

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6692217号  
(P6692217)

(45) 発行日 令和2年5月13日(2020.5.13)

(24) 登録日 令和2年4月16日(2020.4.16)

(51) Int.Cl.

F 1

HO 1 J 37/22 (2006.01)  
HO 1 J 37/317 (2006.01)HO 1 J 37/22 502 H  
HO 1 J 37/317 D

請求項の数 9 (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2016-114894 (P2016-114894)  
 (22) 出願日 平成28年6月8日(2016.6.8)  
 (65) 公開番号 特開2017-4948 (P2017-4948A)  
 (43) 公開日 平成29年1月5日(2017.1.5)  
 審査請求日 令和1年6月6日(2019.6.6)  
 (31) 優先権主張番号 15171227.0  
 (32) 優先日 平成27年6月9日(2015.6.9)  
 (33) 優先権主張国・地域又は機関  
　　歐州特許庁(EP)

(73) 特許権者 501233536  
　　エフ イー アイ カンパニ  
　　F E I C O M P A N Y  
　　アメリカ合衆国 オレゴン 97124-  
　　5793 ヒルズボロ ドーソン・クリー  
　　ク・ドライヴ 5350 エヌイー  
 (74) 代理人 100107766  
　　弁理士 伊東 忠重  
 (74) 代理人 100070150  
　　弁理士 伊東 忠彦  
 (74) 代理人 100091214  
　　弁理士 大貫 進介  
 (72) 発明者 パベル ポトツェク  
　　オランダ国, 5654 ペーイクス エイ  
　　ントホーフェン, ファウレストラート 1  
　　最終頁に続く

(54) 【発明の名称】荷電粒子顕微鏡において、試料の表面修正を分析する方法

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

荷電粒子顕微鏡を用いて、試料を調べる方法であって、  
前記荷電粒子顕微鏡は、

前記試料を保持する試料ホルダと、

荷電粒子放射のビームを生成するソースと、

前記ビームが前記試料の表面を照射するように、前記ビームを指向する照明器と、

前記照射に応じて、前記試料から放出される放射束を受けて、前記表面の少なくとも一部の画像を生成する画像検出器と、

材料除去と、材料付着と、これらの組み合わせと、を含むグループから選択された処理を、前記表面に行うことによって、前記表面を修正する装置であって、該装置は、動作パラメータのセットを用いる方法であって、

当該方法は、

一次性能指数との比較のための下限値及び上限値を規定する工程と、

前記試料の当初の表面である第一表面の第一画像を生成及び記憶する工程と、

前記装置のための前記動作パラメータを設定する工程と、

一次修正工程として、前記装置を起動し前記第一表面を修正して、修正された表面である第二表面を得る工程と、

前記第二表面の第二画像を生成及び記憶する工程と、

数学的な画像類似測定基準を用いて、前記第一画像と前記第二画像との画素単位での比

10

20

較を行い、前記一次修正工程のための前記一次性能指數を生成するようにする工程であって、該一次性能指數は、前記第一画像と前記第二画像の類似を定量化し、該一次性能指數の変化は、前記第一画像と前記第二画像の類似の変化を示す、工程と、

前記一次性能指數を前記下限値及び前記上限値と比較する工程であって、前記一次性能指數が、前記第一画像と前記第二画像の類似により示される前記一次修正工程の第一結果を示す前記上限値を超える場合、第一表面修正動作を行い、前記一次性能指數が、前記第一画像と前記第二画像の類似により示される前記一次修正工程の、該第一結果とは異なる結果を示す前記下限値を下まわる場合に該第一表面修正動作とは異なる第二表面修正動作を行う、工程と、を含む方法。

【請求項 2】

10

前記一次性能指數は、

前記一次修正工程は、前記第一表面を修正し損なったこと、

前記一次修正工程は、前記第一表面を十分には修正していないこと、及び

前記第二表面は、前記第一表面と比べて破損していること、

の少なくとも一つの状況であるとみなすのに用いられる、請求項1に記載の方法。

【請求項 3】

次の反復において、前記一次性能指數は、前記第二表面に施される、二次修正工程の少なくとも一つのパラメータを修正するのに用いられる、請求項1又は2に記載の方法。

【請求項 4】

20

前記一次性能指數は、前記一次修正工程により、前記試料に生じた厚さ変化を定量化するのに用いられる、請求項1から3のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 5】

前記画像類似測定基準は、SSIMと、MSEと、PSNRと、MIRとこれらの組み合わせ又は掛け合わせと、を含むグループから選択される、請求項1から4のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 6】

前記装置は、

機械的切断ツールと、

集束粒子ビームミリングツールと、

エッティング装置と、

ビーム誘起付着ツールと、

PVD装置と、

CVD装置と、

これらの組み合わせと、を含むグループから選択される、請求項1から5のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 7】

前記装置は、前記荷電粒子顕微鏡の現場にある、請求項1から6のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 8】

処理されるべき表面を有する試料を保持する試料ホルダと、

荷電粒子放射のビームを生成するソースと、

40

前記ビームが前記試料の表面を照射するように、前記ビームを指向する照明器と、

前記照射に応じて、前記試料から放出される放射束を受けて、前記表面の少なくとも一部の画像を生成する画像検出器と、

材料除去と、材料付着と、これらの組み合わせと、を含むグループから選択された処理を、前記表面に行うことによって、前記表面を修正する装置であって、該装置は、動作パラメータのセットを用いる、装置と、

電子プロセッサであって、

前記装置の動作パラメータを制御および調整することと、

前記試料から第一画像を取得することと、

表面修正工程として、前記装置を用いて前記試料の表面を修正し、次いで、前記試料

50

から第二画像を取得することと、

数学的画像類似測定基準を用いて、前記画像検出器で生成された、第一画像と第二画像との画素単位での比較を行い、数値的性能指数を生成することであって、該数値的性能指数は、前記第一画像と前記第二画像の類似を量化し、該数値的性能指数の変化は、前記第一画像と前記第二画像の類似の変化を示す、生成することと、

