

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5309359号
(P5309359)

(45) 発行日 平成25年10月9日 (2013. 10. 9)

(24) 登録日 平成25年7月12日 (2013. 7. 12)

(51) Int. Cl.

F I

G O 1 B 11/06 (2006. 01)
H O 1 L 21/66 (2006. 01)G O 1 B 11/06 I O 1 G
H O 1 L 21/66 P

請求項の数 6 (全 39 頁)

(21) 出願番号 特願2008-162046 (P2008-162046)
 (22) 出願日 平成20年6月20日 (2008. 6. 20)
 (65) 公開番号 特開2010-2327 (P2010-2327A)
 (43) 公開日 平成22年1月7日 (2010. 1. 7)
 審査請求日 平成23年5月11日 (2011. 5. 11)

(73) 特許権者 000206967
 大塚電子株式会社
 大阪府枚方市招提田近三丁目2番3号
 (74) 代理人 100064746
 弁理士 深見 久郎
 (74) 代理人 100085132
 弁理士 森田 俊雄
 (74) 代理人 100083703
 弁理士 仲村 義平
 (74) 代理人 100096781
 弁理士 堀井 豊
 (74) 代理人 100098316
 弁理士 野田 久登
 (74) 代理人 100109162
 弁理士 酒井 将行

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 膜厚測定装置および膜厚測定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基板上に複数の層が形成された被測定物に対して所定の波長範囲をもつ測定光を照射する光源を備え、前記被測定物は、前記光源に最も近い第1層と前記第1層に隣接する第2層とを含み、さらに

前記被測定物で反射された光または前記被測定物を透過した光に基づいて、反射率または透過率の波長分布特性を取得する分光測定部と、

前記被測定物に含まれる各層の膜厚を含むモデル式を用いて、前記波長分布特性に対してフィッティングを行うことにより、前記第1層および前記第2層の膜厚をそれぞれ決定する第1決定手段と、

前記波長分布特性における各波長とその波長における反射率または透過率の値との対応関係を、各波長についての波数と所定の関係式に従って算出される変換値との対応関係に変換することで、波数分布特性を生成する変換手段と、

前記波数分布特性に含まれる各波数成分の振幅値を取得する解析手段と、

前記波数分布特性に含まれる振幅値の大きな波数成分に基づいて、少なくとも前記第1層の膜厚を決定する第2決定手段とを備え、前記第2決定手段は、前記第1決定手段によるフィッティングが規定回数以内に収束しない場合に、選択的に有効化され、

前記被測定物に含まれる各層の膜厚を含むモデル式に、前記第2決定手段により決定された前記第1層の膜厚の値を設定した上で、前記波長分布特性に対してフィッティングを行うことにより、前記第2層の膜厚を決定する第3決定手段を備える、膜厚測定装置。

【請求項 2】

前記モデル式は、屈折率を示す波長についての関数を含む、請求項 1 に記載の膜厚測定装置。

【請求項 3】

前記所定の波長範囲は、赤外帯域の波長を含む、請求項 1 または 2 に記載の膜厚測定装置。

【請求項 4】

前記解析手段は、前記波数分布特性を離散的にフーリエ変換する手段を含む、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の膜厚測定装置。

【請求項 5】

前記解析手段は、最適化法を用いて前記波数分布特性に含まれる各波数成分の振幅値を取得する、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の膜厚測定装置。

【請求項 6】

基板上に複数の層が形成された被測定物に対して所定の波長範囲をもつ測定光を照射するステップを備え、前記被測定物は、前記測定光が最初に入射する第 1 層と前記第 1 層に隣接する第 2 層とを含み、さらに

前記被測定物で反射された光または前記被測定物を透過した光に基づいて、反射率または透過率の波長分布特性を取得するステップと、

前記被測定物に含まれる各層の膜厚を含むモデル式を用いて、前記波長分布特性に対してフィッティングを行うことにより、前記第 1 層および前記第 2 層の膜厚をそれぞれ決定する第 1 決定ステップと、

前記波長分布特性における各波長とその波長における反射率または透過率の値との対応関係を、各波長についての波数と所定の関係式に従って算出される変換値との対応関係に変換することで、波数分布特性を生成するステップと、

前記波数分布特性に含まれる各波数成分の振幅値を取得するステップと、

前記第 1 決定ステップにおいてフィッティングが規定回数以内に収束しない場合に、選択的に有効化される、前記波数分布特性に含まれる振幅値の大きな波数成分に基づいて、少なくとも前記第 1 層の膜厚を決定する第 2 決定ステップと、

前記被測定物に含まれる各層の膜厚を含むモデル式に、前記第 2 決定ステップにおいて決定された前記第 1 層の膜厚の値を設定した上で、前記波長分布特性に対してフィッティングを行うことにより、前記第 2 層の膜厚を決定する第 3 決定ステップと備える、膜厚測定方法。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

この発明は、膜厚測定装置および膜厚測定方法に関し、より特定的には基板上に複数の層が形成された被測定物の膜厚を測定する構成および方法に関する。

【背景技術】**【0002】**

近年、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 回路などの低消費電力化や高速化を図るために、SOI (Silicon on Insulator) と称される基板構造が注目されている。この SOI 基板は、2 つの Si (シリコン) 基板の間に SiO₂ などの絶縁層 (BOX 層) を配置したものであり、一方の Si 層に形成される PN 接合と他方の Si 層 (基板) との間に生じる寄生ダイオードや浮遊容量などを低減することができる。

【0003】

このような SOI 基板の製造方法としては、シリコンウェハの表面に酸化膜を形成した上で、当該酸化膜を挟むように別のシリコンウェハを張り合わせ、さらに、回路素子が形成される側のシリコンウェハを研磨して所定の厚みとする方法が知られている。

【0004】

このように研磨工程によってシリコンウェハの厚みを制御するためには、膜厚を連続的

10

20

30

40

50

にモニタする必要がある。このような研磨工程における膜厚の測定方法として、特開平 05 - 306910 号公報（特許文献 1）および特開平 05 - 308096 号公報（特許文献 2）には、フーリエ変換赤外分光光度計（FTIR）を用いる方法が開示されている。また、特開 2005 - 19920 号公報（特許文献 3）には、分散型マルチチャンネル分光器にて測定した反射スペクトルを用いる方法が開示されている。

【0005】

また、特開平 10 - 125634 号公報（特許文献 4）には、赤外線光源からの赤外線を研磨体を透過させて研磨対象物に照射して、その反射光を検出することで膜厚を測定する方法が開示されている。

【0006】

10

さらに、特開 2002 - 228420 号公報（特許文献 5）には、シリコン薄膜の表面へ向かって、 $0.9\mu\text{m}$ 以上の波長を有した赤外線を照射し、シリコン薄膜の表面による反射光とシリコン薄膜の裏面による反射光との干渉結果に基づいて、シリコン薄膜の膜厚を測定する方法が開示されている。

【0007】

さらに、特開 2003 - 114107 号公報（特許文献 6）には、測定光として赤外光を使用する光干渉式の膜厚測定装置が開示されている。

【特許文献 1】特開平 05 - 306910 号公報

【特許文献 2】特開平 05 - 308096 号公報

【特許文献 3】特開 2005 - 19920 号公報

20

【特許文献 4】特開平 10 - 125634 号公報

【特許文献 5】特開 2002 - 228420 号公報

【特許文献 6】特開 2003 - 114107 号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

しかしながら、特開平 05 - 306910 号公報（特許文献 1）および特開平 05 - 308096 号公報（特許文献 2）に開示される測定方法では、予め基準となるサンプルに対する膜厚の相対値を測定することしかできず、膜厚の絶対値を測定することはできない。

30

【0009】

また、特開 2005 - 19920 号公報（特許文献 3）に開示される測定方法では、たとえば屈折率を波長に依存しない固定値であると仮定して、自己回帰モデルによる周期推定を行っているが、実際の屈折率は波長依存性を有しており、このような波長依存性に起因する誤差を排除することができない。また、特開 2003 - 114107 号公報（特許文献 6）に開示される測定方法においても同様の問題を含んでいる。

【0010】

また、特開 2002 - 228420 号公報（特許文献 5）に開示される測定方法では、測定対象のサンプルに貫通部を形成する必要がある、膜厚を非破壊で連続的に測定することはできない。

40

【0011】

この発明は、このような問題点を解決するためになされたものであって、その目的は、膜厚をより高い精度を測定することが可能な膜厚測定装置および膜厚測定方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0012】

この発明のある局面に従う膜厚測定装置は、光源と、分光測定部と、第 1 決定手段と、変換手段と、解析手段と、第 2 決定手段とを含む。光源は、基板上に複数の層が形成された被測定物に対して所定の波長範囲をもつ測定光を照射する。被測定物は、光源に最も近い第 1 層と第 1 層に隣接する第 2 層とを含む。分光測定部は、被測定物で反射された光ま

50

たは被測定物を透過した光に基づいて、反射率または透過率の波長分布特性を取得する。第1決定手段は、被測定物に含まれる各層の膜厚を含むモデル式を用いて、波長分布特性に対してフィッティングを行うことにより、少なくとも第1層の膜厚を決定する。変換手段は、波長分布特性における各波長とその波長における反射率または透過率の値との対応関係を、各波長についての波数と所定の関係式に従って算出される変換値との対応関係に変換することで、波数分布特性を生成する。解析手段は、波数分布特性に含まれる各波数成分の振幅値を取得する。第2決定手段は、波数分布特性に含まれる振幅値の大きな波数成分に基づいて、少なくとも第1層の膜厚を決定する。そして、第1決定手段および第2決定手段は、選択的に有効化される。

【0013】

10

好ましくは、被測定物に含まれる各層の膜厚を含むモデル式に、第2決定手段により決定された第1層の膜厚の値を設定した上で、波長分布特性に対してフィッティングを行うことにより、第2層の膜厚を決定する第3決定手段をさらに含む。

【0014】

好ましくは、第2決定手段は、第1決定手段によるフィッティングが規定回数以内に収束しない場合に有効化される。

【0015】

好ましくは、モデル式は、屈折率を示す波長についての関数を含む。

好ましくは、所定の波長範囲は、赤外帯域の波長を含む。

【0016】

20

好ましくは、解析手段は、波数分布特性を離散的にフーリエ変換する手段を含む。

好ましくは、解析手段は、最適化法を用いて波数分布特性に含まれる各波数成分の振幅値を取得する。

【0017】

この発明の別の局面に従う膜厚測定方法は、基板上に複数の層が形成された被測定物に対して所定の波長範囲をもつ測定光を照射するステップを含む。被測定物は、測定光が最初に入射する第1層と第1層に隣接する第2層とを含む。膜厚測定方法は、さらに、被測定物で反射された光または被測定物を透過した光に基づいて、反射率または透過率の波長分布特性を取得するステップと、被測定物に含まれる各層の膜厚を含むモデル式を用いて、波長分布特性に対してフィッティングを行うことにより、少なくとも第1層の膜厚を決定する第1決定ステップと、波長分布特性における各波長とその波長における反射率または透過率の値との対応関係を、各波長についての波数と所定の関係式に従って算出される変換値との対応関係に変換することで、波数分布特性を生成するステップと、波数分布特性に含まれる各波数成分の振幅値を取得するステップと、波数分布特性に含まれる振幅値の大きな波数成分に基づいて、少なくとも第1層の膜厚を決定する第2決定ステップと、第1決定ステップおよび第2決定ステップを選択的に有効化するステップとを含む。

30

【発明の効果】

【0018】

この発明によれば、被測定物の膜厚をより高い精度で測定することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

40

【0019】

この発明の実施の形態について、図面を参照しながら詳細に説明する。なお、図中の同一または相当部分については、同一符号を付してその説明は繰返さない。

【0020】

<装置構成>

図1は、この発明の実施の形態に従う膜厚測定装置100の概略構成図である。

【0021】

本実施の形態に従う膜厚測定装置100は、代表的に、単層または積層構造の被測定物における各層の膜厚を測定することが可能である。特に、本実施の形態に従う膜厚測定装置100は、比較的厚みの大きな層（代表的には、 $2\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$ ）を含む被測定

50

物の膜厚測定に適している。

【 0 0 2 2 】

具体的には、膜厚測定装置 1 0 0 は、顕微分光式の測定装置であって、被測定物に光を照射し、当該被測定物で反射された反射光の波長分布特性（以下「スペクトル」とも称す。）に基づいて、被測定物を構成する各層の膜厚を測定可能である。なお、膜厚測定に限られず、各層における（絶対および相対）反射率の測定や層構造の解析も可能である。なお、反射光のスペクトルに代えて、被測定物を透過した光のスペクトル（透過光のスペクトル）を用いてもよい。

【 0 0 2 3 】

本明細書では、被測定物として、基板単体もしくは基板上に 1 つ以上の層が形成されたものを対象とする場合について例示する。被測定物の具体的な一例としては、S i 基板、ガラス基板、サファイア基板などの比較的厚みのある基板単体や、S O I (Silicon on Insulator) 基板のような積層構造の基板などである。特に、本実施の形態に従う膜厚測定装置 1 0 0 は、切削また研磨後の S i 基板の膜厚、S O I 基板の S i 層（活性層）の膜厚、化学機械研磨（C M P）工程での S i 基板の膜厚などの測定に適している。

