

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第6995855号

(P6995855)

(45)発行日 令和4年1月17日(2022.1.17)

(24)登録日 令和3年12月17日(2021.12.17)

(51)国際特許分類

F I

G 0 1 B	15/00	(2006.01)	G 0 1 B	15/00	K
H 0 1 J	37/28	(2006.01)	H 0 1 J	37/28	B
H 0 1 J	37/147	(2006.01)	H 0 1 J	37/147	B
H 0 1 J	37/22	(2006.01)	H 0 1 J	37/22	5 0 2 B
G 0 6 T	7/62	(2017.01)	H 0 1 J	37/22	5 0 2 H

請求項の数 10 (全21頁) 最終頁に続く

(21)出願番号	特願2019-531892(P2019-531892)
(86)(22)出願日	平成29年12月12日(2017.12.12)
(65)公表番号	特表2020-502509(P2020-502509 A)
(43)公表日	令和2年1月23日(2020.1.23)
(86)国際出願番号	PCT/EP2017/082427
(87)国際公開番号	WO2018/108912
(87)国際公開日	平成30年6月21日(2018.6.21)
審査請求日	令和2年11月20日(2020.11.20)
(31)優先権主張番号	1662509
(32)優先日	平成28年12月15日(2016.12.15)
(33)優先権主張国・地域又は機関	フランス(FR)

(73)特許権者	311015001 コミサリヤ・ア・レネルジ・アトミック・ エ・オ・エネルジ・アルテルナティブ フランス国、エフ - 7 5 0 1 5 ・パリ、 リュ・ルブラン・2 5、パテイマン “ル・ ポナン・デ”
(74)代理人	110001173 特許業務法人川口国際特許事務所
(72)発明者	クメール, パトリック フランス国、3 8 3 4 0 ・ボルupp、リ ユ・シャルベ・7
(72)発明者	アザール, ジェローム フランス国、3 8 3 2 0 ・エイバン、ア ブニュ・ドゥ・ラ・レピュブリック・2 8・デ

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 C D - S E Mキャラクタリゼーション技術を実装するための方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

C D - S E M技術として知られる、寸法測定分野における、サンプルの構造の少なくとも1つの限界寸法の決定のための走査型電子顕微鏡キャラクタリゼーション技術を実装するための方法(100)であって、

- サンプルの構造を表し、走査型電子顕微鏡から導出された実験画像を発生するステップ(101)と、

- パラメトリック数学関数に基づく第1の理論モデルから、補正項の代数和によって得られる第2の理論モデルを計算するステップ(102)であって、前記補正項は、所与の畳み込みカーネルと第1の理論モデルとの間の畳み込み積であり、前記第2の理論モデルは、決定されるべきパラメータの組を備え、第1および第2の理論モデルは、実験画像におけるサンプルの構造の数学的表現である、ステップと、

- 前記第2の理論モデルと前記実験画像との間の調整により、第2の理論モデルに存在するパラメータの組を決定するステップ(103)であって、調整は、前記第2の理論モデルと前記実験画像との間の差の最小化に対応する、ステップとを含む、方法(100)。

【請求項 2】

第2の理論モデルが、次の式

【数 1】

$$\text{Im}g(x, y) = G(x, y) - C \iint_{-\infty}^{+\infty} F(x', y') * [G(x', y') - \bar{G}_0] dx' dy'$$

にしたがって計算され、ここで、

(x, y) は、2つの直交方向 x および y に沿った、画像の各点に関連した空間座標であり、

$G(x, y)$ は、パラメトリック数学関数に基づく第1の理論モデルであり、

$Img(x, y)$ は、補正項の適用により得られる第2の理論モデルであり、

$F(x, y)$ は、所与の畳み込みカーネルであり、

【数2】

$$\bar{G}_0$$

10

は、実験画像上に存在する、強度のバックグラウンドであり、

C は、調整定数である

ことを特徴とする、請求項1に記載の方法(100)。

【請求項3】

一次電子ビームが、いわゆるTVまたはラスタ走査方法にしたがって、サンプルの表面を走査し、走査方向が、水平方向または x 軸であることを特徴とする、請求項1または2に記載の方法(100)。

【請求項4】

畳み込みカーネルが、対称一次元関数であることを特徴とする、請求項1から3のいずれか一項に記載の方法(100)。

20

【請求項5】

畳み込みカーネルが、 x 軸に沿ってとられたガウシアンであり、前記ガウシアンは、次の式

【数3】

$$Img(x, y) = G(x, y) - C \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-x')^2}{2\sigma^2}} * [G(x', y) - \bar{G}_0] dx'$$

にしたがって、シグマに比例する半値全幅を有することを特徴とする、請求項2および4に記載の方法(100)。

【請求項6】

30

畳み込みカーネルが、二次元対称関数であることを特徴とする、請求項1から3のいずれか一項に記載の方法(100)。

【請求項7】

畳み込みカーネルが、次の式

【数4】

$$Img(x, y) = G(x, y) - C \iint_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-x')^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{(y-y')^2}{2\sigma_y^2}} * [G(x', y') - \bar{G}_0] dx' dy'$$

にしたがって、一次電子ビームの走査方向にそれぞれ平行および垂直な方向において二次元対称であることを特徴とする、請求項2および6に記載の方法(100)。

40

【請求項8】

畳み込みカーネルが、一次電子ビームの走査方向に沿って非対称な一次元プロファイルを、または、一次電子ビームの走査方向に沿って非対称な二次元プロファイルを有することを特徴とする、請求項1から3のいずれか一項に記載の方法(100)。

【請求項9】

前記方法が、CD-SEMキャラクタリゼーション技術の較正のために実装され、前記較正が

- 幾何学的寸法が知られている基準サンプルの構造を表す実験画像を発生するステップであって、前記画像が、走査型電子顕微鏡から導出される、ステップと、

50

- パラメトリック数学関数に基づく第1の理論モデルから、補正項の代数和によって得られる第2の理論モデルを計算するステップであって、前記補正項は、所与の畳み込みカーネルと第1の理論モデルとの間の畳み込み積であり、前記第2の理論モデルは、パラメータの組を備え、前記パラメータの組は、基準サンプルの幾何学的構造を記述する、知られているパラメータと、機器応答を記述する、決定されるべきパラメータとの両方を含む、ステップと、

- 第2の理論モデルに存在するパラメータを決定し、前記第2の理論モデルと、基準サンプルの構造を表す前記実験画像との間の調整によって機器応答を記述するステップとを含む、請求項1から8のいずれか一項に記載の方法。

【請求項10】

請求項1から8のいずれか一項および請求項9に記載のCD-SEMキャラクタリゼーション技術を実装するための方法であって、

- サンプルの構造を表し、走査型電子顕微鏡から導出される実験画像を発生するステップと、

- パラメトリック数学関数に基づく第1の理論モデルから、補正項の代数和によって得られる第2の理論モデルを計算するステップであって、前記補正項は、所与の畳み込みカーネルと第1の理論モデルとの間の畳み込み積であり、前記第2の理論モデルは、パラメータの組を備え、前記パラメータの組は、関心のあるサンプルの幾何学的構造を記述する、決定されるべきパラメータと、機器応答を記述する、請求項9に記載の較正にしたがって決定されるパラメータとの両方を含む、ステップと、

