

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6916886号  
(P6916886)

(45) 発行日 令和3年8月11日(2021.8.11)

(24) 登録日 令和3年7月20日(2021.7.20)

(51) Int.Cl.

F 1

G01N 21/65 (2006.01)

G01N 21/65

G01N 21/956 (2006.01)

G01N 21/956

H01L 21/66 (2006.01)

H01L 21/66

A

J

請求項の数 19 (全 24 頁)

(21) 出願番号 特願2019-541117 (P2019-541117)  
 (86) (22) 出願日 平成30年1月26日 (2018.1.26)  
 (65) 公表番号 特表2020-505607 (P2020-505607A)  
 (43) 公表日 令和2年2月20日 (2020.2.20)  
 (86) 國際出願番号 PCT/US2018/015570  
 (87) 國際公開番号 WO2018/140805  
 (87) 國際公開日 平成30年8月2日 (2018.8.2)  
 審査請求日 令和3年1月21日 (2021.1.21)  
 (31) 優先権主張番号 15/419,355  
 (32) 優先日 平成29年1月30日 (2017.1.30)  
 (33) 優先権主張国・地域又は機関  
米国(US)

早期審査対象出願

(73) 特許権者 500049141  
ケーレルエー コーポレイション  
アメリカ合衆国 カリフォルニア ミルピ  
タス ワン テクノロジー ドライブ  
(74) 代理人 110001210  
特許業務法人 Y K I 国際特許事務所  
(72) 発明者 ハーラー クルト  
アメリカ合衆国 カリフォルニア プレザ  
ントン シルバナー ドライブ 890  
審査官 赤木 貴則

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】分光組成分析のためのウェハ粒子欠陥の活性化

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

半導体ウェハが着脱可能に取り付けられるウェハチャックを含むウェハ位置決めシステムであって、前記半導体ウェハは1つ以上の結晶軸を特徴とする結晶構造を有する基板材料を含む、ウェハ位置決めシステムと、

照明光のビームを発生するように構成された照明光源と、

前記半導体ウェハの表面に入射する前記照明光のビームを測定スポットに向けて焦光するように構成された1つ以上の光学素子であって、前記半導体ウェハの前記表面は前記照明光の入射ビームを基準として前記ウェハ位置決めシステムによって配置される、光学素子と、

複数の欠陥出力信号を生成するように構成された1つ以上の欠陥粒子検出器であって、各欠陥出力信号は、前記ウェハ位置決めシステムが前記測定スポットを横断して前記半導体ウェハの前記表面を走査する際に前記測定スポット内で検出された検出欠陥粒子の存在を示すものであり、前記検出欠陥粒子のうちの各検出欠陥粒子は、前記半導体ウェハの前記表面においてそれぞれ異なる位置に存在する、欠陥粒子検出器と、

コンピューティングシステムであって、

前記複数の欠陥出力信号を受け取り、

前記複数の検出欠陥粒子のマップであって、各検出欠陥粒子の前記半導体ウェハの前記表面上の位置を示すマップを生成し、

前記ウェハ位置決めシステムに制御コマンドを送信し、前記ウェハ位置決めシステム

に前記半導体ウェハを移動させて、前記測定スポットが特定の期間において前記複数の検出欠陥粒子のうちの1つの欠陥粒子の位置において前記半導体ウェハの前記表面上に存在するようにし、前記検出欠陥粒子上への、1.0ミリワット露光以上の照明パワーを有する照明ビームの入射によって前記検出欠陥粒子を化学的に改変して、前記期間中に前記検出欠陥粒子を分光学的に活性化するように構成されたコンピューティングシステムと、

前記期間中の前記検出欠陥粒子への前記照明ビームの入射に反応して生じた前記活性化させた検出欠陥粒子から散乱された光の量に基づいて、前記活性化させた検出欠陥粒子の材料組成を示す出力信号を生成するように構成された1つ以上の分光器と、を備え、

前記コンピューティングシステムが、さらに、

前記活性化させた検出欠陥粒子から散乱された前記光の量を示す前記出力信号を受信し、前記出力信号に基づいて前記活性化させた検出欠陥粒子の材料組成を決定するように構成される、

ことを特徴とする表面検査システム。

【請求項2】

請求項1に記載の表面検査システムであって、

前記照明光のビームの光学経路内に設置された第1の偏光素子であって、前記照明光のビームを第1の方向に偏光させるように構成された第1の偏光素子と、

前記活性化させた検出欠陥粒子から散乱された量の光の光学経路内に設置された第2の偏光素子であって、前記活性化させた検出欠陥粒子から散乱された前記量の光を、前記第1の方向に直交する第2の方向に偏光させるように構成された第2の偏光素子と、

をさらに備えることを特徴とする表面検査システム。

【請求項3】

請求項2に記載の表面検査システムであって、

前記第1の偏光素子は、前記半導体ウェハの前記基板材料における前記1つ以上の結晶軸のうちの1つの結晶軸の方向を基準として、前記照明光のビームが前記基板材料の前記1つの結晶軸に対して所定の偏光方位角で前記測定スポットに焦光されるように、方向決めされる、

ことを特徴とする表面検査システム。

【請求項4】

請求項1に記載の表面検査システムであって、

メモリ内に格納されている以前に分析した検出欠陥粒子の測定値のライブラリデータベースをさらに含み、

前記コンピューティングシステムは、前記活性化させた検出欠陥粒子から散乱された光を示す前記出力信号と、前記ライブラリデータベース内の以前に分析した検出欠陥粒子の複数の測定値とを相關付けて、前記活性化させた検出欠陥粒子の前記材料組成を決定するようにさらに構成される、

ことを特徴とする表面検査システム。

【請求項5】

請求項1に記載の表面検査システムであって、

前記検出欠陥粒子が、結晶構造、多結晶構造、又は非晶質構造を有する、有機、無機、又は金属化学組成を有する、

ことを特徴とする表面検査システム。

【請求項6】

請求項1に記載の表面検査システムであって、

前記検出欠陥粒子が、固有の振動ラマンスペクトルシグネチャを示さない面心立方結晶構造若しくは体心立方結晶構造、又は、固有の振動ラマンスペクトルシグネチャを弱く示す六方密充填結晶構造を有する金属である、

ことを特徴とする表面検査システム。

【請求項7】

請求項1に記載の表面検査システムであって、

10

20

30

40

50

前記検出欠陥粒子が金属であり、  
前記検出欠陥粒子が、分光学的に活性になるように化学酸化により化学的に変えられる  
ことを特徴とする表面検査システム。

【請求項 8】

請求項 7 に記載の表面検査システムであって、

前記表面検査システムの周囲の大気環境における酸素の分圧とは異なる、制御された酸素分圧を含んでいる環境チャンバをさらに含み、前記化学酸化が前記環境チャンバ内で生じる、

ことを特徴とする表面検査システム。

10

【請求項 9】

請求項 7 に記載の表面検査システムであって、

前記検出欠陥粒子は、前記照明光のビームが前記検出欠陥粒子上へと投射される前に表面活性物質で被覆され、前記表面活性物質が前記化学酸化を促進させる、

ことを特徴とする表面検査システム。

【請求項 10】

請求項 1 に記載の表面検査システムであって、

前記活性化させた検出欠陥粒子の前記材料組成を示す前記出力信号が、観測可能なラマンスペクトルを含む、

ことを特徴とする表面検査システム。

20

【請求項 11】

請求項 1 に記載の表面検査システムであって、

前記活性化させた検出欠陥粒子の前記材料組成を示す前記出力信号が、観測可能な蛍光ミネッセンススペクトルを含む、

ことを特徴とする表面検査システム。

【請求項 12】

請求項 1 に記載の表面検査システムであって、

前記照明光源が、多数の別個の波長を有する照明光を発生するように構成される、

ことを特徴とする表面検査システム。

【請求項 13】

30

請求項 1 に記載の表面検査システムであって、

照明光の第 2 のビームの光学経路内に設置された回転可能な偏光素子をさらに含み、

前記回転可能な偏光素子は、前記半導体ウェハに対して複数の異なる偏光方位角で前記偏光素子が方向決めされるように構成され、

前記活性化させた検出欠陥粒子の前記材料組成を示す前記出力信号は、前記複数の異なる偏光角度における各偏光角度での前記活性化させた検出欠陥粒子への前記照明光のビームの入射に反応して、前記活性化させた検出欠陥粒子から散乱された光の量に基づいて生成される、

ことを特徴とする表面検査システム。

【請求項 14】

40

請求項 1 に記載の表面検査システムであって、

前記照明光源と前記半導体ウェハの間で光学経路内に配置された照明パワー制御素子をさらに含み、

前記照明パワー制御素子は、前記測定スポットが前記複数の検出欠陥粒子のうちの前記 1 つの検出欠陥粒子の位置において前記半導体ウェハの前記表面上に存在する前記期間中に、前記照明光のビームの照明パワーを変化させる、

ことを特徴とする表面検査システム。

【請求項 15】

照明光のビームで半導体ウェハの表面上の欠陥粒子を第 1 の期間において照明するステップと、

50

前記第1の期間における前記照明光のビームに反応して前記欠陥粒子から散乱された光の量に基づいて、第1の出力信号を発生させるステップであって、前記第1の出力信号が前記欠陥粒子の材料組成を示す観測可能なラマンスペクトルを含む、発生させるステップと、

前記第1の期間の後の第2の期間において、1.0ミリワット露光以上の照明パワーを有する前記照明光のビームで前記半導体ウェハの前記表面上の前記欠陥粒子を照明するステップであって、前記照明光のビームの照明パワーは、前記第2の期間中の方が前記第1の期間中よりも高く、前記照明光のビームは、前記第2の期間中に前記欠陥粒子を化学的に改変して前記欠陥粒子を分光学的に活性にし、ラマンスペクトル反応は、前記欠陥粒子が分光学的に活性になる前は観測不能であるが、前記欠陥粒子が分光学的に活性になった後で観測可能になる、照明するステップと、

前記第2の期間中に前記照明光のビームに反応して前記活性化させた欠陥粒子から散乱された光の量に基づいて、前記活性化させた欠陥粒子の材料組成を示す第2の出力信号を発生させるステップと、