【 0 0 2 4 】

図 1 を参照して、膜厚測定装置 1 0 0 は、測定用光源 1 0 と、コリメートレンズ 1 2 と、カットフィルタ 1 4 と、結像レンズ 1 6 , 3 6 と、絞り部 1 8 と、ビームスプリッタ 2 0 , 3 0 と、観察用光源 2 2 と、光ファイバ 2 4 と、出射部 2 6 と、ピンホールミラー 3 2 と、軸変換ミラー 3 4 と、観察用カメラ 3 8 と、表示部 3 9 と、対物レンズ 4 0 とステージ 5 0 と、可動機構 5 1 と、分光測定部 6 0 と、データ処理部 7 0 とを備える。

【 0 0 2 5 】

測定用光源 1 0 は、被測定物の反射率スペクトルを取得するために、所定の波長範囲をもつ測定光を発生する光源であり、特に赤外帯域に波長成分（たとえば、9 0 0 n m ~ 1 6 0 0 n m、または 1 4 7 0 n m ~ 1 6 0 0 n m）を有する光源が用いられる。測定用光源 1 0 としては、代表的にハロゲンランプが用いられる。

【 0 0 2 6 】

コリメートレンズ 1 2 と、カットフィルタ 1 4 と、結像レンズ 1 6 と、絞り部 1 8 とは、測定用光源 1 0 とビームスプリッタ 3 0 とを結ぶ光軸 A X 2 上に配置され、測定用光源 1 0 から出射される測定光を光学的に調整する。

【 0 0 2 7 】

具体的には、コリメートレンズ 1 2 は、測定用光源 1 0 からの測定光が最初に入射する光学部品であり、拡散光線として伝播する測定光を屈折させて平行光線に変換する。コリメートレンズ 1 2 を通過した測定光はカットフィルタ 1 4 に入射する。カットフィルタ 1 4 は、測定光に含まれる不要な波長成分を遮断する。代表的に、カットフィルタ 1 4 は、ガラス基板などに蒸着された多層膜によって形成される。結像レンズ 1 6 は、測定光のビーム径を調整するために、カットフィルタ 1 4 を通過した測定光を平行光線から収束光線に変換する。結像レンズ 1 6 を通過した測定光は絞り部 1 8 に入射する。絞り部 1 8 は、測定光の光量を所定量に調整した上でビームスプリッタ 3 0 へ出射する。好ましくは、絞り部 1 8 は、結像レンズ 1 6 によって変換された測定光の結像位置に配置される。なお、絞り部 1 8 の絞り量は、被測定物に入射する測定光の被写界深度や必要な光強度などに応じて適宜設定される。

【 0 0 2 8 】

一方、観察用光源 2 2 は、被測定物への焦点合わせや測定位置の確認に使用される観察光を生成する光源である。そして、観察用光源 2 2 が発生する観察光は、被測定物で反射可能な波長を含むように選択される。観察用光源 2 2 は、光ファイバ 2 4 を介して出射部 2 6 と接続されており、観察用光源 2 2 で生成された観察光は、光導波路である光ファイバ 2 4 を伝播した後に、出射部 2 6 からビームスプリッタ 2 0 へ向けて出射される。

【 0 0 2 9 】

出射部 2 6 は、被測定物に所定の観察基準像が投射されるように、観察用光源 2 2 で生

10

20

30

40

50

成された観察光の一部をマスクするマスク部 26a を含む。この観察基準像は、その表面に何らの模様（パターン）も形成されていない被測定物（代表的に、透明なガラス基板など）に対しても、ユーザによる焦点合わせを容易化するためのものである。なお、レチクル像の形状はいずれであってもよいが、一例として同心円状や十字状のパターンなどを用いることができる。

【0030】

すなわち、観察用光源 22 で生成された直後の観察光のビーム断面における光強度（光量）は略均一であるが、マスク部 26a がこの観察光の一部をマスク（遮蔽）することで、観察光は、そのビーム断面において光強度が略ゼロである領域（影領域）が形成される。この影領域が観察基準像として被測定物に投射される。

10

【0031】

ステージ 50 は、被測定物を配置するための試料台であり、その配置面は平坦に形成される。このステージ 50 は、一例として機械的に連結された可動機構 51 によって、3 方向（X 方向・Y 方向・Z 方向）に自在に駆動される。可動機構 51 は、代表的に 3 軸分のサーボモータと、各サーボモータを駆動するためのサーボドライバとを含んで構成される。そして、可動機構 51 は、ユーザまたは図示しない制御装置などからのステージ位置指令に応答してステージ 50 を駆動する。このステージ 50 の駆動によって、被測定物と後述する対物レンズ 40 との間の位置関係が変更される。

【0032】

対物レンズ 40 と、ビームスプリッタ 20 と、ビームスプリッタ 30 と、ピンホールミラー 32 とは、ステージ 50 の平坦面に垂直な方向に延伸する光軸 AX1 上に配置される。

20

【0033】

ビームスプリッタ 30 は、測定用光源 10 で生成される測定光を反射することで、その伝播方向を光軸 AX1 の紙面下向きに変換する。また、ビームスプリッタ 30 は、光軸 AX1 を紙面上向きに伝播する被測定物からの反射光を透過させる。

【0034】

一方、ビームスプリッタ 20 は、観察用光源 22 で生成される観察光を反射することで、その伝播方向を光軸 AX1 の紙面下向きに変換する。同時に、ビームスプリッタ 20 は、光軸 AX1 を紙面下向きに伝播するビームスプリッタ 30 で反射された測定光を透過させる。すなわち、ビームスプリッタ 20 は、測定用光源 10 から集光光学系である対物レンズ 40 までの光学経路上の所定位置において観察光を注入する光注入部として機能する。このビームスプリッタ 20 で合成された測定光と観察光とは、対物レンズ 40 に入射する。また、ビームスプリッタ 20 は、光軸 AX1 を紙面上向きに伝播する被測定物からの反射光を透過させる。

30

【0035】

特に、測定光は赤外帯域の波長成分を含み、観察光は可視帯域の波長成分を含むので、ビームスプリッタ 20 および 30 は、いずれもその透過／反射特性が可視帯域から赤外帯域まで所望の値を維持できるものが採用される。

【0036】

対物レンズ 40 は、光軸 AX1 を紙面下向きに伝播する測定光および観察光を集光するための集光光学系である。すなわち、対物レンズ 40 は、被測定物またはその近接した位置で結像するように測定光および観察光を収束させる。また、対物レンズ 40 は、所定の倍率（たとえば、10 倍、20 倍、30 倍、40 倍など）を有する拡大レンズであり、被測定物の光学特性を測定する領域を対物レンズ 40 に入射する光のビーム断面に比較してより微小化できる。

40

【0037】

また、対物レンズ 40 から被測定物に入射した測定光および観察光は、被測定物で反射され、光軸 AX1 を紙面上向きに伝播する。この反射光は、対物レンズ 40 に透過した後、ビームスプリッタ 20 および 30 を透過してピンホールミラー 32 まで到達する。

50

【 0 0 3 8 】

ピンホールミラー 3 2 は、被測定物で生じる反射光のうち、測定反射光と観察反射光とを分離する光分離部として機能する。具体的には、ピンホールミラー 3 2 は、光軸 A X 1 を紙面上向きに伝播する被測定物からの反射光を反射する反射面を含み、その反射面と光軸 A X 1 との交点を中心とする穴あき部（ピンホール）3 2 a が形成されている。このピンホール 3 2 a の大きさは、測定用光源 1 0 からの測定光が被測定物で反射されて生じる測定反射光の、ピンホールミラー 3 2 の位置におけるビーム径に比較して小さくなるように形成される。また、このピンホール 3 2 a は、それぞれ測定光および観察光が被測定物で反射されて生じる測定反射光および観察反射光の結像位置と一致するように配置される。このような構成によって、被測定物で生じた反射光は、ピンホール 3 2 a を通過して分光測定部 6 0 に入射する。一方、反射光の残部は、その伝播方向を変換されて軸変換ミラー 3 4 へ入射する。

10

【 0 0 3 9 】

分光測定部 6 0 は、ピンホールミラー 3 2 を通過した測定反射光から反射率スペクトルを測定し、その測定結果をデータ処理部 7 0 へ出力する。より詳細には、分光測定部 6 0 は、回折格子（グレーティング）6 2 と、検出部 6 4 と、カットフィルタ 6 6 と、シャッタ 6 8 とを含む。

【 0 0 4 0 】

カットフィルタ 6 6 と、シャッタ 6 8 と、回折格子 6 2 とは、光軸 A X 1 上に配置される。カットフィルタ 6 6 は、ピンホールを通過して分光測定部 6 0 に入射する測定反射光に含まれる測定範囲外の波長成分を制限するための光学フィルタであり、特に測定範囲外の波長成分を遮断する。シャッタ 6 8 は、検出部 6 4 をリセットするときなどに、検出部 6 4 に入射する光を遮断するために使用される。シャッタ 6 8 は、代表的に電磁力によって駆動する機械式のシャッタからなる。

20

【 0 0 4 1 】

回折格子 6 2 は、入射する測定反射光を分光した上で、各分光波を検出部 6 4 へ導く。具体的には、回折格子 6 2 は、反射型の回折格子であり、所定の波長間隔毎の回折波が対応する各方向に反射するように構成される。このような構成を有する回折格子 6 2 に測定反射波が入射すると、含まれる各波長成分は対応する方向に反射されて、検出部 6 4 の所定の検出領域に入射する。なお、この波長間隔が分光測定部 6 0 における波長分解能に相当する。回折格子 6 2 は、代表的にフラットフォーカス型球面グレーティングからなる。

30

【 0 0 4 2 】

検出部 6 4 は、被測定物の反射率スペクトルを測定するために、回折格子 6 2 で分光された測定反射光に含まれる各波長成分の光強度に応じた電気信号を出力する。検出部 6 4 は、赤外帯域に感度をもつ InGaAs アレイなどからなる。

【 0 0 4 3 】

データ処理部 7 0 は、検出部 6 4 によって取得された反射率スペクトルに対して、本発明に係る特徴的な処理を行うことで、被測定物を構成する各層の膜厚を測定する。さらに、データ処理部 7 0 は、被測定物の各層の反射率や層構造の解析も可能である。なお、このような処理の詳細については後述する。そして、データ処理部 7 0 は、測定した被測定物の膜厚をはじめとする光学特性を出力する。

40

【 0 0 4 4 】

一方、ピンホールミラー 3 2 で反射された観測反射光は光軸 A X 3 に沿って伝播し、軸変換ミラー 3 4 へ入射する。軸変換ミラー 3 4 は、観測反射光の伝播方向を光軸 A X 3 から光軸 A X 4 に変換する。すると、観測反射光は、光軸 A X 4 に沿って伝播し、観察用カメラ 3 8 へ入射する。

【 0 0 4 5 】

観察用カメラ 3 8 は、観察反射光によって得られる反射像を取得する撮像部であり、代表的には CCD (Charged Coupled Device) や CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) センサなどからなる。なお、観察用カメラ 3 8 は、代表的に可視帯域に感

50

度をもつものであり、所定の測定範囲に感度をもつ検出部 64 とは異なる感度特性をもつ場合が多い。そして、観察用カメラ 38 は、観察反射光によって得られる反射像に応じた映像信号を表示部 39 へ出力する。表示部 39 は、観察用カメラ 38 からの映像信号に基づいて反射像を画面上に表示する。ユーザは、この表示部 39 に表示される反射像を目視して、被測定物に対する焦点合わせや測定位置の確認などを行う。表示部 39 は、代表的に液晶ディスプレイ (LCD) などからなる。なお、観察用カメラ 38 および表示部 39 に代えて、ユーザが反射像を直接的に目視できるファインダーを設けてもよい。

【0046】

< 反射光の解析的検討 >

まず、被測定物に測定光を照射した場合に観測される反射光について、数学的および物理的に検討を行う。

【0047】

図 2 は、この発明の実施の形態に従う膜厚測定装置 100 が測定対象とする被測定物 O B J の断面模式図の一例である。

【0048】

図 2 を参照して、被測定物 O B J の代表例として S i O 基板を考える。すなわち、被測定物 O B J は、S i 層 1 とベース S i 層 3 (基板層) との間に S i O 層 2 (B O X 層) が配置された 3 層構造を有する。そして、膜厚測定装置 100 からの照射光は、紙面上側から被測定物 O B J に入射するものとする。すなわち、測定光は、最初に S i 層 1 へ入射するものとする。

【0049】

理解を容易にするために、被測定物 O B J に入射した測定光が S i 層 1 と S i O 層 2 との界面で反射して生じる反射光について考える。以下の説明では、添え字 i を用いて各層を表現する。すなわち、空気や真空などの雰囲気層を添え字「0」、被測定物 O B J の S i 層 1 を添え字「1」、S i O 層 2 を添え字「2」とする。また、各層における屈折率を添え字 i を用いて、屈折率 n_i と表す。

