(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7686797号
(P7686797)

(45)発行日　令和7年6月2日(2025.6.2)

(24)登録日　令和7年5月23日(2025.5.23)

(51)国際特許分類

Ｈ０１Ｊ　37/22　(2006.01)	Ｈ０１Ｊ	37/22	５０２Ｌ
Ｇ０１Ｎ　21/17　(2006.01)	Ｇ０１Ｎ	21/17	Ｚ

ＦＩ

請求項の数　16　（全19頁）

(21)出願番号　特願2023-576531(P2023-576531)
(86)(22)出願日　令和4年1月28日(2022.1.28)
(86)国際出願番号　PCT/JP2022/003391
(87)国際公開番号　WO2023/145015
(87)国際公開日　令和5年8月3日(2023.8.3)
審査請求日　令和6年3月29日(2024.3.29)

(73)特許権者　501387839
株式会社日立ハイテク
東京都港区虎ノ門一丁目１７番１号
(74)代理人　110000350
ポレール弁理士法人
(72)発明者　白崎 保宏
日本国東京都千代田区丸の内一丁目６番６号 株式会社日立製作所内
(72)発明者　内保 美南
日本国東京都千代田区丸の内一丁目６番６号 株式会社日立製作所内
(72)発明者　谷内 一史
日本国東京都港区虎ノ門一丁目１７番１号 株式会社日立ハイテク内
審査官　大門 清

最終頁に続く

(54)【発明の名称】　検査装置および膜質検査方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

試料上に形成された膜の膜質を検査する検査装置であって、

前記試料に荷電粒子線を照射する荷電粒子源と、

前記試料に第１の光を照射する第１の光源と、

前記第１の光が前記試料に照射されることにより発生する信号光を検出する光検出系と、

前記試料上の電界を制御する帯電制御電極または前記試料に第２の光を照射する第２の光源と、

前記荷電粒子源と、前記帯電制御電極または前記第２の光源とを用いて、前記試料の電子状態を変調させる制御装置と、

前記光検出系から出力される前記試料の電子状態の変調に同期してサンプリングされた前記信号光の検出信号に基づき前記試料上に形成された膜の膜質を推定する計算機を有する検査装置。

【請求項２】

請求項１において、

前記帯電制御電極と前記第２の光源との両方を有し、

前記制御装置は、前記荷電粒子源、前記帯電制御電極および前記第２の光源のうち、少なくとも一つ以上を用いて、前記試料の電子状態を変調させる検査装置。

【請求項３】

請求項２において、

前記光検出系は、前記試料の電子状態の変調による前記信号光の変化を示す検出信号を出力する検査装置。
【請求項４】
請求項３において、
前記検出信号は複数のフィットパラメータを含むモデル式で表され、
前記計算機は、前記複数のフィットパラメータの組み合わせに対する膜質情報を登録するデータベースを備え、前記検出信号を前記モデル式にフィッティングして前記検出信号の前記複数のフィットパラメータを算出し、算出された前記複数のフィットパラメータと前記データベースとを照合する検査装置。
【請求項５】
請求項３において、
前記制御装置は、前記帯電制御電極が前記試料に印加する電界強度を変化させながら、前記第２の光源を変調する検査装置。
【請求項６】
請求項５において、
前記検出信号は、前記試料に印加される電界強度に対する依存性を有し、
前記計算機は、前記依存性を示す特徴量に対する膜質情報を登録するデータベースを備え、前記検出信号から前記依存性を示す特徴量を算出し、算出された前記依存性を示す特徴量と前記データベースとを照合する検査装置。
【請求項７】
請求項６において、
前記荷電粒子線が前記試料に照射されることにより発生する信号電子を検出する信号電子検出器を有し、
前記計算機は、前記信号電子検出器が検出する信号電子のエネルギーに基づき、前記試料の表面電位を算出する検査装置。
【請求項８】
請求項６において、
前記試料の表面電位を測定する表面電位計を有する検査装置。
【請求項９】
請求項１において、
前記試料は大気中に配置され、
前記荷電粒子源は、前記荷電粒子源を真空雰囲気に保持するための隔壁を備える鏡筒内に配置され、
前記荷電粒子線は、前記隔壁を貫通して前記試料に照射される検査装置。
【請求項１０】
請求項１において、
前記試料および前記荷電粒子源は大気中に配置され、
前記荷電粒子源はコロナ放電でイオンを発生させる電極である検査装置。
【請求項１１】
請求項１において、
前記第１の光は、前記試料上に形成された膜に対して垂直な方向から前記試料に照射され、
前記荷電粒子線は、前記試料上に形成された膜に対してななめから前記試料に照射される検査装置。
【請求項１２】
請求項１１において、
前記第１の光を集光する光学レンズを有し、
前記光学レンズの前記試料側の面には前記帯電制御電極となる導電膜が製膜されている検査装置。
【請求項１３】

