

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6199978号
(P6199978)

(45) 発行日 平成29年9月20日 (2017. 9. 20)

(24) 登録日 平成29年9月1日 (2017. 9. 1)

(51) Int. Cl.

F I

GO 1 N 1/28 (2006. 01)

GO 1 N 1/28 G

HO 1 J 37/20 (2006. 01)

GO 1 N 1/28 F

HO 1 J 37/317 (2006. 01)

HO 1 J 37/20 Z

HO 1 J 37/317 D

請求項の数 25 (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2015-535822 (P2015-535822)
 (86) (22) 出願日 平成25年10月4日 (2013. 10. 4)
 (65) 公表番号 特表2015-533215 (P2015-533215A)
 (43) 公表日 平成27年11月19日 (2015. 11. 19)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2013/063479
 (87) 国際公開番号 W02014/055876
 (87) 国際公開日 平成26年4月10日 (2014. 4. 10)
 審査請求日 平成28年10月2日 (2016. 10. 2)
 (31) 優先権主張番号 61/710, 580
 (32) 優先日 平成24年10月5日 (2012. 10. 5)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 501419107
 エフ・イー・アイ・カンパニー
 アメリカ合衆国オレゴン州 9 7 1 2 4, ヒ
 ルズバラ, ノースイースト・ドーソンクリ
 ーク・ドライブ 5 3 5 0
 (74) 代理人 100103171
 弁理士 雨貝 正彦
 (72) 発明者 サンファン・リー
 アメリカ合衆国 9 7 1 2 4 オレゴン州
 ヒルズバラ エヌイー オレンコ・ステ
 ーション・パークウェイ # D 3 2 0 1
 0 5 3

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 高アスペクト比構造体の分析

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

荷電粒子ビームを使用して加工物上の関心領域を露出させる方法であって、
 前記加工物の上面に対して斜めの第 1 の角度でトレンチをイオン・ビーム・ミリングし
 て、前記関心領域に隣接して前記上面と斜めの第 2 の角度を形成する表面を露出させるこ
 と、

前記関心領域に隣接した前記表面の一部分に保護層を堆積させること、

前記関心領域に隣接した前記表面の一部分を、前記上面に対して実質的に垂直な第 3 の
 角度で前記保護層を貫いてイオン・ビーム・ミリングして、前記関心領域の第 1 の表面を
 露出させること、および

荷電粒子ビーム画像化によって前記関心領域を観察すること
 を含む方法。

【請求項 2】

前記上面に対して垂直でない第 1 の角度でトレンチをミリングすることが、複数の高ア
 スペクト比特徴部分を有する前記加工物の領域にトレンチをミリングすることを含む、請
 求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記複数の高アスペクト比特徴部分がホールである、請求項 2 に記載の方法。

【請求項 4】

前記関心領域に隣接した前記表面の一部分に保護層を堆積させることが、前記高アスペ

クト比ホールを貫いて前記トレンチをミリングすること、および前記ホールを前記保護層で覆うことを含む、請求項 3 に記載の方法。

【請求項 5】

前記上面に対して実質的に垂直な後続のミリング・ステップを実行して、前記関心領域の第 2 の表面を露出させること、および荷電粒子ビーム画像化を使用して前記第 2 の表面を観察することをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 6】

後続の複数のミリング・ステップを実行して、前記関心領域の異なる表面を順次露出させること、および荷電粒子ビーム画像化を使用して前記異なる表面をそれぞれ観察することをさらに含む、請求項 1 または 5 に記載の方法。

10

【請求項 7】

前記トレンチの壁が、前記関心領域に隣接した前記表面を含み、前記トレンチの壁が、前記上面に対して垂直な線と、 5° から 50° の間の角度の第 4 の角度を形成する、請求項 1、5、6 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 8】

前記第 4 の角度が約 18° から約 22° の間の範囲である、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

前記関心領域に隣接した前記表面の一部分に保護層を堆積させることが、ビーム誘起堆積を使用することを含む、請求項 1、5、6、7 のいずれか一項に記載の方法。

20

【請求項 10】

ビーム誘起堆積を使用することが、 10 keV よりも大きなエネルギーを有する電子を使用した電子ビーム誘起堆積を含む、請求項 9 に記載の方法。

【請求項 11】

電子ビーム誘起堆積を使用することが、 20 keV よりも大きなエネルギーを有する電子を使用した電子ビーム誘起堆積を含む、請求項 10 に記載の方法。

【請求項 12】

前記関心領域に隣接した前記表面の一部分に保護層を堆積させることが、レーザ誘起堆積またはイオン・ビーム誘起堆積を使用して保護層を堆積させることを含む、請求項 1、5、6、7、9 のいずれか一項に記載の方法。

30

【請求項 13】

前記関心領域が、3D NAND 構造体または 3D DRAM 構造体の一部分を含む、請求項 1、5、6、7、9、12 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 14】

試料の高アスペクト比特徴部分の一部分の断面を観察のために露出する方法であって、集束イオン・ビームを使用して、前記試料の表面に対して垂直でない角度および前記高アスペクト比特徴部分の長軸に対して垂直でない角度でトレンチをミリングして、前記表面に対して斜めの面を露出させること、

前記斜めの面に前記高アスペクト比特徴部分の選択された深さで保護層を堆積させること、

前記保護層を貫く、前記表面に対して実質的に垂直な断面を、前記集束イオン・ビームを使用してミリングして、前記高アスペクト比特徴部分の断面を露出させること、および露出させた前記断面を観察すること

40

を含む方法。

【請求項 15】

露出させた前記断面を観察することが、走査電子顕微鏡法、X 線分析、またはマイクロ・ラマン法を含む、請求項 14 に記載の方法。

【請求項 16】

前記第 1 の断面に対して平行な前記保護層を貫く第 2 の断面をミリングして、前記高アスペクト比特徴部分の第 2 の断面を露出させることをさらに含む、請求項 14 または 15 に記載の方法。

50

【請求項 17】

前記集束イオン・ビームを使用して、前記保護層を貫く断面を順次ミリングすること、および露出させた前記断面を電子ビームを使用して観察して、前記高アスペクト比特徴部分の一連の断面画像を形成することをさらに含む、請求項 14、15、16 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 18】

保護層を堆積させることが、15 keV よりも大きなエネルギーを有する電子の電子ビーム誘起堆積を使用することを含む、請求項 14、15、16、17 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 19】

前記斜めの面に保護層を堆積させることが、ビーム誘起堆積を使用して前記斜めの面に前記保護層を堆積させることを含む、請求項 14、15、16、17、18 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 20】