- 第2の理論モデルに存在するパラメータを決定し、前記第2の理論モデルと前記実験画像との間の調整によって、関心のあるサンプルの構造を記述するステップとを含む、方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、寸法測定 (dimensional metrology) の分野に関し、本発明の主題は、CD-SEM技術として知られている、限界寸法 (critical dimension) の決定のための走査型電子顕微鏡キャラクタリゼーション技術を実装するための方法である。CD-SEM技術は今日、たとえば、マイクロエレクトロニクスにおけるプリント回路に使用されるパターンのような、マイクロメートルまたはナノメートル構造のキャラクタリゼーションに広く使用されている。

【背景技術】

【0002】

マイクロメートルまたはナノメートルサイズの構造のキャラクタリゼーションは、半導体産業、特にマイクロエレクトロニクス、そしてより一般的にはナノテクノロジー分野において今日非常に重要である。マイクロエレクトロニクスの場合を考慮すると、ナノ構造の特性寸法 (characteristic dimensions) の、正確で信頼性のある測定は、研究開発段階から製造段階までの製造プロセスの異なるステップのあらゆるところで必要である。さらに、超小型電子部品の小型化は、さらに効率的なキャラクタリゼーションツールを必要とする。

【0003】

半導体産業は、その製品のサイズを、限界寸法 (CD) と呼ばれる特徴的サイズの観点から定義している。限界寸法は、パターンの1つまたは複数の特性長 (characteristic length) を表す、パターンの1つまたは複数の限界寸法を意味すると解釈され、特性長は、製造方法の制御のために、または、前記パターンからなる最終的な電子デバイスの電氣的性能を保証するために限界的であることがわかっている。この限界寸法の信頼性のある測定は、今日、走査型電子顕微鏡の主な問題の1つである。

【0004】

走査型電子顕微鏡による画像の取得中に、一次電子ビームとして知られている電子ビーム

10

20

30

40

50

が、関心のあるサンプルの表面を走査する。表面の各点は、一对の空間座標、たとえば、デカルト座標 (x, y) によって識別される。一次電子と、サンプルの原子との衝突は、非常に複雑になり得るいくつかの物理現象を発生する。これらの現象の中には、二次電子の放出および後方散乱電子の放出がある。これらの電子は、サンプル近くの選択的検出器によって捕獲される。サンプルの一点ずつの走査は、サンプルの異なる形状および異なる材料を反映する電子画像の形成という結果となる。以下では、サンプルの構造に関して、サンプルの異なる形状およびそれらの異なる材料について言及される。

【0005】

SEMによって得られたSEM画像はグレイレベル画像であり、物体の幾何学的測定値は、1つまたは複数のしきい値の選択後に得られた物体の輪郭の分析によって決定される。たとえば、図1に示すように、 y 軸に、収集された二次電子のパーセンテージを、 x 軸に、走査位置を表すnm単位の寸法を備えた二次電子の強度プロファイルPIを表すグラフを再構築することが可能である。しかし、大きな問題の1つは、しきい値化アルゴリズムによる画像の解釈であり：実際には、このしきい値の選択が、関心のある特徴的サイズ、つまり限界寸法の値を決定する。しかし、しきい値の選択はしばしば任意であり、最適な選択は、パターンの高さ、考慮される材料、物体の寸法、パターンの密度などに特に応じて、物体毎に異なる。他のタイプのアルゴリズムは、グレイレベルに直接ではなく、強度ピークの形状の分析と、ピークの振幅に対するしきい値の選択とに基づく。ここでもまた、ピークの分析に対するしきい値の選択は経験的である。現在、CD-SEM技術は、100nm未満のサイズの物体についてはあまり信頼性のない測定値(ナノメートルから数ナノメートルまでの現実との差)を与えることが知られている。収集された二次電子のパーセンテージと、限界寸法を決定するために求められるパターンの実際の高さとの間に直接的な物理的なリンクがないので、任意のタイプのパターンに適用される固定の経験的しきい値は、なおさら満足できない。言い換えれば、80%の二次電子で測定が行われる場合、それは、限界寸法がパターンの高さの80%で測定されることを意味しない。したがって、しきい値化アルゴリズムを用いたSEM画像の分析は、限界寸法の測定値を容易に歪める可能性がある。

【0006】

この問題を克服するために、2つのアプローチが考慮されている。第1は、モンテカルロタイプの物理的シミュレーションに基づく。この方法の実装は、サンプル上の入射ビームの一次電子と、サンプル自体との間の相互作用の物理的プロセスのシミュレーションを必要とする。これらの非常に複雑なシミュレーションを実施するには、優れた計算能力と非常に長い実行時間とを必要とする。これらの特徴により、モンテカルロタイプの物理的シミュレーションは、一般的にはあまり利用し難く、多数のCD-SEM画像の処理にはほとんど適していない。第2の解決策は、画像のパラメトリック数学モデリングを実行することであり；そのような解決策は、「CD characterization of nanostructures in SEM metrology」(C.G.Frase、E.Buhr、およびK.Dirscherl、Meas.Sci.Technol.第18巻、第2号、第510頁、2007年2月)という記事に特に説明されている。そのような関数の例は、図2aに表されている方向 x に沿って台形のプロファイルを有するパターンについて図2bに示されている。これらの関数は、単純な現象論的モデルにしたがって、あるいは代わりにSEM画像の形成を記述する予備的モンテカルロモデリングの分析によって選択され得る(より複雑で正確だが、長い計算時間を必要とする)。図2の例によれば、パターンは、方向 x に沿ったセクション(ここでは6つのセクション)にしたがって分解され、各セクションは、特定の形状関数に対応する。それによって、関数 $M(x)$ は、以下：

【数1】

10

20

30

40

50

$$M(x) := \begin{cases} S_0 + Ae^{\frac{x-x_1}{t_0}} & x < x_1 \\ S_1 - (S_1 - S_0 - A)e^{\frac{x-x_1}{t_1}} & x_1 \leq x \leq x_2 \\ S_2 + Ce^{\frac{x-x_2}{t_2}} & x_2 < x \leq x_3 \\ S_2 + De^{\frac{x-x_4}{t_3}} & x_3 < x < x_4 \\ S_3 - (S_3 - S_0 - B)e^{\frac{x-x_5}{t_4}} & x_4 \leq x \leq x_5 \\ S_0 + Be^{\frac{x_5-x}{t_5}} & x > x_5 \end{cases}$$

