのように変化しているのかを追跡するのに役立つことがある。この基準マークは、原位置 STEM を実行しようとする場合、または独立型 S / TEM で特定のゲートの位置を特定しようとする時にも役立つ。

【0032】

この基準マークの形状は加工物に応じて変更される。電子回路試料のフィーチャは角張っている傾向があるため、電子回路に対しては円形の基準マークを選択するとよい。生命科学では、試料のフィーチャが丸みを帯びていたり曲線状だったりする傾向があるため、正方形の基準マークが必要となることがある。この基準マークの形状はケース・バイ・ケースで変更することができる。この基準マークは、薄片の表面にミリングされた形状を含み、または薄片を貫通して延びる特定の形状の穴を含むことができる。

【0033】

グリッド降着中には、FIB 画像の上半分または SEM 画像の下半分の何も無い空間に他のフィーチャがないため、いくつかの用途では、この基準マークが、TEM グリッドへの薄片の取付けの成功率を向上させる。薄片を裏返した後に薄片の位置を正確に特定することをより容易にすることにより、この基準マークを使用して、マニピュレータの回転位置合せを微調整することもできる。

【0034】

ステップ 115 で、プローブ先端 310 を有する試料プローブ 301 を薄片 309 に接触させ、または薄片 309 の近くに置く。後述するように、マシンビジョンを使用して、プローブ先端を見つけ、プローブ先端を薄片に対して移動させることによって、ステップ 115 を自動化することができる。

【0035】

薄片へのプローブの取付け

図 4 は、図 5 および 16 に示されている、プローブ先端を薄片に自動的に取り付ける方法を示す流れ図である。いくつかの実施形態では、最初に、プローブ先端および薄片上の取付け点の x - y 平面内における位置を特定し、次いで、プローブ先端を、x - y 平面内において、取付け点の x - y 座標まで移動させる。次いで、後述するように、表面に対して直角でないビームによって得た画像でプローブ先端および取付け点の位置を特定して、プローブ先端および取付け点の Z 座標を決定することができるようし、プローブ先端を Z 方向に取付け点まで移動させる。他の実施形態では、異なる経路に沿ってプローブが取付け点まで移動してもよく、異なる変位ベクトルを計算することができる。「物体の位置を決定する」および同様の言い回しは、物体の縁の位置または物体上の点の位置を決定することを含むことが理解される。この物体の縁の位置または物体上の点の位置の決定はしばしば、1 つの物体の縁もしくは点を移動させて、別の物体の縁もしくは点の近くに置くこと、または別の物体の縁もしくは点に接触させることを目的とする。

【0036】

ステップ402で、薄片309のそばの加工物上の基準マーク210の位置を、電子カラム1604からの電子ビームによって生成された上面画像を使用して特定する。ステップ404で、プローブ先端310を薄片309に溶接する位置503を、基準マーク210からのオフセット1602として決定する。これは、薄片309が、基準マーク210から既知の方向かつ既知の距離のところに位置するためである。ステップ406で、電子ビーム・カラム1604からの上面画像内で、プローブの先端310のx-y平面内における位置を特定する。ステップ408で、x-y平面内における先端310の位置とx-y平面内における薄片上の溶接位置503の位置との間のベクトル V_{x-y} (図16)を計算する。溶接位置503の位置は、基準マーク210からのオフセット1602によって決定される。ステップ410で、プローブ301を、ステージに対して平行な平面内において、計算されたベクトル距離 V_{x-y} だけ移動させて、プローブが、プローブを取り付ける薄片の面の上方に位置するようにする。

【0037】

ステップ412で、図16に示された傾けられたイオン・カラム1606の視点からの画像を使用して、針の先端310の位置を特定する。ステップ413で、加工物上の基準マーク210の位置を特定する。ステップ414で、薄片上の溶接位置とプローブ先端310との間のベクトル V_z を計算する。溶接位置は、基準マーク210からの既知のオフセットによって決定される。ステップ416で、ステージの平面に対して垂直なこのベクトルに沿った移動を使用して、プローブを、計算されたベクトル距離 V_z だけ移動させる。 V_z を決定する際には、三角法スカラーを使用して、イオン・カラム1606の斜めからの視点に対応する。すなわち、イオン・ビーム画像によるz距離を、イオン・ビームと表面法線の間の角度の正弦で除して、 V_z の大きさを決定する。図16は、薄片の表面に取り付けられたプローブを示しているが、薄片の上面にプローブを溶接することもできる。薄片の上面の代わりに薄片の表面にプローブ先端310を溶接することによって、プローブのZ方向の位置決めの重要性が低下する。薄片の上面へのZ位置決めに誤差があると、薄片が損傷する可能性がある。プローブ先端と薄片の側面との間にわずかな隙間がある場合、その隙間は溶接操作中に埋められる。

【0038】

プローブを薄片に取り付ける図1のステップ116は、ステップ418に示されているように、この画像上の薄片309に接触したプローブ先端310の位置に溶接ボックスを置くことによって実施することができる。プログラムは次いで、ビーム誘起付着による溶接に適したビーム・パラメータを使用して溶接位置でラスタリング(rastering)するようイオン・ビーム・カラムに指示する。ステップ420で、プローブ先端310を薄片309に溶接する。図5は、ガス噴射ノズル510によって導入されたW(CO)などの前駆体ガスを分解して材料503を付着させることによって、薄片309に取り付けられているプローブ先端310を示す。いくつかの実施形態では、プローブ先端310を薄片の上面に取り付ける。他の実施形態では、プローブ先端310を、薄片の側面の関心領域202から十分に離れた位置に取り付ける。自動化されたプロセスに関しては、薄片を上面を通して取り付けるよりも、側面に取り付けた方が容易であることがある。プローブを、Z方向に、薄片に近い位置または薄片に接触する位置まで下ろすことができる。プローブは、固定された単一のZ値を有する上面ではなく、Z方向に延びる側面にあるため、取付け部のZ寸法が正確であるかどうかは重要ではない。

【0039】

この手順は次いで図1のステップ118へ進む。ステップ118では、タブ308を切断して、プローブ301に取り付けられた薄片を基板から分離する。ステップ120で、薄片をTEMグリッドへ移動させる。これについては後により詳細に説明する。ステップ122で、薄片をTEMグリッドに取り付ける。

【0040】

ステップ406および412では、ビームによって形成された画像中でプローブの位置を特定する必要がある。これは画像解析、つまりパターン認識または小塊検出(blob

10

20

30

40

50

finding)によって実行することができる。プローブと薄片の間の近接または接触の判定は、電気回路を使用してプローブと薄片の間の接触を検出することによって、または静電容量センサを使用して近接を感知することによって支援することができる。このガイド方法が画像解析法である場合には、プローブ先端が認識可能な形状を有することを保証することによってプローブ先端の発見が容易になる。プローブ先端が認識可能な形状を有することを保証する1つの方法は、イオン・ビーム・ミリングによってプローブ先端を自動的に整形する方法である。

【0041】

プローブ先端の整形

図6は、プローブ先端を自動的に整形する方法を示す流れ図である。図7および8に示されているように、プローブ700の太い部分を針702、細くされた部分を先端704、針が先端に変わる領域を肩705と呼ぶ。針は通常、約10度から約13度の間の角度で次第に細くなる。しかしながら、まっすぐな針を使用することもできる。ステップ602で、プローブを移動させて、プローブ先端が、イオン・ビームの視野の中心706の近くに位置するようにする。ステップ604で、図7に示されているように、針702の画像上にエッジ・ファインダ・ツール708を置き、それを使用して針の上縁710を見つける。ステップ606で、図8に示されているように、この画像上にエッジ・ファインダ・ツールを置き、それを使用して針の下縁を見つける。ステップ604および606は協力して針軸の「Y」位置を決定する。針軸の「Y」位置は、上縁と下縁の間の中央である。