【0050】

互いに異なる屈折率 n_i をもつ層の界面では光の反射が生じるため、屈折率の異なる i 層と i + 1 層との間の各境界面での P 偏光成分および S 偏光成分の振幅反射率 (Fresnel 係数) $r^{(P)}_{i, i+1}$, $r^{(S)}_{i, i+1}$ は次のように表わすことができる。

【0051】

【数 1】

$$r^{(P)}_{i, i+1} = \frac{n_{i+1} \cos \phi_i - n_i \cos \phi_{i+1}}{n_{i+1} \cos \phi_i + n_i \cos \phi_{i+1}}$$

$$r^{(S)}_{i, i+1} = \frac{n_i \cos \phi_i - n_{i+1} \cos \phi_{i+1}}{n_i \cos \phi_i + n_{i+1} \cos \phi_{i+1}}$$

【0052】

ここで、 ϕ_i は、i 層における入射角である。この入射角 ϕ_i は、以下のような Snell の法則によって、最上層の雰囲気層 (0 層) における入射角から計算できる。

【0053】

$$N_0 \sin \theta_0 = N_i \sin \phi_i$$

光が干渉可能な膜厚をもつ層内では、上式で表される反射率で反射する光が層内を何度も往復する。そのため、隣接する層との界面で直接反射した光と層内を多重反射した後の光との間ではその光路長が異なるため、位相が互いに異なったものとなり、S i 層 1 の表面において光の干渉が生じる。このような、各層内における光の干渉効果を示すために、i 層の層内における光の位相角 ϕ_i を導入すると、以下のように表わすことができる。

【0054】

10

20

30

40

50

【数 2】

$$\beta_i = 2\pi \left(\frac{d_i}{\lambda} \right) n_i \cos \phi_i$$

【0055】

ここで、 d_i は i 層の膜厚を示し、 λ は入射光の波長を示す。

より単純化するために、被測定物 O B J に対して垂直に光が照射される場合、すなわち入射角 $\phi_i = 0$ とすると、P 偏光と S 偏光との区別はなくなり、各層間の界面における振幅反射率および薄膜の位相角 β_i は以下ようになる。

10

【0056】

【数 3】

$$r_{01} = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}$$

$$r_{12} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

$$\beta_1 = 2\pi \left(\frac{d_1}{\lambda} \right) n_1$$

20

【0057】

さらに、図 2 に示す 3 層系の被測定物 O B J における反射率 R は、以下ようになる。

【0058】

【数 4】

$$R = \frac{r_{01}^2 + r_{12}^2 + 2r_{01}r_{12} \cos 2\beta_1}{1 + r_{01}^2 r_{12}^2 + 2r_{01}r_{12} \cos 2\beta_1}$$

30

【0059】

上式において、位相角 β_1 についての周波数変換（フーリエ変換）を考えると、位相因子（Phase Factor）である $\cos 2\beta_1$ は反射率 R に対して非線形となる。そこで、この位相因子 $\cos 2\beta_1$ について線形性を有する関数への変換を行う。一例として、この反射率 R を以下の式のように変換し、独自の変数である「波数変換反射率」 R' を定義する。

【0060】

【数 5】

40

$$R' \equiv \frac{R}{1-R} = \frac{r_{01}^2 + r_{12}^2}{(1-r_{01}^2)(1-r_{12}^2)} + \frac{2r_{01}r_{12}}{(1-r_{01}^2)(1-r_{12}^2)} \cos 2\beta_1 \equiv R_a + R_b \cos 2 \left(\frac{2\pi n_1}{\lambda} \right) d_1$$

但し、 $\frac{2\pi n_1}{\lambda}$ は光（電磁波）が物質中すなわち層内を伝播する際の波数 K (propagation number) である。

【0061】

50

この波数変換反射率 R' は、位相因子 $\cos 2K_1 d_1$ についての 1 次式となり、線形性を有することになる。ここで、式中の R_a は波数変換反射率 R' における切片であり、 R_b は波数変換反射率 R' における傾きである。すなわち、この波数変換反射率 R' は、各波長における反射率 R の値を周波数変換に係る位相因子 $\cos 2K_1 d_1$ に対して線形化するための関数である。なお、このような位相因子について線形化するための関数としては、 $1/(1-R)$ という関数を用いてもよい。

【0062】

したがって、対象とする S_i 層 1 内の波数 K_1 は以下のように定義できる。

【0063】

【数 6】

10

$$K_1 \equiv \frac{2\pi n_1}{\lambda}$$

【0064】

ここで、 S_i 層 1 内での波長 λ の光速度を s とし、真空中の波長 λ_0 の光速度を c とすると、屈折率 $n_1 = c/s$ で表される。また、 S_i 層 1 内を x 方向に進行する光によって生じる電磁波 $E(x, t)$ は、波数 K_1 、角周波数 ω 、位相 ϕ を用いて、 $E(x, t) = E_0 \exp[j(\omega t - K_1 x + \phi)]$ と表される。すなわち、 S_i 層 1 内の電磁波の伝搬特性は波数 K_1 に依存する。これらの関係から、真空中において波長 λ_0 をもつ光は、層内ではその光速度が低下するため、波長も λ_0 から λ_0/n_1 まで長くなることがわかる。このような波長分散現象を考慮して、波数変換反射率 R' を以下のように定義する。

20

【0065】

【数 7】

$$R'(K_1) = R_a + R_b \cos 2K_1 d_1$$

【0066】

この関係から、波数変換反射率 R' を波数 K について周波数変換（フーリエ変換）すると、膜厚 d_1 に相当する周期成分にピークが現れることにより、このピーク位置を特定することで、膜厚 d_1 を算出することができる。

30

【0067】

すなわち、被測定物 OBJ から測定される反射率スペクトルと各波長における反射率との対応関係を、各波長から算出される波数と上述の関係式に従って算出される波数変換反射率 R' との対応関係（波数分布特性）に変換し、この波数 K を含む波数変換反射率 R' の関数を波数 K について周波数変換し、この周波数変換後の特性に現れるピークに基づいて、被測定物 OBJ を構成する S_i 層 1 の膜厚を算出できる。これは、波数分布特性に含まれる各波数成分の振幅値を取得し、このうち振幅値の大きな波数成分に基づいて、 S_i 層 1 の膜厚を算出することを意味する。なお、後述するように、波数分布特性から振幅値の大きな波数成分を解析する方法としては、FFT（Fast Fourier Transform：高速フーリエ変換）などの離散的なフーリエ変換を用いる方法と、最大エントロピー法（Maximum Entropy Method；以下、「MEM」とも称す。）などの最適化法を用いる方法とのいずれかを採用することができる。

40

【0068】

波数変換反射率 R' の定義において、 R_a および R_b は、層内における干渉現象とは無関係な値ではあるが、 S_i 層 1 の屈折率 n_1 を含む各層間の界面における振幅反射率に依存する。そのため、屈折率 n_1 が波長分散をもつ場合には、その値は波長（すなわち、波数 K ）に依存する関数値となり、波数 K に関して一定値とはならない。そこで、フーリエ変換を \mathcal{F} で表し、 R' 、 R_a 、 R_b 、 $\cos 2K_1 d_1$ を波数 K でフーリエ変換した後の

50

関数であるパワースペクトルをそれぞれ P , P_a , P_b , F とすると、以下の式が成立する。

【 0 0 6 9 】

【 数 8 】

$$P \supset P_a + (P_b * F)$$

但し、 $*$ はコンボリューションを表す。

10

【 0 0 7 0 】

式中の P_a における膜厚に依存する成分は相対的に小さく、かつパワースペクトル F とは独立のピークをもつので、パワースペクトル F に影響を与えない。

【 0 0 7 1 】

一方、式中の P_b は、パワースペクトル F とコンボリューションされることにより、 P_b における膜厚成分がパワースペクトル F の膜厚成分に変調を加えることになる。しかしながら、 P_b は、層内における干渉現象に無関係であり、隣接する 2 つの層における屈折率の波長依存性のみに影響を受けるため、波数 K に対する P_b の膜厚成分は F の膜厚成分に比較して無視できる程度に小さい。たとえば、 R_b が膜厚 q の周期関数であるとし、そのフーリエ変換後の P_b がコンボリューションによりパワースペクトル F の膜厚成分 d に変調を加えたとなると、スペクトルとして現れるピークは、「 $d - q$ 」または「 $d + q$ 」となるが、 q の値が非常に小さいのでピーク位置 d に対する影響は小さい。

20

【 0 0 7 2 】

さらに、フーリエ変換を行う際には、後述するように、測定対象の層の最大膜厚を考慮して、ナイキストのサンプリング定理に従って、波数変換反射率 R' に対して適切なサンプル間隔およびサンプル数でサンプリングが行なわれる。このようにサンプリングされた波数変換反射率 R' に基づいて算出されたパワースペクトルの膜厚分解能 r に対して、 P_b の膜厚成分 q はより小さい可能性が高く ($q < r$)、膜厚 d の測定結果にはほとんど影響を与えないといえる。

【 0 0 7 3 】

このように、算出された反射率スペクトルを、薄膜における波長分散を考慮した波数についての関数に変換した上で、フーリエ変換を行うことにより、薄膜の膜厚を正確に算出することができる。

30

【 0 0 7 4 】

なお、上述の説明では、反射率スペクトルを用いる場合について例示したが、透過率スペクトルを用いてもよい。この場合には、測定された透過率を T 、「波数変換透過率」を T' とすると、以下のような関係式で表される。

【 0 0 7 5 】

【 数 9 】

$$T' \equiv \frac{1}{T} = T_a + T_b \cos 2Kd_1$$

40

【 0 0 7 6 】

透過率スペクトルを用いる場合においても、透過率 T は位相因子 $\cos 2\delta_1$ に対して非線形となる。そのため、上述したのと同様の理由から、位相因子 $\cos 2\delta_1$ について線形性を有する波数変換透過率 T' を採用する。上式によれば、波数変換透過率 T' は、位相因子 $\cos 2\delta_1$ についての 1 次式となり、上述したのと同様の手順に従って、薄膜の膜厚を正確に算出することができる。すなわち、この波数変換透過率 T' は、各波長に

50

おける透過率 T の値を周波数変換に係る位相因子 $\cos 2\theta_1$ に対して線形化するための関数である。

【 0 0 7 7 】

再度、図 2 を参照して、 SiO_2 層 2 とベース Si 層 3 との界面で反射して生じる反射光について考える。 Si 層 1 の屈折率を n_1 、膜厚を d_1 とし、 SiO_2 層 2 の屈折率を n_2 、膜厚を d_2 とすると、波数変換反射率 R' は以下のように表される。

【 0 0 7 8 】

【 数 1 0 】

$$R' = R_a + R_b \cos 2K_1 d_1 + R_c \cos 2K_2 d_2 + R_d \cos 2(K_1 d_1 + K_2 d_2) + R_e \cos 2(K_1 d_1 - K_2 d_2)$$

10

$$\text{但し、} K_1 \equiv \frac{2\pi n_1}{\lambda}, K_2 \equiv \frac{2\pi n_2}{\lambda} \text{ である。}$$

【 0 0 7 9 】

ここで、 Si 層 1 の膜厚 d_1 および SiO_2 層 2 の膜厚 d_2 を分離して算出する場合には、波数 K_1 、 K_2 でそれぞれ変換した波数変換反射率 $R_1'(K_1)$ 、 $R_2'(K_2)$ を用いる。具体的には、以下のように表される。

20

【 0 0 8 0 】

【 数 1 1 】

$$R_1'(K_1) = R_a + R_b \cos 2K_1 d_1 + R_c \cos 2K_1 d_2' + R_d \cos 2K_1 (d_1 + d_2') + R_e \cos 2K_1 (d_1 - d_2')$$

$$R_2'(K_2) = R_a + R_b \cos 2K_2 d_1' + R_c \cos 2K_2 d_2 + R_d \cos 2K_2 (d_1' + d_2) + R_e \cos 2K_2 (d_1' - d_2)$$

30

$$\text{但し、} d_1' = \frac{n_1}{n_2} d_1, d_2' = \frac{n_2}{n_1} d_2 \text{ である。}$$

【 0 0 8 1 】

これらの式中において、 d_1' および d_2' は正しい膜厚ではないが、波数変換反射率 $R_1'(K_1)$ の第 2 項に相当するパワースペクトル中のピークから本来の膜厚 d_1 を求めることができ、かつ波数変換反射率 $R_2'(K_2)$ の第 3 項に相当するパワースペクトル中のピークから本来の膜厚 d_2 を求めることができる。

【 0 0 8 2 】

なお、実際には、 Si 層 1 および SiO_2 層 2 は、その屈折率が近似しており、両者の界面における反射率は、他の界面における反射率に比較して相対的に小さくなることが多い。その結果、波数変換反射率の関数に含まれる R_b や R_d に比較して、 R_c の値が小さくなり、パワースペクトルから、波数変換反射率 $R_2'(K_2)$ の第 3 項に相当するピークを識別することが困難である場合も多い。このような場合には、波数変換反射率 $R_2'(K_2)$ の第 4 項に相当するパワースペクトルのピーク位置 ($d_1' + d_2$) と、波数変換反射率 $R_2'(K_2)$ の第 2 項に相当するパワースペクトルのピーク位置 (d_1') とを算出した上で、両者の差をとることで、膜厚 d_2 を算出することができる。