請求項１１において、
前記第１の光を集光する光学レンズを有し、
前記帯電制御電極は、前記光学レンズと前記試料との間に配置される透明電極である検査装置。
【請求項１４】
試料上に形成された膜の膜質を検査する検査装置であって、
前記試料に第１の光を照射する第１の光源と、
前記第１の光が前記試料に照射されることにより発生する信号光を検出する光検出系と、
前記試料上の電界を制御する帯電制御電極と、
前記帯電制御電極に第３の光を照射して光電子を発生させる第３の光源と、
前記試料に第４の光を照射して光電子を発生させる第４の光源と、
前記帯電制御電極に印加する電圧、前記第３の光源及び前記第４の光源を制御して、前記試料の電子状態を変調させる制御装置と、
前記光検出系から出力される前記試料の電子状態の変調に同期してサンプリングされた前記信号光の検出信号に基づき前記試料上に形成された膜の膜質を推定する計算機を有する検査装置。
【請求項１５】
試料上に形成された膜の膜質を検査する膜質検査方法であって、
前記試料に荷電粒子線を照射して、前記試料を帯電させ、
前記試料の電子状態を変調させた状態で前記試料にプローブ光を照射し、
前記プローブ光が前記試料に照射されることにより発生する信号光を検出し、
前記試料の電子状態の変調に同期してサンプリングされた前記信号光の検出信号に基づき、前記試料上に形成された膜の膜質を推定する膜質検査方法。
【請求項１６】
請求項１５において、
前記試料に印加される電界強度を変化させながら、前記試料の電子状態を変調させた状態で前記試料に前記プローブ光を照射し、
前記試料の電子状態の変調に同期してサンプリングされた前記信号光の検出信号の電界強度依存性に基づき、前記試料上に形成された膜の膜質を推定する膜質検査方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本開示は、検査装置およびそれを用いた膜質検査方法に関する。
【背景技術】
【０００２】
特許文献１には、除電用の紫外光を搭載したＳＥＭが記載されている。絶縁膜の帯電は紫外光の照射によって除去できることが知られている。特許文献２には、試料上の電界を制御する帯電制御電極が搭載されたＳＥＭが記載されている。帯電制御電極の電圧を制御することによって電子線照射により帯電する試料の帯電量を制御できることが知られている。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００３】
【文献】特開２０００－３５７４８３号公報
【文献】特開２００６－３３８８８１号公報
【非特許文献】
【０００４】
【文献】D. E. Aspnes, “Third-Derivative Modulation Spectroscopy with Low-Field Electroreflectance” Surface Science 37 (1973) 418-442
【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】
【０００５】
半導体デバイスにおいて、その半導体膜や絶縁膜の膜質は重要である。例えば、トランジスタの性能は、ゲート絶縁膜の性質やゲート絶縁膜とその接する層との界面の性質などによって大きく左右される。絶縁膜や界面に欠陥が存在すると、デバイス駆動時の電界印加により欠陥に電荷が蓄積され、デバイス動作に悪影響を及ぼす。この欠陥のようにデバイス動作時に問題となるような膜質の検査には、デバイス動作時と同様に検査対象膜に電界を印加してその特性変化を測定することが有効である。
【０００６】
デバイスを完成させた後においては、デバイスを実際に動作させる電気特性検査によって膜質は検査できる。しかしながら、完成後の検査では、量産工程における不具合の作り込みを未然に防ぐことができない。また、半導体製造プロセスの開発においては、検査対象膜を挟み込む電極を作製して電極間に電圧を印加することにより、電界印加下での膜質の測定が可能になるが、このための電極の作製には時間もコストもかかる。
【０００７】
したがって、半導体デバイスの量産工程において、あるいは半導体製造プロセス開発において、成膜した半導体膜や絶縁膜などの膜質を非接触で検査することが望まれる。ここで、膜質とは、成膜された材料が含む電荷、歪、欠陥、あるいは下地の状態、界面の状態等によって当該膜が示す材料特性をいう。また、本発明において検査対象とする膜としては半導体デバイスの製造工程において形成される膜を広く含むものとし、膜の製法や材料を問わない。例えば、成膜後にアニール等の加工を行った膜、半導体基板を熱酸化して得られる膜（熱酸化膜）、半導体基板にイオン注入により形成される膜なども対象となる。また、材料も無機材料、有機材料ともに含まれる。
【課題を解決するための手段】
【０００８】
本発明の一態様である検査装置は、試料上に形成された膜の膜質を検査する検査装置であって、試料に荷電粒子線を照射する荷電粒子源と、試料に第１の光を照射する第１の光源と、第１の光が試料に照射されることにより発生する信号光を検出する光検出系と、試料上の電界を制御する帯電制御電極または試料に第２の光を照射する第２の光源と、荷電粒子源と、帯電制御電極または第２の光源とを用いて、試料の電子状態を変調させる制御装置と、光検出系から出力される試料の電子状態の変調に同期してサンプリングされた信号光の検出信号に基づき試料上に形成された膜の膜質を推定する計算機を有する。
【０００９】
本発明の一態様である膜質検査方法は、試料上に形成された膜の膜質を検査する膜質検査方法であって、試料に荷電粒子線を照射して、試料を帯電させ、試料の電子状態を変調させた状態で試料にプローブ光を照射し、プローブ光が試料に照射されることにより発生する信号光を検出し、試料の電子状態の変調に同期してサンプリングされた信号光の検出信号に基づき、試料上に形成された膜の膜質を推定する。
【発明の効果】
【００１０】
成膜した半導体や絶縁膜などの膜質を非接触で検査することが可能になる。その他の課題と新規な特徴は、本明細書の記述および添付図面から明らかになるであろう。
【図面の簡単な説明】
【００１１】
【図１】実施例１の検査装置の概略構成図である。
【図２Ａ】試料の電子状態を制御する制御シーケンスの例である。
【図２Ｂ】試料の電子状態を制御する制御シーケンスの例である。
【図２Ｃ】試料の電子状態を制御する制御シーケンスの例である。
【図３Ａ】検出信号スペクトルの例である。
【図３Ｂ】検出信号スペクトルの例である。

【図４】膜質を推定するためのデータベースのデータ構造例である。
【図５】検出信号の電界依存性から推定可能な膜質検査のための制御フローである。
【図６】帯電制御電極の印加電圧を掃引したときの検出信号の強度変化を示す図である。
【図７】検出信号の電界依存性から求められる膜質を推定するためのデータベースのデータ構造例である。
【図８】膜質検査の結果の表示例である。
【図９Ａ】設定・計測画面（設定タブ）の例である。
【図９Ｂ】設定・計測画面（計測タブ）の例である。
【図９Ｃ】結果出力画面の例である。
【図１０Ａ】変形例１の検査装置の概略構成図である。
【図１０Ｂ】信号電子検出量とエネルギーフィルタ電圧との関係を示す図である。
【図１１】変形例２の検査装置の概略構成図である。
【図１２】実施例２の検査装置の概略構成図である。
【図１３】実施例３の検査装置の概略構成図である。
【図１４】実施例４の検査装置の概略構成図である。
【発明を実施するための形態】
【００１２】
以下、本発明の実施例について説明する。なお、本実施例で示す図面は本発明の具体的例を示しているが、これらは本発明の理解のためのものであり、決して本発明を限定的に解釈するために用いられるものではない。
【００１３】
本実施例の検査装置では、膜質を光学検査によって評価する。すなわち、具体例は後述するが、膜が有する材料特性を膜の光学特性として検出し、検出された光学特性から膜質についての情報を得る。本実施例では、光学検査にあたり、検査対象膜の帯電制御及び／または光照射による内部電界制御により、検査対象試料の電子状態を変調制御する。
【００１４】
以下の実施例において、検査対象膜上の電界強度を制御する目的は大きく２つに分けられる。第一は、光学検査の条件を最適化することである。例えば、最大の信号光強度を得られる電界強度下で光学検査を行うことで、高ＳＮＲでの検査を行うことができ、検査のスループットを向上させることができる。第二は、電界依存する膜質を検査することである。電界強度に依存する材料特性は、印加する電界強度を変えて検出信号の変化を検出することで、膜質についての情報を得ることができる。詳細については後述する。
【００１５】
以下では、検査対象を半導体ウェハの上に成膜された絶縁膜とその界面として実施例を開示するが、本技術の適用先はこれに限られない。電界下での膜質測定は、例えば半導体膜や有機膜、それらの界面でも有効である。
【実施例１】
【００１６】
図１に実施例１の検査装置１の概略構成を示す。検査装置１は、主要な構成として、試料における検査対象試料の電子状態を制御する荷電粒子線装置、試料にプローブ光を照射する光照射系、試料にプローブ光が照射させることに起因して生じる信号光を検出する光検出系、これらを制御する制御系を有する。
【００１７】
（荷電粒子線装置）
荷電粒子線装置は、試料室１０と鏡筒１１とを備え、これらの内部は図示しない排気機構により真空雰囲気に保持される。試料室１０には、半導体ウェハのような試料１６が収容される。鏡筒１１には、試料１６に照射する荷電粒子線１３を発生させる荷電粒子源１２、荷電粒子源１２をチョッピングするブランカ１４が収容されている。ここで、荷電粒子源１２としては、試料１６を帯電させるための荷電粒子線１３を発生できればよく、電子銃、フラッドガン、イオン源などが使用できる。また、荷電粒子線１３を試料１６に導

くための荷電粒子光学系を構成するレンズや偏向器などの荷電粒子光学部品を備えていてもよい。

【００１８】

試料１６の近傍には、試料１６上の電界を制御することで、試料１６の帯電量を制御する帯電制御電極１７が設けられている。帯電制御電極１７に電圧を印加することで試料１６直上の電界を制御する。帯電制御電極１７に印加された電界が荷電粒子線１３を試料１６に照射した際に発生する二次荷電粒子を試料１６から遠ざけるまたは押し戻すことで試料１６の帯電状態が制御される。帯電制御電極１７は、試料１６から、例えば数～３０ｍｍ程度離れた位置に配置される。このため、荷電粒子線１３、あるいは後述するプローブ光２６やポンプ光２７を試料１６に照射する障害にならないよう、金属メッシュや穴の開いた電極板によって構成することが望ましい。

【００１９】

さらに、特許文献１に開示されているような紫外光を用いると素早く試料１６の帯電を除去できる。一方、紫外光よりも長波長の光の場合、帯電状態は変化させることなく、試料内部の電界（界面電界）を制御できることが知られている。このため、図１の構成例では、試料１６に光（ポンプ光（第２の光）２７と呼ぶ）を照射する第２の光源２２が設けられている。ポンプ光２７を照射することで検査対象試料の電子状態を制御することができ、さらにポンプ光２７の波長を選択することで、制御する電子状態の内容を変えることができる。具体的には、紫外光を用いることで試料帯電の除電及び界面電界の制御を行うことができ、紫外光よりも長波長の光を用いることで、界面電界の制御を行うことができる。第２の光源２２は、後述する第１の光源２１と同様に構成できる。