【0042】

ステップ608で、針702の上縁を包含し下縁を包含しないより短いエッジ・ファインダ902(図9)を、針702の上縁に沿って移動させ、これを、エッジ・ファインダが針の上縁を見失うまで繰り返す。エッジ・ファインダが針の上縁を見失った点が、既存の針702の上縁の最大範囲および先端704の始まりを示す。所望の長さおよび幅を有する先端を形成するため、ステップ610で、ミリング・ボックス1002(図10)を置いて針をミリングする。既存の先端の端に対応する視野の中心からミリング・ボックスの反対端までの長さが、新しい先端の長さを決定する。針の軸からミリング・ボックス1002まで距離が、新しい先端の太さの1/2を決定する。いくつかの実施形態では、先端の太さが、10ミクロン未満であることが好ましく、5ミクロン未満であることがより好ましく、3ミクロン未満であることがよりいっそう好ましく、約2.5ミクロンであることが最も好ましい。ステップ612で、プローブの所望の先端長さの始まりからプローブ先端908の端までを画像の中心に置く。ステップ612でのミリングは、3nAから30nAの間、より好ましくは5nAから20nAの間、よりいっそう好ましくは約8nAから15nAの間の大きなビーム電流でのバルク・ミリングである。ステップ614で、同様のミリングを実行して、所望のプローブ先端よりも下方の材料を除去する。図11は、先端の長さを延ばすこのバルク・ミリングが完了した後の針を示す。

【0043】

ステップ614および616のバルク・ミリングの後、ステップ618で、プローブ先端の全長に沿って断面クリーニング(cleaning cross section)を実行する。「断面クリーニング」は、最終的な切削面位置に向かってゆっくりと進むライン・ミリングであり、所望の最終切削面に対して平行なラインに沿ってビームが前後に掃引し、間隔を置いて、所望の最終切削面に向かってラインを前進させ、これを所望の最終切削面に達するまで続ける。この間隔は、ミリングの放射線量(dose)によって決定される。この放射線量は普通、ナノクーロン/平方マイクロメートルで示され、実質的に、単位面積当たりいくつのイオンが加工物に衝突するのかを規定する方法である。断面クリーニングを使用するときには通常、そのライン走査が増分される前に、切削面の上面からトレンチの底までの全ての材料が除去されることを保証する放射線量が設定される。

【0044】

ステップ620で、プローブを90度回転させ、ステップ610から618を繰り返す

。図6のプロセスの結果は、図12に示されているような直方柱 (r e c t a n g u l a r p r i s m) 状の形状に整形された既知の長さの先端を有するプローブである。針702は次第に細くなるため、針と先端の間の肩の高さは、使用中に針が時間の経過とともに短くなるにつれて増大する。他の先端形状および回転角を使用することもできる。

【0045】

接触時のプローブと基板の間の角度のため、いくつかの実施形態では、図13に示されているように、プローブ先端704の端を斜めにミリングすることが好ましい。次いで、図14に示されているようにプローブ先端704を薄片309に接触させると、プローブの端1302が薄片309の側面と平行になる。プローブ先端を切削する好ましい角度は、試料室内でプローブが装着される角度によって異なる。さらに、鋭い角およびまっすぐな線は画像認識ソフトウェアによって容易に識別され、そのため、この形状は、プローブの画像認識の信頼性を高め、薄片へのプローブの取付けを改善する。したがって、好ましいプローブ先端の形状は「鑿 (のみ : c h i s e l) 形」である。すなわち、遠位縁1302は長軸に対して垂直ではなく、長縁と90度では交差しない。

【0046】

この鑿形の先端は、イオン・ビームでミリングすることによって生み出すことができる。鑿形の形状を生み出すため、ステップ622で、図15に示されているように、プローブ先端の端にミリング・ボックス1502を置く。ステップ624で、プローブ先端をミリングして、斜めの先端を形成する。画像認識では先端の形状が認識可能であることが重要であるため、1つの薄片と別の薄片の間で先端の形状を維持することが望ましいことがある。試料プローブの縁および先端の位置に関する正確な情報なしに、プローブがたどらなければならない後述する移動経路を計算することは難しい。先端の形状が認識可能であることを保証するため、薄片を抜き取るごとに、または2つもしくは3つの薄片を抜き取るごとに先端を整形し直すことが好ましい。薄片が移送されるときには、薄片が切り離されるたびに、プローブ先端の一部がしばしば失われ、そのため、薄片の取付け部は、次第に細くなるプローブの上の方へ段々と移動し、それによって肩がより高くなる。この自動プローブ再整形手順は、プローブが短くなったときでもプローブ先端の外観を均一に保つのに役立つ。

【0047】

この自動プローブ再整形の重要な態様は、それが、抜取りプロセスの一部として、粒子ビーム機器内で「原位置」で実行されることである。

【0048】

ステップ626は、任意選択で、図3に示されているように、プローブ先端に、基準マーク302がミリングされることを示している。図19は、プローブ先端310にミリングされた基準マーク302の顕微鏡写真を示す。この基準マークを使用して、ステップ115で薄片に対するプローブ先端の位置を決定するプローブ先端の位置の自動画像認識を容易にすることができる。さらに、この基準マークを使用して、画像認識プログラムが先端を探すエリアをより精緻にすることができ、この基準マークは、使用するエッジ・ファインダの正確さを増大させる。この基準マークは、プローブ先端から既知の距離のところにミリングすることができる。画像認識によってこの基準マークを見つけると、プローブ先端の位置をより容易に特定することができる。

【0049】

この基準マークは、画像中において先端位置を機械認識する第2の方法を可能にするため、この基準マークを、整形された先端と一緒にまたは整形された先端の代わりに使用することができる。

【0050】

プローブに基準マークがミリングされる場合には、プローブ先端を薄片まで移動させるときに、基準マークの位置を使用してエッジ・ファインダを置き、それによってプローブ先端の端の位置を特定することができる。例えば、プローブ先端の縁がエッジ・ファインダの探索ボックス内にあることを保証する十分な大きさの固定された距離だけ、エッジ・

10

20

30

40

50

ファインダを、基準マークの端から延ばすことができる。そのエッジ・ファインダは、プローブ先端の縁の位置を特定し、プローブ先端と薄片の間のベクトル変位を計算することによって、プローブを薄片に自動的に接触させることを容易にするであろう。その薄片がTEMグリッドに取り付けられときには、次の薄片を取り上げるときに使用するプローブ先端に、新しい基準マークをミリングすることができる。

【0051】

この基準マークは、針を薄片まで正確に移動させて、薄片を傷つけることなく溶接することができるように、画像認識ソフトウェアが先端の端を容易に識別することを可能にする。いくつかの実施形態では、プローブ先端に円形の基準マークがミリングされるが、異なる形状の基準マークを使用することもできる。この新しい基準マークは、加工物から次の薄片を取り上げるために使用される。

10

【0052】

この項で説明したとおり、プローブ先端を整形しおよび/またはプローブに基準マークを追加するプロセスは、薄片の抜取りの自動化において特に有用である。しかしながら、薄片を抜き取るたびにこのプロセスを実行することが常に必要であるというわけではない。いくつかのケースでは、このプローブ先端の整形および/または基準マークの追加が定期的に行われるが、薄片を抜き取るごとに必ず実行されるというわけではない。例えば、プローブ先端の整形は、薄片を1つ抜き取るごとに、または薄片を2つ抜き取るごとに、または薄片を3つ抜き取るごとに、または薄片を4つ抜き取るごとに、または薄片を5つもしくはそれ以上抜き取るごとに実行することができる。

20

プローブ先端を薄片まで移動させる際の画像減算の使用

画像中の特定のフィーチャの画像認識を容易にするためにいくつかの実施形態で利用される他の技法が画像減算である。当面の作業に無関係の複数の外部フィーチャを画像が有するときには、それらのフィーチャが、物体の位置を自動的に特定しようとする試みを複雑にすることがある。ターゲット物体を移動させた複数の画像を撮影することによって、それらの外部フィーチャを排除することができる。それらの複数の画像の減算を実行し、それにより静止した外部フィーチャを排除することができる。関心の物体の位置を背景の干渉なしに決定するためには、エッジ・ファインダまたは他の自動計測ツール(automated metrology tool)を配置する。

【0053】

30

図17a~17fは、プローブ先端を識別して、プローブ先端の位置を正確に決定することができるようにするのに使用する画像を示す。プローブ先端の位置を正確に決定した後、プローブを薄片に取り付ける薄片溶接位置までプローブ先端を移動させるためのベクトルを計算することができる。図17a~17cは、加工物表面に対して垂直に向けられた電子ビームによる画像を示す。これらの画像を使用して、X-Y平面内におけるプローブ先端の位置を決定する。図17d~17fは、加工物表面に対して45度、52度などの角度に向けられたイオン・ビームによる画像を示す。これらの画像を使用して、プローブ先端と薄片上に取付け点との間のZ座標の差を決定する。