10

のように（セクションの各々にしたがって6つの関数に）分解される。

【0007】

6つのパラメトリック関数の各々は、ある範囲のxの値において、サンプルのプロファイルの高さを座標xに応じて再現する。したがって、上に提示されたモデルは、複数のパラメータ： x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 t_0 、 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 、 A 、 B 、 C 、 D を備える。このパラメータの組の存在は、指定パラメトリック数学関数を正当化する。しばしば、寸法測定の用途で最も興味深いパラメータは、

20

パターンの横方向の寸法、すなわち： x_1 、 x_2 、 x_4 、および x_5 に関連している。

【0008】

CD-SEM画像のパラメトリックモデリングのための別の方法は、「Analytical Linescan Model for SEM Metrology」（C.A. MackおよびB.D. Bunday、Metrology, Inspection and Process Control for Microlithography XXIX、Proc. SPIE、第9424巻、2015年）という記事に説明されている。このモデルによれば、関数 $M(x)$ は以下：

【数2】

$$M(x) := \begin{cases} S_0 \cdot (1 - \alpha_f \cdot e^{\frac{x}{\sigma_f}} - \alpha_b \cdot e^{\frac{x}{\sigma_b}}) & x < x_1 \\ S_1 + (S_0 \cdot (1 - \alpha_f - \alpha_b) - S_1) \cdot e^{\frac{x}{d_1}} + (S_2 \cdot (1 + \alpha_e - \alpha_v) - S_1) \cdot e^{\frac{(x_2-x)}{d_2}} & x_1 \leq x \leq x_2 \\ S_2 \cdot (1 + \alpha_e \cdot e^{\frac{x_2-x}{\sigma_e}} - \alpha_v \cdot e^{\frac{x_2-x}{\sigma_v}}) & x > x_2 \end{cases}$$

30

のように分解され得る。

【0009】

このモデルでは、パラメータは S_0 、 S_1 、 S_2 、 f 、 b 、 e 、 v 、 f 、 b 、 e 、 v 、 d_1 、 d_2 、 X_2 である。

40

【0010】

さらに、ゼロではない一次電子ビームの大きさを考慮するために、 $M(x)$ によって記述されるプロファイルを、ビームの大きさおよび形状を表すパラメータをモデル内に含める畳み込み積に関連付けることが賢明である。通常、一次電子ビームのプロファイルは、ガウシアンプロファイル（点像分布関数またはPSF）を使用してキャラクタリゼーションされ、パラメータ psf は、ガウシアン半値全幅に比例する。それによって修正されたパラメトリックモデルは、次の式：

【数3】

50

$$M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-x')^2}{2\sigma_{PSF}^2}} * M(x') dx'$$

を用いて計算される。

【0011】

以下では、「理論モデルのパラメータの組」という表現は、理論モデルの数学的定式化において使用されるすべてのパラメータを指す。これらのパラメータの中で、サンプルの構造の幾何学的記述に使用されるものもあれば、機器応答を記述するものもある。関数 $M(x)$ のようなパラメトリック関数は、以後、モデルプロファイルまたはパラメトリックプロファイルと呼ばれる。

10

【0012】

別のタイプのモデリングは、二次電子の放出の確率を、材料に応じて、および、検出器への電子の伝搬を、検出器の角度に応じてモデリングすることにある（たとえば、AMATタイプのモデル、Shimon Levi、Ishai Schwarzbard、Sergey Khristo、Yan Ivanchenko、Ofer Adanによる「SEM Simulation for 2D and 3D Inspection Metrology and Defect Review」、Advances in Patterning Materials and Processes XXXI、2014

20

【0013】

より単純なまたはより複雑なモデルは、サンプルのタイプ、画像の品質、または材料もしくはプロファイルに関する先験的な情報に応じて精巧化され得る。

【0014】

モデリングが終了すると、逆問題、すなわちパラメータを変えることによる、実験データのモデルへの調整を解決する必要がある。これらの技術の大きな制限の1つは、CD-SEM画像上で観察されるある種のアーチファクトを考慮に入れること、およびそれらを再現することができないことにある。これは、たとえば、いわゆるラスタ走査モードで取得された画像の場合である。これらの画像は、図3aの正方形または長方形のパッドなど、2つ以上の隣接する構造の間に含まれるサンプルの表面の領域内にダークマークを示している。この図では、方向 x および y が示されており、方向 x は走査方向であり、方向 y は方向 x に対して垂直である。より具体的には、これらのダークマークは2つのタイプ：走査方向と整列され、水平方向のエッジの延長上にあるダークグレイまたは黒色の、図3aのマーク1で示される、かなり直線状のマークと、やはり走査方向にあり、パターンに沿った薄いグレイの、図3aのマーク2で示される、表面マークとにしたがって分類され得る。

30

【0015】

これらのダークマークは、画像を形成するプロセス中に発生されたアーチファクトである。

40

【0016】

パラメトリックプロファイル法は、エッジに垂直な方向に沿ったプロファイルのモデリングのみを考慮しており、したがってエッジ自体の延長上に存在する黒い跡の効果を再現できないことに留意されたい。図3b、図3c、および図3dに示されているように、黒い跡の存在は、いくつかの構造が接近して存在するときに増加することに注目することは、興味深い。より具体的には、図3bは孤立した正方形構造を示す。マーク I_1 によって示されるように、ダークトレースが構造の左右に見え、水平方向のエッジの延長上に黒い跡がある。図3cは、互いに接近して水平方向に沿って整列した3つの正方形構造のSEM画像を示す。 I_2 で示されるダークマークは、図3bの場合よりも強い。図3dは一連のいくつかの正方形構造のSEM画像を示す。 I_3 によって示される走査方向に沿ったダー

50

クマークタイプのアーチファクトは、今度は、画像3bおよび3c上よりも強い。これらの変化は、パラメトリックプロファイルのもののような純粋に局所的なアプローチにしたがって説明できない。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0017】

【文献】「CD characterization of nanostructures in SEM metrology」、C.G.Frase、E.Buhr、およびK.Dirscherl、Meas.Sci.Technol.第18巻、第2号、第510頁、2007年2月

10

「Analytical Linescan Model for SEM Metrology」、C.A.MackおよびB.D.Bunday、Metrology, Inspection and Process Control for Microlithography XXIX、Proc.SPIE、第9424巻、2015年
Shimon Levi、Ishai Schwarzbard、Sergey Khristo、Yan Ivanchenko、Ofer Adanによる「SEM Simulation for 2D and 3D Inspection Metrology and Defect Review」、Advances in Patterning Materials and Processes XXXI、2014年

【発明の概要】

20

【発明が解決しようとする課題】

【0018】

これに関連して、本発明の目的は、パラメトリックCD-SEM技術によって、実験的に得られるCD-SEM画像の利用を改善することである。

【課題を解決するための手段】

【0019】

この目的のために、本発明は、CD-SEM技術として知られている、寸法測定分野における、サンプルの構造の少なくとも1つの限界寸法を決定するための走査型電子顕微鏡キャラクタリゼーション技術を実装するための方法を提供し、前記方法は以下の：