前記第1の出力信号および前記第2の出力信号に基づいて前記活性化させた欠陥粒子の材料組成を決定するステップと、

を含むことを特徴とする方法。

【請求項16】

請求項15に記載の方法であって、

前記欠陥粒子が金属であり、

前記欠陥粒子が、分光学的に活性になるように化学酸化により化学的に変えられる、ことを特徴とする方法。

【請求項17】

請求項15に記載の方法であって、

前記活性化させた欠陥粒子の前記材料組成を示す前記第2の出力信号が、観測可能なラマンスペクトルを含む、

ことを特徴とする方法。

【請求項18】

請求項15に記載の方法であって、

前記照明光のビームを第1の方向に偏光させるステップと、

前記活性化させた欠陥粒子から散乱された量の光を、前記第1の方向に直交する第2の方向に偏光させるステップと、

をさらに含むことを特徴とする方法。

【請求項19】

第1の期間において、試料の表面上の測定スポットのところに照明光のビームを投射し、前記第1の期間中の前記照明光のビームによる欠陥粒子への照明に反応して前記欠陥粒子から散乱された光の量に基づいて前記測定スポットのところの前記欠陥粒子の存在を検出するように構成された欠陥粒子検出サブシステムと、

前記第1の期間の後の第2の期間において、1.0ミリワット露光以上の照明パワーを有する前記測定スポットに前記照明光のビームを投射して、前記欠陥粒子を化学的に改変して前記欠陥粒子を分光学的に活性にし、ラマンスペクトル反応は前記欠陥粒子が分光学的に活性になる前は観測不能であるが、前記欠陥粒子が分光学的に活性になった後で観測可能になるようにし、前記第2の期間中の前記照明光のビームに反応して前記活性化させた欠陥粒子から散乱された光の量に基づいて前記活性化させた欠陥粒子の材料組成を決定するように構成された欠陥粒子活性化及び分析サブシステムと、

を備えることを特徴とする表面検査システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

説明する実施形態は、表面検査のためのシステム、特に、半導体ウェハ検査モダリティ

10

20

30

40

50

に関する。

【背景技術】

【0002】

ロジックデバイス及びメモリデバイスなどの半導体デバイスは、典型的には、基板又はウェハに適用される一連の処理ステップにより製造される。半導体デバイスの様々な特徴及び多数の構造レベルが、これらの処理ステップにより形成される。例えば、とりわけリソグラフィは、半導体ウェハ上にパターンを生成することを伴う半導体製造プロセスの1つである。半導体製造プロセスのさらなる例は、化学機械研磨、エッチ、堆積、及びイオン注入を含むが、これらに限定されない。多数の半導体デバイスを1枚の半導体ウェハに製造することができ、次いで個々の半導体デバイスへと分離することができる。

10

【0003】

半導体製造プロセス中の様々なステップで検査プロセスが使用されて、より高い歩留まりを図るためにウェハ上の欠陥を検出する。設計ルール及びプロセスウィンドウのサイズが縮小し続けるのにともない、検査システムは、高いスループットを維持しながらウェハ表面上の広い範囲の物理的な欠陥を捕らえることを要求される。

【0004】

1つのこのような検査システムは、パターン形成していないウェハ表面を照明して、望ましくない粒子がないかどうか検査する。半導体設計ルールが進化し続けるのにともない、表面検査システムにより検出されなければならない最小の粒子サイズは、サイズが小さくなり続ける。

20

【0005】

ウェハプロセス設備からの粒子汚染に起因する集積回路歩留まり損失は、コスト効率の良い製造プロセスを実現するために修復されなければならない。半導体製造施設では、粒子汚染レベルが、カリフォルニア州（米国）、ミルピタスの KLA - テンカー（KLA - Tencor）社により製造された製品のサーフスキャン（Surf scan）（登録商標）ファミリーなどのパターン形成していないウェハ表面検査システムによりモニタされる。検査ツールにより測定される典型的な汚染メトリックは、ウェハパス当たりの粒子（particles - per - wafer - pass）（PWP）の数である。テストウェハがプロセスツールを通過する前後に測定した欠陥マップを比較することにより、増えた欠陥の数が定期的に測定され、追跡される。PWPが管理図の限度を超えると、具合の悪いプロセスツールが、排出物の根本原因を究明して問題を解決するためにオフライン時に取り外される。

30

【0006】

従来は、通常の欠陥の組成及び制御外の欠陥の組成のデータベースが、特定の技術ノードに関係する製造プロセスの開発中に生成される。開発中に、増えた粒子の走査型電子顕微鏡（SEM）画像が集められる。しかしながら、多くのケースでは、欠陥画像単独では、欠陥のタイプ及び発生源を明確には同定できない。したがって、加えて電子照射の下で粒子により放出される特性X線のスペクトルを、エネルギー分散型X線（EDX）分光器で測定して構成元素を同定する。

40

【0007】

その後に、排出物が大量生産中に生じると、制御外のテストウェハを、SEM及びEDXツールを使用して測定する。データを、プロセス開発中に生成したデータベースと比較する。欠陥組成の測定した分布を過去の排出物のデータベースと比較して、問題の根本原因を同定する。この知識に基づいてツールを製造に戻すための対策が取られる。

【0008】

一般に、有害粒子の化学的組成が知られている時に汚染問題を解決することは、はるかに容易である。しかしながら、SEM及びEDXツールによるパターン形成したウェハの再検査がパターン形成していないウェハの再検査よりも先に優先されるのが典型的である。大量生産環境で組成測定結果を得ることは、時間のかかるプロセスである。加えて、粒子欠陥の再検査ツールとは別であるSEM及びEDXツールによる再検査は、時間を要する

50

1つのツールから別のツールへのウェハの移動を必要とする。

【0009】

R A M A N 分光法は、ウェハ表面上の粒子欠陥の組成を同定するために採用することができる可能性のある分析技術である。日立ハイテクノロジーズ社に交付された米国特許第7,777,876号及び第9,007,581号は、弹性散乱光及び非弹性散乱光（すなわち、それぞれレイリー散乱及びラマン散乱）の両者を検出する表面検査システムを記載している。分光器は、非弹性光中の固体状態振動モードを解明するために利用され、組成情報を明らかにするが、発明者には、報告された測定のいずれもが集積回路プロセスツールにより発生されたはずの実際の粒子欠陥からのラマンスペクトルに対応するようには思われない。

10

【0010】

一部の粒子の原子振動バンドはレーザラマン顕微分光法で観測することができるものの、一般に、有効なラマン振動バンドを示さず、したがってラマン分光技術によっては観測不可能な、関心対象となる多くの重要な欠陥粒子（すなわち、関心のある物質）がある。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0011】

【特許文献1】米国特許第7,777,876号

【特許文献2】米国特許第9,007,581号

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

ウェハ表面上の欠陥の存在を検出すること、及び異なる再検査ツールへとウェハを移さずに検出した欠陥粒子の材料組成を同定することの両者のために、走査型表面検査システムの改善が望まれる。

【課題を解決するための手段】

【0013】

ウェハ表面上の粒子欠陥を検出し、分光学的に活性な状態に粒子を変換し、分光技術により活性化させた粒子の材料組成を同定するための方法及びシステムが本明細書において説明される。粒子欠陥は、化学的処理、熱的処理、光化学的処理、又はこれらの組み合わせによって変換され、その結果、活性化された粒子は、分光学的に観測することができる原子振動バンドを示す。

30

【0014】

半導体製造設備及びプロセスにより発生する多くの欠陥粒子は、分光学的に不活性である。例えば、体心立方（b c c）結晶対称性又は面心立方（f c c）結晶対称性を有する金属ナノ粒子には、観測可能なラマンスペクトル線がない。

【0015】

1つの態様では、走査型表面検査システムは、ウェハ表面上の粒子欠陥の存在を検出し、検出した粒子のうちの1つ以上において観測可能なラマンバンドを活性化させ、分光技術により活性化させた粒子の材料組成を同定する。同じ検査ツールで欠陥検出及び組成分析の両者を実行することにより、半導体ウェハ上に堆積した粒子欠陥の組成分析を実行するため異なる再検査ツール又はツールの組み合わせへウェハを移動する必要がない。

40

【0016】

コンピューティングシステムは、活性化させた粒子から集めた分光学的測定結果を受信し、測定値に基づいて粒子の組成を推定するように構成される。いくつかの実施形態では、コンピューティングシステムは、測定したスペクトルのスペクトルシグネチャ（例えば、ピーク位置、ピーク強度など）を知られている組成を有する粒子から測定した基準スペクトルのシグネチャと合わせる。いくつかの実施形態では、コンピューティングシステムは、測定したスペクトルのスペクトルシグネチャを解析的に導き出したスペクトルのシグネチャと合わせる。いくつかの実施形態では、コンピューティングシステムは、測定した

50

スペクトルのスペクトルシグネチャを以前に分析した欠陥粒子のライプラリデータベースと関連付ける。いくつかの実施形態では、ライプラリは、光学的な分光学的応答データを含む。いくつかのさらなる実施形態では、ライプラリは、他の組成データ（例えば、フォトルミネッセンスデータ、エネルギー分散型X線（EDX）分光器データなど）をも含む。

【0017】

さらなる態様では、欠陥粒子の組成は、フォトルミネッセンス（PL）スペクトルの測定に基づいて決定される。いくつかの例では、欠陥粒子は、近IRまで広がる広帯域フォトルミネッセンス（PL）スペクトルを示す。

【0018】

もう1つのさらなる態様では、集められた光は、照明光に対して直交偏光され、検出した信号の信号対雑音比を改善する。

【0019】

いくつかの実施形態では、表面検査システムは、走査モードにおけるウェハ表面上の欠陥位置のマップを生成するために利用されて、全体のウェハ表面又はウェハ表面の重要な部分の欠陥マッピングを迅速に生成する。ウェハ表面をマッピングした後で、表面検査システムは、欠陥粒子検出サブシステムにより以前に検出された欠陥粒子のうちの1つ以上を活性化させ分析するために利用される。いくつかの他の実施形態では、欠陥粒子は、検出の直後に活性化され分析される。

【0020】

いくつかの例では、粒子の活性化は、金属粒子の化学酸化に起因する。いくつかの例では、粒子の変換は、制御された酸素分圧のチャンバ内で生じる。いくつかの例では、チャンバは、酸化プロセスに関係しない実質的に不活性ガスの補助的な分圧を含む。いくつかの例では、チャンバは、酸化性変換を触媒するガス状化合物の補助的な分圧を含む。