【0054】

図20aおよび20bは、自動化されたリフトアウトを容易にするための画像減算技法の使用を示す流れ図である。図20aのステップ2002で、図17aに示されているようなプローブ先端310の上面画像を形成する。ステップ2004で、ステップ2002で撮影した画像の視野の中にプローブが依然としてあるようにして、プローブを、x-y平面内で少しだけ移動させる。ステップ2006で、図20bに示されているような第2の画像を、好ましくは図20aの画像を形成するのに使用したビーム設定と同じビーム設定を使用して得る。ステップ2008で、図17bの画像から図17aの画像を差し引く。画像を差し引くとは、一方の画像の画素のグレー・レベルから他方の画像の画素のグレー・レベルを差し引くことを意味する。それらの画像の撮影と撮影の間にビーム・パラメータが変化しない場合には、それらの画像は位置合せされているはずであるが、いくつかの実施形態では、減算の前にそれらの画像の位置合せを実施する。いくつかの実施形態で

40

50

は、この減算プロセスの前および／または後に、メジアン・フィルタ (median filter)、ガウス平滑フィルタ (Gaussian smoothing filter)、しきい値処理 (thresholding)、膨張 (dilation) / 収縮 (erosion) 操作などの画像処理機能を、任意の画像に対して適用する。図 17c は、減算後の画像 1702 を示し、図 17a からの寄与が破線で示されている。背景は実質的に排除されており、移動させたプローブ先端は、エッジ・ファインダまたは他の計測ツールによって位置を精確に特定することがより容易になっている。ステップ 2010 で、図 17c の減算後の画像にエッジ・ファインダを適用して、減算後の画像中のプローブ先端の位置を特定する。図 20 に記載された手順は、上面画像中のプローブ先端の位置を特定するステップ 406 のステップを実行する 1 つの方法である。他の方法を使用することもできる。プローブ先端に基準マークをミリングする実施形態では、この画像減算技法を使用して、基準マークの位置をより精確に特定することができる。いくつかの実施形態では、この画像減算法の使用が、プローブ先端の基準マークの必要性を排除した。他の実施形態では、プローブ先端の基準マークが、画像減算技法の必要性を排除した。

【0055】

図 20b のステップ 2020 から 2028 は、図 4 のステップ 412 に示されているようにプローブ先端の Z 方向の位置を精確に決定する 1 つの方法を説明する。ステップ 2020 で、図 17d に示されているような第 1 の画像を、表面に対して垂直に向けられていないビーム、この場合にはイオン・ビームを使用して得る。ステップ 2022 で、ビーム走査エリアを変更しなくてもプローブ先端が依然として見えるようにして、プローブを、Z 方向に少しだけ移動させる。ステップ 2024 で、第 2 の画像 (図 17e) を、図 17d の画像を得るのに使用したビーム設定と同じビーム設定を使用して得る。ステップ 2026 で、図 17e の画像から図 17d の画像を差し引いて、プローブ先端の位置の変化を図 17e に示し、加工物表面の画像を排除してプローブ先端の認識を容易にする。ステップ 2028 で、エッジ・ファインダを使用して、図 17f の画像中のプローブ先端の位置を特定する。プローブ先端の Z 方向の位置を特定した後、ステップ 414 で、その位置を使用して、ベクトル V_z を決定することができる。

【0056】

プローブを識別する場合には、画像に対してプローブを少しだけ移動させて 2 つの画像を得ることによって、それらの画像の減算を実行し、先端の外側包絡線 (outer envelope) に関連した境界を決定することができる。このようなプロセスは、プローブの包絡線の位置の決定を大いに支援する。複数の移動を実行して追加の情報を得ることができる。さらに、既知の量だけ移動させ、その既知の量の移動を解析の一部として利用することが有利となることがある。

【0057】

TEM グリッドへの薄片の取付け

図 21 は、プローブ 301 に取り付けられた薄片 309 を TEM グリッドに取り付けるプロセスを説明する流れ図である。理解されるとおり、TEM グリッドは、TEM で観察するために薄片が装着される構造体であり、本出願の出願人によって市販されている。グリッド上に薄片を正確に降着させるためには、薄片が取り付けられたプローブおよびグリッドの正確な位置が、3 つの全ての次元において既知であるべきである。3 次元位置特定には、第 1 のビームに対して傾けられた第 2 のビームの視点を使用することができる。図 22 の画像減算ルーチンを使用して、薄片が取り付けられたプローブおよび試料グリッドの位置を、この第 2 の視点を使用することによって識別することができる。

【0058】

ステップ 2102 で、薄片 309 の位置を特定する。いくつかの実施形態では、パターン認識ソフトウェアを使用して薄片の位置を自動的に特定する。このパターン認識は、薄片の位置特定を容易にする図 18 に示された薄片上の基準マーク 306 によって容易にすることができる。薄片の位置特定は、減算画像化を使用して容易にすることもできる。

【0059】

図 2 2 a および 2 2 b は、減算画像化を使用して薄片の位置を特定する諸ステップを示す。図 2 2 a のステップ 2 2 0 2 で、図 2 3 a に示されているように、プローブ先端 3 0 1 の端にある薄片 3 0 9 を示す上面 S E M 画像を取得する。この画像では T E M グリッド 2 3 0 2 が見えている。ステップ 2 2 0 4 で、薄片 3 0 1 が視野の中に留まるようにして、薄片を保持しているプローブを、 $x - y$ 平面内で短い距離だけ移動させる。ステップ 2 2 0 6 で、図 2 3 a を取得するのに使用したシステム設定を使用して、図 2 3 b に示された別の画像を取得する。ステップ 2 2 0 8 で、図 2 3 b の画像から図 2 3 a の画像を差し引き、その結果として図 2 3 c の画像を得る。図 2 3 c は、薄片 3 0 9 およびプローブ先端 3 0 1 を示しているが、その一方で、背景および T E M グリッド 2 3 0 2 の多くを排除している。ステップ 2 2 1 0 で、この減算後の画像にエッジ・ファインダまたは他の計測ツールを適用して、薄片の位置を精確に決定する。

10

【 0 0 6 0 】

薄片の $x - y$ 平面内の位置を決定した後、ステップ 2 1 0 4 (図 2 1) で、T E M グリッド上の取付け点の位置を決定する。ステップ 2 2 2 0 (図 2 2) で、図 2 3 d に示されているように、T E M グリッド 2 3 0 2 の上面 S E M 画像を取得する。ステップ 2 2 2 2 で、T E M グリッドが図 2 3 d の視野の中に留まるようにして、T E M グリッドを支持しているステージをわずかに移動させる。ステップ 2 2 2 4 で、第 1 の画像と同じビーム設定を使用して第 2 の画像を取得する。ステップ 2 2 2 6 で、図 2 3 e に示された第 2 の画像から図 2 3 d に示された第 1 の画像を差し引き、その結果として図 2 3 f の画像を得る。ステップ 2 2 2 8 で、この減算後の画像にエッジ・ファインダまたは他の計測ツールを適用して、T E M グリッド 2 3 0 2 の位置を精確に決定する。

20

【 0 0 6 1 】

ステップ 2 1 0 6 で、図 2 4 に示されているように、薄片 3 0 9 と T E M グリッド 2 4 1 2 上の取付け点との間のベクトル $V_{x,y}$ 変位を決定する。ステップ 2 1 0 8 で、 $X - Y$ 平面内において、薄片を、取付け点位置のすぐ上の位置まで移動させる。

【 0 0 6 2 】

ステップ 2 1 1 0 で、薄片の Z 寸法を決定することができるような異なる視点を提供するもう一方のビームを使用して、薄片の位置を特定する。薄片の位置は例えば、薄片上の基準マーク 3 0 6 によって支援された画像認識を使用することによって、または画像減算技法を使用することによって、またはこれらの両方の技法を使用することによって特定することができる。