前記数値的性能指数を下限値及び上限値と比較することであって、前記数値的性能指数が、前記第一画像と前記第二画像の類似により示される前記表面修正工程の第一結果を示す前記上限値を超える場合、第一表面修正動作を行い、前記数値的性能指数が、前記第一画像と前記第二画像の類似により示される前記表面修正工程の、該第一結果とは異なる結果を示す前記下限値を下まわる場合に該第一表面修正動作とは異なる第二表面修正動作を行う、比較することと、

を行うようにプログラムされた電子プロセッサと、を含む荷電粒子顕微鏡。

**【請求項 9】**

前記電子プロセッサは、

前記表面修正工程の前に前記第一画像を蓄積し、

前記表面修正工程の後に前記第二画像を蓄積し、

前記数値的性能指数を用いて、前記表面修正工程の成功率を決定する、  
ように構成された、請求項8に記載の荷電粒子顕微鏡。

**【発明の詳細な説明】**

**【技術分野】**

**【0001】**

本発明は、試料を調べる方法であって、

荷電粒子顕微鏡であって、

- ・前記試料を保持する試料ホルダと、
- ・荷電粒子放射のビームを生成するソースと、
- ・前記ビームが前記試料の表面を照射するように、前記ビームを指向する照明器と、
- ・前記照射に応じて、前記試料から放出される放射束を受けて、前記表面の少なくとも一部の画像を生成する画像検出器と、を含む荷電粒子顕微鏡と、

材料除去と、材料付着と、これらの組み合わせと、を含むグループから選択された処理を、前記表面に行うことによって、前記表面を修正するように起動され得る装置と、を用いる方法である。

**【0002】**

本発明は、また、そのような方法を実行するのに用いられ得る荷電粒子顕微鏡に関する。

**【背景技術】**

**【0003】**

荷電粒子顕微鏡検査は、広く知られており、特に、電子顕微鏡の形で、微細な物体を撮像する技術として重要性が高まっている。歴史的にみると、電子顕微鏡の基本的な分類は、例えば、透過型電子顕微鏡(TEM)、走査型電子顕微鏡(SEM)、走査透過型電子顕微鏡(STEM)等の広く知られた顕微鏡の種類に進化しているし、さらに種々の細かい種類に進化している。いわゆる「デュアルビーム」ツール(例えば、FIB-SEM)などであり、これは、集束されたイオンビーム(FIB)を「加工(machining)」し、例えば、イオンミリングや、イオンビーム誘起付着(IBID)などの、補助的な活動を可能にしている。より詳細には、

SEMでは、走査電子による試料の放射により、例えば、二次電子、後方散乱電子、X線、陰極線発光(赤外、可視及び/又は紫外光子)の形で、試料からの「予備的(auxiliary)」放射の放出が促進される。この放出される放射の一以上のコンポーネントは、画像蓄積及び/又は分光分析(例えば、EDX(エネルギー分散型X線分光法)の場合のように)の目的のために検出され、用いられる。

TEMでは、試料を照射するのに用いられる電子ビームは、試料を貫通するのに十分な高いエネルギーであるものから選択される(この目的ため、試料はSEMの試料の場合よりも

10

20

30

40

50

概して薄い)。試料から放出される、伝達電子束は、画像を生成する又は、スペクトル(例えば、EELS(電子エネルギー損失分光法)の場合のように)を生成するのに用いられる。そのようなTEMが走査モード(つまり、STEMになる)で動作する場合、対象の(in question)画像/スペクトルが照射電子ビームの走査動作の間に蓄積される。

#### 【 0 0 0 4 】

ここで説明したいいくつかのトピックについてのさらなる情報は、例えば、次のWikipedia(登録商標)のリンクから収集することができる。

[http://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_microscope](http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_microscope)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning\\_electron\\_microscope](http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission\\_electron\\_microscopy](http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_electron_microscopy)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning\\_transmission\\_electron\\_microscopy](http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_transmission_electron_microscopy)

10

#### 【 0 0 0 5 】

照射ビームとして電子を用いる代わりに、荷電粒子の他の種を用いて、荷電粒子顕微鏡を行うこともできる。この点、用語「荷電粒子」は、具体的には、電子、正イオン(例えば、Ga又はHeイオン)、負イオン、陽子及び陽電子を含有するものとして広く解釈される。イオンベースの顕微鏡に関しては、さらなる情報が、例えば、次のようなソースから収集することができる。

[http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning\\_Helium\\_Ion\\_Microscope](http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_Helium_Ion_Microscope)

W.H. Escovitz, T.R. Fox and R. Levi-Setti, Scanning Transmission Ion Microscope with a Field Ion Source, Proc. Nat. Acad. Sci. USA 72(5), pp 1826-1828 (1975).

20

<http://www.innovationmagazine.com/innovation/volumes/v7n1/coverstory3.shtml>

#### 【 0 0 0 6 】

撮像及び/又は分光に加えて、荷電粒子顕微鏡(CPM)は、ディフラクトグラムを調べる、(局所的に)表面修正(例えば、ミリング、エッティング、付着)を行う等の他の機能を有してもよい。

#### 【 0 0 0 7 】

全ての場合において、荷電粒子顕微鏡(CPM)は、少なくとも次のコンポーネントを含む。

放射ソースであって、例えば、ショットキー放出ソース又はイオン銃

30

照明器であって、ソースからの「生の(raw)」放射ビームを扱い、集束、収差軽減、(ストップ/瞳/コンデンサ絞りを用いて)クロッピング、フィルタリング等の所定の動作を行う。照明器は、概して、一以上の荷電粒子レンズを含み、他の種類の粒子光学コンポーネントも含んでよい。望ましくは、照明は、出力ビームが調べる対象の試料を横切る走査動作を行うように起動され得る偏向システムとともに設けられ得る。

試料ホルダであって、調べている試料が保持及び位置決め(例えば、傾けられる、回転される)され得る。望ましくは、このホルダは、試料についてのビームの走査動作に影響を与えるように動き得る。一般的には、そのような試料ホルダは、機械的ステージなどの位置決めシステムに接続される。