加工物の第 1 の表面の下方の関心領域を分析する方法であって、
前記加工物に向かってイオン・ビームを導き、前記加工物の前記第 1 の表面と関心領域の間の材料を除去して、前記第 1 の表面に対して斜めの第 2 の表面を形成すること
を含み、前記第 2 の表面の一部分が、前記関心領域と前記第 1 の表面の位置との間にあり、前記方法がさらに、
前記第 2 の表面上に保護層を堆積させること、
前記イオン・ビームを導き、前記保護層を貫いてミリングして、前記関心領域を通る、分析のための第 3 の表面を形成すること、および
荷電粒子ビーム画像化によって前記関心領域を観察すること
を含み、前記第 2 の表面の前記保護層が、前記関心領域に十分に近く、そのため、前記関心領域が、観察のためにカーテニングなしで露出する方法。

【請求項 21】

前記第 3 の表面が、前記第 1 の表面に対して実質的に直角である、請求項 20 に記載の方法。

【請求項 22】

前記第 2 の表面が、前記第 1 の表面に対して垂直な線に関して 5° から 50° の間の角度に傾いている、請求項 21 に記載の方法。

【請求項 23】

前記第 2 の表面が、前記第 1 の表面に対して垂直な線に関して約 18° から約 22° の間の角度に傾いている、請求項 22 に記載の方法。

【請求項 24】

試料中の関心領域の断面を観察するシステムであって、
イオンの集束ビームを供給するイオン光学カラムと、
電子の集束ビームを供給する電子光学カラムと、
前記試料から放出された 2 次粒子を検出する粒子検出器と、
コンピュータ記憶装置と通信するコントローラと
を備え、前記コンピュータ記憶装置が、
前記試料の外表面にトレンチをミリングして、関心領域に隣接し前記外表面に対して斜めである表面を露出させる命令と、
前記関心領域に隣接した前記表面の一部分に保護層を堆積させる命令と、
前記関心領域に隣接した前記保護層を貫いて前記関心領域に隣接した前記表面の一部分をミリングして、前記関心領域を露出させる命令と、
荷電粒子ビーム画像化によって前記関心領域を観察する命令と
を記憶したシステム。

【請求項 25】

前記電子ビームが、20 keVよりも大きなエネルギーを有する電子を供給して、電子ビーム誘起堆積によって前記保護層を堆積させるようにする命令を、前記コンピュータ記憶装置が記憶した、請求項24に記載のシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、構造体の荷電粒子ビーム処理に関する。

【背景技術】

【0002】

プロセス監視および不良解析のために微視的構造体（ナノメートル規模のものを含む）を調べる一般的な方法は、集束イオン・ビーム（FIB）を用いて構造体内にトレンチを切削して断面を露出させ、次いで走査電子顕微鏡（SEM）を用いてその断面を観察することである。しかしながら、イオン・ビーム・ミリング・アーチファクトが露出した断面を歪め、そのため、電子ビーム像が構造体の正確な像を示さないことがある。

10

【0003】

1つのアーチファクトは「カーテニング（curtaining）」と呼ばれるが、これはそのアーチファクトがカーテンのように見えるためである。カーテニングは、試料が、イオン・ビームによって異なる速度でミリングされる材料からなるときなど、異なる材料が異なる速度で除去されるときに生じる。カーテニングは、不規則な形状を有する表面をミリングするときにも生じることがある。

20

【0004】

高さが幅よりもはるかに大きい特徴部分を露出させるときには深刻なアーチファクトが生み出されることがある。このような構造体は「高アスペクト比」特徴部分と呼ばれる。例えば、高さが幅の4倍ある特徴部分は高アスペクト比特徴部分とみなされることになる。例えば、集積回路の層間のホール（hole）またはコンタクト（contact）はしばしば、幅の数倍の高さを有する。

【0005】

半導体製造プロセスでは、より多くの回路がより小さなパッケージに詰め込まれるため、集積回路設計はますます3次元（3D）的なものとなっており、より多くの高アスペクト比特徴部分を含む。3D NAND回路などの3D集積回路（IC）構造体の高アスペクト比構造体、特に、充填されていないコンタクト・ホールを分析する際、従来のイオン・ビーム試料作製は、構造体の歪み、カーテニングなどの受け入れがたいアーチファクトを生じさせる。

30

【0006】

充填されていない高アスペクト比ホールが試料上にあるとき、中実領域と充填されていないホールに隣接した領域との間にはミリング速度に大きな差がある。ミリング速度のこの大きな差の結果、カーテニング効果、またはホールの形状を歪める別のアーチファクトであるウォーター・フォール（water fall）効果が生じる。イオン・ビーム・ミリング・プロセスに起因する構造体の損傷およびアーチファクトは、高アスペクト比垂直構造体の分析を困難にする。

40

【0007】

例えば、プロセス・エンジニアが観察する必要がある1つの構造的特徴部分は、スルー・シリコン・バイア（through-silicon via: TSV）である。TSVの断面を形成することは、ボイドおよび境界面の特性を評価するために半導体研究室において一般的に実施されている作業である。一般に50～300 nmであるTSVの深さのため、イオン・ビームを用いてTSVの断面をミリングするとかなりのカーテニングが生じることがある。

【0008】

特徴部分を露出させるためのイオン・ビーム・ミリングの使用に起因する損傷およびアーチファクトのため、画像は、製造プロセスの結果を忠実に示さない。それらのアーチ

50

ファクトは、測定を妨げ、製造プロセスの評価を妨げる。なぜなら、それらの画像および測定値は試料作製の結果を示すものであって、製造プロセスの結果だけを示すものではないからである。

【 0 0 0 9 】

高アスペクト比構造体を観察し測定する方法であって、構造体を改変したりまたはアーチファクトを生み出したりしない方法が求められている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【 0 0 1 0 】

【特許文献 1】米国特許第 5 , 8 5 1 , 4 1 3 号明細書

10

【特許文献 2】米国特許第 5 , 4 3 5 , 8 5 0 号明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 1 1 】

本発明の目的は、高アスペクト比構造体を分析する信頼性の高いシステムを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 2 】

加工物表面に、傾斜したトレンチをミリングする。その傾斜したトレンチの表面に保護層を堆積させ、次いで、保護層を貫くミリングによって関心の特徴部分の断面を露出させる。保護層からの関心の特徴部分の深さは、当初の加工物表面からの特徴部分の深さに比べて小さいため、アーチファクトは低減する。

20

【 0 0 1 3 】

露出させた断面は、走査電子顕微鏡法、光学顕微鏡法、X線分析、マイクロ・ラマン分析 (micro Raman analysis) などのさまざまな技法を使用して観察または分析することができる。このプロセスは、高アスペクト比 3 D I C 構造体プロセス、ならびにホール、トレンチおよび他の構造体を含む他の高アスペクト比プロセスの信頼性の高い分析結果を提供する。