30

【 0 0 6 3 】

図 2 5 a および 2 5 b は、画像減算を使用して Z 変位を決定する諸ステップを示す流れ図である。ステップ 2 5 0 2 で、図 2 6 a に示されているように、薄片を示す斜めの F I B 画像を取得する。ステップ 2 5 0 4 で、薄片が、このイオン・ビーム画像の視野の中に留まるようにして、薄片を保持しているプローブを Z 方向に短い距離だけ移動させる。ステップ 2 5 0 6 で、図 2 6 b に示されているような別の画像を取得する。図 2 6 b の画像は、図 2 6 a を取得するのに使用したシステム設定を使用して取得する。ステップ 2 5 0 8 で、図 2 6 b の画像から図 2 6 a の画像を差し引き、その結果として図 2 6 c の画像を得る。この画像は、薄片およびプローブを示しているが、その一方で背景の多くを排除している。ステップ 2 5 1 0 で、この減算後の画像にエッジ・ファインダまたは他の計測ツールを適用して、薄片の位置を精確に決定する。

40

【 0 0 6 4 】

F I B の視点から薄片の位置を決定した後、ステップ 2 1 1 2 で、T E M の取付け点の位置を、F I B の視点から決定する。ステップ 2 5 2 0 で、図 2 6 d に示されているように、T E M グリッド 2 3 0 2 の角度のついた画像を取得する。ステップ 2 5 2 2 で、T E M グリッド 2 3 0 2 が図 2 6 d の視野の中に留まるようにして、T E M グリッド 2 3 0 2 を支持しているステージを Z 方向に少しだけ移動させる。ステップ 2 5 2 6 で、図 2 6 e から図 2 6 d の画像を差し引き、その結果として図 2 6 f の画像を得る。ステップ 2 5 2 8 で、この減算後の画像にエッジ・ファインダまたは他の計測ツールを適用して、T E M

50

グリッドの位置を精確に決定する。

【 0 0 6 5 】

ステップ 2 1 1 4 で、薄片と TEM グリッド上の取付け点との間の高さの差であるベクトル V_z を、FIB 画像内の薄片と TEM グリッドの取付け点の間の距離を使用し、この距離を、FIB 軸と表面に対する法線の間の角度の正弦で除することによって決定する。ステップ 2 1 1 6 で、プローブを、計算された距離 V_z だけ Z 方向に移動させる。

【 0 0 6 6 】

ステップ 2 1 1 8 で、図 2 7 に示されているように、薄片 3 0 9 を TEM グリッド 1 3 0 2 に溶接する。イオン・ビーム 2 0 6 を使用して、ガス噴射針 4 1 0 からの前駆体ガスを分解し、それによって溶接材料 2 7 0 2 を付着させて、薄片 3 0 9 を取り付ける。ステップ 2 1 2 0 で、図 2 8 に示されているように、イオン・ビームを使用して、プローブ 3 0 1 を薄片 3 0 9 から切り離す。あるいは、プローブと薄片を別々に移動させることによって、それらを切り離すこともできる。薄片とプローブの間の接続を切るためにミリング・ボックス 2 8 0 2 が配置される。任意選択のステップ 2 1 2 4 で、例えば図 1 9 に示されているように、プローブ先端に基準マーク 3 0 2 をミリングして、次の薄片のリフトアウト中に画像認識ソフトウェアがプローブ先端をより容易に認識することができるようにする。任意選択のステップ 2 1 2 6 で、図 2 9 に示されているように、TEM グリッド上に薄片が装着されている間に薄片をさらに薄くする。

【 0 0 6 7 】

第 1 の薄片を形成し、その薄片を TEM グリッドまで移動させた後、後続の薄片に対してこのプロセスを繰返すことができる。それに加えてまたはその代わりに、リフトアウトする次の薄片にプローブ先端が接近する前に、図 6 に記載されているようにしてプローブ先端を再整形して、プローブ先端が、自動画像認識ソフトウェアによって容易に認識されるようにする。

【 0 0 6 8 】

以上では、画像減算ルーチンに対して 2 つの画像を使用することを説明したが、3 つ以上の画像を使用することもできる。減算画像化は、画像解析中に偽陽性を示すであろうエリアにおいても特定の物体の識別を可能にする。

【 0 0 6 9 】

本発明の方法を実行する典型的なシステム

図 3 0 は、本発明のさまざまな実施形態の諸ステップを実行する目的に使用することができる典型的なデュアル荷電粒子ビーム・システムを示す。このシステムは、電子源 3 0 0 0 とビーム整形レンズ 3 0 0 1、3 0 0 3 とを備える電子ビーム・カラム 3 0 0 2 を有し、電子ビーム 3 0 1 6 を導く。このシステムはさらに、イオン源 3 0 2 0 とイオン集束レンズ 3 0 1 9、3 0 1 8 とを備えるイオン・ビーム・カラム 3 0 2 1 を有し、イオン・ビーム 3 0 1 7 を導く。これらのビームは、関心領域 3 0 7 を含む試料 3 0 1 3 に向かって導かれる。試料 3 0 1 3 は、x - y - z 方向に移動し、回転し、傾くことができる 5 軸 1 次ステージ 3 0 1 2 上に配置される。この 1 次ステージ上には、TEM グリッド 3 0 2 2 を保持する TEM グリッド・ホルダ 3 0 2 4 が装着されている。薄片の取付けおよび処理のために TEM グリッドを操作する更なる自由度を確認するために、任意選択で、TEM グリッド・ホルダ 3 0 2 4 を 2 次ステージ 3 0 2 6 上に装着することもできる。このシステムはさらに、粒子検出器 3 0 1 5、ガス導入システム 3 0 1 4 および試料操作プローブ 3 0 1 1 を含む。試料操作プローブ 3 0 1 1 は、プローブ先端を x - y - z 方向に移動させることができ、プローブ軸を軸にして回転することができる。荷電粒子ビーム・カラム、検出器、ガス導入システムおよび試料操作プローブは真空室 3 0 0 4 内に収容されており、真空室 3 0 0 4 は、真空ポンプ 3 0 0 9 によって排気される。荷電粒子カラム、検出器、ガス導入システムおよび試料プローブは制御装置 3 0 0 8 によって制御され、制御装置 3 0 0 8 は、記憶装置 3 0 2 8 に記憶されたコンピュータ命令を取り出すことができる。

【 0 0 7 0 】

本発明の以上の説明は主に、TEM薄片を生成する方法を対象としており、この方法は、堅牢さ、繰返し性および速度の面で有利であり、したがって自動化に適しているが、この方法の操作を実行する装置も本発明の範囲に含まれるであろうことを認識すべきである。さらに、本発明の実施形態は、コンピュータ・ハードウェアもしくはソフトウェアまたはハードウェアとソフトウェアの組合せによって実現することができることを認識すべきである。本発明の方法は、標準プログラミング技法を使用した、本明細書に記載された方法および図に基づくコンピュータ・プログラムとして実現することができる。ここで言うコンピュータ・プログラムには、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記憶媒体が含まれ、そのように構成された記憶媒体は、コンピュータを、事前に決定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。

10

【0071】

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装置とは別個の、または荷電粒子ツールもしくは他の画像化装置と一体の、または荷電粒子ツールもしくは他の画像化装置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・プラットフォームなどを含む、任意のタイプのコンピューティング・プラットフォ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・プラットフォームと一体であるかを問わない、ハードディスク、光学式記憶媒体、RAM、ROMなどの記憶媒体上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、1つまたは複数の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、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、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を含む。

20

30

【0072】

以上の説明の多く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。

【0073】

本発明のいくつかの実施形態は、荷電粒子ビーム・システム内での自動化された試料調製の方法であって、

40

1つまたは複数の荷電粒子ビーム・システムおよび試料操作プローブを特徴とする真空室内に加工物を装填することと、

加工物上の関心領域を画像化することと、

薄い切片の周囲の材料を、集束イオン・ビームを使用して除去することと、

薄い切片を支持している材料を除去し、小さな取付け構造体によって大きな加工物に取り付けられた薄い切片を残すことと、

イオン・ビームを使用して材料を除去することによって、試料操作プローブの先端を整形することと、

薄い切片に対する先端の位置を決定するために、先端の既知の形状を使用することと、

50

薄い切片に対する先端の位置を使用して、薄い切片のすぐ近くに試料プローブを自動的に移動させることと、

試料プローブを薄い切片に取り付けることと、

大きな加工物に薄い切片を接続している支持構造体を、イオン・ビームを使用して除去することであって、薄い切片が試料プローブだけによって支持されているようにすることと、