【００２０】

（光照射系）

検査装置１は、試料１６上に形成されている検査対象膜の光学検査を行うため、試料１６にプローブ光（第１の光）２６を照射する第１の光源２１を備える。第１の光源２１としては、キセノンランプなどの白色光源、レーザ、ＬＥＤなどを用いることができる。白色光源は、モノクロメータを通して単色化して使用することもできる。なお、図示していないが、光照射系は、プローブ光２６を試料１６に導くための光学系を構成するレンズやミラー、プローブ光２６の偏光を制御するための偏光子などの光学部品を備えている。

【００２１】

図１の例では、第１の光源２１は試料室１０の外側に配置され、プローブ光２６は、試料室１０に設けられたビューポート１５ａを介して試料室１０内に導入されている。この例ではポンプ光２７もビューポート１５ａを介して試料室１０内に導入されているが、プローブ光２６とポンプ光２７とを異なるビューポートから試料室１０に導入してもよい。

【００２２】

（光検出系）

プローブ光２６が試料１６に照射させることにより、信号光２８が発生する。信号光２８としては、反射光、散乱光（ラマン散乱光を含む）、発光、回折光を含む。光検出系は信号光２８を検出するものであり、光学フィルタ２３、光検出システム２４、信号処理装置２５を備える。光学フィルタ２３は信号光２８以外の光を除去するフィルタであり、光検出システム２４では、ビューポート１５ｂを透過した光を、光学フィルタ２３を介して受光することにより、信号光２８を検出する。光検出システム２４としては、検出する信号光２８にあわせて、パワーメータ、フォトダイオード、スペクトロメータなどを用いることができる。信号処理装置２５は、複数の試料内部の電界条件で得られた光検出システムの検出信号の処理を行う。信号処理装置２５は例えば、ロックインアンプであり、光検出システム２４からの検出信号の変調強度や位相等を抽出する。

【００２３】

光検出システム２４が検出する信号光２８は、検査対象膜に対して検査を行う膜質に応じて定められる。例えば、反射光を検出することにより界面電界、欠陥、歪などの情報を、散乱光（ラマン散乱光を含む）を検出することにより振動準位、応力、歪みなどの情報

を、発光を検出することにより欠陥、発光効率などの情報を、回折光を検出することにより構造周期性、屈折率などの情報を得ることができる。

【００２４】

（制御系）

制御装置３０は、検査装置１の構成要素の制御を行う。制御装置３０は、例えば、計算機３１から入力される検査条件に基づき、荷電粒子線装置、光照射系、光検出系の動作制御を行う。制御装置３０は、例えばＣＰＵ等のプロセッサで実行されるプログラムにより実現される。また、例えば、ＦＰＧＡ（Field-Programmable Gate Array）やＡＳＩＣ（Application Specific Integrated Circuit）等で構成されてもよい。

【００２５】

検査装置１による検査、計測の条件設定や光検出系からの検出信号に基づく膜質の推定は計算機３１によって実行される。計算機３１は、条件設定や膜質の推定に必要な種々のデータベースまたは換算式を記憶している。

【００２６】

検査、計測の条件設定には、以下のようなパラメータの設定を含む。これらのパラメータは計算機３１のＧＵＩを通じて、ユーザが設定する。試料を帯電させる荷電粒子線１３の条件には、加速電圧、電流量、照射面積、照射位置、ブランカによる照射周期などがある。試料の帯電量を制御する帯電制御電極１７の条件には、電圧の値やその印加周期などがある。試料の除電あるいは内部電界を制御するポンプ光２７の条件には波長、強度、偏光、照射周期などがある。プローブ光２６の条件には波長、強度、偏光などがある。光検出システム２４の検出器の条件にはゲインなどがある。

【００２７】

なお、制御装置３０の機能を計算機３１が実行するように構成することも可能である。

【００２８】

図２Ａ～Ｃに試料の電子状態を変調する制御シーケンスの例を示す。いずれの例も、試料１６の電子状態を、荷電粒子線１３、帯電制御電極１７、ポンプ光２７の３つの作用源により制御する制御シーケンスである。図２Ａは、荷電粒子線１３と帯電制御電極１７の条件を固定し、ポンプ光２７の条件を変調する。変調するパラメータは波長や偏光であってもよいが、ここでは強度としている。ポンプ光２７の強度がＯＮ時には、ポンプ光２７の波長に依存して試料１６の帯電が除去され、あるいは試料内部の電界が制御される。図２Ｂは、荷電粒子線１３とポンプ光２７の条件を固定し、帯電制御電極１７の条件を変調する。図２Ｃは、帯電制御電極１７とポンプ光２７の条件を固定し、荷電粒子線１３の条件を変調する。試料１６の電子状態が変調されるよう、３つの作用源の少なくとも１つ以上について、何らかのパラメータを変調させればよい。複数の作用源を変調させる場合には、複数の作用源の変調パターンは同じであっても、異なっていてもよい。また、ポンプ光２７の波長を短波長として検査対象膜の除電を目的として使用し、試料の帯電の有無のみを制御できればよい場合には帯電制御電極１７をなくすることも可能である。また、図２Ｂ，Ｃの制御シーケンスのように、荷電粒子線１３と帯電制御電極１７とにより試料の帯電量を変調する場合は第２の光源２２をなくすことも可能である。ただし、そのような場合であっても、試料内部の電界（界面電界）を制御したい場合には、紫外光よりも長波長の光を照射可能な第２の光源２２、さらに変調ごとに試料の帯電量をリセットしたい場合には、紫外光を照射可能な第２の光源２２を設けておくことは有効である。

【００２９】

光検出系が信号光２８を検出して出力する検出信号のサンプリングはサンプリングトリガーにしたがって行われる。サンプリングトリガーは試料の電子状態の変調に同期している。これにより、変調される作用源が第１状態（図２Ａの例ではポンプ光２７の強度がＯＦＦ）のときの信号光２８の強度S_Aと変調される作用源が第２状態（図２Ａの例ではポンプ光２７の強度がＯＮ）のときの信号光２８の強度S_Bを得ることができ、強度S_Aと強度S_Bとを比較することにより、検査対象膜の膜質についての情報が得られる。図２Ａ～Ｃの制御シーケンスはいずれも第１状態と第２状態との２種類の電子状態をつくるもの

であるが、複数の作用源を異なる変調パターンで変調させることにより、３種類以上の電子状態をつくるものであってもよい。

【００３０】

ここでサンプリングトリガーには光検出系の構成に応じて様々な態様があり、特定の態様に限定されない。例えば、第２の光源２２は制御装置３０からの同期信号に同期してポンプ光２７を変調させており、光検出系が信号処理装置２５から連続的に検出信号を出力しているとする。この場合、計算機３１は、制御装置３０から同期信号を受信し、同期信号と同期するサンプリングトリガーにより信号処理装置２５からの検出信号をサンプリングすることができる。または、光検出系において光検出システム２４は連続的に検出信号を出力し、信号処理装置２５が制御装置３０から同期信号を受信し、同期信号と同期するサンプリングトリガーにより光検出システム２４からの検出信号をサンプリングして信号処理を行うよう構成してもよい。さらに、光検出系において光検出システム２４が制御装置３０から同期信号を受信し、同期信号と同期するサンプリングトリガーにより信号光２８を検出するよう構成してもよい。光検出システム２４の検出器がスペクトロメータの場合は、この構成にするとよい。