- サンプルの構造を表し、走査型電子顕微鏡から導出された実験画像を発生するステップと、
- パラメトリック数学関数に基づく第1の理論モデルから、補正項の代数和によって得られる第2の理論モデルを計算するステップであって、前記補正項は、所与の畳み込みカーネルと第1の理論モデルとの間の畳み込み積であり、第2の理論モデルは、決定されるべきパラメータの組を備える、ステップと、
- 前記第2の理論モデルと前記実験画像との間の調整により、第2の理論モデルに存在するパラメータの組を決定するステップとを含む。

30

【0020】

限界寸法は、パターンの1つまたは複数の特性長を表す、パターンの1つまたは複数の限界寸法を意味すると解釈され、特性長は、製造方法の制御のために、または、前記パターンで構成された最終的な電子デバイスの電気的性能を保証するために限界的であることがわかっている。

40

【0021】

パラメトリック数学関数に基づく理論モデルは、たとえば、「CD characterization of nanostructures in SEM metrology」(C.G.Frase、E.Buhr、およびK.Dirscherl、Meas.Sci.Technol.第18巻、第2号、第510頁、2007年2月)または「Analytical Linescan Model for SEM Metrology」(C.A.Mack、およびB.D.Bunday、Metrology, Inspection and Process Control for Microlitog

50

raphy XXIX、Proc. SPIE、第9424巻、2015年)またはたとえばAMATという記事で、以前に定義され、詳細に説明されている、関数 $M(x)$ のうちの1つによって、サンプルの構造の数学的表現を意味すると解釈される。

【0022】

第2の理論モデルに存在するパラメータの組は、第2の理論モデルの数学的定式化において使用されるすべてのパラメータを意味すると解釈される。このパラメータの組は、第1のパラメトリック理論モデルに存在するパラメータと、第2の理論モデルの計算中に加えられた補正項に存在するパラメータとの両方を含む。このパラメータの組には、サンプルの構造の幾何学的形状を記述するいくつかのパラメータと、機器応答を記述する他のいくつかのパラメータがある。

10

【0023】

第2の理論モデルと実験画像との間の調整は、前記モデルと前記実験画像との間の差を最小にするパラメータの組を見つけることを目的とした反復計算方法を意味すると解釈される。実際には、この計算方法は、たとえば、いわゆる最小二乗法にしたがって、実験画像と理論モデルとの間の差を最小化するための、知られているアルゴリズムのうちの1つを選択することによって、たとえばコンピュータによって実装される。

【0024】

一般的に言えば、本発明は、サンプルの構造を表す実験画像と理論モデルとの間の調整によってサンプルの構造の限界寸法を得ることにあり、前記理論モデルは、実験画像上に存在するアーチファクトを考慮するように計算される。

20

【0025】

本発明の目的は、限界寸法をより効率的、かつより正確に得ることである。

【0026】

本発明による方法は、実験画像のモデリングを使用するCD-SEMキャラクタリゼーション技術を実装するための方法であり、前記モデリングは、たとえば、画像上に現れるエッジの延長上における強度変動のタイプの変化を記述することができる。強度変化は、パラメトリックプロファイルのような純粋に局所的なアプローチにしたがって説明することができない現象の結果である。そのような変化を発生することができる現象の中で、たとえば電荷蓄積(「帯電」)効果を挙げることができる。これらの過剰な電荷は、電子(一次および二次)を偏向させる可能性がある電界を発生し、したがって、図3aから図3d

30

【0027】

これらの効果を考慮するために、本発明による方法は、代数和によって補正項を加えることによって、パラメトリックモデルを修正し、前記補正項は、パラメトリックモデル自体と、所与の畳み込みカーネルとの間の畳み込み積である。畳み込み積の存在のおかげで、この新たなモデルは、たとえば、一次電子ビームの走査方向に対するエッジの密度、およびそれらの位置を考慮することを可能にする。さらに、畳み込みカーネルの選択は、本発明による方法を、多種多様なパターンおよび走査方法に適合させることを可能にする。

【0028】

本発明による方法はまた、個別にまたはその技術的に可能なすべての組合せにしたがって考慮される、以下の特徴のうちの1つまたは複数を有し得る：

40

【0029】

- 第2の理論モデルが、次の式：

【数4】

$$\text{Img}(x, y) = G(x, y) - C \iint_{-\infty}^{+\infty} F(x', y') * [G(x', y') - \bar{G}_0] dx' dy'$$

にしたがって計算される。ここで：

50

(x, y) は、2つの直交方向 x および y に沿った、画像の各点に関連した空間座標であり；

$G(x, y)$ は、パラメトリック数学関数に基づく第1の理論モデルであり；

$Img(x, y)$ は、補正項の適用により得られる第2の理論モデルであり；、

$F(x, y)$ は、所与の畳み込みカーネルであり；

【数5】

$$\overline{G_0}$$

は、実験画像上に存在する、強度のバックグラウンドであり；

10

C は、調整定数であり；

- 一次電子ビームは、いわゆるTVまたはラスタ走査方法にしたがって、 x 軸または水平軸と指定された直線に沿ってサンプルの表面を走査し、走査方向は、水平方向または x 軸であり；

- 畳み込みカーネルは、たとえば x 軸に沿ってとられたガウシアンを介して、一次元対称形状をとることができ、前記ガウシアンは、次の式：

【数6】

$$Img(x, y) = G(x, y) - C \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-x')^2}{2\sigma^2}} * [G(x', y) - \overline{G_0}] dx'$$

20

にしたがって、シグマに比例する半値全幅を有する。

- 畳み込みカーネルは、たとえば、次の式：

【数7】

$$Img(x, y) = G(x, y) - C \iint_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-x')^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{(y-y')^2}{2\sigma_y^2}} * [G(x', y') - \overline{G_0}] dx' dy'$$

にしたがって、一次電子ビームの走査方向にそれぞれ平行および垂直な x' 軸および y' 軸によってそれぞれとられる2つのガウシアンを通して、二次元対称形状をとることができ

30

る。

- 畳み込みカーネルは、一次電子ビームの走査方向に沿って非対称な一次元形状をとり得る。

- 畳み込みカーネルは、一次電子ビームの走査方向に沿って非対称な二次元形状をとり得る。

- この方法は、CD-SEMキャラクタリゼーション技術を較正するために実装され、前記較正は以下の：

- 幾何学的寸法が知られている基準サンプルの構造を表す実験画像を発生するステップであって、前記画像が、走査型電子顕微鏡から導出される、ステップと、

- パラメトリック数学関数に基づく第1の理論モデルから、補正項の代数和によって得られる第2の理論モデルを計算するステップであって、前記補正項は、所与の畳み込みカーネルと第1の理論モデルとの間の畳み込み積であり、前記第2の理論モデルは、パラメータの組を備え、前記パラメータの組は、基準サンプルの幾何学的構造を記述する、知られているパラメータと、機器応答を記述する、決定されるべきパラメータとの両方を含む、ステップと、