40

【 0 0 8 3 】

< 波長範囲および波長分解能について >

図 3 は、本実施の形態に従う膜厚測定装置 100 を用いて SOI 基板を測定した場合の

50

測定結果を示す図である。なお、図3には、測定光として、波長範囲が900～1600nmであるものを用いた場合（図3（a））、および波長範囲が1340～1600nmであるものを用いた場合（図3（b））の測定例を示す。なお、測定波長に応じて回折格子62を適切な特性を有するものを選択し、反射光が入射する検出部64（図1）での検出ポイント数（検出チャンネル数）はいずれも同一（たとえば、512チャンネル）であるとした。言い換えれば、波長範囲が狭いほど、検出ポイントあたりの波長間隔（すなわち、波長分解能）は小さくなる。

【0084】

上述の解析的検討によれば、測定される反射率は、波長に対して周期的に変化するはずである。

【0085】

図3（a）に示す測定結果においては、反射率が波長に対して周期的に変化している兆候は見られるものの、膜厚を測定するには十分な精度は得られていない。

【0086】

これに対して、図3（b）に示す測定結果においては、反射率のピークおよびバレーが明りょうに現れており、反射率の変化周期についても測定が可能となっている。図3（c）は、図3（b）に示される測定結果（反射率スペクトル）を上述した波数変換反射率 R' の関数に変換した上で、波数 K について周波数変換した結果を示す。この図3（c）に現れる主ピークに対応する値がSi層1の膜厚として決定できる。

【0087】

さらに、図4および図5には、SOI基板の別の測定結果を示す。

図4は、本実施の形態に従う膜厚測定装置100を用いてSOI基板を測定した別の測定結果を示す図である。図4には、Si層1の膜厚が10.0 μm （設計値）であり、SiO₂層2の膜厚が0.3 μm （設計値）である場合の測定例を示す。また、図4（a）には、可視帯域（330～1100nm）の波長成分をもつ測定光を用いた場合を示し、図4（b）には、赤外帯域（900～1600nm）の波長成分をもつ測定光を用いた場合を示す。なお、上述したように、検出部64（図1）での検出ポイント数（検出チャンネル数）はいずれも同一である。

【0088】

図4（a）に示すように、可視帯域の波長成分をもつ測定光を用いた場合には、約860nmより長い波長領域では、反射率が周期的な挙動を示すものの、それより短い可視帯域では、有意な周期的変化を生じていないことがわかる。これに対して、図4（b）に示すように、赤外帯域の波長成分をもつ測定光を用いた場合には、反射率の周期的変化が有意に現れていることがわかる。

【0089】

また、図5は、本実施の形態に従う膜厚測定装置100を用いてSOI基板を測定したさらに別の測定結果を示す図である。図5には、Si層1の膜厚が80.0 μm （設計値）であり、SiO₂層2の膜厚が0.1 μm （設計値）である場合の測定例を示す。また、図5（a）には、赤外帯域（900～1600nm）の波長成分をもつ測定光を用いた場合を示し、図5（b）には、より狭い赤外帯域（1470～1600nm）の波長成分をもつ測定光を用いた場合を示す。なお、上述したように、検出部64（図1）での検出ポイント数（検出チャンネル数）はいずれも同一である。

【0090】

図5（a）に示すように、赤外帯域の波長成分をもつ測定光を用いた場合であっても、測定された反射率には有意な周期的変化が現れていないことがわかる。これに対して、図5（b）に示すように、より狭い赤外帯域の波長成分をもつ測定光を用いた場合には、反射率の周期的変化が有意に現れていることがわかる。

【0091】

以上の測定例によれば、比較的厚みのある層の膜厚を高い精度で測定するためには、測定光の波長範囲および波長分解能を適切に設定する必要があるといえる。これは、層内で

10

20

30

40

50

の光干渉現象を利用する測定方法であること、および検出部 6 4 による反射光の波長分解能が有限であることに起因するものであり、以下に説明するような手順によって、適切な測定光の波長を設定することが好ましい。

【 0 0 9 2 】

以下の検討では、膜厚測定範囲の下限値を d_{\min} とし、膜厚測定範囲の上限値を d_{\max} とする。また、検出部 6 4 の波長検出の下限値を λ_{\min} とし、検出部 6 4 の波長検出の上限値を λ_{\max} とする。なお、測定用光源 1 0 (図 1) が照射する測定光の波長範囲は、検出部 6 4 の波長検出範囲を含むものであれば、いずれの範囲であってもよい。さらに、検出部 6 4 (図 1) での検出ポイント数 (検出チャンネル数) を S_p とする。

【 0 0 9 3 】

図 6 は、この発明の実施の形態に従う膜厚測定範囲と検出部 6 4 の検出波長範囲および検出ポイント数との関係を説明するための図である。

【 0 0 9 4 】

(1) 膜厚測定範囲の下限値 d_{\min} と検出波長範囲との関係

上述した膜厚の測定方法によれば、対象の被測定物内で光干渉を生じる波長を見つける必要があるので、検出部 6 4 が光干渉を生じ得る波長範囲をもつ必要がある。すなわち、図 6 (a) に示すように、被測定物に対して測定される反射率波形が検出部 6 4 の検出波長範囲において 1 周期以上変化する必要がある。

【 0 0 9 5 】

これは、検出部 6 4 の検出波長範囲が下限値 λ_{\min} から上限値 λ_{\max} まで変化することで生じる光学的距離が被測定物の膜厚の往復分以上変化する必要があることを意味する。したがって、膜厚測定範囲の下限値 d_{\min} と測定光の波長範囲との関係としては、以下の条件式 (1) を満たす必要がある。

【 0 0 9 6 】

【 数 1 2 】

$$d_{\min} \geq \frac{\lambda_{\min} \cdot \lambda_{\max}}{2(\lambda_{\max} \cdot n_{\min} - \lambda_{\min} \cdot n_{\max})} \quad \dots (1)$$

但し、 n_{\min} は、波長 λ_{\min} における屈折率

n_{\max} は、波長 λ_{\max} における屈折率

【 0 0 9 7 】

(2) 膜厚測定範囲の上限値 d_{\max} と検出ポイント数との関係

図 6 (b) に示すように、測定光の波長が長くなるほど、被測定物に対して測定される反射率波形の周期は長くなる。図 6 (c) に示す反射率波形は、図 6 (b) に示す反射率波形を波数 ($1/f$) の座標に変換したものである。このとき、InGaAs などの各アレイ素子が波長について等間隔に配置されているとすると、波数に対する各アレイ素子の配置間隔は波数が小さくなるほど広がることわかる。

【 0 0 9 8 】

したがって、波数に対して所定の周期で変化する反射率波形を正確にサンプリングするためには、この各アレイ素子の配置間隔 (波長分解能) がナイキストのサンプリング定理を満たす必要があり、このサンプリング定理が満たされるという条件によって、膜厚測定範囲の上限値 d_{\max} が決定される。

【 0 0 9 9 】

検出部 6 4 における波長分解能 $\Delta\lambda$ は、検出ポイント数 (検出チャンネル数) S_p を用いて、 $\Delta\lambda = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) / S_p$ と表わすことができる。

【 0 1 0 0 】

測定光の波長が長くなるほど反射率波形の周期は短くなるので、反射率波形において測

10

20

30

40

50

定光の上限値 d_{\max} において極値（ピークまたはバレイ）が生じるとした場合に、当該極値と隣接する極値（ピークに隣接するピーク、またはバレイに隣接するバレイ）を生じる波長を λ_1 とすると、膜厚測定範囲の上限値 d_{\max} との間に、以下の条件が満たされる必要がある。

【 0 1 0 1 】

【数 1 3】

$$d_{\max} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_{\max}}{2(\lambda_{\max} \cdot n_1 - \lambda_1 \cdot n_{\max})}$$

10

【 0 1 0 2 】

ここで、測定対象の層の膜厚が比較的大きな場合には、 $n_{\max} \approx n_1$ とみなすことができるので、上述の条件は、以下のような条件式（ 2 ）として表わすことができる。

【 0 1 0 3 】

【数 1 4】

$$d_{\max} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_{\max}}{2 \cdot n_{\max} (\lambda_{\max} - \lambda_1)} \quad \dots (2)$$

20

【 0 1 0 4 】

このとき、波長分解能 S_p については、以下の条件が満たされる必要がある。

【 0 1 0 5 】

【数 1 5】

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{S_p} \leq \frac{\lambda_{\max} - \lambda_1}{2}$$

30

【 0 1 0 6 】

上述の波長分解能 S_p の関係式に、上限値 d_{\max} の関係式を代入して λ_1 の項をなくすと、以下のような条件式（ 3 ）として表わすことができる。

【 0 1 0 7 】

【数 1 6】

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{S_p} \leq \frac{\lambda_{\max}^2}{2(\lambda_{\max} + 2 \cdot n_{\max} \cdot d_{\max})} \quad \dots (3)$$

40

【 0 1 0 8 】

以上の検討の結果、被測定物について要求される膜厚測定範囲（下限値 d_{\min} ～ 上限値 d_{\max} ）が予め定められると、上述の条件式（ 1 ）および（ 2 ）を満足するように、測定光の波長範囲（下限値 λ_{\min} ～ 上限値 λ_{\max} ）および検出ポイント数 S_p を定める必要がある。

【 0 1 0 9 】

< 計算例 >

図 2 に示すような S O I 基板の S i 層 1 の膜厚を測定する場合に必要なとされる条件について計算した一例を以下に示す。

【 0 1 1 0 】

50

この計算例では、SOI基板のSi層1の上限値 d_{max} が $100\mu m$ であるとし、屈折率 n が波長に依らず一定値($n = 3.5$)であるとした。なお、この計算例では、SOI基板のSi層1の下限値 d_{min} については考慮していない。

【0111】

上記の前提となる値を上述のそれぞれの条件式(2)および(3)に代入すると、上限値 $d_{max} = 1424.0nm$ 、波長分解能 $\Delta\lambda = 1.445375nm$ と算出される。したがって、最大 $100\mu m$ の膜厚をもつ被測定物の膜厚測定を行うために、512チャンネルの検出部64を用いた場合には、約 $684 \sim 1424nm$ の波長範囲を含む測定光を用いて、検出部64で当該範囲の反射光を検出(波長分解能 $\Delta\lambda = 1.4453125nm$)すればよいことがわかる。

10

【0112】

但し、上記の条件式によって算出される波長分解能 $\Delta\lambda$ は、理論上の最低限のスペックを記述したものであり、実際に測定を行う場合には、算出された波長分解能 $\Delta\lambda$ に比較して精度をより高くすることが好ましい。なお、より好ましくは、数倍程度(たとえば、2~4倍)にすることがよい。なお、精度を高くすることは、波長分解能 $\Delta\lambda$ の値をより小さく設定することを意味する。

【0113】

すなわち、実際の膜厚測定装置では、被測定物への測定光の入射角の影響や、レンズ集光系を用いたときの開口角の影響などによって、スペクトル精度が劣化する場合がある。このような場合には、パワースペクトル上のピーク高さが小さくなり、膜厚の算出が困難になる。また、有限個のサンプリング値を用いて離散的に周波数変換を行うFFTなどを用いた場合には、エリアシングの影響を受けて、波数変換時などの変換誤差が大きく生じる場合もある。さらに、被測定物の屈折率分散が測定光の波長範囲によっては大きく変化するものもあり、部分的に条件に合致しない可能性もある。

20

【0114】

図7は、理論値に近い波長分解能をもつ膜厚測定装置を用いて測定した結果をシミュレーションした結果を示す図である。図8は、理論値に対して精度を2倍にした波長分解能をもつ膜厚測定装置を用いて測定した結果をシミュレーションした結果を示す図である。なお、対象とする被測定物の膜厚は $100\mu m$ であるとした。

【0115】

より具体的には、図7(a)には、512チャンネルの検出部64を用いて、 $900nm \sim 1600nm$ の範囲で反射率スペクトルを測定(波長分解能 $\Delta\lambda = 2.734375nm$)した結果を示し、図7(b)には、図7(a)に示す反射率スペクトルを周波数変換(ここでは、FFT変換)したパワースペクトルを示す。図7(b)に示すように、この場合には、 $100\mu m$ の付近にピークが存在しているものの、薄膜側のノイズ(ゴースト)に比較してそのレベルは小さく、膜厚の決定が難しい場合もある。

30

【0116】

一方、図8(a)には、検出部64における波長分解能の精度が理論値の2倍となるように波長範囲を定めた場合の測定結果を示し、図8(b)には、図8(a)に示す反射率スペクトルを周波数変換(ここでは、FFT変換)したパワースペクトルを示す。この例では、検出部64の波長分解能 $\Delta\lambda$ が $1.3671875nm$ となるように、検出ポイント数および波長範囲を定めている。図8(b)に示すように、この場合には、本来の膜厚である $100\mu m$ の付近に強いピークが現れており、被測定物の膜厚を正確に測定できることを意味している。