【0021】

いくつかの例では、金属粒子は、酸化の前に表面活性物質で処理されて、酸化状態を伴う金属酸化物及び大きなラマン散乱断面積を有する結晶性多形構造の形成を促進する。

【0022】

いくつかの例では、酸化性変換は、高くした温度により行われる。いくつかの例では、高くした温度を、放射加熱、電磁放射での照明、又はこれらの組み合わせによって生成することができる。

【0023】

いくつかの例では、粒子の酸化性変換は、電磁放射源から放出されたフォトンに曝すことによって励起された光化学経路により行われる。

【0024】

いくつかの例では、変換は、ガス状、液体、又は溶液系薬剤及び光熱的又は光化学的駆動力を用いた酸化性反応以外の化学反応である。

【0025】

一般に、多数の異なる照明光源を、活性化、スペクトル測定、又は両者のための照明を与えるために利用することができる。加えて、ウェハ表面上の欠陥粒子の位置をマッピングするために利用する1つ以上の照明光源を、活性化、スペクトル測定、又は両者のための照明を与えるためにも利用することができる。

【0026】

いくつかの実施形態では、多数の異なる波長が利用され、これらの波長は、それらが基板ウェハの表面アスペリティ（例えば、薄膜、非常に非球形状の欠陥粒子の高いアスペクト比突起物など）と互いに影響し合うことが知られているという理由で選択される。表面アスペリティは、それ自体のすぐ付近に強い電磁場を生成し、この電磁場が弱いスペクトルシグネチャを強める。

【0027】

上記は、概要であり、したがって必要に応じて、単純化、一般化、及び詳細の省略を含

10

20

30

40

50

み、その結果として、当業者は、概要が単に例示的であり、多少なりとも限定しないことを認識するだろう。本明細書において説明するデバイス及び／又はプロセスの他の態様、発明的特徴、及び利点は、本明細書において述べる非限定的な詳細な説明で明らかになるだろう。

【図面の簡単な説明】

【0028】

【図1】検査中の試料上の欠陥粒子を検出し、活性化させ、そして材料組成を同定するよう構成された検査システムの1つの実施形態を図説する単純化した図である。

【図2】回転式走査ステージ上に設置されたウェハの上面視を図説する図である。

【図3】球直径の関数としての銅粒子の吸収断面積のシミュレーションを図説する図である。10

【図4】入射照射量及び実効熱伝導率の様々な値の関数としてシリコンウェハの表面に堆積した銅粒子の加熱のシミュレーションを図説する図である。

【図5】低い照明パワーレベルで活性化させた欠陥粒子のスペクトル測定値を図説する図である。

【図6】高い照明パワーレベルで活性化させた欠陥粒子のスペクトル測定値を図説する図である。

【図7】様々な照明パワーレベルで活性化させた欠陥粒子のスペクトル測定値を図説する図である。

【図8】低い照明パワーで表面検査システムにより集められた二酸化チタン粒子のスペクトル測定値を図説する図である。20

【図9】二酸化チタン( $TiO_2$ )に関係する基準ラマンスペクトルを図説する単純化した図である。

【図10】ウェハ表面上の活性化させた欠陥粒子の材料組成を同定するために有用な例示的な方法200のフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0029】

ここで背景の例及び本発明のいくつかの実施形態を詳細に参照する。その例を添付の図面に図示する。

【0030】

ウェハ表面上の粒子欠陥を検出し、粒子を分光学的に活性な状態へ変換し、そして分光技術により活性化させた粒子の材料組成を同定するための方法及びシステムを、本明細書において説明する。30

【0031】

本明細書において説明する発明概念は、半導体製造設備及びプロセスにより発生する多くの欠陥粒子が分光学的に不活性である（例えば、粒子にはラマン分光で観測することができる原子振動バンドがない）という観測結果に基づいている。しかしながら、化学的処理、熱的処理、光化学的処理、又はこれらの組み合わせによって、粒子欠陥は、活性化された粒子が（例えば、ラマン分光を介して）分光学的に観測することができる原子振動バンドを示すように変換される。40

【0032】

1つの態様では、走査型表面検査システムは、ウェハ表面上の粒子欠陥の存在を検出し、この検出した粒子のうちの1つ以上において観測可能なラマンバンドを活性化させ、そして分光技術により活性化させた粒子の材料組成を同定する。同じ検査ツール上で欠陥検出及び組成分析の両者を実行することにより、半導体ウェハ上に堆積した粒子欠陥の組成分析を実行するために、異なる再検査ツール又はツールの組み合わせへウェハを移す必要がない。

【0033】

図1は、本明細書において説明する検査方法を実行するために使用することができる表面検査システム100の1つの実施形態の単純化した模式図である。単純化のために、シ50

ステムのいくつかの光学部品を省略している。例として、折り畳み式ミラー、偏光子、ビーム形成光学系、補助的な光源、補助的な集光器、及び補助的な検出器も含むことができる。すべてのこのような変形形態は、本明細書において説明する発明の範囲内である。本明細書において説明する検査システムは、パターン形成したウェハ、並びにパターンを形成していないウェハを検査するために使用することができる。

#### 【0034】

図1に図示したように、表面検査システム100は、照明光源101、光学素子103、104と107、及び検出器109を含む欠陥粒子検出サブシステムを含む。加えて、表面検査システム100は、照明光源111、光学素子112～115、130～132、及び検出器116を含む欠陥粒子活性化及び分析サブシステムを含む。

10

#### 【0035】

欠陥粒子検出サブシステムの照明光源101は、ウェハ110に向けて向けられた照明光のビーム102を発生する。図1に描かれたように、照明は、欠陥粒子検出サブシステムにより斜めの角度でウェハ110の表面に与えられる。しかしながら、一般に、欠陥粒子検出サブシステムを、垂直な入射角で試料へ光ビームを向けるように構成することができる。いくつかの実施形態では、欠陥粒子検出サブシステムを、斜めの入射角及び垂直な入射角などの異なる入射角で試料へ多数の光のビームを向けるように構成することができる。多数の光のビームを、実質的に同時に又は順次に試料へ向けることができる。

#### 【0036】

照明光源101は、例として、レーザ、ダイオードレーザ、ヘリウムネオンレーザ、アルゴンレーザ、固体レーザ、ダイオード励起固体(DPSS)レーザ、キセノンアークランプ、ガス放電ランプ、及びLEDアレイ、又は白熱灯を含むことができる。光源を、ほぼ単色光又は広帯域光を発するように構成することができる。いくつかの実施形態では、欠陥粒子検出サブシステムは、ある時間間隔で試料へ比較的狭い波長帯域を有する光(例えば、ほぼ単色光、又は約20nm未満、約10nm未満、約5nm未満、又はさらには約2nm未満の波長範囲を有する光)を向けるように構成される。それゆえ、光源が広帯域光源である場合に、欠陥粒子検出サブシステムは、試料へ向けられた光の波長を制限することができる1つ以上のスペクトルフィルタを含むこともできる。1つ以上のスペクトルフィルタを、バンドパスフィルタ及び/又はエッジフィルタ及び/又はノッチフィルタとすることができます。いくつかの実施形態では、欠陥粒子検出サブシステムは、光をラマン分光法に適した非常に狭い波長帯域を有する試料へ向けるように構成される。いくつかの例では、照明の線幅は、30ギガヘルツ( $1\text{ cm}^{-1}$ )以下のオーダーの線幅を有する。1つの例では、レーザ照明光源は、0.016ナノメートル未満の線幅を有する405ナノメートルの光を発するように構成される。

20

#### 【0037】

いくつかの実施形態では、一定パワーのレーザビームが、照明光源101により発生され、照明パワー制御素子103が、ウェハ表面への損傷を防止するようにビームパワーを調整するために利用される。いくつかの実施形態では、ビームパワーは、走査しようとする粒子のサイズ及び材料組成に基づいて調整される。

#### 【0038】

照明パワー制御素子103を通過した後で、照明ビームは、照明光のビーム102をウェハ表面上へと焦光する照明光学系104へ向けられる。一般に、ウェハの表面に達する光は、偏光、強度、サイズ及び形状などを含め、1つ以上的方法で変えることができる。

30

#### 【0039】

図1に図示した実施形態では、ウェハ位置決めシステム125は、照明ビーム102の下でウェハ110を移動させて、ウェハ表面上の測定スポット106の位置を調節する。ウェハ位置決めシステム125は、ウェハチャック126、動きコントローラ123、回転ステージ121及び移動ステージ122を含む。ウェハ110は、ウェハチャック126上に支持される。図2に図示したように、ウェハ110は、その幾何学的中心150を回転ステージ121の回転の軸にほぼ位置を合わせて設置される。このようにして、回転

40

50

ステージ 121 は、容認される許容誤差内で指定された角速度  $\dot{\theta}$  でその幾何学的中心の周りにウェハ 110 をスピンさせる。加えて、移動ステージ 122 は、指定された速度  $V_T$  で回転ステージ 121 の回転の軸に実質的に垂直な方向にウェハ 110 を移動させる。動きコントローラ 123 は、回転ステージ 121 によるウェハ 110 のスピニングと移動ステージ 122 によるウェハ 110 の移動とを調整して、検査システム 100 内でのウェハ 110 の所望の走査運動を実現する。

#### 【0040】

例示的な動作シナリオでは、検査は、ウェハ 110 の幾何学的中心 150 のところに位置する測定スポット 106 で始まり、次いで、ウェハ 110 は、測定スポット 106 がウェハ 110 の外周に達する（すなわち、R がウェハ 110 の半径に等しくなるとき）まで回転され、移動される。回転ステージ 121 と移動ステージ 122 との調整された動きのために、測定スポット 106 によって照明された点の軌跡は、ウェハ 110 の表面上で渦巻き状経路をたどる。ウェハ 110 の表面上の渦巻き状経路は、検査軌道 127（その全体を図示せず）と呼ばれる。例示的な検査軌道 127 の一部分が、TRACK<sub>i</sub> として図 2 に図示されている。図 2 に図示したように、測定スポット 106 は、ウェハの幾何学的中心 150 から距離 R に位置する。