検出器であって、事実上、単一のもの又は、組み合わされた/分散したものでよく、記録される放射/エンティティに依存して、多くの異なる形をとり得る。そのような検出器は、例えば、強度値を記録するのに用いられて、画像を取得する又は、スペクトルを記憶してよい。実施例には、光電子増倍管(SSPMs(固体光電子倍増管)を含む)、フォトダイオード、(画素で構成された)CMOS検出器、(画素で検出された)CCD検出器、光電池等が含まれ、例えば、シンチレータ膜と組み合わせて用いられてもよい。X線検出については、例えば、いわゆるシリコンドリフト検出器(SDD)又はシリコンリチウム(Si(Li))検出器からなるものが典型的には用いられる。典型的には、CPMは種々の種類の複数の検出器を含む。

40

#### 【 0 0 0 8 】

透過型CPM((S)TEMなど)の場合、次のものも用いる。

50

撮像システムであって、実質的に試料(平面)を通して伝達された荷電粒子を捕え、それらを、検出/撮像装置、分光ユニット等の分析/検知装置にそれらを指向(集束)する。上記に示した照明器とともに、撮像システムは、収差軽減、クロッピング(cropping)、フィルタリング等の他の機能を行ってもよい。撮像システムは、概して、一以上の荷電粒子レンズ及び/又は、他の種類の粒子光学コンポーネントを含んでよい。

#### 【0009】

以下では、本発明は 実施例を用いて しばしば、電子顕微鏡の文脈で記載される。しかし、そのように単純化しているのは、明確にする目的/説明をする目的とすることを意図しているだけであり、限定事項として解釈されるべきではない。

#### 【0010】

始めの段落で記載したように、表面修正は、現場にない(CPMの外側)又は現場(CPMの内側)にあり得る装置/モジュールを用いて実行される、多くの具体的方法がある。そのような表面修正の実施例には、次のものが含まれる。

(i) 機械的切断ツール(減じる処理/材料除去処理) :

ここでは、ミクロトーム、ダイアモンドスコアリングツール(scoring tool)、黒曜石ブレード、ミル(mill)又は旋盤(lathe)等の接触ツール(の一以上が動作して)が、試料表面(の一部)から一切れの材料を切り取る/そぐ/はがす。

(ii) 集束粒子ビームミリング(減じる処理/材料除去処理) :

ここでは、エネルギー/サイズが選択された、集束された粒子ビーム(例えば、イオン又は電子ビーム)が試料表面(の一部)を横切るように走査されて、材料をそこから除去する。望むのであれば、この処理は、連続する反復によって繰り返されて、連続的により大きな厚みの材料を取り除き得る。望むのであれば、この処理はパターン化された材料除去に役立つ。

(iii) エッティング装置(減じる処理/材料除去処理) :

この場合、科学試薬(気相エッチャント)が試料表面から材料を除去するのに用いられる。望むのであれば、この処理は、集束された粒子ビームを用いて活性/促進され得る。集束された粒子ビームは、必要であれば、この処理を高度に局所化/パターン化することができる。そのようなアプローチの実施例には、IBIE(イオンビーム誘起エッティング)及びEBIE(電子ビーム誘起エッティング)が含まれる。

(iv) ビーム誘起付着(加える処理/材料付着処理) :

ここでの実施例には、IBID(イオンビーム誘起付着)と、EBID(電子ビーム誘起付着)が含まれ、集束されたビームが(局所的に)先行ガス雲から材料の付着を引き起こす/促進するのに用いられる。

(v) 物理気相成長(PVD)(加える処理/材料付着処理) :

実施例には、スパッタリングと、分子線エピタキシー法(MBE)が含まれる。

(vi) 化学気相成長(CVD)(加える処理/材料付着処理) :

特定の実施例には、PCVD(プラズマCVD)と、MOCVD(有機金属CVD)が含まれる。

#### 【0011】

(i)から(vi)の技術は(必ずしもそうでなくてはならないということではないが)CPMの現場にあるモジュールを用いて行われ得る。例えば、(i)の技術は、いわゆるATLUM(Automated Tape-collecting Lathe UltraMicrotome)ツールの場合のように、現場以外でも実行され得る。ATLUMツールは、例えば、下記のリンクに記載されている。

<http://cbs.fas.harvard.edu/science/connectome-project/atlum>

#### 【0012】

(v)と(vi)の技術は、従来的には現場以外(ex situ)で行われるが、原理的には、現場にあるモジュールを使って行い得る。

#### 【0013】

CPMにおいて表面修正技術を用いる特定の方法は、例えば、次の文献に記載されている。

US 8,232,523号であって、ここでは、物理的スライス(例えば、ミクロトームを用い

10

20

30

40

50

た)が演算画像再構築と組み合わされて再構築深さの範囲を向上している。

EP 2824445 A1であって、ここでは、種々の表面修正技術が試料の関心領域からのラマンスペクトル信号を改善するのに用いられる。

【0014】

そのような方法の問題点は、表面修正された試料が撮像されるCPMは、典型的には、ナノメータ又はサブナノメータの解像度を有するとともに、対象の試料はしばしば非常にデリケート/もろい(例えば、非常に薄い(TEMの試料の場合のように)ため、又は、例えば、ビトリファイド(vitrified)されているので)、用いられた表面修正技術が、満足のいく結果(例えば、質的に、量的に、再動作可能性、タッチアップ、サンプルダメージ等を考慮して)を出す場合には、非常に正確に行われなくてはならない。今のところ、そのような動作を監視する正確な方法がない。そのかわり、監視は、むしろあてずっぽうで、事実上偶然にたより、試料を調べた人の過去の経験/技術強く依存し、ある程度の運である傾向がある。

10

【発明の概要】

【0015】

本発明の目的は、これらの事柄に対処することである。より詳細には、本発明の目的は、上記に示したような表面修正技術が監視し得るやり方を提供することである。特に、本発明の目的は、そのような監視により、表面修正の試行(attempt)のし損ない又は、表面修正の試行による破損を比較的高速に特定することができる。また、本発明の目的は、質的及び量的な出力のいずれも将来的には生成することができる監視技術を提供することである。