40

【0117】

<膜厚算出処理の概要>

上述したように、被測定物の膜厚は、反射率スペクトルの周期性に基づいて算出することができる。すなわち、検出された反射率スペクトルを周波数変換してパワースペクトルを求め、このパワースペクトルに現れるピークから膜厚を算出できる。このようなパワースペクトルは、現実的にはFFTなどの離散的なフーリエ変換法によって算出される。し

50

かしながら、FFTでは周期性を十分に反映したパワースペクトルを得られない場合もある。そのため、本実施の形態に従う膜厚測定装置100は、パワースペクトルの算出方法として、FFTなどの離散的なフーリエ変換に加えて、MEMなどの最適化法を実行可能に構成される。すなわち、本実施の形態に従う膜厚測定装置100は、検出された反射率スペクトルに応じて、フーリエ変換および最適化法を選択的または併合的に実行する。なお、MEMの処理の詳細については、「科学計測のための波形データ処理 計測システムにおけるマイコン/パソコン活用技術」、南茂夫編著、CQ出版社、1992年8月1日第10版発行などに詳しいので、そちらを参照されたい。

【0118】

さらに、本実施の形態に従う膜厚測定装置100は、上述したような検出された反射率スペクトルから解析的に膜厚を算出する方法に加えて、測定対象から算出される物理モデルから理論的に算出される反射率スペクトルと実際に検出された反射率スペクトルとの偏差に基づいて、測定対象の光学的特性値を探索的に算出する、いわゆるフィッティングと称される方法も実行可能に構成される。

【0119】

ところで、図2に示すSOI基板のように、第2層であるSiO₂層2の膜厚に比較して、第1層のSi層1の膜厚が2桁以上大きいような被測定物については、フィッティング法では各層の膜厚を十分な精度で算出できない場合もある。

【0120】

図9は、SOI基板についての反射率スペクトルの測定結果を示す図である。図9には、第1層のSi層1の膜厚が100μmであり、第2層であるSiO₂層2の膜厚を0.48~0.52μmの範囲で0.1μm刻みで変化させた場合の測定例を示す。図9に示されているように、第2層であるSiO₂層2の膜厚が変化しても、測定される反射率スペクトルにはあまり大きな変化が生じていないことがわかる。すなわち、このような被測定物から測定される反射率スペクトルでは、第1層のSi層1の影響が主体的であるため、第2層であるSiO₂層2のパラメータを変化させたとしても、十分にフィッティングできないことを意味する。

【0121】

そこで、本実施の形態に従う膜厚測定装置100は、SOI基板などのように、異なる複数の層を有する被測定物について、各層の膜厚を独立して正確に解析できるように、上述したフーリエ変換、最適化法、フィッティング法のうちいずれか1つ、もしくは複数を適宜組み合わせる。以下、本実施の形態に従う膜厚測定装置100における膜厚算出処理の詳細について説明する。なお、このような膜厚算出処理は、データ処理部70(図1)によって実行される。

【0122】

<データ処理部の構成>

図10は、この発明の実施の形態に従うデータ処理部70の概略のハードウェア構成を示す模式図である。

【0123】

図10を参照して、データ処理部70は、代表的にコンピュータによって実現され、オペレーティングシステム(OS: Operating System)を含む各種プログラムを実行するCPU(Central Processing Unit)200と、CPU200でのプログラムの実行に必要なデータを一時的に記憶するメモリ部212と、CPU200で実行されるプログラムを不揮発的に記憶するハードディスク部(HDD: Hard Disk Drive)210とを含む。また、ハードディスク部210には、後述するような処理を実現するためのプログラムが予め記憶されており、このようなプログラムは、フレキシブルディスクドライブ(FDD)216またはCD-ROMドライブ214によって、それぞれフレキシブルディスク216aまたはCD-ROM(Compact Disk-Read Only Memory)214aなどから読み取られる。

【0124】

CPU 200は、キーボードやマウスなどからなる入力部208を介してユーザなどからの指示を受取るとともに、プログラムの実行によって測定される測定結果などをディスプレイ部204へ出力する。各部は、バス202を介して互いに接続される。

【0125】

<演算処理構造>

本実施の形態に従うデータ処理部70は、被測定物の各層のパラメータ（材質、膜厚、膜厚範囲、屈折率、消衰係数など）のうち未知の値の種類や数、および解析精度などに応じて、以下に示す処理パターン1～6のいずれかを選択して実行することが可能である。なお、以下の説明では、図2に示すSOI基板のように、積層された2層（それぞれ「第1層」および「第2層」とも称す。）の膜厚をそれぞれ独立に算出する場合について例示するが、同様の手順によって、より多くの積層された膜厚をそれぞれ独立に算出することが可能である。

10

【0126】

（1）処理パターン1

処理パターン1は、第1層および第2層の屈折率および消衰係数が既知である場合に実行可能な膜厚算出処理である。この処理パターン1では、各層の膜厚はいずれもフィッティング法によって決定される。なお、フィッティング法として、代表的に、最小二乗法を用いる場合について例示する。

【0127】

図11は、この発明の実施の形態に従う処理パターン1に係る膜厚算出処理を実行する制御構造を示すブロック図である。図11に示すブロック図は、CPU200がハードディスク部210などの予め格納されたプログラムをメモリ部212などに読み出して実行することで実現される。

20

【0128】

図11を参照して、データ処理部70（図1）は、バッファ部71と、モデル化部721と、フィッティング部722とをその機能として含む。

【0129】

バッファ部71は、分光測定部60（図1）から出力される実測された反射率スペクトル $R(\lambda)$ を一時的に格納する。より具体的には、分光測定部60からは所定の波長分解能毎に反射率の値が出力されるので、バッファ部71は、波長とその波長における反射率とを対応付けて格納する。

30

【0130】

モデル化部721は、被測定物に係るパラメータを受付けて、当該受付けたパラメータに基づいて、被測定物における理論反射率を示すモデル式（関数）を決定し、当該決定した関数に従って、各波長における理論反射率（スペクトル）を算出する。この算出した各波長における理論反射率は、フィッティング部722へ出力される。より具体的には、モデル化部721は、第1層の屈折率 n_1 および消衰係数 k_1 と、第2層の屈折率 n_2 および消衰係数 k_2 とを受付けるとともに、第1層の膜厚 d_1 の初期値および第2層の膜厚 d_2 の初期値を受付ける。なお、ユーザが各パラメータを入力してもよいが、予め標準的な材質のパラメータをファイルなどとして格納しておき、必要に応じて読出すようにしてもよい。また、必要に応じて、雰囲気層の屈折率 n_0 および消衰係数 k_0 についても入力される。

40

【0131】

理論反射率を示すモデル式については、上述した3層系の被測定物OBJにおける反射率 R と同様であり、少なくとも各層の膜厚の値を含む関数となる。

【0132】

また、モデル化部721は、後述するフィッティング部722からのパラメータ更新指令に従って、理論反射率を示す関数を更新し、更新後の関数に従って、各波長における理論反射率（スペクトル）を繰返し算出する。より具体的には、モデル化部721は、パラメータとして、第1層の膜厚 d_1 および第2層の膜厚 d_2 を順次更新する。

50

【 0 1 3 3 】

フィッティング部 7 2 2 は、バッファ部 7 1 から反射率スペクトルの実測値を読み出し、モデル化部 7 2 1 から出力される反射率スペクトルの理論値との間の二乗偏差を各波長について順次算出する。そして、フィッティング部 7 2 2 は、各波長における偏差から残差を算出し、この残差が所定のしきい値以下であるか否かを判断する。すなわち、フィッティング部 7 2 2 は、現時点のパラメータにおいて収束しているか否かを判断する。

【 0 1 3 4 】

残差が所定のしきい値以下でなければ、フィッティング部 7 2 2 は、モデル化部 7 2 1 に対してパラメータ更新指令を与え、新たに反射率スペクトルの理論値が出力されるまで待つ。一方、残差が所定のしきい値以下であれば、フィッティング部 7 2 2 は、現時点の第 1 層の膜厚 d_1 および第 2 層の膜厚 d_2 を解析値として出力する。

10

【 0 1 3 5 】

図 1 2 は、この発明の実施の形態に従う処理パターン 1 に係る膜厚算出処理の手順を示すフローチャートである。

【 0 1 3 6 】

図 1 2 を参照して、まず、ユーザが被測定物（試料）をステージ 5 0（図 1）上に配置する（ステップ S 1 0 0）。続いて、ユーザが測定準備指令を与えると、観察用光源 2 2（図 1）からは観察光の照射が開始される。ユーザは、表示部 3 9 に表示される観察用カメラ 3 8 で撮影された反射像を参照しながら、可動機構 5 1 にステージ位置指令を与えて、測定範囲の調整や焦点合わせを行う（ステップ S 1 0 2）。

20

【 0 1 3 7 】

測定範囲の調整や焦点合わせの完了後、ユーザが測定開始指令を与えると、測定用光源 1 0（図 1）から測定光の発生が開始される。分光測定部 6 0 は、被測定物からの反射光を受光し、当該反射光に基づく反射率スペクトルをデータ処理部 7 0 へ出力する（ステップ S 1 0 4）。続いて、データ処理部 7 0 の CPU 2 0 0 は、分光測定部 6 0 で検出された反射率スペクトルをメモリ部 2 1 2 などに一時的に格納する（ステップ S 1 0 6）。その後、データ処理部 7 0 の CPU 2 0 0 が以下に示す膜厚算出処理を実行する。

【 0 1 3 8 】

CPU 2 0 0 は、ディスプレイ部 2 0 4（図 2）などに入力画面を表示して、ユーザにパラメータの入力を促す（ステップ S 1 0 8）。ユーザは、表示された入力画面上などから、被測定物の第 1 層の屈折率 n_1 および消衰係数 k_1 と、被測定物の第 2 層の屈折率 n_2 および消衰係数 k_2 とを入力するとともに、被測定物に係る第 1 層の膜厚 d_1 および第 2 層の膜厚 d_2 の初期値を入力する（ステップ S 1 1 0）。

30

【 0 1 3 9 】

さらに、CPU 2 0 0 は、ユーザ入力されたパラメータに基づいて、反射率スペクトルの理論値を算出する（ステップ S 1 1 2）。続いて、CPU 2 0 0 は、メモリ部 2 1 2 などに格納されている反射率スペクトルの実測値と反射率スペクトルの理論値との間の二乗偏差を各波長について順次算出し、両者の間の残差を算出する（ステップ S 1 1 4）。さらに、CPU 2 0 0 は、算出した残差が所定のしきい値以下であるか否かを判断する（ステップ S 1 1 6）。

40

【 0 1 4 0 】

算出した残差が所定のしきい値以下でない場合（ステップ S 1 1 6 において NO の場合）には、CPU 2 0 0 は、第 1 層の膜厚 d_1 および第 2 層の膜厚 d_2 の現在値を変更する（ステップ S 1 1 8）。なお、膜厚 d_1 および d_2 をどの方向にどの程度変更するかについては、残差の発生度合いに応じて決定される。そして、処理はステップ S 1 1 2 に戻る。

【 0 1 4 1 】

これに対して、算出した残差が所定のしきい値以下である場合（ステップ S 1 1 6 において YES の場合）には、CPU 2 0 0 は、第 1 層の膜厚 d_1 および第 2 層の膜厚 d_2 の現在値を被測定物の各層の膜厚（解析値）として出力する（ステップ S 1 2 0）。そして

50

、処理は終了する。

【 0 1 4 2 】

なお、図 1 1 に示すブロック図では、屈折率 n_1 , n_2 および消衰係数 k_1 , k_2 として固定値を入力する構成について例示したが、波長分散を考慮した屈折率および消衰係数を用いてもよい。たとえば、波長分散を考慮した屈折率および消衰係数としては、以下に示すようなCauchyモデルの式を用いてもよい。

【 0 1 4 3 】

【 数 1 7 】

$$n(\lambda) = \frac{a}{\lambda^4} + \frac{b}{\lambda^2} + c$$

10

$$k(\lambda) = \frac{d}{\lambda^4} + \frac{e}{\lambda^2} + f$$

但し、 a, b, c, d, e, f は層に依存する係数である。

【 0 1 4 4 】

このような式を用いる場合には、式中の各係数についても予め初期値または既知の値を入力しておき、これらの係数についてもフィッティング対象とされる。

【 0 1 4 5 】

20

あるいは、以下に示すようなSellmeierモデルの式を用いてもよい。

【 0 1 4 6 】

【 数 1 8 】

$$n(\lambda) = \sqrt{f + \frac{g\lambda^2}{\lambda^2 - h}}$$

但し、 f, g, h は Sellmeier の係数であり、 λ は波長である。

30

【 0 1 4 7 】

(2) 処理パターン 2

処理パターン 2 は、第 1 層および第 2 層の屈折率および消衰係数が既知である場合に実行可能な膜厚算出処理である。この処理パターン 2 では、膜厚の大きい第 1 層を離散的なフーリエ変換を用いた周波数変換によって求め、この第 1 層の膜厚を固定値として、第 2 層の膜厚をフィッティング法によって決定する。なお、フィッティング法として、代表的に、最小二乗法を用いる場合について例示する。