【００３１】

光検出系における信号処理装置２５の信号処理について説明する。例えば、光検出システム２４における検出器をパワーメータとし、信号光２８をプローブ光２６の反射光であるとする。図２Ａの制御シーケンスを適用したとして、第１状態での信号光２８の信号強度S_A、第２状態での信号光２８の信号強度S_Bとする。信号処理装置２５は、２つの電子状態で取得した信号強度の差分を規格化して検出信号として出力する。この場合、検出信号は（数１）として表され、反射率の変化率を意味している。

【００３２】

【数１】

$$\frac{\Delta R}{R}=\frac{S_B-S_A}{S_A} \qquad (1)$$

【００３３】

信号処理装置２５としてロックインアンプを用いた場合には、振幅ΔR_0、位相θが出力され、この場合、検出信号は（数２）として表される。

【００３４】

【数２】

$$\frac{\Delta R}{R}=\Delta R_0 e^{i\theta} \qquad (2)$$

【００３５】

プローブ光２６の波長を変えながら検出信号ΔＲ／Ｒを検出すると図３Ａまたは図３Ｂのようなスペクトルが得られる。横軸は反射光の波長またはエネルギーである。ここで、図３Ａは帯電制御電極１７の電圧を０Ｖに設定した場合であり、図３Ｂは帯電制御電極１７の電圧を＋３Ｖに設定した場合である。帯電制御電極１７の電圧、すなわち試料１６の帯電量を調整することにより、よりＳＮＲの高い検出信号が得られている。なお、プローブ光２６に白色光源と光検出システム２４の検出器としてスペクトロメータを用いても同様のスペクトルを得ることが可能である。

【００３６】

計算機３１は、図３Ａまたは図３Ｂに示したような、検出信号スペクトルの強度や形状から膜質、例えば絶縁膜と半導体との界面における半導体の歪みやドーパント濃度を推定する。得られた検出信号スペクトルは、例えば（数３）で表される関係を有する（非特許文献１）。

【００３７】
【数３】

$$\frac{\Delta R}{R}(E) = Re\left[Ae^{i\theta}(E - E_{CP} + i\Gamma)^{-n}\right] \qquad (3)$$

【００３８】
（数３）において、Ａはintensity、θはphase、Ｅはenergy、E_{CP}はcritical point energy、Γはbroadening factor、ｎは検査対象膜の材料に依存する係数である。得られた検出信号スペクトルに（数３）をフィットする。フィッティングにより、（数３）に含まれるフィットパラメータ（Ａ，θ，E_{CP}，Γ）が求められる。一方、計算機３１はフィットパラメータの様々な組み合わせに対する膜質情報をデータベースとして保有している。図４にデータベースの例を示す。
【００３９】
図４は、膜質を推定するためのデータベース４１のデータ構造例である。データベース４１では、フィットパラメータ（Ａ，θ，E_{CP}，Γ）の組み合わせに対する膜の歪量（Strain）が登録されている。計算機３１は、（数３）より求めたフィットパラメータとデータベース４１とを照合することにより、検査対象膜の歪量を推定する。なお、データベース４１は、膜質情報を、フィットパラメータを引数とする関数として登録していてもよく、その登録形態には限定されない。なお、本例は信号光２８をプローブ光２６の反射光として歪量測定を行う場合に（数３）のようなモデル式及びデータベース４１を用いた例であり、例えば、信号光２８が散乱光や発光の場合、または測定対象が歪量以外の場合には、それに応じたモデル式やデータベースを用いればよい。
【００４０】
計算機３１は、このように検出信号から求められるパラメータと膜質との関係をデータベースとして記憶し、信号光２８から検出されたパラメータから膜質情報を推定する。計算機３１は、検査装置１が実施する膜質検査に用いる光検出系からの検出信号、解析式に応じたデータベースを備え、実施する検査に応じたデータベースを利用して、膜質を推定する。
【００４１】
次に、膜質が検出信号の電界依存性から求められる場合の制御フローについて説明する。欠陥や可動電荷量のような膜質は、試料に印加する電界を変化させたときに、検出信号がどのように変化するか（検出信号の電界依存性）から推定することができる。このような検出信号の電界依存性から推定可能な膜質検査のための制御フローを図５に示す。図２Ａの制御シーケンスを適用し、検査対象膜の可動電荷量を推定する場合を例に説明する。
【００４２】
まず、可変パラメータを選択し、その範囲を設定する（Ｓ０１）。ここでは可変パラメータを、帯電制御電極１７の印加電圧とする。続いて、膜質測定のための制御シーケンスを設定する。上述のように、図２Ａの制御シーケンスを設定する（Ｓ０２）。可変パラメータを変更しながら制御シーケンスの実施及び信号光２８の測定を行い、（Ｓ０３～Ｓ０６）、設定した可変パラメータの範囲について検出信号を得た後、検出信号の可変パラメータ依存性を示す特徴量を算出する（Ｓ０７）。計算機３１は、検出信号の可変パラメータ依存性を示す特徴量に対する膜質情報をデータベースとして保有している。このデータベースを参照して、検査対象膜の膜質を推定する（Ｓ０８）。
【００４３】
制御フローの一例として、図６に帯電制御電極１７の印加電圧を順方向（負から正）と逆方向（正から負）に掃引したときの検出信号（ΔＲ／Ｒ）の強度変化を示す。横軸は試料１６の表面電位V_sである。表面電位V_sは、帯電制御電極１７の印加電圧V_{cc}と（数４）に示す関係を有するので、印加電圧V_{cc}から換算することで求めることができる。（数４）はシミュレーション等により求めておく。
【００４４】

【数４】

$$V_S = f(V_{CC}) \qquad (4)$$

【００４５】

図７は、検出信号の電界依存性から求められる膜質を推定するためのデータベース５１のデータ構造例である。データベース５１では、検出信号の電界強度依存性を示す特徴量（Ｖ１，Ｖ２，ΔＶ）の組み合わせに対する膜の可動電荷量が登録されている。計算機３１は、図６のような測定結果より求めた電界強度依存性を表す特徴量（ここでは、特定の反射率となる電圧Ｖ１，Ｖ２やヒステリシス）とデータベース５１とを照合することにより、検査対象膜の可動電荷量を推定する。なお、対象とする膜質に対応したデータベースを用いることで固定電荷量、フラットバンド電圧や前述したように材料が含む電荷、歪、欠陥、界面の状態等の膜質を推定できる。また、データベース５１は、膜質情報を、特徴量を引数とする関数として登録していてもよく、その登録形態には限定されない。

【００４６】

図８に、検査装置１による光学検査の結果の表示例を示す。光学検査は、例えば半導体ウェハ上のユーザが指定したチップ区画に対して行われる。全チップ区画に対して光学検査を行ってもよい。光学検査を実施したチップ区画ごとの膜質をウェハヒートマップ６０として表示する。ウェハヒートマップ６０では、ウェハ６１中にチップ区画６２を表示し、例えば検査した膜質が欠陥であれば、欠陥密度の高いチップ区画ほど、濃い色となるように表示する。これにより、チップ区画ごとの膜質がユーザに視認可能になる。

【００４７】

検査装置１により膜質測定を行い、結果を表示させるためのＧＵＩ（Graphical User Interface）である設定・計測画面７０の例を図９Ａに示す。設定・計測画面７０には、設定ファイル選択部７１が設けられており、過去の計測において計算機３１に保存された設定ファイルを呼び出すことができる。例えば、同じウェハに対して異なる膜質の検査を実施する場合など、過去の設定内容を活用することでユーザの作業負荷を低減することができる。