#### 【0041】

集光光学系 107 は、測定スポット 106 から散乱された光及び/又は反射された光を集め。集光光学系 107 の特定の名目上の向きが図 1 に図示されているが、ウェハ表面に対する集光光学系の向きは、例えば、入射角及び/又はウェハのトポグラフィカルな特徴に応じて適切に配置することができることが理解される。

#### 【0042】

集光光学系 107 により集められた光 108 は、検出器 109 へ向けられる。検出器 109 は、検出した視野内でウェハ 110 から集められた検出した光を示す電気信号へと検出した光を変換するように一般に機能する。一般に、検出器 109 は、本技術において知られている実質的にすべての光検出器を含むことができる。しかしながら、検出器の所望の動作特性、検査しようとする試料のタイプ、及び照明の構成に基づいて本発明の 1 つ以上の実施形態内で使用するために、特定の検出器を選択することができる。例えば、検査のために利用可能な光の量が比較的小さい場合、時間遅延積分 (TDI) カメラなどの高効率化検出器を、信号対雑音比及びシステムのスループットを大きくするために利用することができる。しかしながら、フォトダイオード、光電管、光電子増倍管 (PMT)、電荷結合素子 (CCD) カメラ、フォトダイオード、光電管及び光電子増倍管 (PMT) のアレイなどの他の検出器を、検査のために利用可能な光の量及び実行しようとする検査のタイプに応じて使用することができる。

#### 【0043】

いくつかの実施形態では、検出器 109 は、測定スポット 106 から散乱された光の量を示す单一の出力信号を発生させるように構成された非撮像検出器である。单一の出力信号は、高いスループットで大きな粒子の効率的な検出を可能にする。

#### 【0044】

いくつかの実施形態では、検出器 109 は、明視野、暗視野、及び共焦点などの様々な撮像モードで実装されることがある撮像検出器である。明視野、暗視野、及び位相差などの様々な撮像モードを、異なるアーチャ又はフーリエフィルタを使用することにより実施することができる。本願に引用して援用されている米国特許第 7,295,303 号及び第 7,130,039 号は、これらの撮像モードをさらに詳細に記述している。もう 1 つの例（図示せず）では、検出器は、大きな視野角で集めた散乱光を撮像することにより暗視野画像を生成する。もう 1 つの例では、入射スポット 106 に一致するピンホールを検出器（例えば、検出器 109）の前に設置して、共焦点画像を生成することができる。本願に引用して援用されている米国特許第 6,208,411 号は、これらの撮像モードをさらに詳細に記述している。加えて、表面検査システム 100 の様々な態様が、両者とも本願に引用して援用されている米国特許第 6,271,916 号及び米国特許第 6,2

10

20

30

40

50

01, 601号に記載されている。

【0045】

いくつかの実施形態では、多数の検出器が、測定スポット106から集められた光108を検出するために選択可能に利用される。例えば、異なる検出器（例えば、1つ以上の非撮像検出器及び1つ以上の撮像検出器）に向けて集光した光108を選択可能に向けるために、1つ以上のフリップインミラー又はビームスプリッタを利用して、種々の欠陥粒子測定を実行することができる。

【0046】

図1に描かれた本発明の少なくとも1つの実施形態では、単一の検出器（例えば、個別の光電子増倍管（PMT））が、測定スポット106から散乱された光を検出するために検出器109として利用される。検出器109の出力信号134は、処理のためにコンピューティングシステム140へ伝達されて、欠陥粒子の存在を判断する。

10

【0047】

いくつかの実施形態では、表面検査システム100の欠陥粒子検出サブシステムが、ウェハ表面上の欠陥位置のマップを生成するために利用される。これらの実施形態では、欠陥粒子検出サブシステムを走査モードで動作させて、全体のウェハ表面又はウェハ表面の重要な部分の欠陥マッピングを迅速に生成する。ウェハ表面をマッピングした後で、欠陥粒子検出サブシステムにより前に検出された欠陥粒子のうちの1つ以上を活性化させ分析するために、欠陥粒子活性化及び分析サブシステムが利用される。しかしながら、いくつかの他の実施形態では、欠陥粒子検出サブシステムによる検出の直後に欠陥粒子を活性化させ分析するために、欠陥粒子活性化及び分析サブシステムが利用される。

20

【0048】

欠陥粒子活性化及び分析サブシステムの照明光源111は、ウェハ110に向けて向ける照明光のビーム117を発生させる。図1に描かれたように、照明が、欠陥粒子活性化及び分析サブシステムによって多数の入射角でウェハ110の表面に与えられる。しかしながら、一般に、欠陥粒子活性化及び分析サブシステムを、直角の入射角を含め、任意の単一の入射角又は多数の入射角の集合で試料へ光のビームを向けるように構成することができる。

【0049】

照明光源111は、例として、レーザ、ダイオードレーザ、ヘリウムネオンレーザ、アルゴンレーザ、固体レーザ、ダイオード励起固体（DPSS）レーザ、キセノンアークランプ、ガス放電ランプ、及びLEDアレイ、又は白熱灯を含むことができる。光源を、ほぼ単色光又は広帯域光を発するように構成することができる。いくつかの実施形態では、欠陥粒子活性化及び分析サブシステムは、ある時間間隔で比較的狭い波長帯域を有する光（例えば、ほぼ単色光又は約20nm未満、約10nm未満、約5nm未満、又はさらには約2nm未満の波長領域を有する光）を試料へ向けるように構成される。それゆえ、光源が広帯域光源である場合には、欠陥粒子活性化及び分析サブシステムもまた、試料へ向けられた光の波長を制限することができる1つ以上のスペクトルフィルタ112を含むことができる。1つ以上のスペクトルフィルタを、バンドパスフィルタ及び/又はエッジフィルタ及び/又はノッチフィルタとすることができます。いくつかの実施形態では、欠陥粒子検出サブシステムは、ラマン分光法にとって好適な非常に狭い波長帯域を有する試料へ光を向けるように構成される。いくつかの例では、照明の線幅は、30ギガヘルツ（1cm<sup>-1</sup>）以下のオーダーの線幅を有する。1つの例では、レーザ照明光源は、0.016ナノメートル未満の線幅を有する405ナノメートルの光を発するように構成される。

30

【0050】

図1に描かれた実施形態では、照明ビーム117は、照明パワー制御素子130へ向ける。照明パワー制御素子130は、コンピューティングシステム140から受信するコマンド信号133にしたがって照明光のビーム117の光学的パワーを制御するように構成される。1つの実施形態では、照明パワー制御素子130は、照明光源111とビームスプリッティング素子113との間の照明ビーム経路に設置されて、粒子活性化及び分

40

50

析中に照明パワーを動的に調節する。

【0051】

好みの実施形態では、照明パワー制御素子130は、高効率、低成本の音響光学変調器（AOM）である。AOMを通じて透過する光パワーは、費用のかかる高電圧ドライバを用いずに高速のスイッチング能力を与える無線周波数（RF）ドライバにより変調される。

【0052】

一般に、照明パワー制御素子130は、選択的に透過する光学部品を用いて実装することができ、この光学部品を、入射光の偏光に基づいて入射光の一部分を透過するように適合させることができる。いくつかの実施形態では、照明パワー制御素子130は、（四分の一波長板などの）波長板及び偏光ビームスプリッタを含む。この構成では、入ってくる光の偏光を変えるために、波長板を使用することができ、一方で、ビームスプリッタは、1つ以上の選択偏光（例えば、直線偏光された光）を透過し、すべての他の光（例えば、ランダムに偏光された光、円偏光又は橢円偏光された光）を反射するように機能する。光の一部分を反射することによって、波長板及びビームスプリッタは、透過光の強度又はパワー・レベルを低下させるように機能する。

10

【0053】

いくつかの実施形態では、照明パワー制御素子130は、「オン」状態と「オフ」状態との間を切り替えることができる電気・光学材料を含む。「オン」のときに、電気・光学材料は、入ってくる光の偏光を所定の偏光方向へと変える。このいわゆる「再偏光された光」を、次いで、電気・光学スイッチからの特定の偏光出力に応じて、再偏光された光の一部分だけを透過することができる偏光ビームスプリッタへ供給することができる。再偏光された光の残りの部分を、反射させて捨てる（例えば、ビームダンプ材料により吸収される）ことができる。いくつかのケースでは、電気・光学材料は、数ナノ秒から数マイクロ秒までのタイムスパン内で「オン」状態と「オフ」状態との間を切り替えることができる。

20

【0054】

特定の実施形態では、照明パワー制御素子130は、ポッケルスセル（Pockels Cell）として知られている、高速の電気的に制御された光学シャッタを含む。ポッケルスセルを、照明光源101によって発生された光が自由に通過することができる「オン」状態に設定することができる。大きな粒子の存在が検出されると、ポッケルスセルは、「オフ」状態へ切り替わることができ、偏光ビームスプリッタにより少なくとも部分的にフィルタして除去することができる異なる偏光へと発生した光の偏光を変えることができる。「オン」状態と「オフ」状態との間を切り替えるために、可変電源により与えられる電圧をポッケルスセルへ供給することができて、電気・光学材料（典型的には、電気・光学結晶）を通過した光の偏光を変えることができる。ポッケルスセルへ供給する電圧は、コンピューティングシステム140から伝達される制御信号133により決定することができる。

30

【0055】

AOMを任意の適した周波数で駆動することができ、このように広い範囲にわたり照明パワーを変調することができる。もう1つの例では、実質的に任意の位相シフトを生じさせるように、ポッケルスセルを駆動することができ、このように、実質的に任意の出力パワー・レベルを作るために偏光ビームスプリッタと組み合わせることができる。いくつかの実施形態では、回路及び/又はソフトウェアを照明パワー制御素子130と共に含めて、（例えば、閉フィードバックループの形態で）連続的なパワー・レベル調節を行うことができる。

40

【0056】

いくつかの実施形態では、照明パワー制御素子130は、コンピューティングシステム140から受信する制御コマンド133に基づいてビーム経路へと選択的に挿入される別個の光学濃度フィルタの組み合わせを含む。