40

- 第2の理論モデルに存在するパラメータを決定し、前記第2の理論モデルと、基準サンプルの構造を表す前記実験画像との間の調整によって機器応答を記述するステップとを含む。

【0030】

CD-SEMキャラクタリゼーション技術を実装するための方法は、有利には：

50

- サンプルの構造を表し、走査型電子顕微鏡から導出される実験画像を発生するステップと、
- パラメトリック数学関数に基づく第 1 の理論モデルから、補正項の代数和によって得られる第 2 の理論モデルを計算するステップであって、前記補正項は、所与の畳み込みカーネルと第 1 の理論モデルとの間の畳み込み積であり、前記第 2 の理論モデルは、パラメータの組を備え、前記パラメータの組は、関心のあるサンプルの幾何学的構造を記述する、決定されるべきパラメータと、機器応答を記述する、上述された較正によって決定されるパラメータとの両方を含む、ステップと、
- 第 2 の理論モデルに存在するパラメータを決定し、前記第 2 の理論モデルと前記実験画像との間の調整によって、関心のあるサンプルの構造を記述するステップとを含む。

10

【 0 0 3 1 】

本発明の他の特徴および利点は、添付の図面を参照しながら、説明を目的として、決して限定することなく与えられた以下の説明から明らかになるであろう：

【図面の簡単な説明】

【 0 0 3 2 】

【図 1】CD - SEMタイプの機器を介して得られたパターンのプロファイルに応じて二次電子の強度プロファイルを概略的に示す図である。

【図 2 a】CS - SEM画像のパラメトリック数学モデリングの一例を示す図である。

【図 2 b】CS - SEM画像のパラメトリック数学モデリングの一例を示す図である。

【図 3 a】実験CD - SEM画像上で観察されたダークマークタイプのアーチファクトの例を示す図である。

20

【図 3 b】実験CD - SEM画像上で観察されたダークマークタイプのアーチファクトの例を示す図である。

【図 3 c】実験CD - SEM画像上で観察されたダークマークタイプのアーチファクトの例を示す図である。

【図 3 d】実験CD - SEM画像上で観察されたダークマークタイプのアーチファクトの例を示す図である。

【図 4】本発明による方法の異なるステップを表す図である。

【図 5 a】CS - SEM画像を表す図である。

【図 5 b】画像 5 a のパラメトリック理論モデルを表す図である。

30

【図 5 c】本発明による方法を適用することによって得られる画像 5 a の理論モデルを表す図である。

【図 6 a】いわゆるTV走査（ラスト走査）方法を示す図である。

【図 6 b】のこぎり歯走査方法を示す図である。

【図 6 c】双方向走査方法を示す図である。

【図 6 d】測定される物体に適合した走査方法を示す図である。

【図 7 a】実験CS - SEM画像を表す図である。

【図 7 b】サンプルの構造中の隅に対応する特定の局所的な効果を示す図 7 a の一部の拡大を示す図である。

【図 8】畳み込みカーネルの対称プロファイルの例を示す図である。

40

【図 9】畳み込みカーネルの非対称プロファイルの例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 3 3 】

図 4 は、本発明による方法 1 0 0 の異なるステップを概略的に示す。

【 0 0 3 4 】

本発明による方法 1 0 0 は、寸法測定分野における、サンプルの構造の少なくとも 1 つの限界寸法の決定のための走査型電子顕微鏡キャラクタリゼーション技術の実装を目的としている。1 つの用途は、たとえば、マイクロエレクトロニクスにおけるプリント回路を形成するパターンの限界寸法の測定であり得る。パターンの形状はどのような形状でもよい。パターンの材料もまたどのような材料でもよい。このパターンは、たとえば、孤立パ

50

ターンであってもよく、または周期的に繰り返されるパターンのネットワークに属していてもよい。製造方法の任意のステップ（リソグラフィ、エッチングなど）の後に得られるパターンであってもよい。

【0035】

本発明による方法100のステップ101は、サンプルの構造を表し、走査型電子顕微鏡から導出された画像を発生することにある。

【0036】

本発明によるステップ101の優先的な実施形態によれば、一次電子ビームは、いわゆるラスタ走査方法にしたがってサンプルを走査する。この走査モードは図6aによって表される。この走査モードによれば、図6aに示すx方向に沿った早い走査方向と、図6aに示すy方向に沿った遅い走査方向とを識別することができる。この走査方法によれば、データ取得は、図6aの(1)に示される水平線に対応してのみ行われる。以後、図6aにおける高速走査方向xは、一次電子ビームの走査方向を指す。

10

【0037】

本発明によるステップ101の他の実施形態によれば、一次電子ビームは、いわゆるのこぎり歯方法にしたがってサンプルを走査する。この走査モードは図6bによって表される。この図において、実線は、データ取得段階（したがって、画像の形成）を表し、点線は、データ取得なしの一次電子ビームの単純な変位の段階を示す。グレイの矢印は、一次電子ビームの走査方向を表す。

【0038】

本発明によるステップ101の別の実施形態によれば、一次電子ビームは、いわゆる双方向方法にしたがってサンプルを走査する。この走査モードは図6cによって表される。この図において、実線はデータ取得段階（したがって画像の形成）を表す。図6aおよび図6bとは異なり、この場合、データの取得は、座標xの値が増加する方向、および座標xの値が減少する方向の両方に、表面を走査することによって行われる。グレイの矢印は、一次電子ビームの走査方向を表す。

20

【0039】

本発明によるステップ101の別の実施形態によれば、一次電子ビームは、キャラクタライズすべき物体の形状に適合した方法にしたがってサンプルを走査する。この走査モードは図6dによって表される。

30

【0040】

本発明による方法100のステップ102によれば、サンプルの表面のパラメトリック理論モデルから、エッジの延長上に存在し、しばしば黒い跡の形状を有している、強度のダークマークタイプの変化を考慮できる第2の理論モデルが計算される。

【0041】

より具体的には、本発明による方法100のステップ102は、 $Img(x, y)$ と呼ばれる第2の理論モデルを得るために、 $G(x, y)$ と呼ばれる第1の理論モデルの修正を備える。モデル $G(x, y)$ は、たとえば、「CD characterization of nanostructures in SEM metrology」(C. G. Frase, E. Buhr, およびK. Dirscherl, Meas. Sci. Technol., 第18巻、第2号、第510頁、2007年2月)または「Analytical Linescan Model for SEM Metrology」(C. A. Mack, およびB. D. Bunday, Metrology, Inspection and Process Control for Microlithography XIX, Proc. SPIE, 第9424巻、2015年)またはAMATまたはその他の記事に説明された方法のうちの一つによって得られる、サンプルの構造に対する顕微鏡の応答のパラメトリックモデルである。したがって、関数 $G(x, y)$ は、走査方向にリンクされる影響のない、サンプルの構造の理論的画像を表す。たとえば、走査効果のない理論的画像 $G(x, y)$ が、モデル $M(x, y)$ の適用によって得られ、ここで、 (x, y) は、撮像された物体のエッジまでの符号付き距離である。関数 $M(x)$ と同