【００４８】

設定タブ７２に含まれる制御シーケンスタブを選択することにより、図２Ａ～Ｃの制御シーケンスあるいはそれ以外の制御シーケンスを選択することができる。ここではレーザ変調タブ７３が選択されており、この場合はシーケンス図７４に示されるように、図２Ａとして示したポンプ光を変調させる制御シーケンスが選択される。なお、この装置では荷電粒子線として電子線が、ポンプ光としてレーザ光が使用されている。

【００４９】

ユーザは、レーザ変調タブ７３を開いて、電子線条件設定部７５、帯電制御電極条件設定部７６、レーザ条件設定部７７にて、ウェハの電子状態を変調させる条件を設定する。さらにこの例では、検出信号の電界依存性から膜質を推定するため、帯電制御電極条件設定部７６において印加電圧を掃引させるよう設定している。この場合には、掃引範囲設定部７８が表示され、ユーザは印加電圧を掃引させる範囲を設定する。以上の設定が終了すると、保存ボタン７９を押下して、設定した内容を保存する。

【００５０】

条件設定が終了すると、図９Ｂに示すように、ユーザは計測タブ８１を開く。ユーザは検査チップ区画設定部８２にて光学検査を行うチップ区画を指定し、検査実行ボタン８３を押下する。これにより、指定したチップ区画に対して、設定タブ７２で設定した条件にて光学検査が行われる。指定した全チップ区画に対する光学検査が終了すると、検査結果を簡易的にユーザに示すため、ウェハヒートマップ表示部８４にウェハヒートマップが表示される。ユーザは検査結果を確認し、保存ボタン８５を押下して、光学検査の結果を保存する。

【００５１】

ユーザは図９Ｃに示す結果出力画面９０から検査結果の詳細を確認することができる。結果出力画面９０に設けられた結果ファイル選択部９１から、詳細表示される結果データファイルを呼び出す。この例では、設定・計測画面７０と同じウェハヒートマップが表示されるウェハヒートマップ表示部９２とヒストグラム表示部９３が設けられている。ヒストグラム表示部９３に表示されるヒストグラムは、ウェハヒートマップ表示部９２に表示されるウェハヒートマップにおける欠陥密度を示す濃淡の出現頻度（チップ区画数）を示している。また、ウェハヒートマップ表示部９２に表示されたチップ区画のいずれかを指定することで、個別のチップ区画における測定結果の詳細を表示させることができる。この例では、検査チップ区画測定結果表示部９４において、特定のチップ区画における検出信号の測定結果や推定された膜質情報を表示する。

【００５２】

（変形例１）

図１０Ａに図１に示した検査装置１の変形例を示す。実施例１においては、帯電制御電極１７の印加電圧を掃引させたとき、試料表面電位V_sを（数４）を用いて、帯電制御電極１７の印加電圧V_{cc}から換算すること、（数４）はシミュレーション等によって求められることを説明した。しかしながら、測定条件によって（数４）から求められる値と真の試料表面電位V_sとの間に誤差が生じるおそれがある。

【００５３】

図１０Ａの検査装置１ｂは試料１６の試料表面電位V_sを実測する機構として、エネルギーフィルタ１０１、信号電子検出器１０２を備えている。ここで、信号電子検出器１０２は、荷電粒子線１３が試料１６に照射されることにより発生する信号電子１００を検出する検出器であって、検出する信号電子１００は、二次電子であっても反射電子（後方散乱電子）であってもよい。エネルギーフィルタ１０１には、制御装置３０によって負電圧が印加されており、その負電圧によって生じる電界障壁を乗り越えられる信号電子のみが信号電子検出器１０２によって検出される。すなわち、信号電子検出器１０２が検出する信号電子量はエネルギーフィルタ１０１の電圧に依存する。この特徴を用いて、検査装置１ｂでは、計算機３１は、信号電子１００のエネルギーから試料表面電位V_sを算出する。

【００５４】

図１０Ｂに信号電子検出量とエネルギーフィルタ電圧との関係を示す。エネルギーフィルタ１０１に印加される負電圧を変えながら信号電子検出量を検出することによって信号電子スペクトルが取得できる。シフト量は、試料表面電位V_sに依存する。試料表面電位V_sによって信号電子１００を試料側に引き戻す力が変化するためである。信号電子スペクトル１０３が、試料１６が非帯電である場合の信号電子スペクトルであるとすると、信号電子スペクトル１０４、１０５はそれぞれ、試料１６が正帯電、負帯電の場合の信号電子スペクトルである。そこで、例えば信号電子スペクトルの微分値が最大の電圧を試料表面電位V_sと定義すると、非帯電、正帯電、負帯電時の電位はそれぞれ電位V_0，V_1，V_2となる。これにより、（数４）の換算式を使うことなく、試料表面電位V_sを実測できる。なお、信号電子スペクトル１０３は紫外光等の短波長ポンプ光２７により試料１６の帯電を除去した状態で測定することにより得ることができる。

【００５５】

本変形例では、エネルギーフィルタ１０１を用いて信号電子１００のエネルギーを弁別したが、信号電子をそのエネルギーに応じて分光し検出するスペクトロメータなどによって電子エネルギーを検出することによっても、試料表面電位V_sの測定が可能である。

【００５６】

（変形例２）

図１１に図１に示した検査装置１の変形例を示す。変形例２も変形例１と同様、試料表面電位V_sを実測することを可能とするものである。検査装置１ｃは試料１６の試料表面電位V_sを実測する機構として、表面電位計１１０を備えている。試料室１０内に設けられた表面電位計１１０の位置に試料１６を移動させて、試料表面電位V_sを測定する。

【００５７】

以下、実施例２～４として、検査装置１の別の構成例を説明する。実施例１と同じ構成については同じ符号を付して、重複する説明は省略する。

【実施例２】

【００５８】

実施例１では、試料１６を真空雰囲気に配置しており、真空排気に時間がかかるため、検査計測のスループットを低下させる。実施例２は、試料１６を大気中に配置する構成例である。

【００５９】

図１２に示す検査装置２の構成では、荷電粒子源１２は真空雰囲気とされる鏡筒１１内に配置され、鏡筒１１には内部を真空雰囲気に保つための隔壁１２０が設けられている。荷電粒子源１２から放出された荷電粒子線１３は隔壁１２０を貫通して大気に放出され、試料１６に照射される。さらに、荷電粒子源１２として、大気中においてコロナ放電でイオンを発生させる電極とする場合には、荷電粒子源を真空雰囲気に保つための鏡筒１１及び隔壁１２０も不要とすることができる。

【実施例３】

【００６０】

実施例３では、荷電粒子として、励起光を金属電極に照射することにより発生する光電子を使用する。実施例３の検査装置３は、荷電粒子線源として簡易な構成の電子線源を用いるものであり、短波長の光を試料１６および／または帯電制御電極１７に照射することにより発生する光電子のやりとりにより、試料１６の帯電量を変調させることができる。

【００６１】

第３の光源１３１と第４の光源１３２は、波長400nm未満の光を発生する光源であり、制御装置３０によってその出力が制御されている。第３の光源１３１と第４の光源１３２は、それぞれ第１の光源２１と同様に構成することができる。第３の光源１３１及び第４の光源１３２は試料室１０の外側に配置され、これら光源からの光は、試料室１０に設けられたビューポート１５ｃを介して試料室１０内に導入されている。

【００６２】

第３の光源１３１からの第１の励起光（第３の光）１３３は、帯電制御電極１７に照射される。第１の励起光１３３が照射された場所から第１の光電子１３５が発生する。帯電制御電極１７の電位が試料１６よりも負であると第１の光電子１３５は試料方向に力を受け、試料１６に照射される。よって、試料１６は負帯電する。

【００６３】

一方、第４の光源１３２からの第２の励起光（第４の光）１３４は、試料１６に照射される。第２の励起光１３４が照射された場所から第２の光電子１３６が発生する。帯電制御電極１７の電位が試料１６より正であると第２の光電子１３６は帯電制御電極方向に力を受け、試料１６から遠ざかる。よって、試料１６は正帯電する。