50

## 【0057】

一般に、本発明は、パワー制御素子が比較的早い応答及び十分なダイナミックレンジを与えるように設けられた照明光源のパワーレベルを動的に変えるための任意の適切な技術を包含することができる。いくつかの例では、ビームパワーは、1秒以下の時間スケールで変調されて、酸化を始めさせるために高いパワーで金属粒子を照明し、次いで直ちにパワーを低くして酸化した粒子に損傷を与えるに照明波長における酸化物による吸収を続ける。

## 【0058】

図1に描いたように、照明光117もまた、偏光素子131により偏光される。レーザなどのいくつかの照明光源は本質的に、偏光した光を発する。いくつかの実施形態では、照明光を偏光させ、(例えば、検光子132を用いて)集光した光を直交偏光させることができが好ましく、検出した信号の信号対雑音比を改善する。これらの実施形態では、欠陥粒子の下にある基板(例えば、単結晶シリコンなど)の1つ以上の結晶軸に対して所定の方位角で照明光を偏光させ、照明光に対して直交する角度で集光した光を直交偏光させて、基板からのバックグラウンド雑音を抑制しそして欠陥信号の信号対雑音比を高めることが好ましい。

10

## 【0059】

いくつかの他の実施形態では、照明光を、欠陥粒子の1つ以上の結晶軸に対して異なる方位角で偏光させる。いくつかの例では、入射偏光方向及び検光子方向を、一連の方位角に対してそれぞれ変えることができ、そしてスペクトル集光することができる。粒子欠陥が結晶であるかどうかを確認するため、その組成の同定を助けるため、又は欠陥種別メンバーシップを同定するために、スペクトル応答を解析する。欠陥粒子から様々な照明偏光角及び集光偏向角で一連の測定データを集めることは、時間がかかり、スループットの低下という対価になることに留意する。

20

## 【0060】

照明パワー制御素子130を通過した後で、照明ビーム117は、対物レンズ114に向けて照明ビームの一部分119を向けるビームスプリッティング素子113へ向けられる。いくつかの実施形態では、ビームスプリッティング素子113は、ダイクロイックビームスプリッタである。しかしながら、一般に、任意の適したビームスプリッタをこの特許文書内で想定することができる。

30

## 【0061】

対物レンズ114は、照明ビーム119を測定スポット106のところでウェハ110上へと焦光する。本明細書において前に説明したように、ウェハ位置決めシステム125は、測定スポット106の全体にわたりウェハ表面上へと照明ビーム119を投射するようにウェハ110を移動させる。動きコントローラ123は、回転ステージ121によるウェハ110の回転と移動ステージ122によるウェハ110の移動とを調整して、欠陥粒子活性化及び分析サブシステムの視野内でウェハ110の所望の位置決めを実現する。

## 【0062】

図1に描いた実施形態では、対物レンズ114は、測定スポット106における集光角の範囲全体にわたり照明ビーム119に応じてウェハ110から散乱される及び/又は反射される光を集め。集められた光120は、ビームスプリッティング素子113を通過する。

40

## 【0063】

いくつかの実施形態では、欠陥粒子活性化及び分析サブシステムは、集められた光のラマン分析を実行するように構成される。これらの実施形態では、集められ光120からレイリー波長をフィルタして除去する1つ以上のスペクトルフィルタ115によって集められた光120をフィルタすることが好ましい。このようにして、比較的小さなラマンシグネチャを、欠陥粒子の比較的大きなレイリー(すなわち、弾性散乱)応答から分離することができる。1つ以上のスペクトルフィルタを、バンドパスフィルタ及び/又はエッジフィルタ及び/又はノッチフィルタとすることができます。

50

## 【0064】

さらなる態様では、欠陥粒子活性化及び分析サブシステムは、照明光及び集められた光を直交偏光させて、検出した信号の信号対雑音比を改善するように構成される。図1に描かれたように、集められた光120は、偏光素子131により与えられる照明光118の偏光に直交する偏光で検光子132によって偏光される。一般に、任意の適した偏光光学素子をこの特許文書の範囲内で想定することができる。

## 【0065】

最後に、集められた光120は、分光器116の検出面上へと投射される。分光器116は、一般に波長分解方式又はエネルギー分解方式で検出した光を測定するように機能する。検出器116は、測定中の欠陥粒子の材料組成のさらなる分析のために、コンピューティングシステム140へ測定したスペクトルを示す電気的信号135を伝達する。一般に、分光器116の検出器は、本技術において知られている実質的に任意の光検出器を含むことができる。しかしながら、特定の検出器を、検出器の所望の動作特性、検査しようとする試料のタイプ、及び照明の構成に基づいて本発明の1つ以上の実施形態内で使用するために選択することができる。例えば、検査のために利用可能な光の量が比較的小さい場合、時間遅延積分(TDI)カメラなどの高効率化検出器を、信号対雑音比及びシステムのスループットを高めるために利用することができる。しかしながら、電荷結合素子(CCD)カメラ、フォトダイオード、光電管及び光電子増倍管(PMT)のアレイなどの他の検出器を、検査のために利用可能な光の量及び実行しようとする検査のタイプに応じて使用することができる。

10

## 【0066】

1つの態様では、表面検査ツールの欠陥粒子活性化及び分析サブシステムは、レーザアシスティッド熱酸化によって欠陥粒子の観測可能なラマンバンドを活性化させ、そして活性化させた粒子のラマン分光測定を実行するように構成される。多くの金属ナノ粒子には、その体心立方(bcc)結晶対称性又は面心立方(fcc)結晶対称性のために観測可能なラマンスペクトル線がない。1つの重要な例では、金属銅(Cu)は、fcc結晶構造を有する。

20

## 【0067】

図5は、低い照明パワーで表面検査システム100の欠陥粒子活性化及び分析サブシステムにより集められたスペクトル測定値を描いている。この例では、照明光源111は、ほぼ1マイクロメートル直径の測定スポットサイズ全体にわたりウェハ110の表面上へと405ナノメートル波長でほぼ0.01ミリワットの照明パワーを供給した。スペクトル測定結果が、100秒の測定期間にわたって集積された。プロット線160は、レーザ照明スポット内に粒子のないウェハ表面の測定したスペクトルを描いている。プロット線161は、レーザ照明スポット内に945ナノメートル直径の銅粒子のあるウェハ表面の測定したスペクトルを描いている。図5に描かれたように、グラファイト状の炭素を示す弱いラマンバンドが見られるが、100秒間積分したにもかかわらず何らのラマンバンドの形跡もない。このように、酸化した銅の量は、あったとしても、同定可能なラマンスペクトルを生み出すためには少な過ぎる。

30

## 【0068】

図6は、高い照明パワーで表面検査システム100の欠陥粒子活性化及び分析サブシステムにより集められたスペクトル測定値を描いている。この例では、照明光源111は、ほぼ1マイクロメートル直径の測定スポットサイズの全体にわたりウェハ110の表面上へと405ナノメートル波長でほぼ10ミリワットの照明パワーを供給した。スペクトル測定結果が、50秒の測定期間にわたって集積された。プロット線163は、レーザ照明スポット内に945ナノメートル直径の銅粒子のあるウェハ表面の測定したスペクトルを描いている。プロット線162は、CuOの基準スペクトルを描いている。基準スペクトルとの比較により、酸化銅(CuO)の強いラマン応答が、プロット線163に描かれた測定結果に明確に見られる。このように、活性化(例えば、レーザアシスティッド熱酸化)の後で、酸化銅化学組成を示すラマン応答が明らかに見られる。

40

50

## 【0069】

さらにその上、図6に描かれている測定したスペクトルは、本明細書において前に説明したように集められた光を照明光と直交偏光させることによって測定された。測定したスペクトルを照明光と直交偏光させることによって、シリコン基板に関係する一次フォノンピーク及び二次フォノンピーク（それぞれ、 $520\text{ cm}^{-1}$  及び  $1000\text{ cm}^{-1}$ ）が抑制される。加えて、多フォノン散乱に関係するバックグランド信号も抑制され、測定したスペクトルのCuOピークを強めるという結果になる。いくつかの例では、本明細書において説明されるような直交偏光は、 $200\text{ cm}^{-1}$  と  $1000\text{ cm}^{-1}$  との間の波数の範囲内の検出したラマンバンドの信号対雑音比（SNR）を高める。

## 【0070】

図7は、様々な照明パワーレベルで表面検査システム100の欠陥粒子活性化及び分析サブシステムにより集められたスペクトル測定値を描いている。これらの例では、照明光源111は、ほぼ1マイクロメートル直径の測定スポットサイズの全体にわたりウェハ110の表面上へと405ナノメートル波長で照明パワーの様々なレベルを供給した。露光時間が各々1秒の100回のスキャンが、描かれた結果を実現するために平均される。プロット線164は、0.1ミリワットの露光パワーを描いている。プロット線165は、0.5ミリワットの露光パワーを描いている。プロット線166は、1ミリワットの露光パワーを描いている。プロット線167は、5ミリワットの露光パワーを描いている。プロット線168は、10ミリワットの露光パワーを描いている。図7に描かれたように、照明パワーが増加するにつれて、CuOに関係するラマン応答は大きさが増加する。一般的に、応答は、0.1ミリワット露光では実際的に検出不可能であるが、1.0ミリワット露光で検出可能になり始める。

## 【0071】

結果は、0.1又は0.5ミリワットパワーで取った系列ではCuOピークの形跡を示していない。CuOピークは、1ミリワットパワーで明確に識別可能であり、そしてより強いピークが5及び10ミリワットパワーで観測される。図7に描かれた合計したスペクトルは、CuOピークのサイズがシリコンに関係する一次及び二次フォノンピークに関係するピークに対して徐々に大きくなることを図示している。

## 【0072】

活性化の前後に集めた銅粒子の光学顕微鏡画像は、スペクトル系列に観測された変化に対応する粒子の変化を明らかにしている。0.1及び0.5ミリワット測定の後で、粒子のサイズに識別可能な変化がなかった。しかしながら、粒子サイズは、1、5及び10ミリワット測定の後では大きくなかった。原理的に、酸化銅の単位格子は、金属銅よりも74%大きな体積を有する。10ミリワット照明で活性化させた後の粒子の顕微鏡画像は、直径で56%の増加を示し、これはほぼ45%の体積の増加を表している。