【 0 0 1 4 】

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、本発明の目的と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。

30

【 0 0 1 5 】

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

【図面の簡単な説明】

40

【 0 0 1 6 】

【図 1】図 2 ~ 5 に示すプロセス・ステップ (s t e p) を示す流れ図である。

【図 2】F I B を用いて断面ミリングされている、傾けられた試料を示す図である。

【図 3】e ビーム点堆積を受けている、傾けられていない試料を示す図である。

【図 4】F I B によってミリングされた断面を有する、傾けられた試料を示す図である。

【図 5】関心領域 (R O I) 上での S E M 画像化を使用するスライス・アンド・ビュー・プロセスを示す図である。

【図 6 A】加工物表面の下方の異なる深さにある関心領域を示す図である。

【図 6 B】加工物表面の下方の異なる深さにある関心領域を示す図である。

【図 6 C】加工物表面の下方の異なる深さにある関心領域を示す図である。

50

【図 7】本発明を実現する目的に使用することができるデュアル・ビーム・システムを概略的に示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0017】

本発明の実施形態は、イオン・ビーム・ミリングによって露出させた特徴部分内の損傷およびアーチファクトを低減させる。実施形態は、充填されていない高アスペクト比ホールを含む、3D NAND構造体などの新しい3D構造体の分析に対して特に有用である。このプロセスは、ウェーハの形態の試料上で、または個々の集積回路などのより小さな試料上で実行することができる。

【0018】

本発明の一実施形態では、垂直でない角度で試料をミリングし、その後に保護層を堆積させ、続いて垂直ミリングを実施して、画像化用の高アスペクト構造体の断面を露出させる。ステージの傾斜角および垂直ミルの位置を調整することによって、高アスペクト比構造体の所望の任意の深さにあるROIを露出させることができる。

【0019】

保護層を堆積させる前に、ステージを、例えば約30°から約33.5°の間に傾けることにより、保護層とROIの間の材料が減り、表面からのROIの深さが短くなるため、カーテン効果が低減しまたは排除される。保護層を有する表面からのこのより短い深さがカーテニングを低減させるのは、イオン・ビームを不均一に遮るROIの上方の材料がより少なくなるためである。

【0020】

断面がこの角度で切削されるため、露出した断面において交互に並んだ中実材料とボイドは、高さ約1μmから1.5μmの段(step)を示す。好ましい保護層堆積プロセスは、試料中に段が存在する場合にそれらの段を覆い隠して、イオン・ビームがミリングするための比較的均一な表面を提示する。例えば、比較的高電圧の電子ビーム、好ましくは10keVよりも大きい電子ビーム、20keVよりも大きい電子ビーム、より好ましくは約30keVの電子ビームを使用した電子ビーム誘起堆積を実行する。これは、空の高アスペクト比構造体によって生み出された段に白金、タングステンなどの保護材料を充填することを可能にする。結果として、本発明は、この堅牢な(robust)解決策を有する信頼性の高いROI分析を提供する。イオン・ビーム誘起堆積、レーザ・ビーム誘起堆積またはクラスター・ビーム堆積を含む他のビーム誘起堆積など、他の堆積技法を使用することもできる。

【0021】

図1は、3D集積回路の高アスペクト比構造体を分析するイオン・ビーム分析法を提供するプロセスのステップを示すプロセス流れ図である。図2～5は、プロセス・ステップの最中の試料を示す。試料は、一定の比率では示されていない。図7は、図1のプロセス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・ビーム・システムを示す。図1のプロセスは、電子カラムが垂直であり、イオン・カラムが52°に傾けられたデュアル・ビーム・システム上で実行されるものとして説明される。他のハードウェア構成では、ビームと加工物の間の同じ相対的な角度を生み出すためのステージの傾きが異なる。

【0022】

ステップ102で、ステージを、約30°から約33.5°の間の角度に傾ける。その結果、イオン・ビーム202と加工物表面206に対して垂直な線204との間の角度が約18.5°から約22°の間になる。他の実施形態では、イオン・ビーム202と垂直線204の間の角度が5°から50°の間である。ステップ104で、FIBによってトレンチ210をミリングして、高アスペクト比ホール212を含む断面216を図2に示されているように露出させる。断面216は、試料表面に対して垂直ではない。矢印はそれぞれ、イオン・ビーム202の1つの走査経路を示し、この走査は、トレンチをミリングするためにビームが走査するにつれて紙面を貫く方向へ移動する。

【0023】

10

20

30

40

50

トレンチの幅が狭いとトレンチの底から抜け出る２次電子の数が少なくなるため、トレンチ内の深い位置にあるＲＯＩから、画像を形成するための良好な２次電子信号を提供するためには、トレンチ２１０の幅が十分に広いことが好ましい。この幅の広い断面エリアは、２次電子が、トレンチの底から抜け出て検出されることを可能にする。一般に、トレンチ・エリアの断面は、関心領域のサイズの少なくとも２倍であるべきである。

【００２４】

ステップ１０６で、ステージを０°に傾けて、電子ビーム３０２の向きが、加工物表面２０６に対しては垂直、傾斜した表面２１６に対しては１８．５°から２２°の間になるようにする。ステップ１０８で、関心領域の上方に、白金、タングステンまたは他の材料の保護層３０４を、電子ビーム誘起堆積を使用して図３に示されているように堆積させる。電子の運動量を増大させて露出した段を埋めることによって段を最も良く覆い隠すためには、約３０ｋｅＶの電子エネルギーを使用することが好ましい。

10

【００２５】

ステップ１１０は、図４に示されているようにイオン・ビームが表面に対して垂直になるように、ステージを５２°に傾けることを示す。ステップ１１２は、ＦＩＢによる断面形成を実行することを示す。ステージを５２°に傾けると、試料表面とイオン・カラムの間の角度が直角になる。

【００２６】

ステップ１１２では、走査電子顕微鏡法、Ｘ線分析、マイクロ・ラマン法または他の方法を含むさまざまな方法によって画像化しまたは分析することができる関心領域の垂直断面を形成する。図４は、イオン・ビーム４０２が垂直な切削を実行して、関心領域４０６を通る垂直な表面４０４を露出させる様子を示している。イオン・ビーム４０２によるこの処理は、材料を除去して垂直壁を形成するバルク切削と、材料はほとんど除去しないが、より清浄な表面を観察のために生み出す清浄化断面とを含むことが好ましい。加工物表面２０６は第１の表面を表し、傾斜した表面２１６は第２の表面を表し、垂直な表面４０４は第３の表面を表す。関心領域と第１の表面との間には第２の表面の一部があり、第３の表面は第１の表面に対して実質的に垂直である。ステップ１１４で、図５に示されているように、電子ビーム５０２を試料に導いて走査電子ビーム画像を形成する。