【００６４】

このように、第１の励起光１３３と第２の励起光１３４起因の第１の光電子１３５と第２の光電子１３６により、試料１６の電位を変調制御することができる。第３の光源１３１と第４の光源１３２を一つの光源とすることもでき、その場合は、励起光が帯電制御電極１７または試料１６に照射されるよう、励起光の光路を制御装置３０によって制御する。または、励起光が帯電制御電極１７と試料１６の両方に同時に照射されるような構成でもよい。また、短波長光は大気での吸収を回避するため、第３の光源と第４の光源を真空内に配置してもよい。

【実施例４】

【００６５】

図１に示した検査装置１の構成では、帯電制御電極１７及び荷電粒子源１２の配置がプローブ光（第１の光）２６やポンプ光（第２の光）２７の妨げとなり、光照射系、光検出系を試料１６の近傍に配置できない。このため、試料上に光を集光することが難しく、測定の空間分解能に限界がある。実施例４の検査装置４では、高い空間分解能を得るため、

プローブ光、信号光のための対物レンズ等の光学系を試料直上に配置する。

【００６６】

検査装置４では、プローブ光２６及びポンプ光２７を試料１６に照射するための光学レンズ１４１が試料直上に、その光軸が試料上に形成された検査対象膜に対して垂直な方向に沿うように、配置されている。光学レンズ１４１によってプローブ光２６及びポンプ光２７が試料１６上に集光されるため、高い空間分解能で計測が可能になる。荷電粒子源１２は、光学レンズ１４１の光軸に対してななめに配置されており、荷電粒子線１３は、光学レンズ１４１と試料１６の間を通って、試料１６に斜め照射される。さらに、光学レンズ１４１と試料１６との距離を短くするため、光学レンズ１４１は帯電制御電極の機能を兼ねている。すなわち、光学レンズ１４１には透明な導電膜１７ｂが成膜されており、プローブ光２６、ポンプ光２７、信号光２８を透過させつつ、制御装置３０によって電圧を印加できる。透明な導電膜１７ｂの材料としてはＩＴＯ、ＩＴＺＯなどを使ってもよいし、アルミニウムや金などの金属薄膜を用いることもできる。なお、光学レンズ１４１に成膜するのではなく、帯電制御電極を透明電極として、光学レンズ１４１とは別に、光学レンズ１４１の下に配置するようにしてもよい。プローブ光２６とポンプ光２７とは、光の波長によって透過・反射特性が異なるダイクロイックミラー１４２を用いて同じ光路上に統合されている。信号光２８は、プローブ光２６の光路を逆に伝搬し、ビームスプリッタ１４３によって反射され、光学フィルタ２３を通過したのち光検出システム２４によって検出される。このように、検査装置４ではプローブ光２６を光学レンズ１４１によりを試料１６上に集束させることで、高い空間分解能で膜質計測を実施できる。また、光学レンズ１４１を試料１６の近傍に配置するため、試料１６からの散乱光や発光に対する検出率が向上するというメリットも併せ持つ。なお、図１４には光学系を構成する代表的な光学部品のみを例示しており、レンズやミラーなどの一般的な素子は省略して示している。

【００６７】

以上、本発明について実施例、変形例を挙げて説明した。上記した実施例、変形例は発明の要旨を変更しない範囲で種々変形が可能であり、また、これらを組み合わせて使用することも可能である。

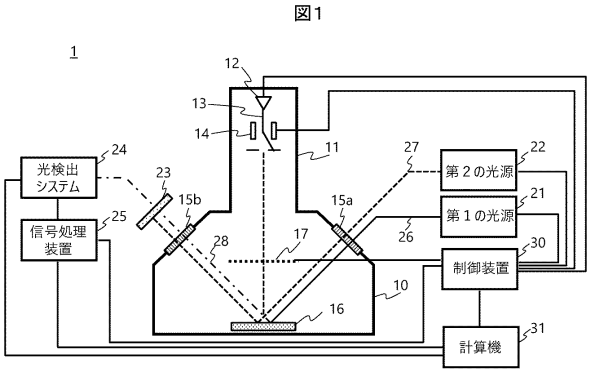
【符号の説明】

【００６８】

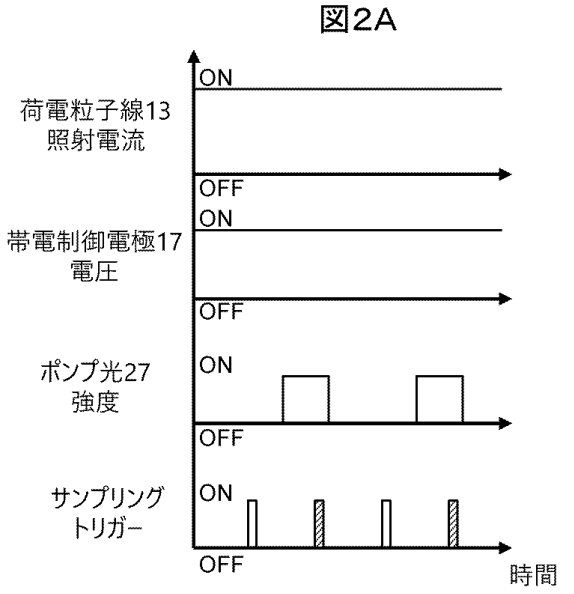
１，２，３，４：検査装置、１０：試料室、１１：鏡筒、１２：荷電粒子源、１３：荷電粒子線、１４：ブランカ、１５：ビューポート、１６：試料、１７：帯電制御電極、１７ｂ：透明導電膜、２１：第１の光源、２２：第２の光源、２３：光学フィルタ、２４：光検出システム、２５：信号処理装置、２６：プローブ光、２７：ポンプ光、２８：信号光、３０：制御装置、３１：計算機、４１，５１：データベース、６０：ウェハヒートマップ、６１：ウェハ、６２：チップ区画、７０：設定・計測画面、７１：設定ファイル選択部、７２：設定タブ、７３：レーザ変調タブ、７４：シーケンス図、７５：電子線条件設定部、７６：帯電制御電極条件設定部、７７：レーザ条件設定部、７８：掃引範囲設定部、７９：保存ボタン、８１：計測タブ、８２：検査チップ区画設定部、８３：検査実行ボタン、８４：ウェハヒートマップ表示部、８５：保存ボタン、９０：結果出力画面、９１：結果ファイル選択部、９２：ウェハヒートマップ表示部、９３：ヒストグラム表示部、９４：検査チップ区画測定結果表示部、１００：信号電子、１０１：エネルギーフィルタ、１０２：信号電子検出器、１０３，１０４，１０５：信号電子スペクトル、１１０：表面電位計、１２０：隔壁、１３１：第３の光源、１３２：第４の光源、１３３：第１の励起光、１３４：第２の励起光、１３５：第１の光電子、１３６：第２の光電子、１４１：光学レンズ、１４２：ダイクロイックミラー、１４３：ビームスプリッタ。