【 0 1 4 8 】

図 1 3 は、この発明の実施の形態に従う処理パターン 2 に係る膜厚算出処理を実行する制御構造を示すブロック図である。図 1 3 に示すブロック図は、CPU 2 0 0 がハードディスク部 2 1 0 などの予め格納されたプログラムをメモリ部 2 1 2 などに読み出して実行することで実現される。

40

【 0 1 4 9 】

図 1 3 を参照して、データ処理部 7 0 (図 1) は、バッファ部 7 1 と、波数変換部 7 3 1 と、バッファ部 7 3 2 と、フーリエ変換部 7 3 3 と、ピーク探索部 7 3 4 と、モデル化部 7 3 5 と、フィッティング部 7 3 6 とをその機能として含む。

【 0 1 5 0 】

バッファ部 7 1 は、分光測定部 6 0 (図 1) から出力される実測された反射率スペクトル R () を一時的に格納する。なお、その具体的な構成に処理内容については、上述し

50

たので詳細な説明は繰返さない。

【0151】

波数変換部731は、第1層に係るパラメータ（屈折率 n_1 および消衰係数 k_1 ）を受付けて、当該受付けたパラメータに基づいて、バッファ部71に一時的に格納される反射率スペクトル $R(\lambda)$ を波数変換する。すなわち、波数変換部731は、反射率スペクトル $R(\lambda)$ における各波長とその波長における反射率との対応関係を、各波長についての波数 $K_1(\lambda)$ と上述の関係式に従って算出される対応の波数変換反射率 $R_1'(K_1)$ との対応関係に変換する。より具体的には、波数変換部731は、バッファ部71に格納される波長毎に、波数 $K_1(\lambda)$ および波数変換反射率 $R_1'(\lambda)$ （ $= R(\lambda) / (1 - R(\lambda))$ ）を順次算出し、バッファ部732へ出力する。

10

【0152】

バッファ部732は、波数変換部731から順次出力される波数 $K_1(\lambda)$ と波数変換反射率 $R_1'(\lambda)$ とを対応付けて格納する。すなわち、バッファ部732には、波数 $K_1(\lambda)$ に関する波数変換反射率の波数分布特性である波数変換反射率 $R_1'(K_1)$ が格納される。

【0153】

フーリエ変換部733は、バッファ部732に格納される波数変換反射率 $R_1'(K_1)$ を波数 K_1 についてフーリエ変換を行って、パワースペクトル P_1 を算出する。なお、フーリエ変換の方法としては、高速フーリエ変換（FFT）や離散コサイン変換（DCT: Discrete Cosine Transform）などを用いることができる。

20

【0154】

ピーク探索部734は、フーリエ変換部733によって算出されたパワースペクトル P_1 の中に現れるピークを探索し、当該ピークに対応する膜厚を取得し、第1層の膜厚 d_1 として出力する。

【0155】

モデル化部735は、被測定物に係るパラメータを受付けて、当該受付けたパラメータに基づいて、被測定物における理論反射率を示すモデル式（関数）を決定し、当該決定した関数に従って、各波長における理論反射率（スペクトル）を算出する。この算出した各波長における理論反射率は、フィッティング部736へ出力される。より具体的には、モデル化部735は、ピーク探索部734から出力される第1層の膜厚 d_1 と、第2層の屈折率 n_2 および消衰係数 k_2 とを受付けるとともに、第2層の膜厚 d_2 の初期値を受付ける。なお、ユーザが各パラメータを入力してもよいが、予め標準的な材質のパラメータをファイルなどとして格納しておき、必要に応じて読出すようにしてもよい。理論反射率を示すモデル式については、上述した3層系の被測定物OBJにおける反射率 R と同様であり、少なくとも各層の膜厚の値を含む関数となる。

30

【0156】

また、モデル化部735は、フィッティング部736からのパラメータ更新指令に従って、理論反射率を示す関数を更新し、更新後の関数に従って、各波長における理論反射率（スペクトル）を再度算出する。より具体的には、モデル化部735は、パラメータとして、第2層の膜厚 d_2 を順次更新する。

40

【0157】

フィッティング部736は、バッファ部71から反射率スペクトルの実測値を読み出し、モデル化部735から出力される反射率スペクトルの理論値との間の二乗偏差を各波長について順次算出する。そして、フィッティング部736は、各波長における偏差から残差を算出し、この残差が所定のしきい値以下であるか否かを判断する。すなわち、フィッティング部736は、現時点のパラメータにおいて収束しているか否かを判断する。

【0158】

残差が所定のしきい値以下でなければ、フィッティング部736は、モデル化部735に対してパラメータ更新指令を与え、新たに反射率スペクトルの理論値が出力されるまで待つ。一方、残差が所定のしきい値以下であれば、フィッティング部736は、現時点の

50

第1層の膜厚 d_1 および第2層の膜厚 d_2 を解析値として出力する。

【0159】

図14は、この発明の実施の形態に従う処理パターン2に係る膜厚算出処理の手順を示すフローチャートである。図14に示すフローチャートの各ステップのうち、ステップS100～S108の処理については、図12に示すフローチャートの同一符号を付した各ステップと同様であるので、詳細な説明は繰返さない。以下、図12に示すフローチャートと異なるステップS132以降の膜厚算出処理について説明する。

【0160】

ステップS132において、ユーザは、表示された入力画面上などから、被測定物の第1層の屈折率 n_1 および消衰係数 k_1 、ならびに被測定物の第2層の屈折率 n_2 および消衰係数 k_2 を入力するとともに、第2層の膜厚 d_2 の初期値を入力する。

10

【0161】

すると、CPU200は、入力された第1層の屈折率 n_1 および消衰係数 k_1 に基づいて、メモリ部212などに格納されている反射率スペクトルを波数変換する（ステップS134）。そして、CPU200は、この波数変換して得られる波数変換反射率をメモリ部212などに格納する（ステップS136）。さらに、CPU200は、波数変換反射率を波数 K_1 についてフーリエ変換を行って、パワースペクトルを算出する（ステップS138）。さらに、CPU200は、算出したパワースペクトルに現れるピークおよびそのピークに対応する膜厚を第1層の膜厚 d_1 として取得する（ステップS140）。

【0162】

20

続いて、CPU200は、ステップS210で取得された第1層の膜厚 d_1 と、ユーザ入力された第2層に係るパラメータとに基づいて、反射率スペクトルの理論値を算出する（ステップS142）。そして、CPU200は、メモリ部212などに格納されている反射率スペクトルの実測値と反射率スペクトルの理論値との間の二乗偏差を各波長について順次算出し、両者の間の残差を算出する（ステップS144）。さらに、CPU200は、算出した残差が所定のしきい値以下であるか否かを判断する（ステップS146）。

【0163】

算出した残差が所定のしきい値以下でない場合（ステップS146においてNOの場合）には、CPU200は、第2層の膜厚 d_2 の現在値を変更する（ステップS148）。なお、膜厚 d_2 をどの方向にどの程度変更するかについては、残差の発生度合いに応じて決定される。そして、処理はステップS142に戻る。

30

【0164】

これに対して、算出した残差が所定のしきい値以下である場合（ステップS146においてYESの場合）には、CPU200は、第1層の膜厚 d_1 および第2層の膜厚 d_2 の現在値を被測定物の各層の膜厚（解析値）として出力する（ステップS150）。そして、処理は終了する。

【0165】

なお、上述の処理パターン1と同様に、波長分散を考慮した屈折率および消衰係数を用いてもよい。その詳細な関数については、上述したので、詳細な説明は繰返さない。

【0166】

40

（3）処理パターン3

処理パターン3は、第1層および第2層の屈折率および消衰係数が既知である場合に実行可能な膜厚算出処理である。この処理パターン3は、上述の処理パターン2に比較して、第1層の膜厚の算出に際して、フーリエ変換ではなく最適化法を用いる点が異なる。その他の処理については、上述の処理パターン2と同様である。

【0167】

図15は、この発明の実施の形態に従う処理パターン3に係る膜厚算出処理を実行する制御構造を示すブロック図である。図15に示すブロック図は、CPU200がハードディスク部210などの予め格納されたプログラムをメモリ部212などに読み出して実行することで実現される。

50

【0168】

図15を参照して、データ処理部70(図1)は、バッファ部71と、最適化演算部741と、モデル化部742と、フィッティング部743とをその機能として含む。

【0169】

バッファ部71は、分光測定部60(図1)から出力される実測された反射率スペクトル $R(\quad)$ を一時的に格納する。なお、その具体的な構成に処理内容については、上述したので詳細な説明は繰返さない。

【0170】

最適化演算部741は、MEMなどの最適化法を用いて、バッファ部71に格納されている反射率スペクトルの周波数成分を解析し、第1層の膜厚 d_1 を算出する。より具体的には、最適化演算部741は、自己回帰モデルを用いて反射率スペクトルの実測値に対する自己相関関数を求め、これらの値から自己回帰モデルを記述する自己回帰係数を決定する。最適化演算部741は、このようにして周波数解析を行うことで得られる主成分の波長に対応する膜厚を取得し、第1層の膜厚 d_1 として出力する。なお、最適化演算部741は、最適化法の実行前に、第1層の膜厚 d_1 の検索範囲と、第1層の屈折率 n_1 および消衰係数 k_1 と、第2層の屈折率 n_2 および消衰係数 k_2 とを受付けるとともに、第2層の膜厚 d_2 の暫定値を受付ける。また、ユーザが各パラメータを入力してもよいが、予め標準的な材質のパラメータをファイルなどとして格納しておき、必要に応じて読出すようにしてもよい。

【0171】

モデル化部742およびフィッティング部743は、最適化演算部741によって算出された第1層の膜厚 d_1 と被測定物に係るパラメータを受付けて、第2層の膜厚 d_2 をフィッティングによって決定する。モデル化部742およびフィッティング部743の処理は、それぞれ上述した処理パターン2のモデル化部735およびフィッティング部736と同様であるので、詳細な説明は繰返さない。

【0172】

図16は、この発明の実施の形態に従う処理パターン3に係る膜厚算出処理の手順を示すフローチャートである。図16に示すフローチャートの各ステップのうち、ステップS100~S106の処理については、図12に示すフローチャートの同一符号を付した各ステップと同様であるので、詳細な説明は繰返さない。以下、図12に示すフローチャートと異なるステップS162以降の膜厚算出処理について説明する。

【0173】

ステップS162において、ユーザは、表示された入力画面上などから、被測定物の第1層の膜厚 d_1 の検索範囲と、被測定物の第1層の屈折率 n_1 および消衰係数 k_1 と、被測定物の第2層の屈折率 n_2 および消衰係数 k_2 とを入力する。

【0174】

すると、CPU200は、メモリ部212などに格納されている反射率スペクトルについて、最適化法を用いて周波数成分を解析することで、第1層の膜厚 d_1 を算出する(ステップS164)。

【0175】

続いて、CPU200は、ステップS164で取得された第1層の膜厚 d_1 と、ユーザ入力された第2層に係るパラメータとに基づいて、反射率スペクトルの理論値を算出する(ステップS166)。そして、CPU200は、メモリ部212などに格納されている反射率スペクトルの実測値と反射率スペクトルの理論値との間の二乗偏差を各波長について順次算出し、両者の間の残差を算出する(ステップS168)。さらに、CPU200は、算出した残差が所定のしきい値以下であるか否かを判断する(ステップS170)。

【0176】

算出した残差が所定のしきい値以下でない場合(ステップS170においてNOの場合)には、CPU200は、第2層の膜厚 d_2 の現在値を変更する(ステップS172)。なお、膜厚 d_2 をどの方向にどの程度変更するかについては、残差の発生度合いに応じて

決定される。そして、処理はステップ S 1 6 6 に戻る。

【 0 1 7 7 】

これに対して、算出した残差が所定のしきい値以下である場合（ステップ S 1 7 0 において Y E S の場合）には、C P U 2 0 0 は、第 1 層の膜厚 d_1 および第 2 層の膜厚 d_2 の現在値を被測定物の各層の膜厚（解析値）として出力する（ステップ S 1 7 4）。そして、処理は終了する。

【 0 1 7 8 】

なお、上述の処理パターン 1 と同様に、波長分散を考慮した屈折率および消衰係数を用いてもよい。その詳細な関数については、上述したので、詳細な説明は繰返さない。

【 0 1 7 9 】

（ 4 ）処理パターン 4

処理パターン 4 は、処理パターン 1 を改良した方法であり、フィッティングによる収束をより確実にする。すなわち、S O I 基板のように、第 1 層と第 2 層との膜厚が大きく異なっているような被測定物では、各層の膜厚をフィッティングするための初期値が重要である。そこで、処理パターン 4 では、まず最適化法を用いて各層の膜厚の初期値を決定し、これらの初期値を用いてフィッティング法によって、第 1 層および第 2 層の膜厚を決定する。

【 0 1 8 0 】

図 1 7 は、この発明の実施の形態に従う処理パターン 4 に係る膜厚算出処理を実行する制御構造を示すブロック図である。図 1 7 に示すブロック図は、C P U 2 0 0 がハードディスク部 2 1 0 などの予め格納されたプログラムをメモリ部 2 1 2 などに読み出して実行することで実現される。