20

【００２７】

任意選択で、ステップ１１２および１１４を繰り返して特徴部分内へ前進し続け、一連の断面画像を形成して、ＲＯＩ内の特徴部分の３Ｄ表現を形成することができるようにする。このプロセスは、「スライス・アンド・ビュー（slice-and-view）」と呼ばれ、この用語は、イオン・ビームを用いて追加の材料を繰り返し除去してＲＯＩの別の面を露出させ、次いで、露出させた面の画像を電子ビームを使用して形成することを含む。

30

【００２８】

先行技術の断面処理では、表面形状が粗い、または深さ方向の構造が複雑な場合、垂直深さが数マイクロメートルを超えて深くなると、カーテン効果が避けられない。電子ビーム誘起堆積の前に、約３０°から３３．５°のステージ傾斜角を使用することにより、ＲＯＩの上方の材料が除去され、表面からのＲＯＩの深さが小さくなるため、カーテン効果が除去される。同時に、高エネルギー電子の使用は段を覆い隠し、このことは、高アスペクト比構造体の空のホールに白金、タングステンなどの保護材料を部分的に充填することを可能にする。結果として、実施形態は、信頼性の高い不良解析またはプロセス監視を提供する。

40

【００２９】

ステージの傾斜角およびイオン・ビーム切削の位置を、関心領域を露出させるように調整することによって、高アスペクト比構造体の任意の深さにあるＲＯＩを露出させ、調べることができる。当然のことながら、以上の説明は本発明の例示的な実施形態に関するものであること、ならびに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することなく変更を加えることができることを理解すべきである。

50

【 0 0 3 0 】

本発明の実施形態は、空のチャンネル (channel) と基板間の新鮮で清浄な境界を示す。この堅牢なプロセスは、調査中の構造体を損傷しない高アスペクト比構造体の不良解析を可能にする。

【 0 0 3 1 】

面 2 1 6 の角度または面 2 1 6 を貫く垂直切削の位置を調整することによって、高アスペクト比特徴部分を、表面からの異なる深さにおいて検査することができる。図 6 A、6 B および 6 C は、加工物表面の下方の異なる深さにある関心領域を示す。トレンチ 2 1 0 がミリングされた試料が示されているが、観察のための面を形成する垂直切削はまだ実行されていない。楕円形 6 0 2 A、6 0 2 B および 6 0 2 C は関心領域を表し、垂直線 6 0 4 A、6 0 4 B および 6 0 4 C は、垂直イオン・ビーム切削の位置を示し、この垂直切削は、電子ビーム堆積させた保護層 6 0 6 A、6 0 6 B および 6 0 6 C を貫き、ROI を通る。鋸歯状の線は、上記のステップ 1 0 4 および図 2 に示されたイオン・ミリングを示す。保護層 6 0 6 A、6 0 6 B および 6 0 6 C の位置は ROI の位置によって変化する。保護層を堆積させるプロセスは、存在する全てのホールを埋めることが好ましい。図 6 A では、ROI が、チャンネル・ホールの底の近くにある。図 6 B では、ROI が、チャンネルの底まで約 1 / 2 のところにある。図 6 C は、チャンネル・ホールの最上部に近い ROI を示す。図 6 A、6 B および 6 C では、ROI を通る垂直線が、ステップ 1 1 2 に示された保護層を貫くイオン・ビーム切削を示す。どの場合も、ROI の上方に残っている材料を貫いてミリングする距離はほぼ同じであり、その距離は比較的小さく、そのため、ROI の上方の陰に起因するカーテニングはほとんどまたは全く生じない。

【 0 0 3 2 】

図 7 は、垂直に装着された SEM カラムと、垂直から約 5 2 ° の角度に装着された FIB カラムとを備える、本発明を実施するのに適した典型的なデュアル・ビーム・システム 7 1 0 を示す。適当なデュアル・ビーム・システムは例えば、本出願の譲受人である FEI Company (米オレゴン州 Hillsboro) から市販されている。適当なハードウェアの一例を以下に示すが、本発明は、特定のタイプのハードウェアで実現されることだけに限定されない。

【 0 0 3 3 】

走査電子顕微鏡 7 4 1 と、電源および制御ユニット 7 4 5 が、デュアル・ビーム・システム 7 1 0 に備わっている。陰極 7 5 2 と陽極 7 5 4 の間に電圧を印加することによって、陰極 7 5 2 から電子ビーム 7 4 3 が放出される。電子ビーム 7 4 3 は、集光レンズ 7 5 6 および対物レンズ 7 5 8 によって微細なスポットに集束する。電子ビーム 7 4 3 は、偏向コイル 7 6 0 によって試料上で 2 次元的に走査される。集光レンズ 7 5 6、対物レンズ 7 5 8 および偏向コイル 7 6 0 の動作は電源および制御ユニット 7 4 5 によって制御される。

【 0 0 3 4 】

電子ビーム 7 4 3 を、下室 7 2 6 内の可動式ステージ 7 2 5 上にある基板 7 2 2 上に焦束させることができる。電子ビーム中の電子が基板 7 2 2 に当たると、2 次電子が放出される。この 2 次電子は、後に論じる 2 次電子検出器 7 4 0 によって検出される。

【 0 0 3 5 】

デュアル・ビーム・システム 7 1 0 は集束イオン・ビーム (FIB) システム 7 1 1 をさらに含み、FIB システム 7 1 1 は、上部 7 1 2 を有する排気された室を含み、上部 7 1 2 内にはイオン源 7 1 4 および集束カラム 7 1 6 が位置し、集束カラム 7 1 6 は、引出し電極および静電光学系を含む。集束カラム 7 1 6 の軸は、電子カラムの軸から 5 2 度傾いている。上部 7 1 2 は、イオン源 7 1 4、引出し電極 7 1 5、集束要素 7 1 7、偏向要素 7 2 0 および集束イオン・ビーム 7 1 8 を含む。イオン源 7 1 4 を出たイオン・ビーム 7 1 8 は、集束カラム 7 1 6 を通過し、7 2 0 に概略的に示されている静電偏向手段間を通り抜けて、下室 7 2 6 内の可動式ステージ 7 2 5 上に配置された基板 7 2 2、例えば半導体デバイスを含む基板 7 2 2 に向かって進む。