【図面】

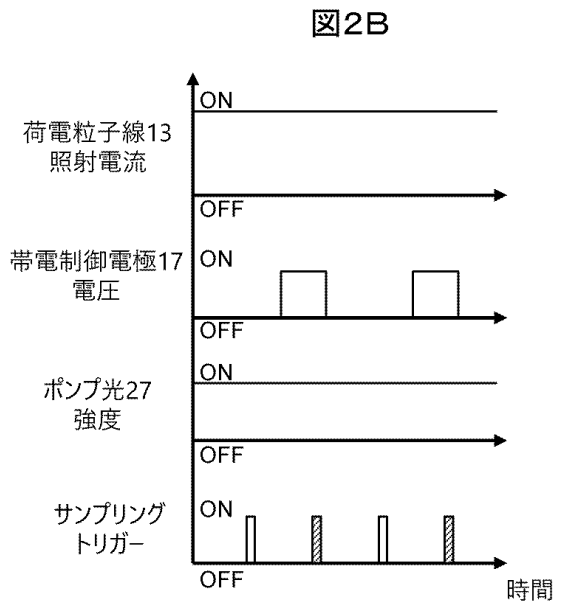
【図１】



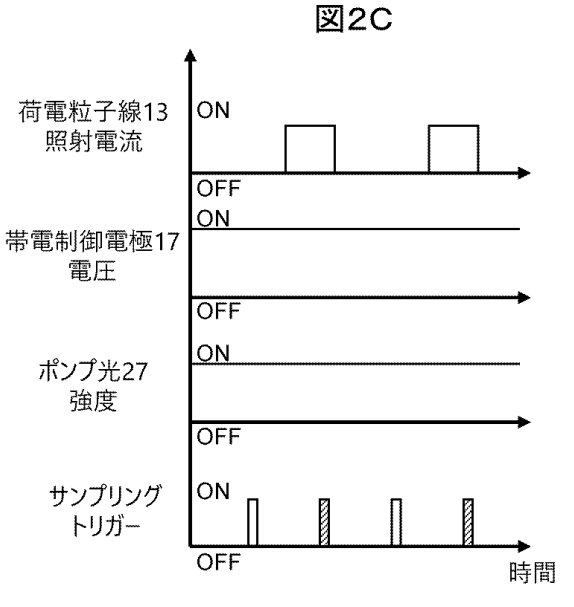
【図２Ａ】



【図２Ｂ】

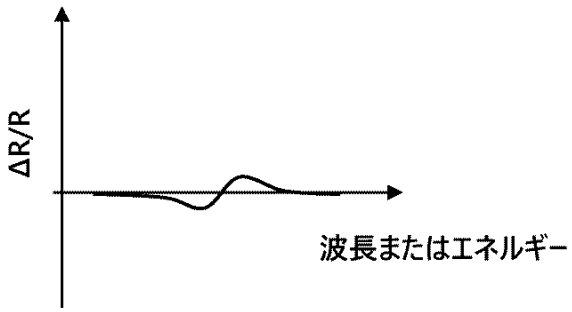


【図２Ｃ】



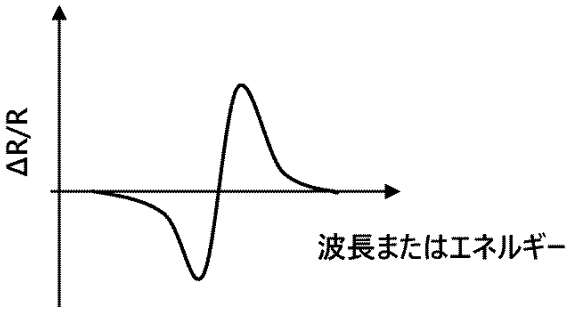
【図３Ａ】

図3A



【図３Ｂ】

図3B



【図４】

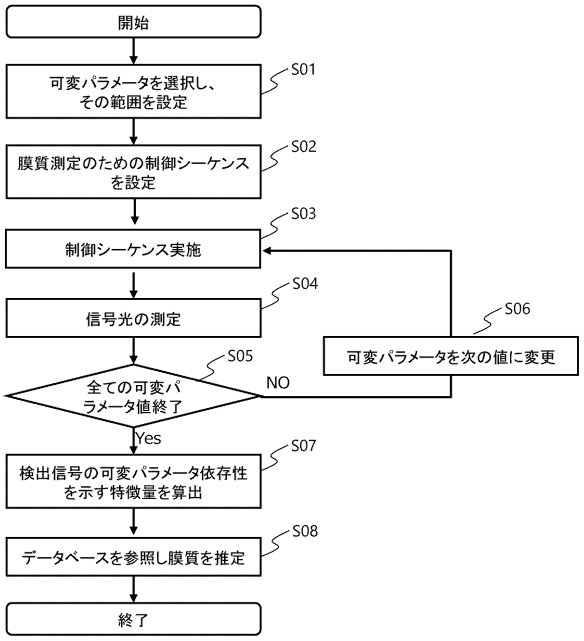
図4

41

Input				Output
A	θ	E_{CP}	Γ	Strain
・	・	3.405	・	$1x10^{-3}$
・	・	3.410	・	$2x10^{-3}$
・	・	・	・	・