20

【0016】

これら及び他の目的は、最初の段落で記載された方法で達成される。ここで、その方法は次の工程により特徴づけられる。

前記試料の当初の表面である第一表面の、第一画像を生成及び記憶する工程

一次修正工程として、前記装置起動し前記第一表面を修正して、修正された表面である第二表面を得る工程

前記第二表面の第二画像を生成及び記憶する工程

数学的画像類似判定基準(ISM)をもちいて、(CPMの)前記第一画像及び前記第二画像の画素単位での比較を行い、前記一次修正工程用の一次性能指數(FOM)を生成する工程

30

【0017】

本発明は、表面修正の後、試料は撮像能力を有する装置(CPM)に転送されるという事実を活用している。また、数学的ISMが、複数の客観的に定義可能な基準を用いて画像の画素単位での自動比較を行う基礎として用いられ得る。それに基づき、対象の画像の類似性(又は相違性)の量的な指標(quantifier)であるFOM又は(例えば、関連性度合いに基づいた)「スコア」を生成し得る。その際、ISMは、座標単位で(画素単位で)比較される数学領域のものとしての画像を扱う(及び保存する)。それにより、もし、例えば、加算、積分等のフィールドデストロイ(スカラー化)操作(field-destroying (scalarizing) operation)を画像に行うと不可能な(中間画像/イントラ画像の)形状変更検出及び定量化を可能にする。したがって、そのようなISMを所与の表面修正の試行に関連した「前」及び「後」の画像(上述の第一画像及び第二画像)に実行すると、問題となる表面にその試行がどのような影響を(もしあれば)与えたかを(自発的に)決定するのに用いることができる。例えば、次のようである。

40

【0018】

(a) 「前」及び「後」画像の比較から生じるFOMが所定の上限値を超える値を有する場合、対象の表面修正の試行が失敗した(failed/missed)(例えば、アラインメント/キャリブレーション不良、プロセス不良(ガス管の閉塞、ビームの誤射等)、同期失敗等)と見なすことができる。例として、用いたISMがいわゆる構造的類似性指數判定基準(Structural Similarity Index Metric (SSIM))で考えると、上限FOM値(例えば、+1又は+1に非常に近い値)がこのように解釈され得る。

50

## 【0019】

(b) 反対に、「前」及び「後」画像の比較から生じるFOMが所定の下限値を下回る場合、対象の表面修正の試行が何らかのやり方、例えば、破片を残した、意図しない機械的なダメージが働いたことにより、表面を破損させたと見なすことができる。再度、上述のSSIMの例で考えると、下限FOM値(例えば、用いたSSIMの定義/正規化に依存して、-1若しくは-1に非常に近い値又は0)がこのように解釈され得る。

## 【0020】

(c) これらの極値(extremes)の間で、表面修正技術の光学的性能に対応する理想的な「FOM帯」を定義することができる。FOMがこの帯の外にある(ものの、上記に示した上下閾値内にはある)場合、表面修正の試行が部分的には成功し、準最適であると結論付けることができる。

10

## 【0021】

状況(a)及び状況(c)の下では、例えば、調整したパラメータ(切断ツール/ビームの位置、補助ガス圧力、処理継続時間等)で別の表面修正の試行をやってみることを考慮することができる。必要に応じて、これを連続的に反復して行うことができ、目標とするFOM値に向けて十分に収束させる。状況(b)の下では、さらなる活動(activities)に進める前に試料表面を洗浄/再条件設定することを考慮することができる。必要に応じて、これを連続した工程/反復により行うことができ、目標とするFOM値に向けて十分に収束させる。これらの実施例から、本発明は、もしなければ不明瞭で有名な処理についての有益な監視を提供することが分かる。

20

## 【0022】

本発明で使用する実際のISMに関しては、種々の可能性がある。その一つ SSIM は、すでに上記で触れているが、二つの正方( $N \times N$ )の画像タイルA及び画像タイルBの類似性についてのFOM値 $F_{SSIM}(A, B)$ を生成する。これらの画像タイルは、それぞれ第一画像及び第二画像の対応する(座標)位置から取得する。関係式は次のようになる。

## 【数1】

$$F_{SSIM}(A, B) = \frac{(2\mu_A\mu_B + C_1)(2\sigma_{AB} + C_2)}{(\mu_A^2 + \mu_B^2 + C_1)(\sigma_A^2 + \sigma_B^2 + C_2)}$$

30

ここで、

$$\mu_A$$

は、Aの(of/over)平均であり、

40

$$\mu_B$$

は、Bの(of/over)平均であり、

$$\sigma_A^2$$

は、Aの(in/of)分散であり、

50

$$\sigma_B^2$$

は、Bの(in/of)分散であり、

$$\sigma_{AB}$$

は、AとBの共分散であり、

10

$$C_1 = k_1 L^2$$

及び

$$C_2 = k_2 L^2$$

20

は、分母の値が小さい場合に、結果が非常に大きくなってしまう(runaway)のを防止する平滑化変数である。ここで、

LはA及びBの画素値のダイナミックレンジであり、nを画素単位のビット数として、典型的には、

$$L = 2^n - 1$$

とする。

30

$$k_1$$

及び

$$k_2$$

は、0.01及び0.03の従来値にそれぞれ設定される。

【0 0 2 3】

40

この値は、典型的には、輝度(色度ではない)のためにだけに計算され、用いた正規化に依存した大きさの範囲(magnitude range)を有する数(FOM)を生成するが、従来的には、+1(画像完全一致)の上限値と-1又は0(画像完全不一致)の下限値の間にある。

【0 0 2 4】

関連事項として、例えば、次の定義に基づいて、「相違性」SSIM(DSSIM)を定義することもできる。

## 【数2】

$$F_{DSSIM}(A, B) = \frac{1 - F_{SSIM}(A, B)}{N}$$

ここで、Nは、正規化ファクタであり、例えば、N=2である。望むのであれば、そのような測定基準を本発明で用いることができる。

## 【0025】

10

本発明は上述したSSIMを用いることに限られない。望むのであれば、他のISMを用いることも選択することができる。ISMの他の実施例には、次のものが含まれる

- ・ 平均二乗誤差(MSE)であり、 $m \times n$ の白黒の画像Aと画像Bについて(又は、対応する座標における部分画像について)次のように定義される。