【 0 0 3 6 】

ステージ 7 2 5 は、水平面（X 軸および Y 軸）内で移動することができ、かつ垂直に（Z 軸）移動することができる。ステージ 7 2 5 はさらに約 60° 傾くことができ、Z 軸を軸にして回転することができる。X - Y ステージ 7 2 5 上に基板 7 2 2 を挿入するため、および内部ガス供給リザーバが使用される場合には内部ガス供給リザーバの整備作業のために、扉 7 6 1 が開かれる。システムが真空状態にある場合に開かないように、この扉はインタロックされる。あるいは、エアロックを使用して、室 7 2 6 が大気にさらされることを防ぐこともできる。

【 0 0 3 7 】

上部 7 1 2 を排気するためにイオン・ポンプ（図示せず）が使用される。室 7 2 6 は、真空コントローラ 7 3 2 の制御の下、ターボ分子および機械ポンピング・システム 7 3 0 によって排気される。この真空システムは、室 7 2 6 に、約 1×10^{-7} トルから 5×10^{-4} トルの間の真空を提供する。エッチング支援ガス、エッチング遅延ガスまたは堆積前駆体ガスを使用する場合、室のバックグラウンド圧力は典型的には約 1×10^{-5} トルまで上昇することがある。

【 0 0 3 8 】

イオン・ビーム 7 1 8 にエネルギーを与え集束させるため、高圧電源が、イオン・ビーム集束カラム 7 1 6 内の電極に適当な加速電圧を印加する。イオン・ビーム 7 1 8 が基板 7 2 2 に当たると、材料がスパッタリングされる。すなわち試料から材料が物理的に追い出される。あるいは、イオン・ビーム 7 1 8 が前駆体ガスを分解して、材料を堆積させることもできる。

【 0 0 3 9 】

液体金属イオン源 7 1 4 と、約 1 keV から 60 keV のイオン・ビーム 7 1 8 を形成しそれを試料に向かって導くイオン・ビーム集束カラム 7 1 6 内の適当な電極とに高圧電源 7 3 4 が接続されている。パターン発生器 7 3 8 によって提供される所定のパターンに従って動作する偏向コントローラおよび増幅器 7 3 6 が偏向板 7 2 0 に結合されており、それによって、対応するパターンを基板 7 2 2 の上面に描くようにイオン・ビーム 7 1 8 を手動または自動で制御することができる。いくつかのシステムでは、当技術分野ではよく知られているように、偏向板が、最後のレンズの前に配置される。イオン・ビーム集束カラム 7 1 6 内のビーム・ブランキング（blanking）電極（図示せず）は、ブランキング・コントローラ（図示せず）がブランキング電極にブランキング電圧を印加したときに、イオン・ビーム 7 1 8 を、基板 7 2 2 ではなくブランキング絞り（図示せず）に衝突させる。

【 0 0 4 0 】

液体金属イオン源 7 1 4 は一般にガリウムの金属イオン・ビームを提供する。イオン・ミリング、強化されたエッチングもしくは材料堆積によって基板 7 2 2 を改変するため、または基板 7 2 2 を画像化するために、この源を一般に、基板 7 2 2 の位置における幅が $1/10$ マイクロメートル未満のビームに集束させることができる。プラズマ・イオン源などの他のイオン源を使用することもできる。

【 0 0 4 1 】

2 次イオンまたは 2 次電子の放出を検出する目的に使用されるエバーハート・ソーナリー（Everhart Thornley）検出器、マルチチャンネル・プレートなどの荷電粒子検出器 7 4 0 がビデオ回路 7 4 2 に接続されており、ビデオ回路 7 4 2 は、ビデオ・モニタ 7 4 4 に駆動信号を供給し、コントローラ 7 1 9 から偏向信号を受け取る。下室 7 2 6 内における荷電粒子検出器 7 4 0 の位置は実施形態によって変更することができる。例えば、荷電粒子検出器 7 4 0 はイオン・ビームと同軸とすることができ、イオン・ビームが通り抜けることを可能にする穴を含むことができる。他の実施形態では、最終レンズを通過させ、次いで収集のために軸から逸らした 2 次粒子を集めることができる。

【 0 0 4 2 】

ガス蒸気を導入し基板 7 2 2 に向かって導くためにガス送達システム 7 4 6 が下室 7 2

10

20

30

40

50

6 内へ延びている。本発明の譲受人に譲渡された Casella 他「Gas Delivery Systems for Particle Beam Processing」という名称の米国特許第 5,851,413 号明細書は適当なガス送達システム 746 を記載している。別のガス送達システムが、やはり本発明の譲受人に譲渡された Rasmussen の「Gas Injection System」という名称の米国特許第 5,435,850 号明細書に記載されている。例えば、イオン・ビームまたは電子ビームの衝突時に金属を堆積させるため、ビーム衝突位置に金属有機化合物を送達することができる。白金を堆積させるための $(CH_3)_3Pt(C_6H_5)$ 、タングステンを堆積させるためのタングステンヘキサカルボニルなどの前駆体ガスを送達し、電子ビームによって分解して、ステップ 108 の保護層を提供することができる。

10

【0043】

システム・コントローラ 719 は、デュアル・ビーム・システム 710 のさまざまな部分の動作を制御する。従来のユーザ・インタフェース（図示せず）にコマンドを入力することにより、ユーザは、システム・コントローラ 719 を介して、イオン・ビーム 718 または電子ビーム 743 を所望の通りに走査することができる。あるいは、システム・コントローラ 719 は、プログラムされた命令に従って、デュアル・ビーム・システム 710 を制御することができる。好ましいコントローラは、図 1 のステップを自動的に実施する命令を記憶した記憶装置と通信し、または図 1 のステップを自動的に実施する命令を記憶した記憶装置を含む。いくつかの実施形態では、デュアル・ビーム・システム 710 が、関心領域を自動的に識別する米マサチューセッツ州 Natick の Cognex Corporation から市販されているソフトウェアなどの画像認識ソフトウェアを含み、システムは、本発明に従って画像化する断面を手動でまたは自動的に露出させることができる。例えば、このシステムは、複数のデバイスを含む半導体ウェーハ上の同様の特徴部分の位置を自動的に突き止め、異なる（または同じ）デバイス上の関心の特徴部分を露出させ、それらの特徴部分の画像を形成することができる。

20

【0044】

本発明は、幅広い適用可能性を有し、上記の例において説明し示した多くの利点を提供することができる。本発明の実施形態は、具体的な用途によって大きく異なる。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。本発明を実施するのに適した粒子ビーム・システムは例えば、本出願の譲受人である FEI Company から市販されている。