40

50

様に、この理論モデルは、決定されるべきパラメータの組を含み、それは、走査方向を考慮せずに、サンプルの幾何学的形状に関する情報と、機器応答に関する情報との両方を表す。

【 0 0 4 2 】

次に、第 2 の理論モデル $I m g (x , y)$ が計算される。前記第 2 の理論モデルは、第 1 の理論モデルに対する補正項の代数和によって得られ、前記補正項は、所与の畳み込みカーネルと第 1 の理論モデルとの間の畳み込み積である。

【 0 0 4 3 】

本発明による方法 1 0 0 のステップ 1 0 2 の実施形態によれば、第 2 の理論モデルは、次の式 (1) :

【 数 8 】

$$I m g (x , y) = G (x , y) - C \iint_{-\infty}^{+\infty} F (x ' , y ') * [G (x ' , y ') - \bar{G}_0] d x ' d y '$$

にしたがって計算される。ここで :

- ・ $G (x , y)$ は、パラメトリック数学関数に基づく第 1 の理論モデルであり ;
- ・ (x , y) は、2 つの直交方向 x および y に沿った画像の各点に関連した空間座標であり ;
- ・ $I m g (x , y)$ は、補正項を適用して得られる第 2 の理論モデルであり ;
- ・ $F (x , y)$ は、所与の畳み込みカーネルであり ;
- ・

【 数 9 】

$$\bar{G}_0$$

は、実験画像に存在する強度のバックグラウンドであり ;

- ・ C は、調整定数である。

【 0 0 4 4 】

この実施形態の利点は、カーネル $F (x , y)$ と差

【 数 1 0 】

$$G (x ' , y ') - \bar{G}_0$$

との間で計算される畳み込み積の式 (1) において生じる。実際、バックグラウンド強度

【 数 1 1 】

$$\bar{G}_0$$

を引くことは、

【 数 1 2 】

$$G (x ' , y ') = \bar{G}_0$$

であるときに、応答が一定である畳み込み積を、したがって補正項を、相殺することを可能とする。この条件は、パターンから遠く離れているサンプルの表面の点、したがって、黒い跡が存在しない画像の部分、および補正が不要な部分について検証される。

【 0 0 4 5 】

一般的に言って、畳み込みカーネル $F (x , y)$ は、空間座標 (x , y) 、あるいはその代わりに、任意の座標系にしたがって選択された空間座標の関数である。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 6 】

本発明は、上に示した式(1)の結果が明確に定義されているという条件で、任意の関数 $F(x, y)$ を用いて実装され得る。例として、本発明の異なる実施形態によれば、対称、非対称、または異方性の畳み込みカーネルが使用され得る。

【 0 0 4 7 】

本発明による方法100のステップ102の実施形態によれば、電子ビームは、図6aに示されるいわゆるラスタ走査方法にしたがって、サンプルの表面を走査する。

【 0 0 4 8 】

ステップ102の実施形態によれば、畳み込みカーネルは、空間の一方向に沿った一次元対称関数である。図8は、本発明の意味における対称カーネル300の例を示す。

10

【 0 0 4 9 】

ステップ102の実施形態によれば、畳み込みカーネルは x 軸に沿ってとられたガウシアンであり、前記 x 軸は、一次電子ビームの走査方向に対応し、前記ガウシアンは、次の式：

【 数 1 3 】

$$Img(x, y) = G(x, y) - C \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-x')^2}{2\sigma^2}} * [G(x', y) - \bar{G}_0] dx'$$

にしたがって、シグマに比例する半値全幅を有する。

【 0 0 5 0 】

この場合、畳み込みカーネル $F(x', y')$ は、垂直方向 y' に沿って一定の関数であることが注目され得、これは、なぜ変数 y' が、畳み込み積に現れないかを説明している。

20

【 0 0 5 1 】

この実施形態の利点は、ラスタ走査モードで走査する場合に、水平方向のエッジの延長上における強度の低下を考慮することに特に適していることである。

【 0 0 5 2 】

本発明による方法100のステップ102の実施形態によれば、畳み込みカーネルは、対称二次元関数である。

【 0 0 5 3 】

本発明による方法100のステップ102の実施形態によれば、畳み込みカーネルは、次の式：

30

【 数 1 4 】

$$Img(x, y) = G(x, y) - C \iint_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-x')^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{(y-y')^2}{2\sigma_y^2}} * [G(x', y') - \bar{G}_0] dx' dy'$$

にしたがって、一次電子ビームの走査方向に対してそれぞれ平行および垂直な方向において対称である。

【 0 0 5 4 】

この実施形態の利点は、特定の局所的な効果、たとえば、サンプルの構造を形成するパターンの隅に対応するものを、考慮することができる畳み込みカーネルを選択できることである。図7aおよび図7bは、これらの効果の例を示す。図7aは、正方形構造のCS-SEM画像である。図7bは、図7aのフレーム部分10の拡大を表す。この図は、破線20で示されるダークマークの特定の例を示している。より具体的には、 x における依存性に追加された、 y における依存性が認識され得る。これらの観察は、2つの直交方向 x および y に沿った二次元の、および潜在的に異方性の畳み込みカーネルの必要性を動機付ける。異方性の畳み込みカーネルは、 y におけるプロファイルとは異なる x におけるプロファイルを有する二次元関数(たとえば、幅 y とは異なる幅 x を有する二次元ガウシアン)を意味すると解釈される。

40

【 0 0 5 5 】

50

この実施形態の他の利点は、ラスト走査モードとは異なる走査方法に適合できることである。

【 0 0 5 6 】

本発明による方法 1 0 0 のステップ 1 0 2 の実施形態によれば、畳み込みカーネルは、方向 x または y の少なくとも一方に沿って非対称のプロファイルを有する。例が図 9 に示されており、これは x 軸に沿った非対称畳み込みカーネル 2 0 0 の例を示している。この場合、たとえば、部分的にガウシアン 2 0 1 であり、部分的に、 x 2 0 2 において、非ガウシアン依存性にしたがって減少するプロファイルがある。

【 0 0 5 7 】

この実施形態の利点は、畳み込みカーネルを、使用される走査モードへ、およびサンプル上に存在するパターンのタイプへ、適合させられることである。

10

【 0 0 5 8 】

本発明による方法 1 0 0 のステップ 1 0 3 によれば、式 (1) と、実験画像との間の調整が行われる。この調整が、たとえば最小二乗法を適用する、知られているアルゴリズムのうちの 1 つを使用することによって、理論モデルと実験画像との間の差を最小化する (1) に存在するパラメータの組を発見することを可能にする。モデル $G (x , y)$ のように、モデル $I m g (x , y)$ は、サンプルの幾何学的形状を記述し、関心のある限界寸法を伝えるために使用されるパラメータを含む、いくつかのパラメータを含む。