## 【数3】

$$F_{MSE}(A, B) = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [A(i, j) - B(i, j)]^2$$

20

これは、従来的には、画像画素値正規化に依存した値を有する値(FOM)を生成する。例えば、

範囲0-1内にある画像画素値については、 $F_{MSE}$ も、範囲0-1内に収まり、0は画像完全一致であり、1は画像完全不一致に対応する。

範囲0-255内にある画像画素値については、 $F_{MSE}$ は、範囲 $0-255^2$ に収まり、0は画像完全一致であり、 $255^2$ は、画像完全不一致に対応する。

- ・ ピーク信号対雑音比(PSNR)であり、次のように定義される。

## 【数4】

30

$$F_{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{P_{MAX}^2}{F_{MSE}}$$

ここで、 $F_{MSE}$ は、先の項目で記載されており、 $P_{MAX}$ は、対象の画像における最大可能画素値である。例えば、

$P_{MAX}$ は、サンプルあたり8ビットを用いて表された画素について255の値を有する。

$P_{MAX}$ は、サンプルあたりNビットを用いて表された画素について、より一般的な値 $2^N - 1$ を有する。

PSNRの利点は、その値が、画像画素値の範囲からは(完全に)独立していることである。

- ・ 相互情報量(Mutual Information of Regions)であり、次のように定義される。

## 【数5】

$$F_{MIR}(A, B) = \sum_{a \in A} \sum_{b \in B} p(a, b) \log \left( \frac{p(a, b)}{p(a)p(b)} \right)$$

ここで、 $p(a, b)$ は、AとBの結合可能性分布関数であり、 $p(a)$ 及び $p(b)$ は、それぞれ、AとBの余剰可能性分布関数である。これは、例えば、0の値が画像完全不一致で、1の値が画像完全不一致となるように、正規化される。

## 【0026】

(他の領域で適用されているように)画像比較の数学についてのさらなる情報は、例えば、A.A. Goshtasby, *Image registration, Advances in Computer Visual and Pattern Recognition, Chapter 2*, Springer-Verlag, London (2012) [DOI 10.1007/978-1-4471-2458-0\_2]の文献から収集することができる。本発明で用いられている数学的なISMは、例えば、放出生成計測(emission yield measures)及び他のスカラー化計測(scalarizing measures)について本質的に異なる性質であることに留意する。例えば、固定領域の特徴が画像フィールド内での位置及び又は形状を変更すると、数学的なISMは、この変更を登録するが、スカラー化計測はこの変更を登録しない。より詳細には、

本発明の数学的なISMは、要素単位(member-by-member basis)で、二つの分布を比較し、その比較から測定基準を抽出する(多変量アプローチ)。

スカラー化計測は、まず各分布を値に変換して(これにより、各分布の所定の詳細を失わせる)、対象の二つの値を比較する。

スカラー化計測は、エッチングにおいて、終端検出用にしばしば用いられる。それにより、マークされた輝度変化(例えば、累積二次電子領域に対応する)が、下にある(例えば、相対的に低輝度の)基板から所与の(例えば、比較的高輝度の)材料の(完全な)除去に一致する。この目的のため、相対的に明るいマーカ素材(金等)が意図的に試料の所与の深さのところに導入され、それが、エッチングにより除去される場合に、消滅する(quench)(そして積分値(integrated yield)に影響を与える)撮像「ビーコン(beacon)」として活動する。

## 【0027】

上記に記載のように、許容できないFOM値が上述の(a)と(c)の場合で取得された場合、よりよいFOM値を取得することを期待して、表面修正処理を繰り返すことができる。これは、「盲目的」に行うことができる(「当てずっぽう」方式)。しかし、本発明の特定の実施形態においては、その代わりに、「賢く」行うことができる(「誘導」方式)。後者の場合において、(一次修正工程により生じた)一次性能指数を、(新たに作成された)第二表面に行う二次修正工程の少なくとも一つのパラメータを調整するのに用いる。言い換えると、一次FOM値(又は、その派生物/合成物)を、表面修正処理の一以上のパラメータが(継続的に)微調整されるフィードバックループへの入力として用いて、許容できる最終的なFOM値への収束を高速化するようとする。そのようなパラメータの例としては、例えば、

## 機械的切断ツールの厚さ設定

集束される粒子ビームミリングツールについてのビームエネルギー及び/又は走査速度(位置当たりの滞在時間)

化学的エッチングツールについてのエッチャント温度/圧力/流量及び/又はエッチング時間

ビーム誘起付着ツールについての先行ガス圧力/流量及び/又はビームエネルギー/走査速度

PVDツールについての付着速度(例えば、スパッタ率又は蒸発温度)及び/又は付着時間

CVDツールについての先行ガス圧力/流量及び/又は付着時間

10

20

30

40

50

## 【0028】

特定のパラメータは、表面から除去された又は、表面に付加された材料の厚さに線形的に影響することが知られている場合(予測されている場合)、そのような調整は、(例えば、)次の形の関係式によって(部分的に)統制される。

## 【数6】

$$\text{Parameter\_new} = \text{Parameter\_old} \times (1 - \text{FOM\_present} / \text{FOM\_ideal})$$

10

又は、その合成物/派生物(hybrid/derivative)である。

## 【0029】

本発明の他の(いくらか関係する)実施形態において、一次性能指数は、一次修正工程によって試料に生じた厚さの変化を定量化するのに用いられる。これは、例えば、

前のキャリブレーション

FOMが厚さの変化の関数としてどのように変化するかについての物理モデル

前もって取得されたデータペアに基づいた補外/補間

等のうち一以上に基づいてなされることができる。このように(減ずる又は追加の)厚さ変更を定量化することにより、表面修正処理そのものの訂正/微調整を可能にするとともに、さらに必要とされる厚さ変更の特質/程度をより正確に評価することができる。