【 0 1 8 1 】

図 1 7 に示す処理パターン 4 に係る制御構造は、図 1 1 に示す処理パターン 1 に係る制御構造に、最適化演算部 7 5 1 を追加したものと実質的に同一である。

【 0 1 8 2 】

最適化演算部 7 5 1 は、M E M などの最適化法を用いて、バッファ部 7 1 に格納されている反射率スペクトルの周波数成分を解析し、第 1 層の膜厚 d_1 および第 2 層の膜厚 d_2 をそれぞれ算出する。特に、最適化演算部 7 5 1 は、実測の反射率スペクトルを周波数解析して得られる 2 つ以上のピークを抽出し、これらのピークに対応する膜厚から第 1 層の膜厚 d_1 および第 2 層の膜厚 d_2 をそれぞれ算出する。なお、この算出される第 1 層の膜厚 d_1 および第 2 層の膜厚 d_2 は、フィッティングの初期値として用いられるものであり、厳密な精度は必要とされない。なお、最適化演算部 7 5 1 における具体的な周波数解析方法は、上述の最適化演算部 7 4 1 と同様であるので詳細な説明は繰返さない。

【 0 1 8 3 】

モデル化部 7 2 1 およびフィッティング部 7 2 2 は、最適化演算部 7 5 1 によって算出された第 1 層の膜厚 d_1 および第 2 層の膜厚 d_2 を初期値として、本来の第 1 層の膜厚 d_1 および第 2 層の膜厚 d_2 をフィッティングによって決定する。モデル化部 7 2 1 およびフィッティング部 7 2 2 の処理内容は、上述したので、詳細な説明は繰返さない。

【 0 1 8 4 】

図 1 8 は、この発明の実施の形態に従う処理パターン 4 に係る膜厚算出処理の手順を示すフローチャートである。図 1 8 に示すフローチャートは、図 1 2 に示すフローチャートにおいてステップ S 1 1 0 に代えて、ステップ S 1 1 1 A および S 1 1 1 B の処理を設けたものであり、その他の処理については同一符号を付した各ステップと同様であるので、詳細な説明は繰返さない。以下、図 1 2 と異なる処理について説明する。

【 0 1 8 5 】

図 1 8 を参照して、ステップ S 1 0 8 の実行後、ステップ S 1 1 1 A の処理が実行される。ステップ S 1 1 1 A において、ユーザは、表示された入力画面上などから、被測定物の第 1 層の屈折率 n_1 および消衰係数 k_1 と、被測定物の第 2 層の屈折率 n_2 および消衰係数 k_2 とを入力するとともに、第 1 層の膜厚 d_1 の検索範囲および第 2 層の膜厚 d_2 の

10

20

30

40

50

検索範囲を入力する。続くステップS 1 1 1 Bにおいて、CPU 2 0 0は、メモリ部 2 1 2などに格納されている反射率スペクトルについて、最適化法を用いて周波数成分を解析することで、第1層の膜厚 d_1 および第2層の膜厚 d_2 を算出する。このステップS 1 1 1 Aにおいて算出された第1層の膜厚 d_1 および第2層の膜厚 d_2 が、フィッティングの初期値として用いられる。そして、このステップS 1 1 1 Bの後、図12のステップS 1 1 2以降の処理と同様の処理が実行される。

【0186】

なお、上述の処理パターン1と同様に、波長分散を考慮した屈折率および消衰係数を用いてもよい。その詳細な関数については、上述したので、詳細な説明は繰返さない。

【0187】

(5) 処理パターン5

処理パターン5は、一方の層の膜厚が既知であって、他方の層の膜厚のみを解析する場合に適用される方法であり、上述の処理パターン1を変形したものである。以下の説明では、被測定物の第2層の膜厚が既知であり、第1層の膜厚をフィッティングによって決定する方法を例示する。

【0188】

図19は、この発明の実施の形態に従う処理パターン5に係る膜厚算出処理を実行する制御構造を示すブロック図である。図19に示すブロック図は、CPU 2 0 0がハードディスク部 2 1 0などの予め格納されたプログラムをメモリ部 2 1 2などに読み出して実行することで実現される。

【0189】

図19に示す処理パターン4に係る制御構造は、図11に示す処理パターン1に係る制御構造において、モデル化部 7 2 1に代えて、モデル化部 7 2 1 Aを配置したものである。

【0190】

モデル化部 7 2 1 Aは、第1層の屈折率 n_1 および消衰係数 k_1 と、第2層の屈折率 n_2 および消衰係数 k_2 とを受付けるとともに、第1層の膜厚 d_1 の初期値および第2層の膜厚 d_2 の既知の値(固定値)を受付ける。なお、ユーザが各パラメータを入力してもよいが、予め標準的な材質のパラメータをファイルなどとして格納しておき、必要に応じて読出すようにしてもよい。また、必要に応じて、雰囲気層の屈折率 n_0 および消衰係数 k_0 についても入力される。

【0191】

また、モデル化部 7 2 1 Aは、フィッティング部 7 2 2からのパラメータ更新指令に従って第1層の膜厚 d_1 を順次更新し、この更新後の第1層の膜厚 d_1 に従って理論反射率を示す関数を更新する。さらに、モデル化部 7 2 1 Aは、更新後の関数に従って、各波長における理論反射率(スペクトル)を繰返し算出する。このような手順によって、第1層の膜厚 d_1 がフィッティングによって決定される。

【0192】

その他の構成については、上述したので、詳細な説明は繰返さない。

図20は、この発明の実施の形態に従う処理パターン5に係る膜厚算出処理の手順を示すフローチャートである。図20に示すフローチャートは、図12に示すフローチャートにおいてステップS 1 1 0, S 1 1 8, S 1 2 0に代えて、それぞれステップS 1 1 0 A, S 1 1 8 A, S 1 2 0 Aの処理を設けたものであり、その他の処理については同一符号を付した各ステップと同様であるので、詳細な説明は繰返さない。以下、図12と異なる処理について説明する。

【0193】

図20を参照して、ステップS 1 1 0 Aにおいて、ユーザは、表示された入力画面上などから、被測定物の第1層の屈折率 n_1 および消衰係数 k_1 と、被測定物の第2層の屈折率 n_2 および消衰係数 k_2 とを入力するとともに、第1層の膜厚 d_1 の初期値および第2層の膜厚 d_2 の既知の値を入力する。

【0194】

ステップS118Aにおいて、CPU200は、第1層の膜厚 d_1 の現在値を変更する。すなわち、処理パターン5では、第1層の膜厚 d_1 のみがフィッティング対象となる。

【0195】

ステップS120Aにおいて、CPU200は、算出した残差が所定のしきい値以下である場合には、第1層の膜厚 d_1 の現在値を被測定物の各層の膜厚（解析値）として出力する

なお、上述の処理パターン1と同様に、波長分散を考慮した屈折率および消衰係数を用いてもよい。その詳細な関数については、上述したので、詳細な説明は繰返さない。

【0196】

(6) 処理パターン6

処理パターン6は、一方の層の膜厚が既知であって、他方の層の膜厚のみを解析する場合に適用される方法であり、上述の処理パターン5を变形したものである。以下の説明では、被測定物の第2層の膜厚が既知であり、第1層の膜厚をフィッティングまたはフーリエ変換によって決定する方法を例示する。

【0197】

図21は、この発明の実施の形態に従う処理パターン6に係る膜厚算出処理を実行する制御構造を示すブロック図である。図21に示すブロック図は、CPU200がハードディスク部210などの予め格納されたプログラムをメモリ部212などに読み出して実行することで実現される。

【0198】

図21に示す処理パターン4に係る制御構造は、図19に示す処理パターン4に係る制御構造において、フィッティング部722に代えて、フィッティング部722Aを配置するとともに、波数変換部731と、バッファ部732と、フーリエ変換部733と、ピーク探索部734とをさらに加えたものに相当する。

【0199】

すなわち、本処理パターンでは、被測定物の第1層の膜厚 d_1 がフィッティングによって決定されるが、フィッティングが規定回数以内に収束しなかった場合には、フーリエ変換を用いて、第1層の膜厚 d_1 が決定される。

【0200】

フィッティング部722Aは、バッファ部71から反射率スペクトルの実測値を読み出し、モデル化部721Aから出力される反射率スペクトルの理論値との間の残差が所定のしきい値以下となるように、モデル化部721Aに対してパラメータ更新指令を順次与える。さらに、フィッティング部722Aは、所定回数の演算によっても残差が所定のしきい値以下とならない場合には、フーリエ変換を用いて第1層の膜厚 d_1 を決定するように、波数変換部731に切替指令を与える。

【0201】

なお、波数変換部731、バッファ部732、フーリエ変換部733、およびピーク探索部734については、図13に示す処理パターン2において説明したので、詳細な説明は繰返さない。

【0202】

図22は、この発明の実施の形態に従う処理パターン6に係る膜厚算出処理の手順を示すフローチャートである。図22に示すフローチャートは、図20に示すフローチャートにおいてステップS117の処理を追加するとともに、図14に示すフローチャートのステップS134～S140の処理を追加したものである。その他の処理については同一符号を付した各ステップと同様であるので、詳細な説明は繰返さない。以下、図14および図20と異なる処理について説明する。

【0203】

図22を参照して、ステップS117において、CPU200は、フィッティング処理が規定回数以上繰返されたか否かを判断する。フィッティング処理が規定回数以上繰返さ

10

20

30

40

50

れていない場合（ステップ S 1 1 7 において N O の場合）には、処理はステップ S 1 1 2 に戻る。これに対して、フィッティング処理が規定回数以上繰返されている場合（ステップ S 1 1 7 において Y E S の場合）には、処理はステップ S 1 3 4 へ進む。

【 0 2 0 4 】

ステップ S 1 3 4 ~ S 1 4 0 では、フーリエ変換を用いて第 1 層の膜厚 d_1 が決定される。これらの各ステップの処理については、上述したので、詳細な説明は繰返さない。

【 0 2 0 5 】

< 測定例 >

図 2 3 は、この発明の実施の形態に従う膜厚測定装置を用いて S O I 基板の膜厚を測定した結果例を示す。なお、図 2 3 には、反射率スペクトルを周波数変換（ F F T 変換）して得られたパワースペクトルを示す。

10

【 0 2 0 6 】

図 2 3 (a) は、第 1 層である S i 層の膜厚が $22.0 \mu\text{m}$ 、第 2 層である S i O ₂ 層の膜厚が $3.0 \mu\text{m}$ となることを目標として形成した S O I 基板を測定した結果を示す。図 2 3 (a) では、測定された反射率スペクトルのうち $1470 \sim 1600 \text{ nm}$ の成分を用いて周波数変換を行った。その結果、 $21.8613 \mu\text{m}$ に対応する位置に第 1 のピークが生じている。

【 0 2 0 7 】

図 2 3 (b) は、第 1 層である S i 層の膜厚が $32.0 \mu\text{m}$ 、第 2 層である S i O ₂ 層の膜厚が $2.0 \mu\text{m}$ となることを目標として形成した S O I 基板を測定した結果を示す。図 2 3 (b) では、測定された反射率スペクトルのうち $1500 \sim 1600 \text{ nm}$ の成分を用いて周波数変換を行った。その結果、 $30.6269 \mu\text{m}$ に対応する位置に第 1 のピークが生じている。

20

【 0 2 0 8 】

図 2 3 (c) は、第 1 層である S i 層の膜厚が $16.0 \mu\text{m}$ 、第 2 層である S i O ₂ 層の膜厚が $1.3 \mu\text{m}$ となることを目標として形成した S O I 基板を測定した結果を示す。図 2 3 (v) では、測定された反射率スペクトルのうち $1400 \sim 1600 \text{ nm}$ の成分を用いて周波数変換を行った。その結果、 $15.9069 \mu\text{m}$ に対応する位置に第 1 のピークが生じている。

【 0 2 0 9 】

30

いずれの測定結果についても、概ね良好であることがわかる。

< 遮蔽部材の介在 >

上述したように、本実施の形態に従う膜厚測定装置 1 0 0 は、主として赤外帯域における反射率スペクトルに基づいて被測定物 O B J の膜厚を測定するので、測定用光源 1 0 (図 1) から被測定物 O B J までの経路上に高分子樹脂のような遮蔽部材が存在していても測定が可能である。すなわち、高分子樹脂のような部材は、可視帯域の光を透過させないが、赤外帯域の光を透過させることができる。

【 0 2 1 0 】

図 2 4 は、この発明の実施の形態に従う膜厚測定装置 1 0 0 を用いてその上面に不透明 P a d が配置された被測定物 O B J 上を測定する場合の構成を示す模式図である。

40

【 0 2 1 1 】

図 2 4 を参照して、ステージ 5 0 上にはスペーサを介して平面状の被測定物 O B J が載置されており、被測定物 O B J の上面（測定光の照射側）には、平面状の不透明 P a d 5 2 が配置されている。この不透明 P a d 5 2 は、研磨工程で用いられる研磨体などに相当し、主として高分子樹脂などからなる。このような不透明 P a d 5 2 は、その透過量は少ないが、赤外帯域（たとえば、 $900 \sim 1600 \text{ nm}$ ）の光を透過させる。