## 【0073】

ほぼ1マイクロメートルのスポットサイズに焦光した10ミリワットのレーザビームは、150~1500まで小さな銅粒子を加熱することができ、大気雰囲気中で酸化させることは極めて妥当である。

## 【0074】

絶対温度 $T_0$ で周囲と熱平衡にある真空中の孤立した球状銅粒子を考える。この状態では、放射の放出と吸収との割合は、式(1)、

$$P_{abs,0} = P_{rad,0} = A T_0^4 \quad (1)$$

に示されたステファン-ボルツマンの法則にしたがって釣り合っている。ここで、Aは球の表面積であり、 $\sigma$ は表面の放射率であり、 $A$ はステファン-ボルツマン定数（ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ）である。

## 【0075】

405nmの光で照明されると、銅の複素屈折率は $1.301 + 2.129i$ である。図3は、ミー理論にしたがって計算した、球直径の関数としての銅粒子の吸収断面積を描いている。180ナノメートル直径の銅球に関して、吸収断面積 $C_{abs}$ は $3.91 \times 10^{-10}$

$0 \cdot 1^0 \text{ cm}^2$  である。1マイクロメートルのスポットサイズ全体にわたる 10 ミリワットの露光で、照射量  $I_0$  は  $1 \text{ MW/cm}^2$  である。これらの条件下では、銅球の熱吸収が、式(2)、

$$P_{abs,1} = C_{abs} I_0 = 3.76 \times 10^{-4} \text{ W} \quad (2)$$

に示されており、これは全 10 ミリワットのレーザパワーの 3.9 % である。吸収されたエネルギーは熱に変換され、粒子温度が上昇する。

### 【0076】

流体によって完全に囲まれた球に関して、球と周囲の流体との間の熱流  $Q$  は、式(3)

$$Q = 2 k d (T - T_0) \quad (3)$$

10

により与えられ、ここでは、 $d$  は球直径であり、 $T$  は球の表面の温度であり、 $T_0$  は球から遠く離れた空気の温度であり、 $k$  は流体の熱伝導率である。基板上の粒子に関して、実効熱伝導率、 $k = k_{eff}$  の観点から式(3)を書くことは妥当であり、この実効熱伝導率は、空気の熱伝導率よりも大きいが、基板の伝導率よりも小さな値を取る。正確な値は、基板との粒子の熱接触の程度に依存する。

### 【0077】

$k_{eff}$  の値を、式(1)により説明された熱バランスの右辺に式(3)を加えることによってさらに狭く特定することができる。これが、結果として、式(4)、

$$T^4 + T - = 0 \quad (4)$$

に示された 4 次方程式になる。

20

### 【0078】

ここで、 $= 2 k_{eff} / d$  であり、 $= T_0 + T_0^4 + C_{abs} I_0 / A$  である。図 4 は、 $k_{eff}$  の様々な値に対する入射照射量、 $I_0$ 、の関数として  $T$  についての式(4)の解を示しているプロット 155 を描いている。各プロット線に關係する  $k_{eff}$  の値が図 4 に図示されている。各プロット線は、180 ナノメートル直径の照射された銅球の定常状態温度を表している。真空中では、 $k_{eff}$  は、ゼロの値にされる。図 4 に描かれたように、(真空中に微量の酸素分子を仮定して)酸化を始めるためには、粒子を十分に加熱するために  $1 \text{ W/cm}^2$  未満しか要さないはずである。空气中では、 $k_{eff}$  は、ほぼ 0.024 である。空气中では、酸化条件に達するまでに  $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$  を要する。しかしながら、実際の動作条件では、測定した銅粒子が  $1 \text{ MW/cm}^2$  では液化せず消失しないという理由で、 $k_{eff}$  は、より大きくなければならない。したがって、シリコン基板上の銅粒子についての  $k_{eff}$  の値が 0.3 と  $1 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$  との間である可能性が最も高いと思われ、そこでは、 $1 \text{ MW/cm}^2$  が、それっぽく 1,300 K 及び 600 K まで粒子を加熱する。

30

### 【0079】

比較的反応性の金属として、細かく分割した銅ナノ粒子がレーザ照明への露出によって酸化される。図 5 ~ 図 7 に描かれたように、酸化銅は、その知られている振動ラマンスペクトルから同定可能である。表面検査システム 100 はまた、検出器により検出され散乱された信号を処理するために必要な様々な電子部品(図示せず)を含む。例えば、システム 100 は、検出器から信号を受信し、所定の量だけ信号を増幅するための増幅回路を含むことができる。いくつかの実施形態では、コンピューティングシステム 140 内で使用するために適したディジタルフォーマットへと増幅した信号を変換するために、アナログ - ディジタル変換器 (ADC) (図示せず) が含まれる。1つの実施形態では、プロセッサ 141 を、伝送媒体により ADC に直接つなげることができる。あるいは、プロセッサ 141 は、ADC につなげられた他の電子部品から信号を受信することができる。このようにして、プロセッサを、伝送媒体及びいずれかの介在する電子部品によって ADC に間接的につなげることができる。

40

### 【0080】

一般に、コンピューティングシステム 140 は、各検出器から得られる電気信号を使用してウェハの特徴、欠陥、又は光散乱特性を検出するように構成される。コンピューティ

50

ングシステム 140 は、本技術において知られているいざれかの適切なプロセッサを含むことができる。加えて、コンピューティングシステム 140 を、本技術において知られているいざれかの適切な欠陥検出アルゴリズム又は方法を使用するように構成することができる。例えば、コンピューティングシステム 140 は、試料上の欠陥を検出するためにダイ - データベース比較又は二値化アルゴリズムを使用することができる。

#### 【 0081 】

加えて、検査システム 100 は、オペレータからの入力を受け入れるために有用な周辺デバイス（例えば、キーボード、マウス、タッチスクリーンなど）、及びオペレータへのディスプレイ出力部（例えば、ディスプレイモニタ）を含むことができる。オペレータからの入力コマンドを、コンピューティングシステム 140 により使用することができて、照明パワーを制御するために使用するしきい値の値を調節することができる。得られたパワーレベルを、ディスプレイモニタ上でオペレータへ図式的に提示することができる。

10

#### 【 0082 】

検査システム 100 は、プロセッサ 141 及び一定量のコンピュータ可読メモリ 142 を含む。プロセッサ 141 及びメモリ 142 は、バス 143 を通して通信することができる。メモリ 142 は、プログラムコードを記憶する一定量のメモリ 144 を含み、プログラムコードは、プロセッサ 141 により実行されたときに、プロセッサ 141 に本明細書において説明した欠陥粒子活性化及び組成分析機能を実行させる。

#### 【 0083 】

さらなる態様では、コンピューティングシステム 140 は、活性化させた粒子から集めた分光学的測定結果を受信し、測定値に基づいて粒子の組成を推定するように構成される。いくつかの実施形態では、コンピューティングシステム 140 は、測定したスペクトルのスペクトルシグネチャ（例えば、ピーク位置、ピークの大きさなど）を知られている組成を有する粒子から測定した基準スペクトルのシグネチャと合わせる。いくつかの実施形態では、コンピューティングシステム 140 は、測定したスペクトルのスペクトルシグネチャを解析的に導き出したスペクトルのシグネチャと合わせる。いくつかの実施形態では、コンピューティングシステム 140 は、測定したスペクトルのスペクトルシグネチャを以前に分析した欠陥粒子のライブラリデータベースと関連付ける。いくつかの実施形態では、ライブラリは、光学的な分光学的応答データを含む。いくつかのさらなる実施形態では、ライブラリはやはり、他の組成データ（例えば、フォトルミネッセンスデータ、エネルギー分散型 X 線（EDX）分光器データなど）を含む。いくつかの実施形態では、コンピューティングシステム 140 は、粒子に分類コードを割り当て、この分類コードは、ライブラリ中の最も近いスペクトル一致に関係する分類コードに最もよく一致している。このようにして、測定した欠陥粒子の組成が、測定したスペクトルと最もよく一致する欠陥分類コードを用いて同定される。

20

#### 【 0084 】

一般に、変換された粒子の光学的なスペクトルシグネチャを、複数の光学的な分光法のうちの 1 つ以上で観測することができ、これらの方法は：自発ラマン分光法；誘導ラマン分光法；コヒーレント反ストークスラマン分光法；第 2 高調波生成、4 光波混合、及び他の非線形分光法；蛍光分光法、またフォトルミネッセンス（PL）分光法とも呼ばれる；蛍光ライフトタイム時間相關フォトンカウンティング分光法；チップ増強型ラマン分光法などの、分析しようとする粒子に密接して設置される金属ナノ構造のために高めた感度を有するラマン分光法及び / 又は蛍光分光法を含むが、これらに限定されない。

30

#### 【 0085 】

さらなる態様では、欠陥粒子の組成が、フォトルミネッセンス（PL）スペクトル（例えば、表面検査システム 100 により測定した PL スペクトル）の測定に基づいて決定される。いくつかの例では、欠陥粒子は、近 IR まで広がる広帯域フォトルミネッセンス（PL）スペクトルを示す。

40

#### 【 0086 】

しかしながら、いくつかの例では、PL スペクトルは、不安定であり、過大な照明パワ

50

ーが利用される場合には経時的に退色する傾向がある。もう1つのさらなる態様では、照明光源（例えば、照明光源111）により与えられる照明量は、PLスペクトルを取り込むために低レベルに初めに設定されて、比較的高いパワーが利用された場合に生じるはずのブリーチングを最小にする。PLスペクトルを取り込んだ後で、照射量を大きくして、粒子を分光学的に活性化させ、ラマンスペクトル測定値を取り込む。このようにして、PLスペクトル及びラマンスペクトルの両方が、欠陥粒子の組成を同定するために利用可能である。