30

【0045】

本明細書は、方法と方法の操作を実行する装置の両方を開示する。このような装置は、必要な目的に合わせて特に構築することができ、または、コンピュータに記憶されたコンピュータ・プログラムによって選択的に起動されもしくは再構成される汎用コンピュータもしくはその他のデバイスを備えることができる。さまざまな汎用荷電粒子ビーム・システムを、本明細書の教示に従ってプログラムとともに使用することができる。あるいは、必要な方法ステップを実行する、より専門化された装置を構築した方が適切なこともある。

40

【0046】

加えて、本明細書に記載された方法の個々のステップをコンピュータ・コードによって実行に移すことができることは当業者には明白であるため、本明細書は、コンピュータ・プログラムも暗に開示する。このコンピュータ・プログラムは、特定のプログラム言語および特定のプログラム言語の実装だけに限定されることは意図されていない。さまざまなプログラム言語およびさまざまなプログラム言語コーディングを使用して、本明細書に含まれる開示の教示を実現することができることが理解される。さらに、このコンピュータ・プログラムが、特定の制御フローだけに限定されることは意図されていない。このコンピュータ・プログラムには他の多くの変形形態があり、それらの変形プログラムは、本発明の趣旨または範囲を逸脱しないさまざまな制御フローを使用することができる。

50

【0047】

このようなコンピュータ・プログラムは任意のコンピュータ可読媒体上に記憶することができる。このコンピュータ可読媒体は、磁気もしくは光ディスク、メモリ・チップなどの記憶デバイス、または汎用コンピュータとインタフェースするのに適した他の記憶装置デバイスを含むことができる。このコンピュータ可読媒体はさらに、インターネット・システムにおいて例証されている媒体などのハード・ワイヤード媒体、またはGSM（登録商標）移動電話システムにおいて例証されている媒体などの無線媒体を含むことができる。このコンピュータ・プログラムは、このような汎用コンピュータまたは荷電粒子ビーム用のコントローラ上にロードされ実行されたときに、好ましい方法のステップを実現する装置を効果的に構成する。

10

【0048】

本発明は、ハードウェア・モジュールとして実現することもできる。より具体的には、ハードウェアに関して、モジュールは、他の構成要素または他のモジュールと一緒に使用されるように設計された機能ハードウェア・ユニットである。例えば、モジュールは、別個の電子構成部品を使用して実現することができ、または特定用途向け集積回路（ASIC）などの全体電子回路の一部分を形成することができる。この他にも数多くの可能性が存在する。このシステムは、ハードウェア・モジュールとソフトウェア・モジュールの組合せとして実現することもできることを当業者は理解するであろう。

【0049】

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。さらに、本明細書において、用語「自動」、「自動化された」または類似の用語が使用されるとき、これらの用語は、自動プロセスもしくは自動ステップまたは自動化されたプロセスもしくは自動化されたステップの手動による開始を含むものと理解される。以下の議論および特許請求の範囲では、用語「含む（including）」および「備える（comprising）」が、オープン・エンド（open-ended）型の用語として使用されており、したがって、これらの用語は、「...を含むが、それらだけに限定されない（including, but not limited to...）」ことを意味すると解釈すべきである。

20

【0050】

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。

30

【0051】

用語「集積回路」は、マイクロチップの表面にパターン形成された一組の電子構成部品およびそれらの相互接続（ひとまとめにして内部電気回路要素）を指す。用語「半導体チップ」は、総称的に集積回路（IC）を指し、この集積回路（IC）は、半導体ウェーハと一体でも、またはウェーハから切り離されていても、あるいは、回路基板上で使用するためにパッケージングされていてもよい。本明細書では用語「FIB」または「集束イオン・ビーム」が、イオン光学部品によって集束させたビームおよび整形されたイオン・ビームを含む、平行イオン・ビームを指すために使用される。

40

【0052】

上記の実施形態は3D NAND型の構造体を記載しているが、本発明は、このような構造体だけに限定されず、例えばDRAMに対して、また、トレンチおよび他の構造体ならびに円形のホールの特性評価に対して有用である。

【0053】

本発明のいくつかの実施形態は、荷電粒子ビームを使用して加工物上の関心領域を露出させる方法であって、加工物の上面に対して垂直でない第1の角度でトレンチをイオン・ビーム・ミリングして、関心領域に隣接し加工物の前記面に対してある角度をなす表面を露出させること、関心領域に隣接した露出させた前記表面の一部分に保護層を堆積させること、関心領域に隣接した前記表面の一部分を、加工物の上面に対して実質的に垂直な角

50

度でイオン・ビーム・ミリングして、関心領域を露出させること、および荷電粒子ビーム画像化によって関心領域を観察することを含む方法を提供する。

【 0 0 5 4 】

いくつかの実施形態では、加工物の上面に対して垂直でない第 1 の角度でトレンチをミリングすることが、複数の高アスペクト比特徴部分を有する加工物の領域にトレンチをミリングすることを含む。

【 0 0 5 5 】

いくつかの実施形態では、前記複数の高アスペクト比特徴部分がホールである。

【 0 0 5 6 】

いくつかの実施形態では、関心領域に隣接した前記表面の一部分に保護層を堆積させることが、高アスペクト比ホールを貫いてトレンチをミリングすることによって生み出された段を覆い隠すことを含む。

10

【 0 0 5 7 】

いくつかの実施形態では、加工物の上面に対して実質的に垂直な後続のミリング・ステップを実行して、関心領域の第 2 の表面を露出させること、および荷電粒子ビーム画像化を使用して第 2 の表面を観察することを含む。

【 0 0 5 8 】

いくつかの実施形態は、後続の複数のミリング・ステップを実行して、関心領域の異なる表面を順次露出させること、および荷電粒子ビーム画像化を使用して前記異なる表面をそれぞれ観察することをさらに含む。

20

【 0 0 5 9 】

いくつかの実施形態では、加工物の上面に対して垂直でない第 1 の角度でトレンチをミリングすることが、加工物の前記面に対して垂直な線から 5 ° から 5 0 ° の間の角度の壁を有するトレンチをミリングすることを含む。

【 0 0 6 0 】

いくつかの実施形態では、トレンチをミリングすることが、加工物の前記面に対して垂直な線から約 1 8 ° から約 2 2 ° の間の角度の壁を有するトレンチをミリングすることを含む。

【 0 0 6 1 】

いくつかの実施形態では、関心領域に隣接した前記表面の一部分に保護層を堆積させることが、ビーム誘起堆積を使用することを含む。

30

【 0 0 6 2 】

いくつかの実施形態では、ビーム誘起堆積を使用することが、1 0 k e V よりも大きなエネルギーまたは 2 0 k e V よりも大きなエネルギーを有する電子を使用した電子ビーム誘起堆積を含む。

【 0 0 6 3 】

いくつかの実施形態では、関心領域に隣接した前記表面の一部分に保護層を堆積させることが、レーザ誘起堆積またはイオン・ビーム誘起堆積を使用して保護層を堆積させることを含む。