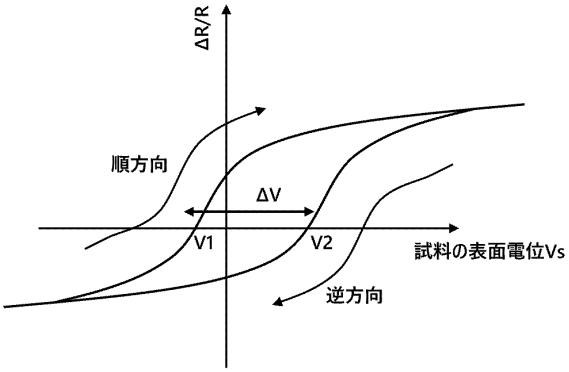
【図５】

図5



【図６】

図6



【図７】

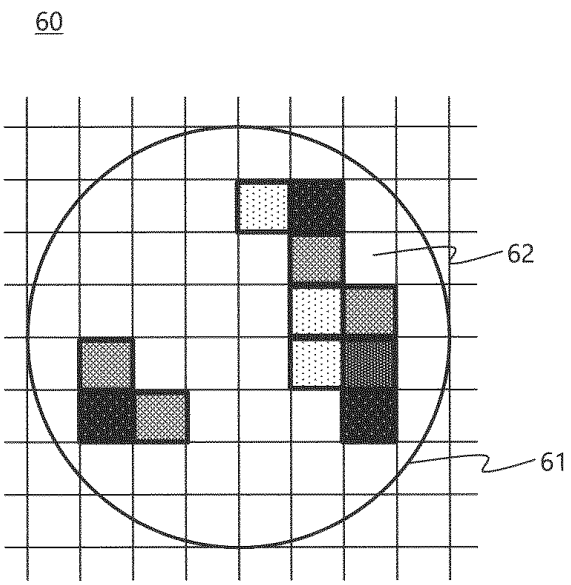
図7

51

Input			Output
$V1$	$V2$	ΔV	可動電荷量
-1	1	2	$3x10^{11}$
-2	2	4	$1x10^{12}$
・	・	・	・

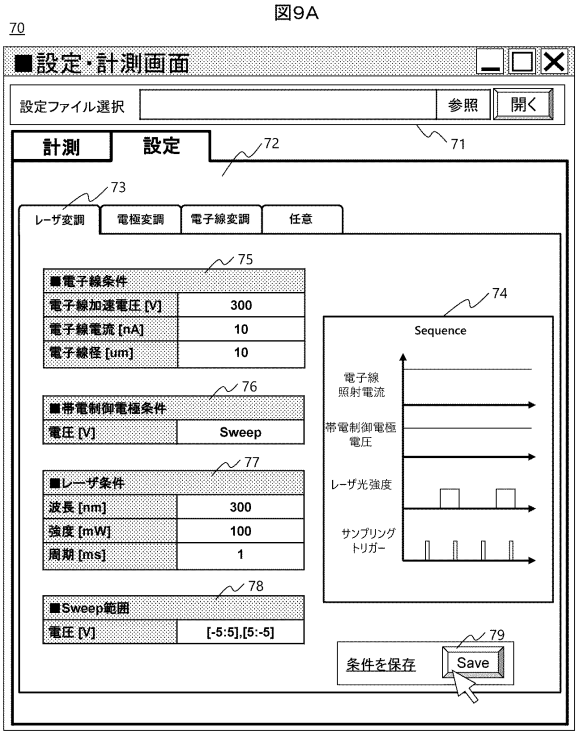
【図８】

図8



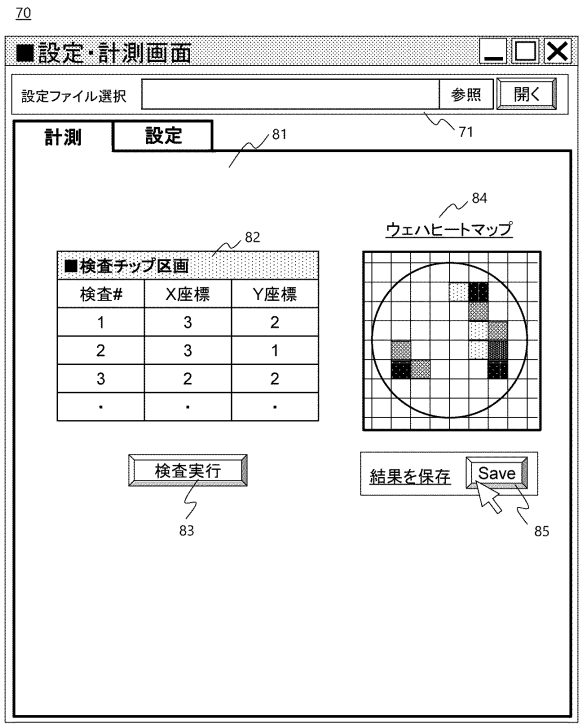
【図９Ａ】

図9A



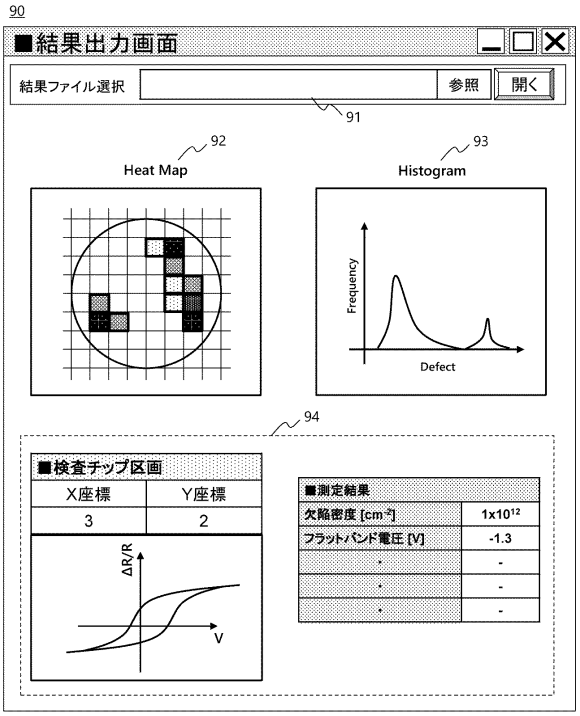
【図９Ｂ】

図9B



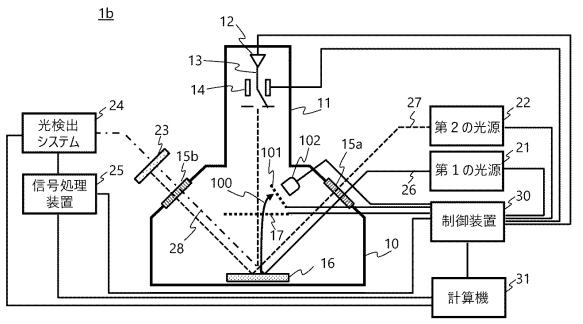
【図９Ｃ】

図9C



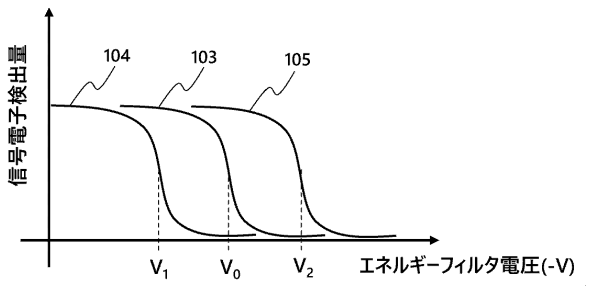
【図１０Ａ】

図10A



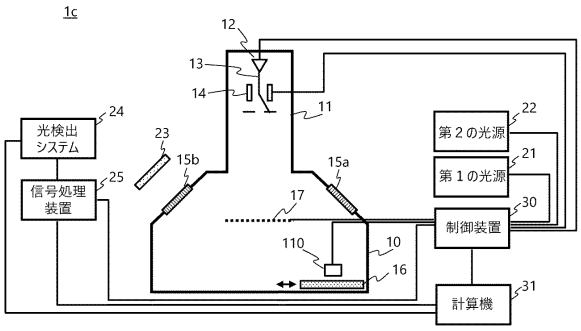
【図１０Ｂ】

図10B



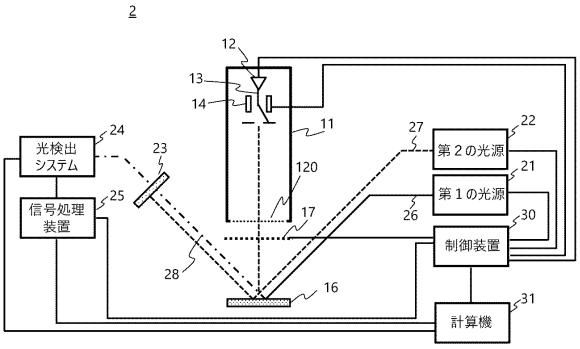
【図１１】

図11



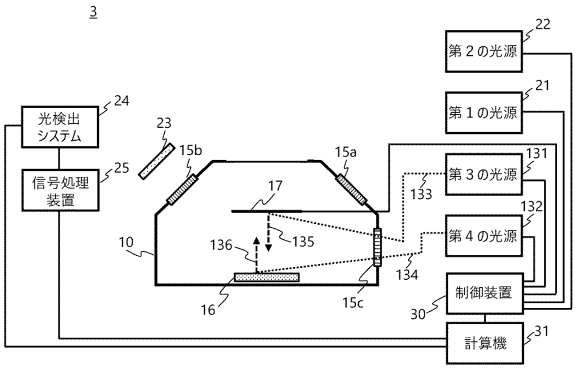
【図１２】

図12



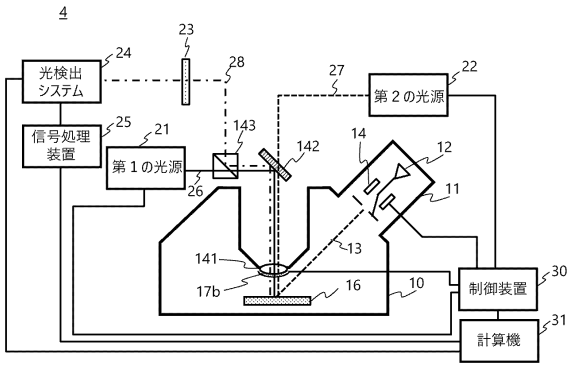
【図１３】

図13



【図１４】

図14



フロントページの続き

(56)参考文献　特開２００９－０４３９６０（ＪＰ，Ａ）
特開２００８－０２７７３７（ＪＰ，Ａ）
特開２０００－３５７４８３（ＪＰ，Ａ）
特開２０１０－０９７７６８（ＪＰ，Ａ）
特許第７１０８７８８（ＪＰ，Ｂ２）
特許第７３７７３７５（ＪＰ，Ｂ２）
(58)調査した分野　(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０１Ｊ　３７／００－３７／３６