試料プローブを、取り付けられた薄い切片とともに、薄い切片用の試料グリッドが位置する領域まで移動させることと、

試料グリッドおよびプローブならびに取り付けられた薄い切片が位置する領域を画像化することと、

薄い切片が試料グリッドのすぐ近くにくるように、プローブを自動的に移動させることと、

薄い切片を試料グリッドに取り付けることと、

薄い切片から試料プローブの先端を取り外すことと

を含む方法を提供する。

【0074】

いくつかの実施形態では、薄い切片が断面観察用の切片である。

【0075】

いくつかの実施形態は、試料プローブの移動を誘導するために、画像解析を使用する。

【0076】

いくつかの実施形態では、試料操作プローブの先端を整形することが、先端を、機械認識が可能な形状に整形することを含み、薄い切片に対する先端の位置を決定するために、先端の既知の形状を使用することが、プローブ先端の位置を決定するために機械認識が可能な先端の形状を認識するために画像認識ソフトウェアを使用することを含む。

【0077】

いくつかの実施形態では、先端が鑿形に整形される。

【0078】

いくつかの実施形態は、プローブを薄い切片または試料グリッドまで移動させるための軌道を決定するために、プローブの位置を画像解析を使用して特定することを含む。

【0079】

いくつかの実施形態では、画像解析が画像減算を使用する。

【0080】

いくつかの実施形態は、プローブと前記薄い切片の間のXYベクトルを、1つの荷電粒子ビームによる画像に基づいて計算し、プローブと薄い切片の間のZベクトルを、第2の粒子ビームによる画像に基づいて計算することをさらに含む。

【0081】

いくつかの実施形態では、この方法が、プローブから薄い切片が取り外された後に先端を再整形することをさらに含む。

【0082】

いくつかの実施形態では、この方法が、薄い切片の側面の関心領域から離れた位置にプローブを取り付けることをさらに含む。

【0083】

いくつかの実施形態では、この方法が、薄い切片が試料グリッドに取り付けられた後に薄い切片をさらに薄くすることをさらに含む。

【0084】

本発明のいくつかの実施形態は、荷電粒子システム内での自動化された試料調製のための装置であって、

加工物を収容する真空室と、

真空室内の加工物を画像化し、加工物に対して作用する荷電粒子ビームを生成する少なくとも2つの荷電粒子ビーム・カラムと、

10

20

30

40

50

真空室内の加工物を保持し、加工物を移動させる可動試料ステージと、
荷電粒子ビームが衝突したときに試料から放出された荷電粒子から画像を形成する荷電粒子検出器と、
サブミクロンの位置決めが可能な試料操作プローブと、
荷電粒子ビーム誘起付着用の前駆体ガスを供給するガス噴射システムと、
この装置の動作を制御する制御装置と、
制御装置によって実行される、上記請求項 [0 0 0 1 5 7] 1 の方法を実行するためのコンピュータ命令を記憶するコンピュータ可読の記憶装置と
を備える装置を提供する。

【 0 0 8 5 】

10

いくつかの実施形態では、この装置が、2つの荷電粒子ビーム・システムを含む装置をさらに備える。

【 0 0 8 6 】

いくつかの実施形態では、加工物を画像化し、加工物に対して作用する荷電粒子ビームを生成する少なくとも2つの荷電粒子ビーム・カラムが、電子ビーム・カラムおよびイオン・ビーム・カラムを含む。

【 0 0 8 7 】

いくつかの実施形態では、コンピュータ記憶装置が、荷電粒子ビームによって形成された画像を解析するためのコンピュータ命令を含み、この画像解析が、薄い切片が取り付けられた試料操作プローブの位置または薄い切片が取り付けられていない試料操作プローブの位置を特定するようにプログラムされている。

20

【 0 0 8 8 】

いくつかの実施形態では、この画像解析が画像減算を使用して実行される。

【 0 0 8 9 】

いくつかの実施形態では、材料除去手段が集束イオン・ビームである。

【 0 0 9 0 】

いくつかの実施形態では、集束イオン・ビームが薄い切片上に基準マークを形成するようにするコンピュータ命令をコンピュータ記憶装置を含む。

【 0 0 9 1 】

いくつかの実施形態では、集束イオン・ビームがプローブ上に基準マークを形成するようにするコンピュータ命令をコンピュータ記憶装置を含む。

30

【 0 0 9 2 】

いくつかの実施形態では、集束イオン・ビームが試料プローブの先端を鑿形に形成するようにするコンピュータ命令をコンピュータ記憶装置を含む。

【 0 0 9 3 】

本発明のいくつかの実施形態は、荷電粒子ビーム・システム内での自動化された試料調製の方法であって、

1つまたは複数の荷電粒子ビーム・システムおよび試料操作プローブを含む真空室内に加工物を装填することと、

操作プローブを、新たな形状へと自動的に物理的に再整形することと、

40

加工物の一部分から試料を形成するために、荷電粒子ミリング操作を自動的に実行することと、

加工物から試料を取り出すために、再整形後のプローブを使用することと

を含む方法を提供する。

【 0 0 9 4 】

いくつかの実施形態では、加工物から試料を取り出すために、再整形後のプローブを使用することが、再整形後のプローブの位置を自動的に決定するために、画像認識ソフトウェアを使用することを含む。

【 0 0 9 5 】

いくつかの実施形態では、プローブを再整形することが、プローブ先端を直方柱の形状

50

にすることを含む。

【0096】

本発明のいくつかの実施形態は、荷電粒子ビーム・システム内での自動化された試料調製の方法であって、

1つまたは複数の荷電粒子ビーム・システムおよび試料操作プローブを含む真空室内に加工物を装填することと、

操作プローブ上に基準マークを形成することと、

加工物の一部分から試料を形成するために、荷電粒子ビーム・ミリング操作を実行することと、

操作プローブ上の基準マークを識別して操作プローブの位置を決定するために、自動化された画像認識を使用することと、

操作プローブを、画像認識ソフトウェアによって決定された位置から、試料に隣接した位置まで自動的に移動させることと、

プローブを試料に取り付けることと、

加工物から試料を取り出すことと

を含む方法を提供する。

10

【0097】

いくつかの実施形態では、薄片の厚さが100nm未満である。

【0098】

いくつかの実施形態では、プローブを試料に取り付けることが、荷電粒子ビーム誘起付着を使用してプローブを試料に取り付けることを含む。

20

【0099】

いくつかの実施形態は、荷電粒子ビーム・システム内での自動化された試料調製の方法であって、

1つまたは複数の荷電粒子ビーム・システムおよび試料操作プローブを含む真空室内に加工物を装填することと、

加工物の一部分から試料を形成するために、荷電粒子ビーム・ミリング操作を実行することと、

試料上に基準マークを形成することと、

プローブを試料に取り付けることと、

加工物から試料を取り出すことと、

試料上の基準マークを識別して、試料ホルダに対する試料の位置を決定するために、自動化された画像認識を使用することと、

自動化された画像認識によって決定された試料の位置を使用して、試料を試料ホルダまで自動的に移動させることと

を含む方法を提供する。

30

【0100】

いくつかの実施形態では、試料上に基準マークを形成することが、基準マークを形成するために、試料に向かって荷電粒子ビームを導くことを含む。

【0101】

いくつかの実施形態では、試料が厚さ100nm未満の薄片であり、試料上に基準マークを形成することが、基準マークを形成するために、薄片に向かって荷電粒子ビームを導くことを含む。

40

【0102】

いくつかの実施形態では、自動化された画像認識によって決定された試料の位置を使用して、試料を試料ホルダまで自動的に移動させることが、試料をTEMグリッドまで自動的に移動させることを含み、前記方法が、ビーム誘起付着を使用して試料をTEMグリッドに取り付けることをさらに含む。