20

## 【図面の簡単な説明】

## 【0030】

例示の実施形態と添付の概略図に基づいて、より詳細に本発明を明らかにする。

【図1】図1は、本発明の実施形態が実行され得る、特定の種類のCPMの長手方向の断面図を示す。

【図2A】図2Aは、マウスの脳の試料に表面修正技術を反復して施したものについて、本発明により計算された、ISM FOM値をグラフで示す。

【図2B】図2Bは、図2Aを生成する際に、用いられたマウスの脳の試料の露出表面のノミナル画像(nominal image)を示す。

【図3A】図3Aは、図2Aの表面修正の反復のうちの一つにより、試料の表面の破損/汚染を引き起こし、規格外のFOM値となった状況の画像を示す。

30

【図3B】図3Bは、図2Aの表面修正の反復のうちの一つにより、試料の表面の破損/汚染を引き起こし、規格外のFOM値となった状況の画像を示す。

【図4A】図4Aは、図2Aの表面修正の反復により、フラグ付きのFOM値となり、表面修正の反復の一つに関連した取得エラーを明らかにしている。

【図4B】図4Bは、図2Aの表面修正の反復により、フラグ付きのFOM値となり、表面修正の反復の一つに関連した取得エラーを明らかにしている。

【図4C】図4Cは、図2Aの表面修正の反復により、フラグ付きのFOM値となり、表面修正の反復の一つに関連した取得エラーを明らかにしている。

【図5A】図5Aは、図2Aの表面修正の反復により、フラグ付きのFOM値となり、表面修正の反復の一つに関連した取得エラーを明らかにしている。

40

【図5B】図5Bは、図2Aの表面修正の反復により、フラグ付きのFOM値となり、表面修正の反復の一つに関連した取得エラーを明らかにしている。

【図5C】図5Cは、図2Aの表面修正の反復により、フラグ付きのFOM値となり、表面修正の反復の一つに関連した取得エラーを明らかにしている。

## 【発明を実施するための形態】

## 【0031】

<実施形態1>

図1は、本発明に関連して用いるに役立つCPM実施形態の高度に概略化された描写である。より詳細には、走査型の顕微鏡M、本実施形態においては、SEMである(本発明の文脈に

50

おいて、例えば、イオンベースの顕微鏡又は、具体例としてはTEMも妥当だろう)実施形態を示す。顕微鏡Mは、粒子光学カラム/照明器1を備え、これは、入力荷電粒子のビームC(本件では、電子ビーム)を生成し、ビームCは、粒子光軸C'に沿って伝搬する。粒子光学カラム1は、真空チャンバVに設置される。真空チャンバVは、試料ホルダHと、試料Sを保持/位置決めする、試料ホルダHに関連したステージ/アクチュエータAを含む。真空チャンバVは、真空ポンプ(図示せず)を用いて排気される。電圧源17を用いて、試料ホルダH又は少なくとも試料Sは、望むのであれば、グラウンドに対する電位をバイアス(フロートする(floated))してもよい。

#### 【0032】

粒子光学カラム1は、電子源9(例えば、ショットキー放出器)と、電子ビームCを試料Sに集束させる(静電/磁気)レンズ11、レンズ13(一般的には、ここでの概略的な描写よりも構造はより複雑である)と、ビームCのビーム偏向/走査を行う偏向部Fとを含む。ビームCが試料Sに衝突する又は、ビームCが試料Sを横切って走査されるとき、後方散乱電子、二次電子、X線、陰極線発光(赤外、可視及び/又は紫外光子)等種々の「誘導」放射の放出を促進する。これらの種々の放射のうちの一つ以上は、一つ以上の検出器を使って感知/記録され得る。検出器は、試料の走査位置の関数として、典型的には、検出器の出力の「マップ(又はマトリクス)」にまとめることにより、画像、スペクトル、ディフラクトグラム等を形成してよい。本図は、二つの検出器D及び検出器D'を示し、これらは、例えば次のように実施される。

検出器Dは、例えば、電子検出器(SSPMなど)、X線検出器(SSD又はSi(Li)センサ等)又は光検出器(フォトダイオードなど)である。

検出器D'は、セグメント化された電子検出器であり、中央開口15のまわりに(ビームCの通過は許容しつつ)配置された複数の検出セグメント(例えば、四分円(quadrants))を含む。そのような検出器は、試料Sから発生する(角度依存の)出力(二次又は後方散乱)電子束を調べるために用いる。

これらは、単なる実施例であって、当業者は検出器の他の種類、数及び形状/構成が可能であると理解するだろう。

#### 【0033】

顕微鏡Mは、さらに、コントローラ/演算処理部Eをさらに含む。コントローラEは、とりわけ、偏向部F、レンズ11、レンズ13、検出器D、検出器D'を制御し、検出器D及び検出器D'から集めた情報を表示部19(フラットパネルディスプレイなど)に表示する。そのような制御は制御線E'(バス)を介して行う。コントローラE(又は、他のコントローラ)は、組み合わせ、積分、減算、偽色、輪郭強調及び当業者に既知の他の処理等の種々な数学的処理を行うのに付加的に用いることができる。また、自動化された認識処理(例えば、粒子分析のために使用される等)もそのような処理に含まれてもよい。

#### 【0034】

本発明の文脈において、顕微鏡Mは、現場にある(in situ)表面修正装置を有する。表面修正装置は、材料除去、材料付着等の処理を実行することで、試料Sの現在の表面(最上表面)を修正するべく起動され得る。上記に示したように、そのような装置は多くの異なる形状をとることができ、(多くのうちの)たった二、三の可能性しか本図には示されていない。より詳細には、

アイテム3は、現場にある機械的切断装置3であり、(後退可能な)ミクロトーム、ナイフ又はミル等でよい。又は、PVD又はCVDを行うための、現場にある付着ステーション3、又はエッティング部でよい。望むのであれば、試料ホルダHは、アクチュエータAにより動かされて、試料Sについての制御された表面修正の動作のためにアイテム3を「訪問(visit)」してよい。

アイテム5は、二次粒子光学カラムであり、本件においては、例えば、イオンカラムである。それは、関連する二次粒子光学軸5'を有しており、これは、典型的には、試料Sの平面内で軸C'に交差する。それは、例えば、試料Sでイオンミリングを行うために用いられ得る。または、(特定の先行ガスを制御可能に流すのに用いられ得る)ガス吸気管