【 0 0 6 4 】

いくつかの実施形態では、関心領域が、3 D N A N D 構造体または 3 D D R A M 構造体の一部分を含む。

40

【 0 0 6 5 】

いくつかの実施形態は、高アスペクト比構造体の一部分の断面を観察のために形成する方法であって、

集束イオン・ビームを使用して、前記試料の前記表面に対して垂直でない角度および高アスペクト比特徴部分の長軸に対して垂直でない角度でトレンチをミリングすること、

トレンチの壁に高アスペクト比特徴部分の選択された深さで保護層を堆積させること、

保護層を貫く、前記試料の前記表面に対して実質的に平行な断面を、荷電粒子ビームを使用してミリングして、高アスペクト比特徴部分の断面を露出させること、および

50

露出させた断面を観察すること
を含む方法を含む。

【0066】

いくつかの実施形態では、露出させた断面を観察することが、走査電子顕微鏡法、X線分析、マイクロ・ラマン法または他の方法を含む。

【0067】

いくつかの実施形態では、前記第1の断面に対して平行な保護層を貫く第2の断面をミリングして、関心領域の第2の断面を露出させることを含む。

【0068】

いくつかの実施形態は、荷電粒子ビームを使用して、保護層を貫く断面を順次ミリングすること、および露出させた断面を電子ビームを使用して観察して、関心領域内の特徴部分の一連の断面画像を形成することをさらに含む。

【0069】

いくつかの実施形態では、トレンチの壁に保護層を堆積させることが、ビーム誘起堆積を使用して保護層を堆積させることを含む。

【0070】

本発明のいくつかの実施形態は、加工物の第1の表面の下方の関心領域を分析する方法であって、

加工物に向かってイオン・ビームを導き、加工物の第1の表面と関心領域の間の材料を除去して、第2の表面を形成すること

を含み、第2の表面の一部が、関心領域と第1の表面の位置との間にあり、この方法がさらに、

第2の表面に保護層を堆積させること、

イオン・ビームを導き、保護層を貫いてミリングして、関心領域を通る、分析のための第3の表面を形成すること、および

荷電粒子ビーム画像化によって関心領域を観察すること

を含み、第2の表面上の保護層が、関心の特徴部分に十分に近く、そのため、関心領域が、観察のためにカーテニングなしで露出する

方法を提供する。

【0071】

いくつかの実施形態では、第3の表面が、第1の表面に対して実質的に直角である。

【0072】

いくつかの実施形態では、第2の表面が、第1の表面に対して垂直な線に関して5°から50°の間の角度に傾いている。

【0073】

いくつかの実施形態では、第2の表面が、第1の表面に対して垂直な線に関して約18°から約22°の間の角度に傾いている。

【0074】

本発明のいくつかの実施形態は、試料の断面を観察するシステムであって、

イオンの集束ビームを供給するイオン光学カラムと、

電子の集束ビームを供給する電子光学カラムと、

試料から放出された2次粒子を検出する粒子検出器と、

コンピュータ記憶装置と通信するコントローラと

を備え、このコンピュータ記憶装置が、

加工物の表面に対して垂直でない第1の角度でトレンチをミリングして、関心領域に隣接し加工物の表面に対してある角度をなす表面を露出させる命令と、

関心領域に隣接した前記表面の一部に保護層を堆積させる命令と、

関心領域に隣接した前記表面の一部をミリングして、関心領域を露出させる命令と、

荷電粒子ビーム画像化によって関心領域を観察する命令と

を記憶したシステムを提供する。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 5 】

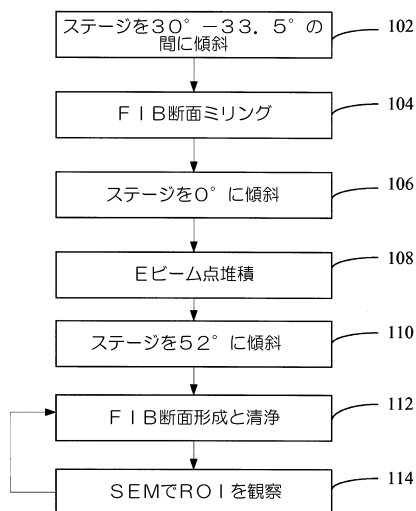
いくつかの実施形態では、電子ビームが、20 keVよりも大きなエネルギーを有する電子を供給して、電子ビーム誘起堆積によって保護層を堆積させるようにする命令を、コンピュータ記憶装置が記憶している。

【 0 0 7 6 】

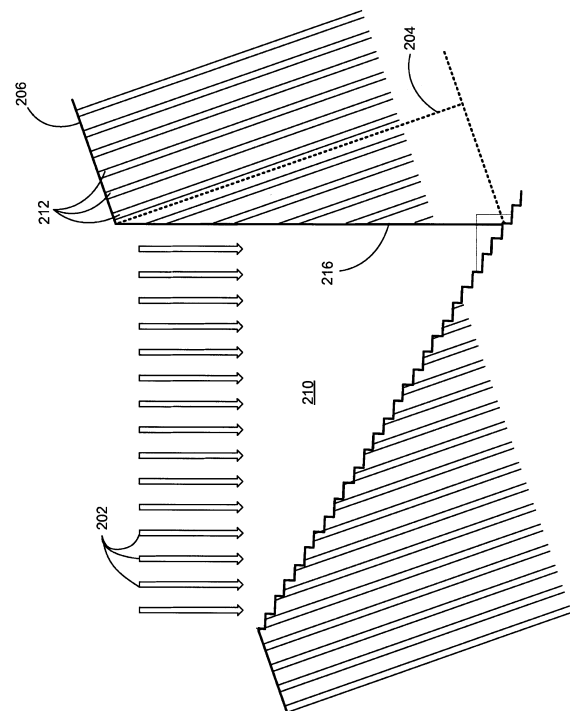
本発明および本発明の利点を詳細に説明したが、添付の特許請求の範囲によって定義された本発明の趣旨および範囲から逸脱することなく、本明細書に、さまざまな変更、置換および改変を加えることができることを理解すべきである。さらに、本出願の範囲が、本明細書に記載されたプロセス、機械、製造、組成物、手段、方法およびステップの特定の実施形態に限定されることは意図されていない。当業者なら本発明の開示から容易に理解するように、本明細書に記載された対応する実施形態と実質的に同じ機能を実行し、または実質的に同じ結果を達成する既存のまたは今後開発されるプロセス、機械、製造、組成物、手段、方法またはステップを、本発明に従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