【0103】

いくつかの実施形態は、荷電粒子ビーム・システム内での自動化された試料調製の方法

50

であって、

1つまたは複数の荷電粒子ビーム・システムおよび試料操作プローブを含む真空室内に加工物を装填することと、

荷電粒子ミリング操作を自動的に実行して、加工物の一部分から試料を形成することと

、

操作プローブの一部分の画像を形成することと、

操作プローブを移動させることと、

操作プローブの第2の画像を形成することと、

第1の画像と第2の画像の差を示す差分画像を形成することと、

操作プローブの位置を決定するために、画像認識ソフトウェアを使用することおよび差分画像中の操作プローブの位置を特定することと、

決定された位置を使用して、操作プローブを試料まで移動させることと、

試料を操作プローブに取り付けることと

を含む方法を提供する。

【0104】

いくつかの実施形態では、試料が、厚さ100nm未満の薄片を含む。

【0105】

いくつかの実施形態では、操作プローブを試料まで移動させることが、操作プローブを移動させて薄片に接触させる、または十分な距離まで操作プローブを薄片に近づけて、荷電粒子ビーム誘起付着を使用して操作プローブを薄片に取り付けることを含む。

【0106】

いくつかの実施形態は、関心領域を透過電子顕微鏡で観察するための試料の、荷電粒子ビーム・システム内での自動化された調製の方法であって、

加工物中の関心領域を真空室内で識別することと、

関心領域の両側から材料を除去し、それによって関心領域を含む厚さ100nm未満の薄片を残すために、加工物に向かってイオン・ビームを導くことと、

加工物の上方にある操作プローブの第1の荷電粒子ビーム画像を形成することと、

操作プローブを移動させることと、

加工物の上方にある操作プローブの第2の荷電粒子ビーム画像を形成することと、

第1の画像と第2の画像の差を表す第3の画像を決定することと、

プローブの位置を決定するために、第3の画像中の操作プローブを自動的に認識することと、

操作プローブを薄片に接触させるための軌道または操作プローブを薄片の近くに置くための軌道を決定することと、

操作プローブを移動させて、薄片に接触させるかまたは薄片の近くに置くことと、

操作プローブに向かって前駆体ガスを導くことと、

前駆体ガスを分解し、それによって材料を付着させて、操作プローブを薄片に接続するために、イオン・ビームを導くことと、

薄片を加工物から分離することと、

プローブを、薄片とともに、TEMグリッドまで移動させることと、

薄片をTEMグリッドに取り付けることと、

プローブを薄片から分離することと

を含み、第1の画像と第2の画像の差を表す第3の画像が、第1の画像および第2の画像中の加工物に関連した要素を減らして、第3の画像中での操作プローブの認識を容易にする

方法を提供する。

【0107】

いくつかの実施形態では、

加工物の上方にある操作ローブの第1の荷電粒子ビーム画像を形成することが、第1の上面画像を形成することを含み、

操作プローブを移動させることが、操作プローブを $x - y$ 平面内で移動させることを含み、

加工物の上方にある操作プローブの第2の荷電粒子ビーム画像を形成することが、第2の上面画像を形成することを含み、

第1の画像と第2の画像の差を表す第3の画像を決定すること、

プローブの位置を決定することが、操作プローブの $x - y$ 座標を決定するために、第3の画像中の操作プローブを自動的に認識することを含み、

操作プローブを薄片に接触させるための軌道または操作プローブを薄片の近くに置くための軌道を決定することが、 $x - y$ 平面内で、操作プローブを、操作プローブを薄片に取り付ける位置の上方の点まで移動させるための軌道を決定することを含み、

前記方法が、

表面に対して直角でない荷電粒子ビームによって、操作プローブの第3の荷電粒子ビーム画像を形成することと、

操作プローブを z 平面内で移動させることと、

表面に対して直角でない荷電粒子ビームによって、操作プローブの第4の荷電粒子ビーム画像を形成することと、

第3の画像と第4の画像の差を表す第5の画像を決定することと、

z 方向のプローブの位置を決定するために、第5の画像中の操作プローブを自動的に認識することと

をさらに含み、

操作プローブを薄片に接触させるための軌道または操作プローブを薄片の近くに置くための軌道を決定することが、 z 方向に、操作プローブを、操作プローブを薄片に取り付ける位置の上方の点まで移動させるための軌道を決定することをさらに含む。

【0108】

いくつかの実施形態では、

第1の荷電粒子ビーム画像を形成することが、第1の電子ビーム画像を形成することを含み、

第2の荷電粒子ビーム画像を形成することが、第2の電子ビーム画像を形成することを含み、

操作プローブの第3の荷電粒子ビーム画像を形成することが、イオン・ビーム画像を形成することを含み、

操作プローブの第4の荷電粒子ビーム画像を形成することが、イオン・ビーム画像を形成することを含む。

【0109】

いくつかの実施形態は、関心領域を透過電子顕微鏡で観察するための試料の、荷電粒子ビーム・システム内での自動化された調製の方法であって、

請求項[00157]33に記載の各動作を複数回繰返すことと、

それぞれの繰返しと繰返しの間に、それぞれの繰返し中に同じ指定された形状を形成するために、プローブの先端をイオン・ビームでミリングすることであり、指定された形状が画像認識ソフトウェアによって認識可能であることと

を含み、

プローブの位置を決定するために、前記各動作のそれぞれの繰返し中に、第3の画像中の操作プローブを自動的に認識することが、指定された形状を認識することを含む

方法を提供する。

【0110】

いくつかの実施形態では、画像認識ソフトウェアによって認識可能な同じ指定された形状を形成することが、プローブの端に端縁(end edge)を形成することとを含み、この端縁が、プローブの縦軸に対して直角でない角度を形成する。

【0111】

いくつかの実施形態は、TEMで観察するための薄い試料を調製するのに使用する微小

10

20

30

40

50

操作プローブの先端を自動的に整形する方法であって、微小操作プローブが、針と、針から延びる先端であり、直径が針の直径よりも小さい先端と、針と先端の間の肩とを含む方法において、

先端の端の位置を特定することと、

肩の位置を特定することと、

所望の先端開始位置から先端の端までの距離が所望の先端長さに一致するように、針に沿った所望の先端開始位置を特定することと、

イオン・ビームを用いて、所望の先端開始位置から少なくとも肩までの第1の材料を針から自動的に除去することと、

先端開始位置から先端の端までの滑らかな表面を生み出すために、イオン・ビームを用いて自動的にミリングすることと、

操作プローブを回転させることと、

イオン・ビームを用いて、所望の先端開始位置から少なくとも肩までの第2の材料を針から自動的に除去することと、

先端開始位置から先端の端までの滑らかな表面を生み出すために、イオン・ビームを用いて自動的にミリングすることと

を含む方法を提供する。

【0112】

いくつかの実施形態では、肩の位置を特定することが、針の上縁の位置を画像中で自動的に特定することと、針の上縁が終わる点を決定することとを含む。

【0113】

いくつかの実施形態では、

イオン・ビームを用いて第1の材料を針から自動的に除去することが、第1の材料の第1の部分除去することと、第1の材料の第2の部分除去することとを含み、第1の材料の第1の部分と第2の部分が、第1の次元の所望の先端太さに対応する距離だけ離れており、

イオン・ビームを用いて第1の材料を針から自動的に除去することが、第2の材料の第1の部分除去することと、第2の材料の第2の部分除去することとを含み、第1の材料の第1の部分と第2の部分が、第2の次元の所望の先端太さに対応する距離だけ離れている。

【0114】

いくつかの実施形態では、第1の材料の第1の部分と第2の部分が互いに針軸の反対側にあり、第2の材料の第1の部分と第2の部分が互いに針軸の反対側にある。

【0115】

いくつかの実施形態は、TEMで観察するための薄い試料を調製するのに使用する微小操作プローブの先端を自動的に整形する方法であって、微小操作プローブが、針と、針から延びる先端であり、直径が針の直径よりも小さい先端と、針と先端の間の肩とを含む方法において、

a) 荷電粒子ビーム画像中の先端の端の位置を特定することと、

b) エッジ・ロケータ・ツール (edge locator tool) を使用して、画像中の針の上縁の位置を特定することと、

c) エッジ・ロケータ・ツールを使用して、画像中の針の下縁の位置を特定することと、

d) 針の上縁および針の下縁から、針軸の位置を決定することと、

e) 針の上縁の端の肩の位置を決定するために、エッジ・ロケータ・ツールを針に沿って先端の端の方向に移動させることと、

f) 針軸から第1の方向に所望の針太さだけオフセットされた針の第1の領域を、肩からまたは肩の前から始めて、針先端の端から指定された距離のところまでミリングすることであり、この指定された距離が所望の先端長さに対応することと、