#### 【0087】

いくつかの例では、欠陥粒子は、顕著な活性化を用いずにラマンスペクトルを示す。図8は、低い照明パワーで表面検査システム100の欠陥粒子活性化及び分析サブシステムにより集められたスペクトル測定値を描いている。この例では、照明光源111は、ほぼ1マイクロメートル直径の測定スポットサイズ全体にわたりウェハ110の表面上へと405ナノメートル波長でほぼ0.1ミリワットの照明パワーを供給した。スペクトル測定結果が、10秒の測定期間にわたって集積された。プロット線170は、レーザ照明スポット内に粒子のないウェハ表面の測定したスペクトルを描いている。プロット線171は、レーザ照明スポット内にほぼ117ナノメートル直径の粒子のあるウェハ表面の測定したスペクトルを描いている。強いラマン応答がプロット線171に描かれた測定結果に明確に見られる。参考のために、主要なピークの各々に関係する波数が図8に標記されている。図9は、二酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)に関係する基準ラマンスペクトルのプロット線172を描いている。参考のために、基準スペクトルに関係する主要なピークの各々に関係する波数が図9に標記されている。図8に描かれた欠陥粒子の測定したラマンスペクトルを図9のTiO<sub>2</sub>に関係する基準ラマンスペクトルと比較すると、測定された欠陥粒子がTiO<sub>2</sub>であることが明らかである。

#### 【0088】

本明細書では銅粒子の測定を具体的に説明しているが、一般に、表面検査システム100は、有機物、無機物、又は結晶構造、多結晶構造、若しくは非晶質構造を伴う金属化学組成物を有する粒子を含むがこれらに限定されない多くの様々なタイプの粒子を測定するように構成される。

#### 【0089】

いくつかの例では、検査している粒子は、固有の振動ラマンスペクトルシグネチャを欠くbcc結晶構造又はfcc結晶構造を伴う金属粒子である。

#### 【0090】

いくつかの例では、検査している粒子は、非常に弱い固有の振動ラマンスペクトルシグネチャを有する六方密充填(hcp)構造を伴う金属粒子である。これらの例では、粒子活性化が利用されて、粒子を変換し、そして変換した粒子に関係する振動のラマンスペクトルシグネチャの検出可能性を向上させる。

#### 【0091】

いくつかの例では、粒子の変換は、平均海面から0と10,000フィート(0と3048メートル)との間の高度における地上大気雰囲気中の金属粒子の化学酸化である。

#### 【0092】

いくつかの例では、粒子の変換は、0.2気圧よりも大きい又はそれ未満の制御された酸素分圧のチャンバ内で生じる。いくつかの例では、チャンバは、酸化プロセスに関係しない実質的に不活性ガスの補助的な分圧を含む。このようなガスは、窒素、ヘリウム、ネオン、アルゴン、キセノン、二酸化炭素、ハロゲン化炭化水素、フッ化金属、及びそれぞれ六フッ化ウラン及び六フッ化硫黄などの非金属を含むが、これらに限定されない。

#### 【0093】

いくつかの例では、金属粒子の酸化性変換は、酸化性変換を触媒するガス状化合物の補助的な分圧を用いて実行される。

#### 【0094】

いくつかの例では、金属粒子の酸化性変換は、ガス状化合物の補助的な分圧を用いて実

10

20

30

40

50

行され、そのガス状化合物は、他の可能性のある酸化状態又はその形態が補助的なガス状化合物のない多形に対して、酸化状態を伴う金属酸化物及び高めたラマン散乱断面積を有する結晶性多形構造の形成を促進する。

**【 0 0 9 5 】**

いくつかの例では、金属粒子は、酸化の前に表面活性材料を用いて処理されて、他の可能性のある酸化状態又はその形態が処理のない前記金属粒子の多形に対して、酸化状態を伴う金属酸化物及び高めたラマン散乱断面積を有する結晶性多形構造の形成を促進する。表面活性材料の例は、ガス相の若しくは液体溶液に溶解した有機アミン、又はそれ自体が表面活性であり、金属粒子を被覆する液体を含むが、これらに限定されない。

**【 0 0 9 6 】**

いくつかの例では、酸化性変換は、温度を高くすることにより行われる。いくつかの例では、高くした温度は、放射加熱、電磁放射を伴う照明、又はこれらの組み合わせによって生成されることがある。

**【 0 0 9 7 】**

いくつかの例では、温度駆動型酸化性変換は、電磁放射の同じ供給源により行われ、この電磁放射は、粒子の組成を同定するために測定され利用されるスペクトルシグネチャを発するために変換された粒子を励起する。

**【 0 0 9 8 】**

いくつかの例では、粒子の酸化性変換は、電磁放射源から放出されたフォトンに曝すことによって励起された光化学経路により行われる。いくつかの例では、フォトン駆動型酸化性変換は、電磁放射の同じ供給源により行われ、この電磁放射は、粒子の組成を同定するために測定され利用されるスペクトルシグネチャを発するために変換された粒子を励起する。

**【 0 0 9 9 】**

いくつかの例では、変換は、ガス状、液体、又は溶液系薬剤及び光熱的又は光化学的駆動力を用いた酸化性反応以外の化学反応である。駆動力は、電磁放射の供給源により与えられた、この供給源は、粒子の組成を同定するために測定され利用されるスペクトルシグネチャを発するために変換された粒子を励起する供給源とは異なっても同じであってもよい。

**【 0 1 0 0 】**

表面検査システム 100 は、粒子活性化及びスペクトル測定の両者のために照明を与える照明光源 111 を含んでいるが、一般に、多数の異なる照明光源を、活性化、スペクトル測定、又は両者のための照明を与えるために利用することができる。加えて、ウェハ表面上の欠陥粒子の位置をマッピングするために利用する 1 つ以上の照明光源（例えば、図 1 に描かれた照明光源 101）を、活性化、スペクトル測定、又は両者のための照明を与えるためにやはり利用することができる。

**【 0 1 0 1 】**

表面検査システム 100 は、欠陥粒子のスペクトル測定を実行する分光器 116 を含んでいるが、一般に、多数の異なる分光器サブシステムを、欠陥粒子のスペクトル測定を行うために利用することができる。いくつかの例では、1 つ以上のビームスプリッティング素子が、集光ビーム経路に含まれて、同時に多数の分光器に向けて散乱された光を向ける。いくつかの例では、可動ミラー及び可動タレットを集光経路に利用して、連続的に多数の分光器に向けて散乱された光を向ける。

**【 0 1 0 2 】**

405 ナノメートルの照明光を用いたスペクトル測定結果を図 5 ~ 図 9 を参照して説明したが、一般に、照明光の 1 つ以上の異なる波長を、スペクトル測定値の信号対雑音比を改善するために利用することができる。

**【 0 1 0 3 】**

いくつかの実施形態では、多数の異なる波長が利用され、これらの波長は、それらが基板ウェハの表面アスペリティ（例えば、薄膜、非常に非球形状の欠陥粒子の高いアスペク

10

20

30

40

50

ト比突起物など)と互いに影響し合うことが知られているという理由で選択される。表面アスペリティは、それ自体のすぐ付近に強い電磁場を生成し、この電磁場が弱いスペクトルシグネチャを強める。いくつかの実施形態では、表面検査システム(例えば、表面検査システム100)は、600 nmと700 nmとの間の波長を有する可視電磁放射の供給源を含む。波長のこの範囲の光は、非球形銅ナノ粒子の高アスペクト比突起物及び特徴において局所表面プラズモン共鳴を励起することが知られている。励起されたプラズモンに関係する強い電磁場は、銅ナノ粒子の表面上の酸化第一銅、酸化第二銅、又は両者の薄層からのラマン散乱シグネチャを高める。いくつかの例では、酸化物層が、最小の活性化又は補助的な活性化なしに欠陥粒子の表面上に十分な量で存在する。

## 【0104】

10

図10は、本明細書において説明したように活性化させた欠陥粒子の材料組成を同定するために有用な例示的な方法200のフローチャートを図示している。いくつかの非限定的な例では、図1を参照して説明した検査システム100は、方法200を実施するように構成される。しかしながら、一般に、方法200の実施は、本明細書において説明する具体的な実施形態によっては限定されない。

## 【0105】

プロック201では、試料の表面上の測定スポットが、照明光のビームで照明される。照明光のビームは、欠陥粒子が分光学的に活性になるように欠陥粒子を化学的に変える。

## 【0106】

プロック202では、活性化させた欠陥粒子の材料組成を示す出力信号が、活性化させた欠陥粒子から散乱された光の量に基づいて発生される。

20

## 【0107】

プロック203では、活性化させた欠陥粒子の材料組成が、出力信号に基づいて決定される。

## 【0108】

試料を検査するために使用することができる検査システム又はツールに関して様々な実施形態を本明細書において説明している。「試料(specimen)」という用語は、ウェハ、レチクル、又は欠陥、特徴、若しくは本技術において知られている他の情報(例えば、ヘイズの量若しくは膜特性)について検査することができる任意の他のサンプルを呼ぶために本明細書では使用される。

30

## 【0109】

本明細書において使用される場合、「ウェハ(wafer)」という用語は一般に、半導体材料又は非半導体材料から作られた基板を呼ぶ。例は、単結晶シリコン、ガリウムヒ素、及びインジウムリンを含むが、これらに限定されない。これらの基板を、半導体製造施設では普通に見つけることができる及び/又は処理することができる。いくつかのケースでは、ウェハは、基板だけ(すなわち、ベアウェハ)を含むことができる。あるいは、ウェハは、基板上に形成した1つ以上の異なる材料の層を含むことができる。ウェハ上に形成された1つ以上の層は、「パターン形成される(patterned)」又は「パターン形成されない(unpatterned)」であってもよい。例えば、ウェハは、繰り返し可能なパターン特徴を有する複数のダイを含むことができる。

40

## 【0110】

「レチクル(reticle)」は、レチクル製造プロセスの任意の段階のレチクル、又は半導体製造施設における使用のためにリリースされても、されなくてもよい完成したレチクルとすることができます。レチクル、又は「マスク(mask)」は、一般に、基板上に形成されかつパターンに構成された実質的に不透明な領域を有する実質的に透明な基板として規定される。基板は、例えば、石英などのガラス材料を含むことができる。レチクルを、リソグラフィプロセスの露光ステップ中にレジストで覆ったウェハの上方に配置することができ、その結果、レチクル上のパターンをレジストに転写することができる。