10

20

30

40

50

7と組み合わせて、IBID又はIBIEを実行するのに用いることができる。また、もちろん、例えば、撮像用のイオンカラムと、EBID又はEBIEを行う電子カラムとを用いて、アイテム1とアイテム5の役割/特性を逆にすることができる。

【0035】

実施においては、アイテム3とアイテム5の一つのみあればよい。または、さらに多くのそのような表面修正モジュールがあつてもよい。さらに、上記に記載したように、チャンバ/エンクロージャVの外に、一以上の現場にない(ex situ)表面修正装置/ツールからなるようにしてもよい。どのようにするかは、選択、利用可能なスペース、望ましい多用性等の問題である。

【0036】

表面修正が試料Sで行われる(アイテム3及び又はアイテム5)のとき、最終的な到達点は、試料Sの当初の表面から望ましい層の厚さを除去する又は、当初の表面に望ましい層の厚さを加えることであろう。実際には、この目的を(満足には)達成できない可能性があり、あまりに少ない材料若しくはあまりに多すぎる材料を除去若しくは追加してしまう、及び/又は、試料表面上に破片/汚染物質を生成することで、試料表面を損傷/破損してしまう。所定の具体例においては、そのような状況が、試料Sが粒子カラム1の下の検査位置に戻されるときに、それらをいくらかの(限られた)程度で質的に明らかにすることで、新たに生成された試料表面が撮影され(、マイクロスコープにより視覚的に検査される)又は、そうでなければ研究される(例えば、スペクトル及び/又はディフラクトグラムを介して)。しかし、量的検査ルーチンがより価値がある特にそれが(半)自動的に実行される場合に。本発明は、「前」及び「後」の画像の(自動的な)数学的比較を用いて、試料に行われた最後の表面修正の意味のある数値「スコア」または「グレード」(FOM)を生成するという点において、そのような量的情報を提供する。上記に説明したように、このスコア値は、表面修正が許容可能だったか否かについての決定を(自動的に)行うのに用いられる。もし、許容可能でない場合は、表面修正反復を(自動的に)行う/調整する基礎として用いることができる。そのような計算、分析及び制御はプロセッサE(内で動くソフトウェア/ファームウェア)又は他の(専用)プロセッサ部によって行うことができる。

【0037】

<実施形態2>

図2Aは、マウスの脳の試料に表面修正技術を反復して施したものについて、本発明により計算された、ISM FOM値をグラフで示す。特定の件においては、ミクロトームを用いて試料から所与の膜厚d<sub>s</sub>のものを反復的にそぎ取る。これにより

d<sub>s</sub>=10nmで反復する場合(図2Aでの点線)

d<sub>s</sub>=20nmで反復する場合(図2Aでの実線)

となる。

【0038】

試料の新たに(freshly)修正された表面の画像が各反復後に撮影され、本発明によれば、ISM FOM値が各反復に関連した「前」及び「後」画像の対応するペアについて計算されている(「前」画像は、前の反復の後に撮影された画像である)。より詳細には、本件においては、各画像は、2048×2048の「画素」または「タイル」に分割されており、F<sub>SSIM</sub>(A, B)が上記で与えられた公式により計算されている。この値(F)は、反復指数(I)に対してプロットされて、図2Aを生成する。それにより、縦軸(F値)は、十個の段階又は帯域に分割されており、各高さ/程度は0.1である。図2Aの検査からは、次のことが明らかである。

10nmのカット(点線)については、F値は、最上位帯(0.9-1)に頻繁にあり、その外にあるのは相対的に見てときどきしかない(目を引く例外(スパイク)は指数80のところであり、これは図4A-4Cに関して下記に詳細に議論する)。これは、多くの場合において、表面修正は試料から材料を除去し損ねていることを示している(F値は1又は非常に1に近い)。

20nmのカット(実線)については、最上位帯(0.9-1)に依然としてデータ点があるが、大部分は、0.6-0.7/0.7-0.8等の「ノミナル(nominal)」帯域にある。目を引く例外(スパイク)は、次の指数のところで起きている。

10

20

30

40

50

- ・ 48と83、これらは図3Aと図3Bに関して下記に詳細に議論する。
- ・ 64、これは図5Aから図5Cに関して下記に詳細に議論する。

#### 【0039】

本発明によると、図2Aの下方帯に向かう( $F$ 値が相対的に0に近づく)目を引くスパイクは、計画通りに進まなかった表面修正反復の指數として解釈され得るが、これについて詳細に説明する。

#### 【0040】

図2Bは、図2Aを生成する際に用いられたマウスの脳の試料の露出表面のノミナル画像を示す。これは、満足のいく表面処理反復が実行された後にどのように試料が見える「はずであるか」を示した例であり、下記の議論のための参考/基準として用いることにする。

10

- ・ 図2Aに戻ると、これは、最下位帯(0-0.1)の境界線上に二つの深いスパイクを示している。つまり、一つは指數48のところであり、一つは指數83のところである(いずれも $d_s=20nm$ で設定された測定において発生している)。本発明によると、そのような低い $F$ 値(0に近い)は、表面処理反復が試料の表面を破損した指數として解釈され得る。そして、この解釈は、図3A及び図3Bにより裏付けされる。これらの図は、これら二つの指數(図3Aでの148、図3Bでの183)にそれぞれ対応する表面修正後の試料画像を示す。これらの図は明らかに試料の表面に破片があることを示している もっともありそうなのは、薄膜工程の後に新たに露出した表面に落下した薄い試料の破片の形式のものである。

- ・ また、図2Aには、下から数えて三番目に低い $F$ 値帯(0.2-0.3)の境界にまで伸びる二つのスパイクがある 一つは、164( $d_s=20nm$ )付近で発生し、もう一つは180( $d_s=10nm$ )付近で発生している。