g) 針軸から第2の方向に所望の針太さだけオフセットされた針の第2の領域を、肩か

10

20

30

40

50

らまたは肩の前から始めて、針先端の端から指定された距離のところまでミリングすることであり、この指定された距離が所望の先端長さに対応することと、

- h) 針を回転させることと、
 - i) b ~ g を繰返すことと
- を含む方法を提供する。

【0116】

いくつかの実施形態では、この方法が、先端の端を、針軸に対して直角でないある角度で切削することをさらに含む。

【0117】

いくつかの実施形態は、関心領域を透過電子顕微鏡で観察するための試料の、荷電粒子ビーム・システム内での自動化された調製の方法であって、

1つまたは複数の荷電粒子ビーム・システムおよび試料操作プローブを有する荷電粒子ビーム・システムの真空室内に加工物を装填することと、

加工物中の関心領域を識別することと、

関心領域の両側から材料を除去し、それによって関心領域を含む厚さ100nm未満の薄片を残すために、加工物に向かってイオン・ビームを導くことと、

薄片上に基準マークを形成するために、イオン・ビームを導くことと、

操作プローブを薄片に取り付けることと、

薄片を加工物から分離することと、

プローブを、薄片とともに、TEMグリッドの近傍に移動させることと、

薄片の基準マークを認識するために、画像認識ソフトウェアを使用することと、

薄片をTEMグリッドの取付け点まで移動させるための軌道を決定するために、薄片の基準マークの位置を使用することと、

薄片をTEMグリッドに取り付けることと

を含む方法を提供する。

【0118】

いくつかの実施形態では、薄片上に基準マークを形成するために、イオン・ビームを導くことが、薄片に、整形された穴をミリングすることを含む。

【0119】

いくつかの実施形態では、薄片上に基準マークを形成するためにイオン・ビームを導くことが、薄片の表面に、ある形状をミリングすることを含む。

【0120】

いくつかの実施形態は、荷電粒子ビーム・システム内での自動化された試料調製の方法であって、微小操作プローブが薄片に取り付けられ、この微小操作プローブが、薄片を移送する目的に使用される方法において、

1つまたは複数の荷電粒子ビーム・システムおよび試料操作プローブを特徴とする真空室内に加工物を装填することと、

加工物上の関心のエリアを識別することと、

関心領域を含む薄い切片を残すために、関心領域の周囲の材料を除去することと、

プローブの先端に基準マークを形成し、それによって自動システムが先端を識別することができるようイオン・ビームを導くことと、

基準マークを含むプローブ先端の画像を形成することと、

画像中の基準マークを識別するために、画像認識ソフトウェアを使用することと、

プローブ先端と薄片上の取付け点との間の変位ベクトルを決定するために、画像認識ソフトウェアによって決定された基準マークの位置を使用することと、

プローブ先端を薄片に接触させるか、または薄片の近くに置くために、変位ベクトルに従ってプローブ先端を移動させることと、

プローブ先端を薄片に取り付けることと、

薄片を加工物から切り離すことと、

プローブ先端を、取り付けられた薄片とともに、TEMグリッドまで移動させることと

、
薄片をTEMグリッドに取り付けることと、
プローブを薄片から切り離すことと
を含む方法を提供する。

【0121】

いくつかの実施形態では、この方法が、プローブの先端に第2の基準マークを形成するためにイオン・ビームを導くことをさらに含み、それによって自動システムが先端を識別することができるようにする。

【0122】

いくつかの実施形態では、この方法が、プローブの先端に第2の基準マークを形成するためにイオン・ビームを導くことをさらに含み、それによって自動システムが先端を識別することができるようにする。

10

【0123】

コンピュータ処理を使用して走査または画像が自動的に処理されているときには、目に見える実際の画像を生成することなしに、生の画像データを処理することができることを理解すべきである。用語「画像」は、広い意味で使用され、表面の外観を示す表示された画像だけでなく、表面または表面よりも下の複数の点を特徴づける情報の集合体をも含む。例えば、表面の一連の点に粒子ビームが入射したときに集められた2次電子に対応するデータの集合体は、たとえそのデータが表示されていないとしても一種の「画像」である。試料または加工物上の点に関する情報を集めることは「画像化する」ことである。用語「自動」または「自動的に」は、オペレータの介入がないことを意味するが、これらの用語は、操作の全てのステップがオペレータの介入なしで実行されること、またはオペレータの介入なしプロセスが始まることを要件としない。

20

【0124】

本発明の好ましい実施形態は、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。試料を画像化するために使用されるこのような粒子は試料と本来的に相互作用し、その結果、試料はある程度、物理的に変形する。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に関し、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・システム内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。

30

【0125】

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異なる。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、全ての実施形態が、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もない。

【0126】

上記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。本明細書では用語「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。

40

【0127】

ある用語が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、特記しない限り、一定の比率では描かれていない。

50

【 0 1 2 8 】

本発明および本発明の利点を詳細に説明したが、特許請求の範囲によって定義された本発明の範囲から逸脱することなく、本明細書に記載された実施形態に、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。

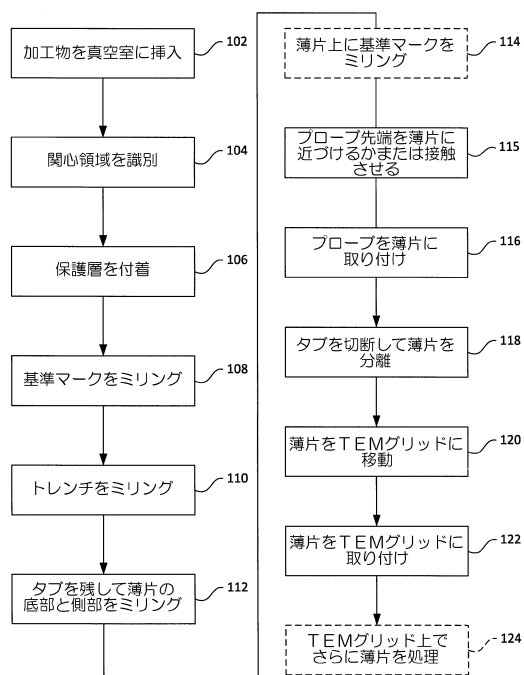
【 符号の説明 】

【 0 1 2 9 】

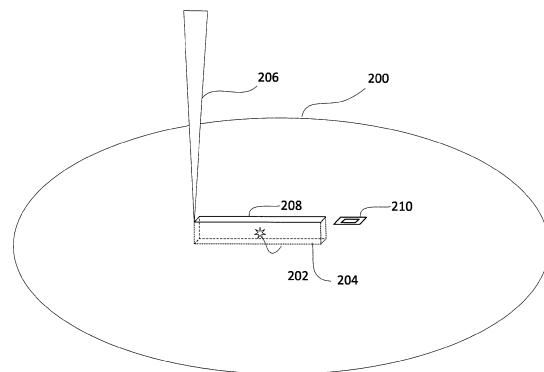
- 7 0 0 プローブ
- 7 0 2 針
- 7 0 4 先端
- 7 0 5 肩
- 7 0 6 イオン・ビームの視野の中心
- 7 0 8 エッジ・ファインダ・ツール
- 7 1 0 針の上縁
- 7 2 0 エッジ・ファインダ・ツール
- 7 2 2 針の下縁