【 0 0 5 9 】

本発明による方法のステップ 1 0 3 の実施形態によれば、モデル内に存在し、かつ機器応答にリンクされるパラメータを決定するために、較正ステップが行われる。これらのパラメータは、第 1 の理論モデルに既に存在するパラメータの組の一部を形成し、それらは、たとえば、一次電子ビームがゼロではないサイズを有するという事実を考慮する。しばしば、一次電子ビームの形状は、ガウシアンプロファイルとして記述される。一次電子ビームの特徴を考慮したこのガウシアン関数は、「点像分布関数」または $P S F$ と呼ばれる。機器応答を記述するパラメータ、たとえば $P S F$ 関数のパラメータは、予備較正ステップ中に有利に決定され得る。較正は、式 (1) と構造が知られているサンプルの実験画像との間の調整を行うことによって得られる。これが、較正ステップ中に幾何学的パラメータを固定し、より信頼性のある様式で、機器応答を記述するパラメータを得ることを可能にする。機器応答を記述するパラメータの値は、次に、関心のある実験画像のキャラクタリゼーションのための $C D - S E M$ 技術の実装中に固定される。

20

30

【 0 0 6 0 】

較正ステップを行うことの利点は、機器応答を記述するパラメータをより正確かつ信頼性のある様式で決定できることである。次に、機器応答を記述するこれらのパラメータは、関心のある実験画像のキャラクタリゼーションのため $C D - S E M$ 技術の実装中に固定され、これが、サンプルの構造、つまり、関心のある限界寸法を記述するパラメータの、より正確で信頼性のある決定を達成することを可能にする。

【 0 0 6 1 】

図 5 a から図 5 c は、本発明による方法のおかげで得られる効果を示す。図 5 a は、キャラクタリゼーションされることが望まれるサンプルの $C D - S E M$ 画像である。この例では、ラスト走査モードで走査する場合は考慮される。図 6 a に示すこの走査モードによれば、一次電子ビームは、方向 x に沿ってサンプルの表面を迅速に走査し、方向 y に沿ってより遅く走査する。この場合、方向 x は、単に、一次電子線の走査方向として指定される。マーク $T a$ は、走査方向に沿って、水平方向のエッジの延長上にある黒い跡を示す。これらのアーチファクトは、この走査方法で得られた $C D - S E M$ 画像で非常に頻繁に見られる。図 5 b は、上記で $G (x , y)$ と指定されているパラメトリック関数に基づく $C S - S E M$ 画像の理論モデルを表す。マーク $T b$ は、このタイプのモデルによって予測されるダークマークを示す。この図では、これらのダークマークの強度が、エッジまでの距離にどのようにユニークに依存しているかが理解され得る。さらに、矢印 $T a$ によって示されるタイプの黒い跡は存在しない。図 5 c は、次の式：

40

50

【数 1 5】

$$Img(x, y) = G(x, y) - C \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-x')^2}{2\sigma^2}} * [G(x', y) - \bar{G}_0] dx'$$

を用いて、本発明による方法によって計算されたCS - SEM画像の理論モデルを表す。

【0062】

この場合に選択された畳み込みカーネルは、x軸に沿ってとられた一次元ガウシアンである。本発明による方法から導出された画像5cは、パラメトリック関数から導出された理論モデルに関して、実験画像5aの特性をより正確な様式で再現する(画像5b)。より具体的には、画像5cにおいて、矢印Tcで示される黒い跡が見え、これはCS - SEM画像5a上で観察される黒い跡を再現する。これらの画像は、本発明による方法が、一次電子ビームの走査方向に沿ったエッジの延長上においてダークマークタイプのアーチファクトまたは黒い跡をどのように正確に再現するかを示している。

10

【0063】

図5a、図5b、および図5cに示される本発明による方法の実装はまた、走査電子顕微鏡の機器応答を記述するパラメータを正確な様式で得ることを可能にする較正ステップを伴ってもよい。そのためには、幾何学的寸法が知られている基準サンプルの実験CD - SEM画像をあらかじめ取得する必要がある。この画像は、較正ステップの基準画像である。次に、第2の理論モデルと基準画像との間の調整が、基準サンプルの場合に知られている幾何学的パラメータを固定することによって行われる。この調整は、機器応答を記述するパラメータの値、たとえばPSFのパラメータ、または信号の振幅を得ることを可能にする。この較正ステップ中に幾何学的パラメータを固定したという事実は、機器応答を記述するパラメータをより信頼性が高く正確な様式で得ることを可能にする。機器応答を記述する前記パラメータの値は、次に、関心のあるサンプルに対する本発明による方法の実装中、固定されるであろう。