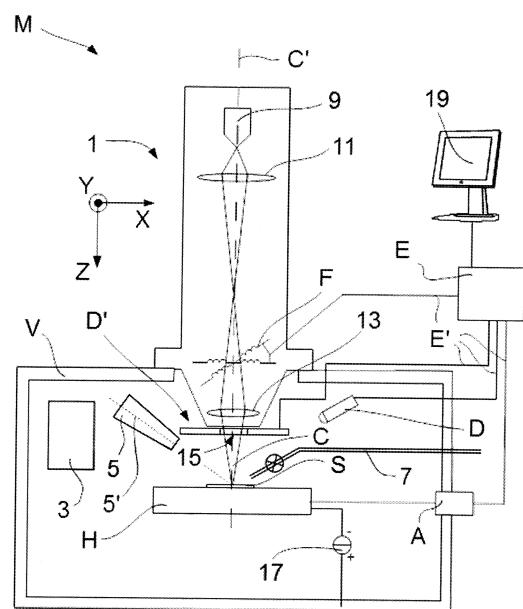
20

これらの二つ目の方から始めるが、図4A及び図4Bは、指數179と178での試料画像をそれぞれ示す。また、図4Cは、一方の画像を他方の画像から差し引いて得られた「差分画像」である。図4Bをよく観察すると、画像内に急な横ずれの形式の不連続性があることがわかる(画像の下から大体2/5の辺り) - おそらく、画像取得の間にビーム/ステージ走査位置の急激なジャンプにより引き起こされたものである。図4Cの差分画像が、このずれをより明確に明らかにしている 二つの他のそのようなずれも一緒にあり これらのずれは、(画像の下から上に向かって)(ある程度)周期的に発生しているようである。これらのずれの結果、 $F$ 値はかなり下がってしまう( $F \sim 0.3$ )。そのような $F$ 値の挙動は、問題(本場合においては、走査エラー)があり、システムチェックが価値ある活動となるフラグとして解釈され得る。

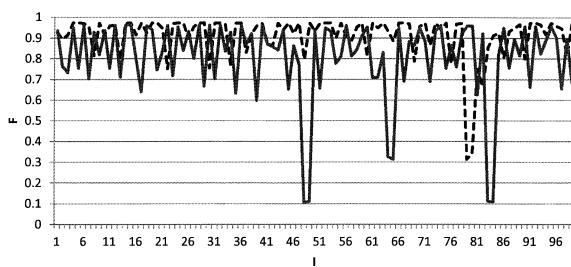
30

図5Aと図5Bは、指數163と164での試料画像をそれぞれ示す。そして、図5Cは、一方の画像を他方の画像から差し引いて得られた「差分画像」である。図5Bを(訓練された目で)よく観察すると、主に上下端近辺に(おそらくレンズの収差により引き起こされた)画像の歪みがあることがわかる。図5Cの差分画像が、この歪みをより明確に明らかにしており、画像の中央を横切るように相対的に特徴のない「無地」であるものの、上下端に沿っては目立った「トポグラフィー(topography)」がある。この歪みの結果、 $F$ 値がかなり下がってしまう( $F \sim 0.3$ )。もう一度言うと、そのような $F$ 値の挙動は、問題(本場合においては、収差事項)があり、システムチェックが賢明となるフラグとして解釈され得る。

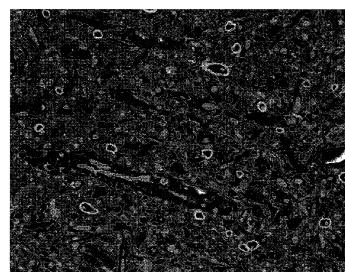
【図1】



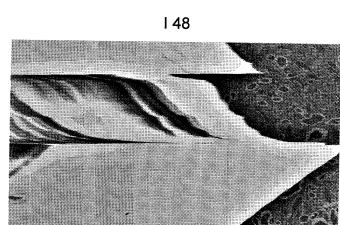
【図2 A】



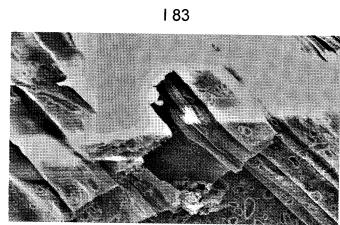
【図2 B】



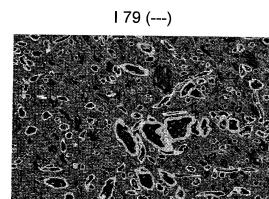
【図3 A】



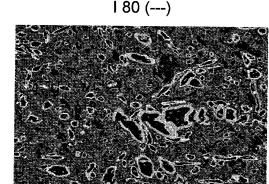
【図3 B】



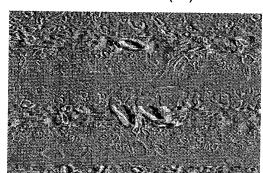
【図4 A】



【図4 B】

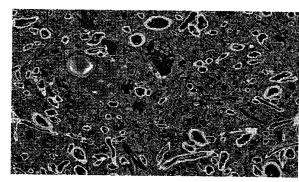


【図4C】

 $\Delta I 80 - I 79 (-)$ 

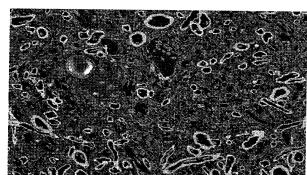
【図5B】

I 64

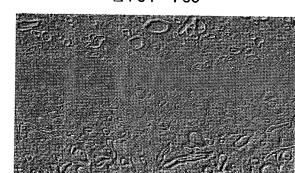


【図5A】

I 63



【図5C】

 $\Delta I 64 - I 63$ 

---

フロントページの続き

(72)発明者 フェイサル ボウクホルベル  
オランダ国, 5 6 2 9 ヘーアー エイントホーフェン, ホンドスルグラーン 8 0  
(72)発明者 マティエス ペトリュス ウィルヘルムス ファン デン ボハード  
オランダ国, 5 2 8 3 エルベー ボクスティル, ショパンストラート 2  
(72)発明者 エミネ コルクマズ  
オランダ国, 5 5 0 8 フェーペー フェルドホーフェン, ラーグハイ 1 4

審査官 右 高 孝幸

(56)参考文献 特開2000-21347 (JP, A)  
米国特許第6175417 (U.S., B1)  
米国特許出願公開第2014/0092230 (U.S., A1)  
米国特許出願公開第2015/0136977 (U.S., A1)  
国際公開第2014/014446 (WO, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H 01 J 37 / 22  
H 01 J 37 / 317