10

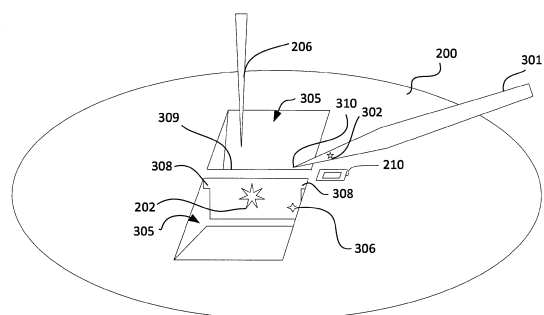
【 図 1 】



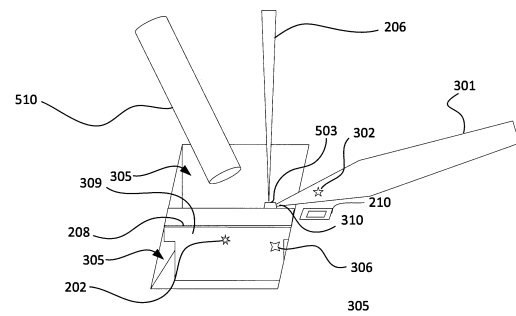
【 図 2 】



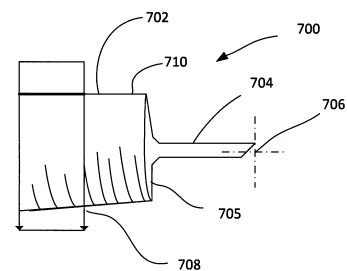
【 図 3 】



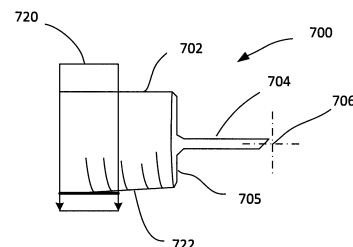
【 図 5 】



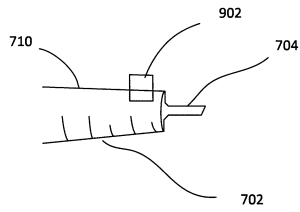
【圖 7】



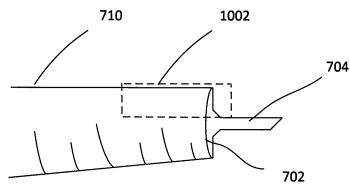
【圖 8】



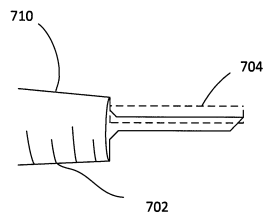
【図 9】



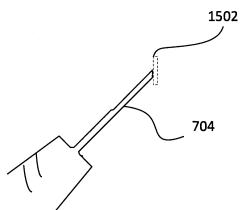
【図 10】



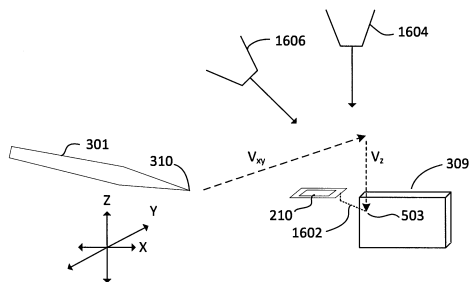
【図 11】



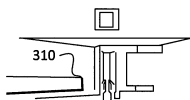
【図 15】



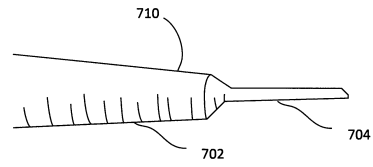
【図 16】



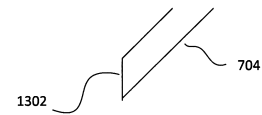
【図 17 a】



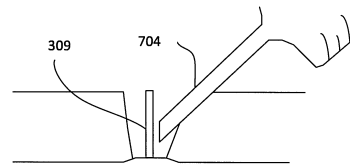
【図 12】



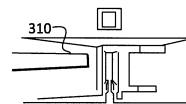
【図 13】



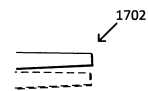
【図 14】



【図 17 b】



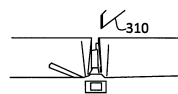
【図 17 c】



【図 17 d】



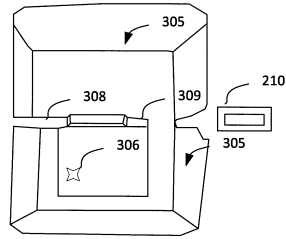
【図 17 e】



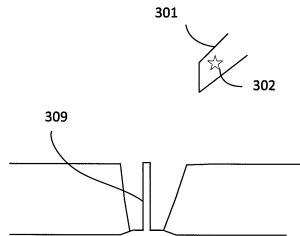
【図 17 f】



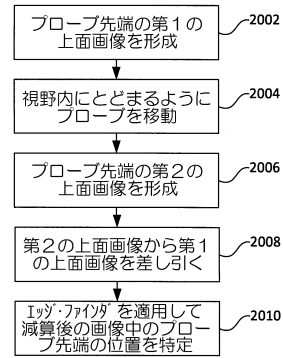
【図 18】



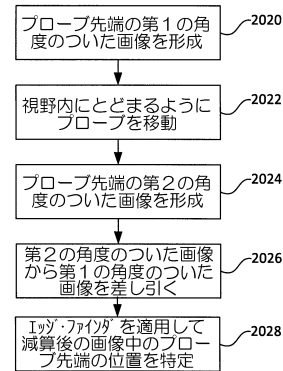
【図 19】



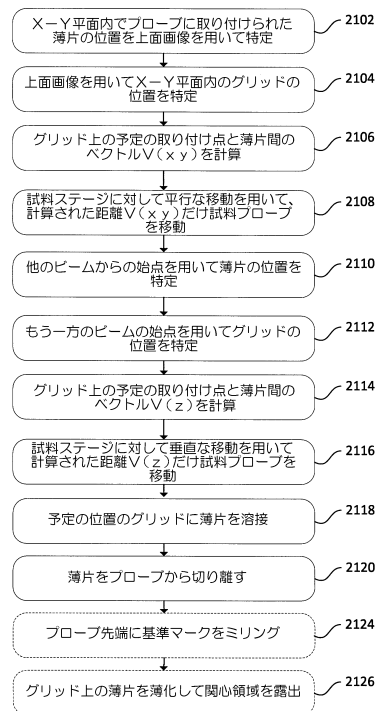
【図 20 a】



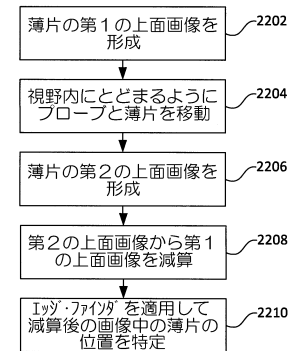
【図 20 b】



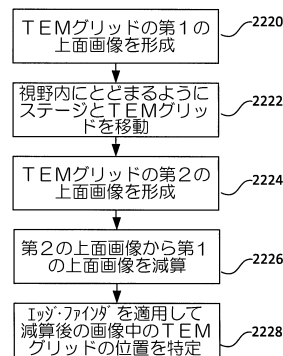
【図 21】



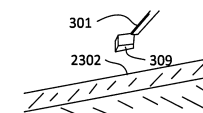
【図 22 a】



【図 22 b】



【 図 2 6 d 】



フロントページの続き

- (72)発明者 マイケル・シュミット
アメリカ合衆国 97080 オレゴン州 グレシャム エスイー ハチェンダ・レーン 100
3
- (72)発明者 ドゥルティ・トリヴェディ
アメリカ合衆国 12189 ニューヨーク州 ウォーターヴリート エイ・ピー・ティー・イー
、フェニモア・トレース エイ・ピー・ティー・エス 9
- (72)発明者 リチャード・ジェイ・ヤング
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 ペニンシュラ・コー
ト 16515
- (72)発明者 トーマス・ジー・ミラー
アメリカ合衆国 97229 オレゴン州 ポートランド エヌダブリュー ラ・カッセル・クレ
スト・レーン 10810
- (72)発明者 ブライアン・ロバーツ・ルース・ジュニア
アメリカ合衆国 97008 オレゴン州 ビーバートン エスダブリュー ベイ・メドウズ・コ
ート 13265
- (72)発明者 スターシー・ストーン
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 320
3
- (72)発明者 トッド・テンブルトン
アメリカ合衆国 97106 オレゴン州 バンクス エヌダブリュー コートサイド・コート
41844

審査官 本村 真也

- (56)参考文献 特開2014-048285(JP,A)
特開2008-210732(JP,A)
特開2013-101123(JP,A)
実開平01-079155(JP,U)
特開平03-230696(JP,A)
国際公開第2010/116428(WO,A1)
特開2000-171364(JP,A)
国際公開第2011/129315(WO,A1)
特開平05-052721(JP,A)
国際公開第2013/082496(WO,A1)
米国特許出願公開第2001/0045511(US,A1)
特開2007-18935(JP,A)
特開2005-167146(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 1/00 - 1/44
H01J 37/20 ; 37/30 - 37/36
H01L 21/302 ; 21/461 ; 21/64 - 21/66