## 【0111】

1つ以上の例示的な実施形態では、説明した機能を、ハードウェア、ソフトウェア、フ

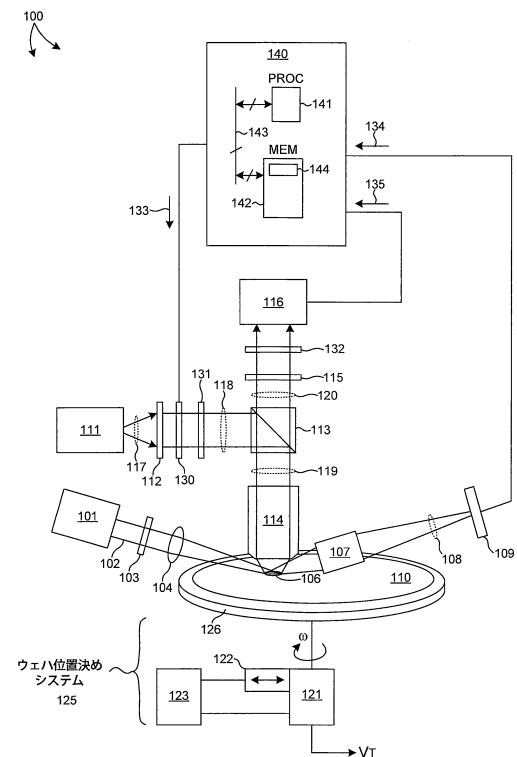
50

アームウェア、又はこれらの任意の組み合わせで実装することができる。ソフトウェアで実装される場合、機能を、コンピュータ可読媒体上に1つ以上の命令又はコードとして記憶することができる又は伝送することができる。コンピュータ可読媒体は、コンピュータ記憶媒体及び1つの場所から別の場所へコンピュータプログラムの転送を容易にするいずれかの媒体を含め通信媒体の両者を含む。記憶媒体を、汎用コンピュータ又は専用コンピュータによりアクセスされることが可能な任意の利用可能な媒体とすることができる。例として、限定ではなく、このようなコンピュータ可読媒体は、RAM、ROM、EEPROM、CD-ROM若しくは他の光ディスク記憶装置、磁気ディスク記憶装置若しくは他の磁気記憶デバイス、あるいは命令若しくはデータ構造の形態で所望のプログラムコード手段を搬送する又は記憶するために使用することができ、汎用コンピュータ若しくは専用コンピュータにより又は汎用プロセッサ若しくは専用プロセッサによりアクセスされることが可能な任意の他の媒体を含むことができる。また、任意の接続がコンピュータ可読媒体と然るべく呼ばれる。例えば、ソフトウェアが、同軸ケーブル、光ファイバケーブル、撲り線対、デジタル加入者回線(DSL)、又は赤外線、無線、及びマイクロ波などのワイアレス技術を使用してウェブサイト、サーバ、又は他の遠隔ソースから伝送される場合には、同軸ケーブル、光ファイバケーブル、撲り線対、DSL、又は赤外線、無線、及びマイクロ波などのワイアレス技術が、媒体の定義に含まれる。ディスク(disk)及びディスク(disc)は、本明細書において使用されるように、コンパクトディスク(CD)、レーザディスク、光ディスク、デジタルバーサタイルデスク(DVD)、フロッピー(登録商標)ディスク及びブルーレイディスクを含み、ここでディスク(disk)は通常磁気的にデータを再生し、一方でディスク(disc)は、レーザを用いて光学的にデータを再生する。上記の組み合わせもまた、コンピュータ可読媒体の範囲内に含まれるべきである。1020

#### 【0112】

ある種の具体的な実施形態が教育的な目的で上に説明されているが、この特許文書の教示は、一般的な利用可能性を有し、上に説明した具体的な実施形態には限定されない。したがって、様々な変形、改造、及び説明した実施形態の様々な特徴の組み合わせを、特許請求の範囲に記載したような本発明の範囲から逸脱せずに実行することができる。

【 図 1 】



【 図 2 】

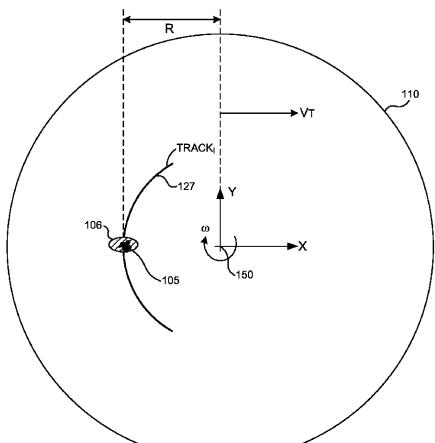
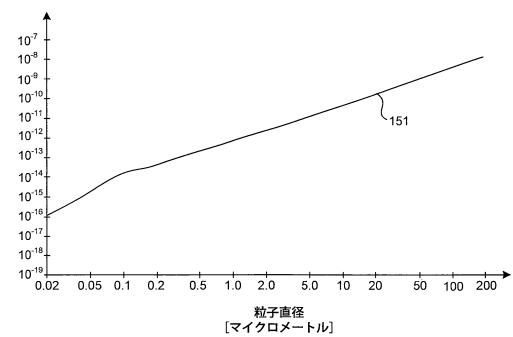
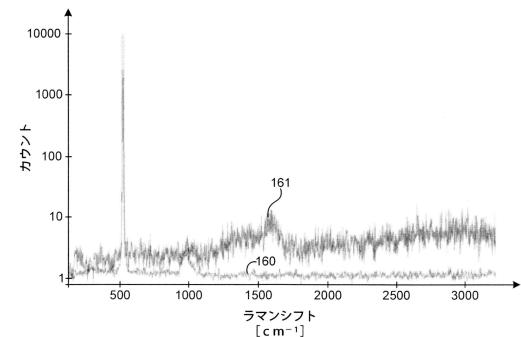


FIG. 2

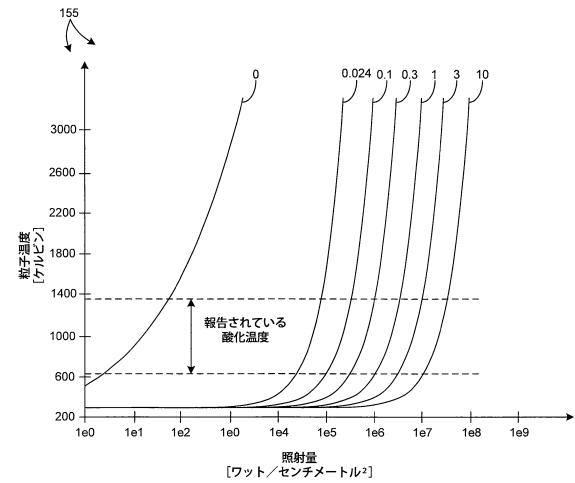
【 図 3 】



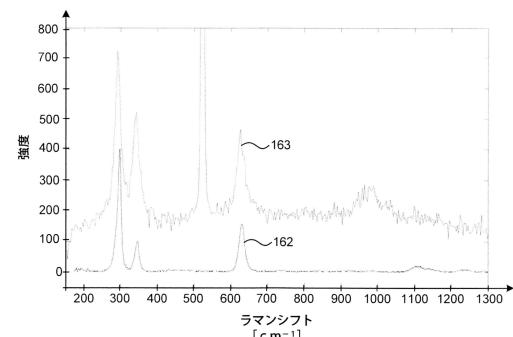
【 図 5 】



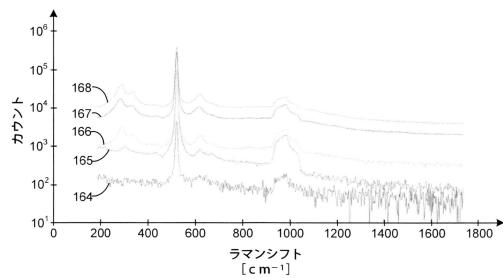
### 【図4】



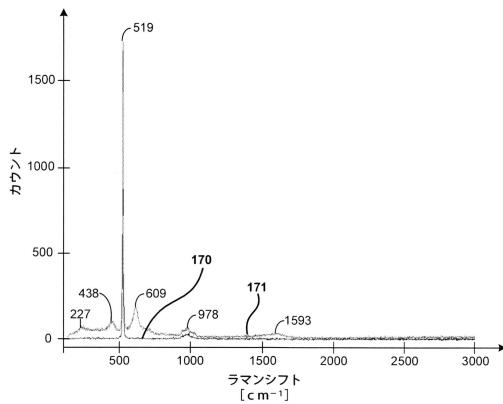
【図6】



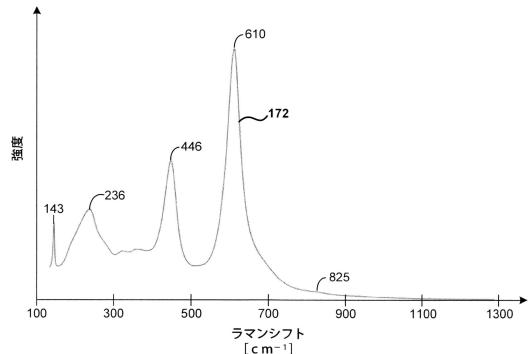
【図7】



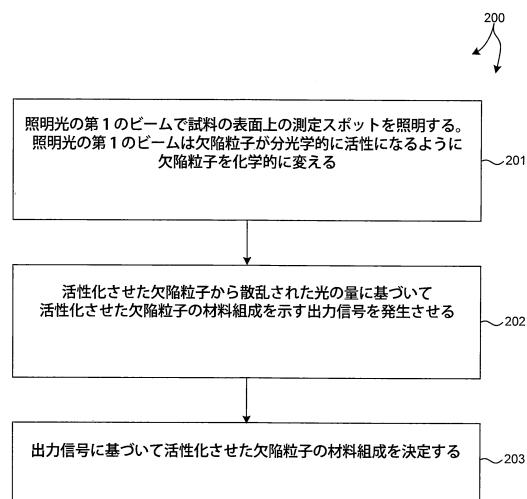
【図8】



【図9】



【図10】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開2008-008805(JP,A)  
特開2008-096432(JP,A)  
特開2011-009554(JP,A)  
特表2013-501228(JP,A)  
特表2014-503843(JP,A)  
特表2014-525565(JP,A)  
特表2015-534267(JP,A)  
米国特許出願公開第2008/0129988(US,A1)  
米国特許出願公開第2015/0268176(US,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 21/00 - 21/01  
G01N 21/17 - 21/958  
G01B 11/00 - 11/30  
G02B 19/00 - 21/36  
H01L 21/64 - 21/66  
JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)