10

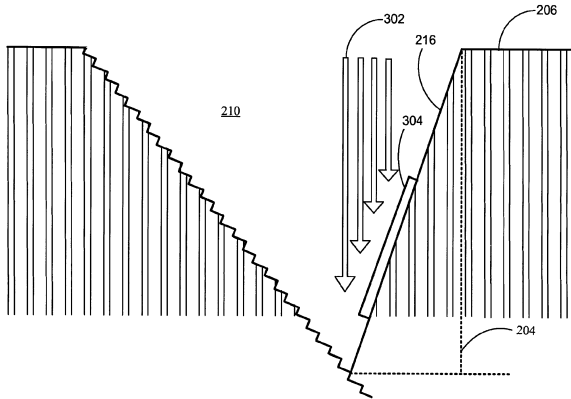
【 図 1 】



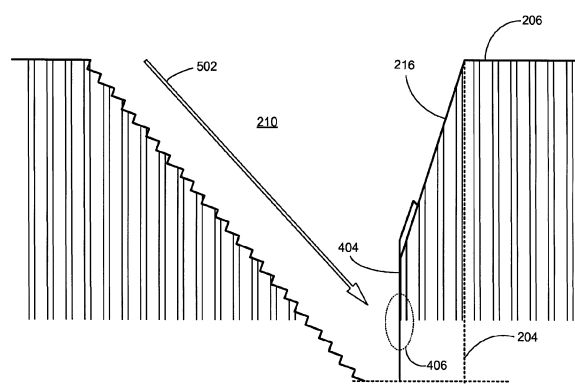
【 図 2 】



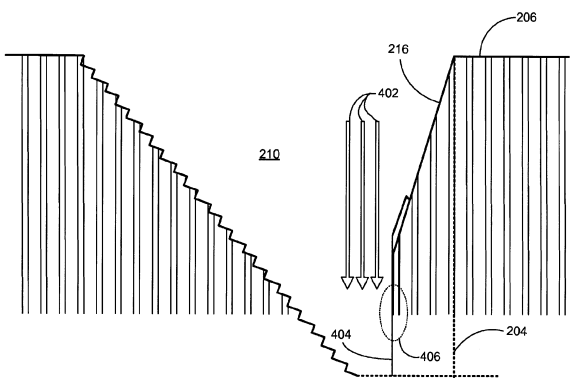
【図 3】



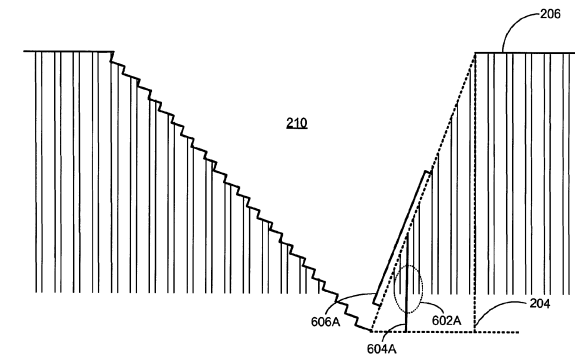
【図 5】



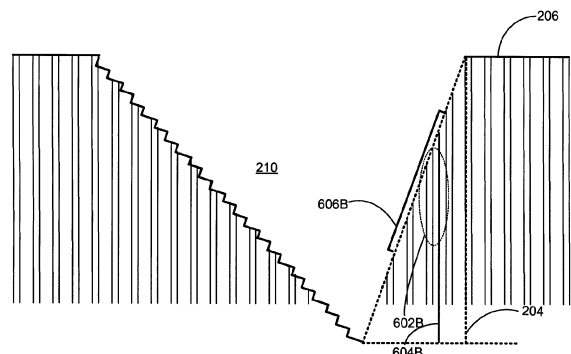
【図 4】



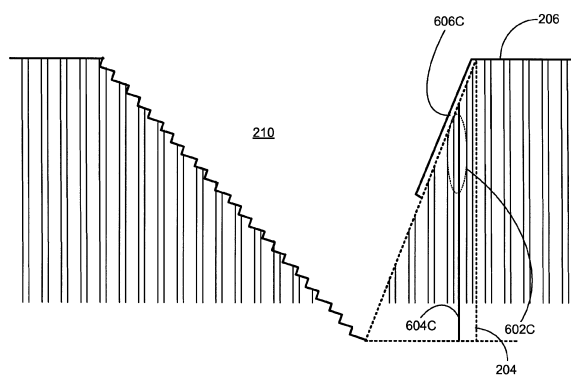
【図 6 A】



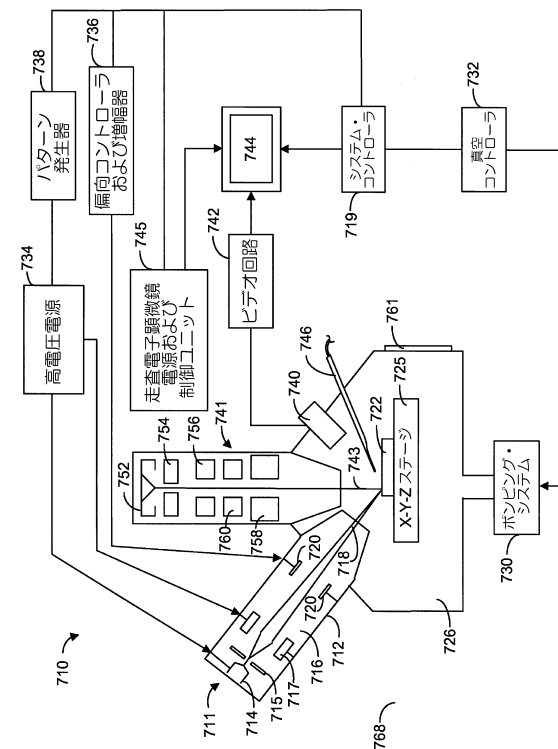
【図 6 B】



【図 6 C】



【図 7】



フロントページの続き

(72)発明者 スターシー・ストーン

アメリカ合衆国 97006 オレゴン州 ビーバートン エスタブリュー ソーサ・プレイス
795

(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 320
3

(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

審査官 三木 隆

(56)参考文献 特開2009-139379(JP,A)

特開2001-264225(JP,A)

特開2006-128068(JP,A)

特開2000-214056(JP,A)

国際公開第2012/108465(WO,A1)

特開2012-146659(JP,A)

特開2010-190809(JP,A)

米国特許出願公開第2011/0031388(US,A1)

米国特許第4460634(US,A)

米国特許出願公開第2007/0087572(US,A1)

中国特許出願公開第101153855(CN,A)

中国特許出願公開第1979791(CN,A)

米国特許第6517734(US,B1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 1/28

H01J 37/20

H01J 37/317