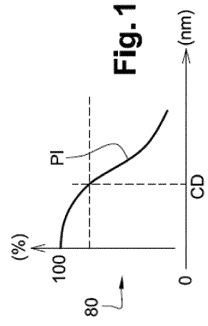
20

30

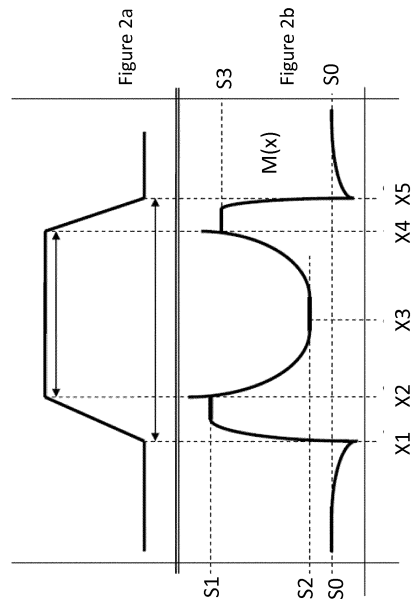
40

50

【 図面 】
【 図 1 】



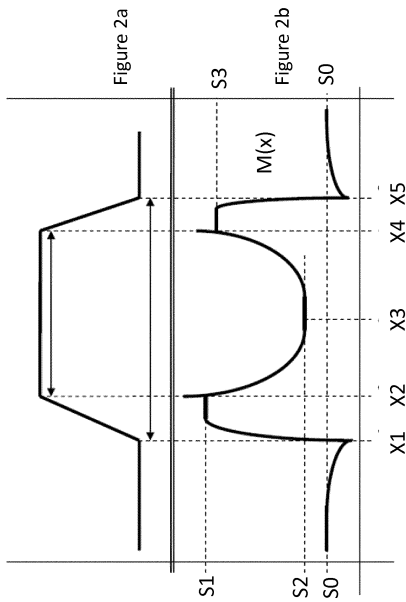
【 図 2 a 】



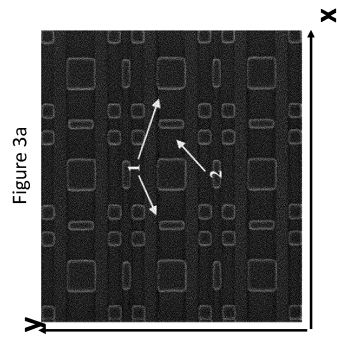
10

20

【 図 2 b 】



【 図 3 a 】

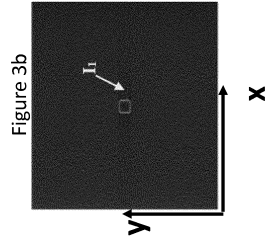


30

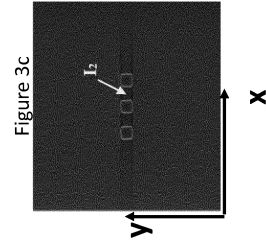
40

50

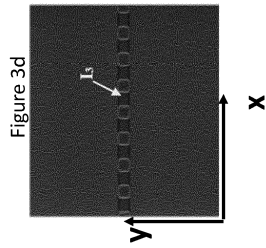
【 3 b 】



【 3 c 】

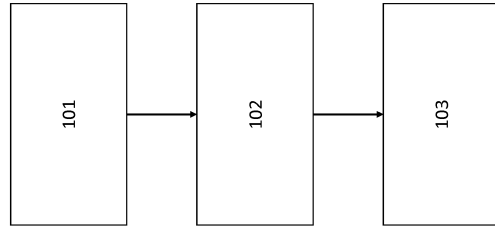


【 3 d 】



【 4 】

Figure 4



100 ↗

10

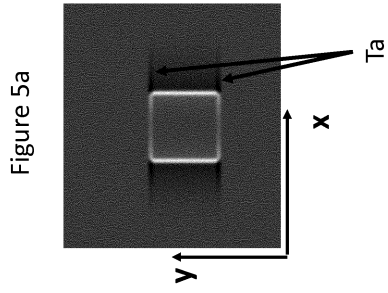
20

30

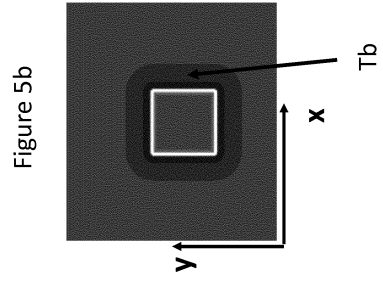
40

50

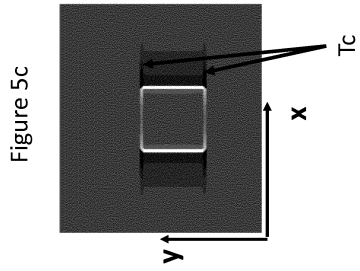
【 5 a 】



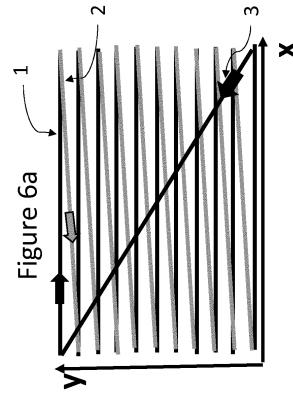
【 5 b 】



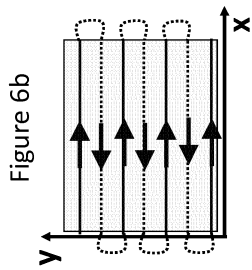
【 5 c 】



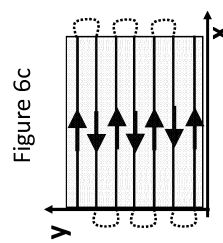
【 6 a 】



【 6 b 】



【 6 c 】



10

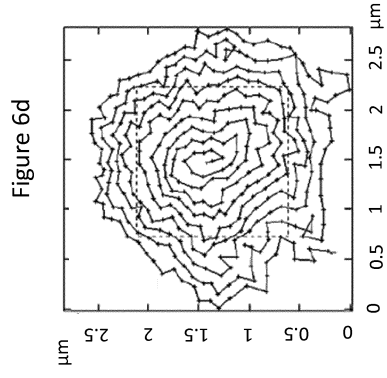
20

30

40

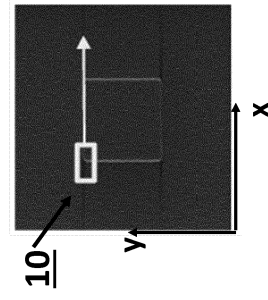
50

【 図 6 d 】



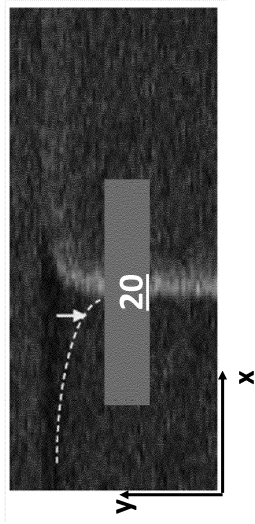
【 図 7 a 】

Figure 7a



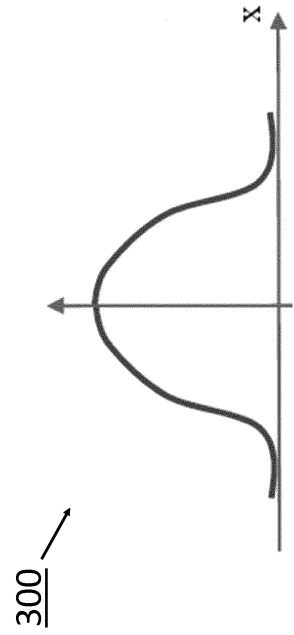
【 図 7 b 】

Figure 7b



【 図 8 】

Figure 8



10

20

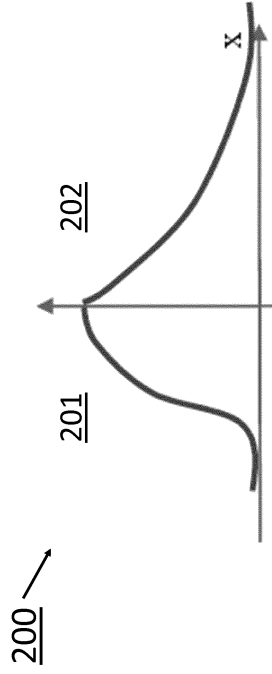
30

40

50

【 図 9 】

Figure 9



10

20

30

40

50

フロントページの続き

(51)国際特許分類

F I
G 0 6 T 7/62

審査官 眞岩 久恵

(56)参考文献 米国特許出願公開第 2 0 0 9 / 0 1 2 1 1 3 1 (U S , A 1)

特表 2 0 1 3 - 5 1 1 1 5 2 (J P , A)

(58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)

G 0 1 B 1 5 / 0 0 - 1 5 / 0 8

H 0 1 J 3 7 / 2 8

H 0 1 J 3 7 / 1 4 7

H 0 1 J 3 7 / 2 2

G 0 6 T 7 / 6 2