【 0 2 1 2 】

図 2 5 および図 2 6 は、この発明の実施の形態に従う膜厚測定装置を用いて不透明 P a d 5 2 が配置された S O I 基板を測定した結果を示す。図 2 5 は、対物レンズ 4 0 (図 1 , 図 2 4) として 1 0 倍の倍率をもつ拡大レンズを用いた場合の結果を示し、図 2 6 は、

50

対物レンズ 40 (図 1, 図 24) として 2.83 倍の倍率をもつ拡大レンズを用いた場合の結果を示す。

【0213】

また、図 25 および図 26 には、比較のため、不透明 Pad 52 が配置されていない状態での結果を重ねて表示する。なお、それぞれの反射率スペクトルのレンジ (絶対値) は異なっていることに注意されたい。

【0214】

図 27 は、図 25 および図 26 に示す Pad 52 が配置されていない状態の反射率スペクトルから得られるパワースペクトルを示し、図 28 は、図 25 および図 26 に示す Pad 52 が配置されている状態の反射率スペクトルから得られるパワースペクトルを示す。

10

【0215】

図 25 を参照して、対物レンズ 40 として 10 倍の倍率をもつ拡大レンズを用いた場合には、不透明 Pad 52 が存在するときの結果は、不透明 Pad 52 が存在しないときの結果に比較してノイズ成分が増加している。

【0216】

一方、図 26 を参照して、対物レンズ 40 として 2.83 倍の倍率をもつ拡大レンズを用いた場合には、不透明 Pad 52 が存在するときの結果は、不透明 Pad 52 が存在しないときの結果とほぼ同様に、その周期性については十分に測定されている。

【0217】

図 27 および図 28 に示すように、対物レンズ 40 として 2.83 倍の倍率をもつ拡大レンズを用いた場合には、不透明 Pad の有無にかかわらず、ほぼ同一のパワースペクトルを得られることがわかる。

20

【0218】

これに対して、対物レンズ 40 として 10 倍の倍率をもつ拡大レンズを用いた場合には、十分な精度のパワースペクトルが得られていないことがわかる。これは、対物レンズ 40 の倍率を変更に伴って開口数が変化し、この結果、10 倍の倍率をもつレンズを用いた場合には、拡散光が増大し、ノイズ成分が増加するものと考えられる。

【0219】

以上のように、本実施の形態に従う膜厚測定装置 100 を用いて、不透明 Pad 52 が配置された被測定物 OBJ の膜厚を測定することは可能であることが示された。但し、測定光を照射するための光学系および反射光を受光するための光学系について、拡散光の影響を排除するように設計する必要はあるといえる。

30

【0220】

[変形例]

被測定物 OBJ に対する測定光の照射および反射光の受光を行うための光学系として、Y 型ファイバを用いてもよい。

【0221】

図 29 は、この発明の実施の形態の変形例に従う膜厚測定装置 100 # の光学系の構造を示す模式図である。

【0222】

40

図 29 を参照して、膜厚測定装置 100 # は、測定用光源 10 (図 1) からの測定光を被測定物 OBJ まで導き、かつ被測定物 OBJ からの反射光を検出部 64 (図 1) まで導く光学系として、投受光ファイバ 56 を含んでいる。

【0223】

投受光ファイバ 56 は、2 つの光線を 1 つの光線に結合可能であるとともに、1 つの光線を 2 つの光線に分離可能な Y 型ファイバである。より具体的な一例として、投受光ファイバ 56 は、Ge ドープされた単線 Y 型ファイバからなる。

【0224】

測定用光源 10 (図 1) から発生した測定光は、第 1 分岐ファイバ 56 a を通って被測定物 OBJ へ入射し、被測定物 OBJ で反射して生じた反射光は、第 2 分岐ファイバ 56

50

b を通って検出部 6 4 へ導かれる。

【 0 2 2 5 】

また、投受光ファイバ 5 6 と被測定物 O B J との間には、「絞り」として機能するピンホール光学系 5 4 が配置される。

【 0 2 2 6 】

図 2 9 に示す膜厚測定装置 1 0 0 # を用いることで、研磨液などの溶液中に被測定物 O B J が配置された場合であってもその膜厚を測定することができる。

【 0 2 2 7 】

図 3 0 は、この発明の実施の形態の変形例に従う膜厚測定装置 1 0 0 # を用いて溶液中の被測定物 O B J の膜厚を測定する形態を示す模式図である。

10

【 0 2 2 8 】

図 3 0 を参照して、容器内に配置されたテーブル 5 7 上にスペーサを介して被測定物 O B J が配置されており、当該容器内は、研磨液などの溶液 5 8 で満たされている。そして、投受光ファイバ 5 6 の投受光口側の一部が溶液 5 8 中に浸漬されている。このような構成によって、溶液中の被測定物 O B J の膜厚を測定することができる。

【 0 2 2 9 】

なお、水を溶媒とする溶液 5 8 を用いる場合には、上述の赤外帯域 (9 0 0 ~ 1 6 0 0 n m) のうち、水の吸収波長を除く帯域を膜厚測定に用いることが好ましい。具体的には、水には約 1 3 2 0 n m 以上の波長帯域に吸収があるため、被測定物 O B J の膜厚測定には、9 0 0 ~ 1 3 2 0 n m の範囲の反射光スペクトルを用いることが好ましい。

20

【 0 2 3 0 】

[その他の実施の形態]

本発明に係るプログラムは、コンピュータのオペレーティングシステム (O S) の一部として提供されるプログラムモジュールのうち、必要なモジュールを所定の配列で所定のタイミングで呼出して処理を実行させるものであってもよい。その場合、プログラム自体には上記モジュールが含まれず O S と協働して処理が実行される。このようなモジュールを含まないプログラムも、本発明に係るプログラムに含まれ得る。

【 0 2 3 1 】

さらに、本発明に係るプログラムは、他のプログラムの一部に組み込まれて提供されるものであってもよい。その場合にも、プログラム自体には上記他のプログラムに含まれるモジュールが含まれず、他のプログラムと協働して処理が実行される。このような他のプログラムに組み込まれたプログラムも、本発明に係るプログラムに含まれ得る。

30

【 0 2 3 2 】

提供されるプログラム製品は、ハードディスクなどのプログラム格納部にインストールされて実行される。なお、プログラム製品は、プログラム自体と、プログラムが記憶された記憶媒体とを含む。

【 0 2 3 3 】

さらに、本発明に係るプログラムによって実現される機能の一部または全部を専用のハードウェアによって構成してもよい。

【 0 2 3 4 】

40

この発明の実施の形態によれば、被測定物に測定光を照射して取得された反射率スペクトル (もしくは、透過率スペクトル) に基づいて、被測定物を構成する各層の膜厚をそれぞれ独立に算出する際に、(1) F F T などの離散的なフーリエ変換、または M E M などの最適化法を用いて主要な波数成分を算出して膜厚を決定する方法と、(2) モデル式を用いたフィッティングを用いて膜厚を決定する方法とを、選択的に実行できる。これにより、被測定物を構成する層が多数であったり、各層の膜厚に大きな差があったりするような場合であっても、各層の膜厚をより正確に測定することができる。

【 0 2 3 5 】

また、この発明の実施の形態によれば、測定対象とする被測定物を構成する各層の膜厚に応じて、測定光の波長範囲 (あるいは、波長検出範囲) および検出部の波長分解能を適

50

切に設定できるので、各層の膜厚をより正確に測定することができる。

【 0 2 3 6 】

今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は、上記した説明ではなく、特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

【図面の簡単な説明】

【 0 2 3 7 】

【図 1】この発明の実施の形態に従う膜厚測定装置の概略構成図である。

【図 2】この発明の実施の形態に従う膜厚測定装置が測定対象とする被測定物 O B J の断面模式図の一例である。

10

【図 3】本実施の形態に従う膜厚測定装置を用いて S O I 基板を測定した場合の測定結果を示す図である。

【図 4】本実施の形態に従う膜厚測定装置を用いて S O I 基板を測定した別の測定結果を示す図である。

【図 5】本実施の形態に従う膜厚測定装置を用いて S O I 基板を測定したさらに別の測定結果を示す図である。

【図 6】この発明の実施の形態に従う膜厚測定範囲と検出部の検出波長範囲および検出ポイント数との関係を説明するための図である。

【図 7】理論値に近い波長分解能をもつ膜厚測定装置を用いて測定した結果をシミュレーションした結果を示す図である。

20

【図 8】理論値に対して精度を 2 倍にした波長分解能をもつ膜厚測定装置を用いて測定した結果をシミュレーションした結果を示す図である。

【図 9】S O I 基板についての反射率スペクトルの測定結果を示す図である。

【図 10】この発明の実施の形態に従うデータ処理部の概略のハードウェア構成を示す模式図である。

【図 11】この発明の実施の形態に従う処理パターン 1 に係る膜厚算出処理を実行する制御構造を示すブロック図である。

【図 12】この発明の実施の形態に従う処理パターン 1 に係る膜厚算出処理の手順を示すフローチャートである。

30

【図 13】この発明の実施の形態に従う処理パターン 2 に係る膜厚算出処理を実行する制御構造を示すブロック図である。

【図 14】この発明の実施の形態に従う処理パターン 2 に係る膜厚算出処理の手順を示すフローチャートである。

【図 15】この発明の実施の形態に従う処理パターン 3 に係る膜厚算出処理を実行する制御構造を示すブロック図である。

【図 16】この発明の実施の形態に従う処理パターン 3 に係る膜厚算出処理の手順を示すフローチャートである。

【図 17】この発明の実施の形態に従う処理パターン 4 に係る膜厚算出処理を実行する制御構造を示すブロック図である。

40

【図 18】この発明の実施の形態に従う処理パターン 4 に係る膜厚算出処理の手順を示すフローチャートである。

【図 19】この発明の実施の形態に従う処理パターン 5 に係る膜厚算出処理を実行する制御構造を示すブロック図である。

【図 20】この発明の実施の形態に従う処理パターン 5 に係る膜厚算出処理の手順を示すフローチャートである。

【図 21】この発明の実施の形態に従う処理パターン 6 に係る膜厚算出処理を実行する制御構造を示すブロック図である。

【図 22】この発明の実施の形態に従う処理パターン 6 に係る膜厚算出処理の手順を示すフローチャートである。

50

【図 2 3】この発明の実施の形態に従う膜厚測定装置を用いて S O I 基板の膜厚を測定した結果例を示す。

【図 2 4】この発明の実施の形態に従う膜厚測定装置を用いてその上面に不透明 P a d が配置された被測定物 O B J 上を測定する場合の構成を示す模式図である。

【図 2 5】この発明の実施の形態に従う膜厚測定装置を用いて不透明 P a d が配置された S O I 基板を測定した結果を示す。

【図 2 6】この発明の実施の形態に従う膜厚測定装置を用いて不透明 P a d が配置された S O I 基板を測定した結果を示す。

【図 2 7】図 2 5 および図 2 6 に示す不透明 P a d が配置されていない状態の反射率スペクトルから得られるパワースペクトルを示す。

10

【図 2 8】図 2 5 および図 2 6 に示す不透明 P a d が配置されている状態の反射率スペクトルから得られるパワースペクトルを示す。

【図 2 9】この発明の実施の形態の変形例に従う膜厚測定装置の光学系の構造を示す模式図である。

【図 3 0】この発明の実施の形態の変形例に従う膜厚測定装置を用いて溶液中の被測定物の膜厚を測定する形態を示す模式図である。

【符号の説明】

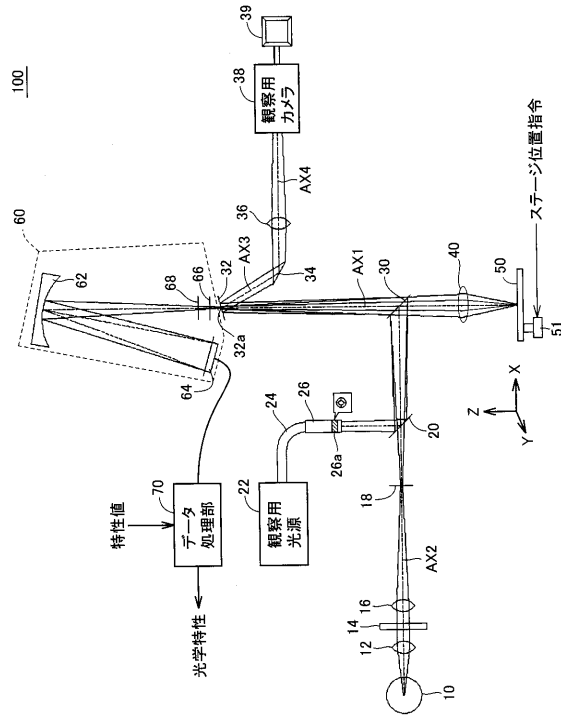
【 0 2 3 8 】

1 0 測定用光源、1 2 コリメートレンズ、1 4 カットフィルタ、1 6 , 3 6 結像レンズ、1 8 絞り部、2 0 , 3 0 ビームスプリッタ、2 2 観察用光源、2 4 光ファイバ、2 6 出射部、2 6 a マスク部、3 2 ピンホールミラー、3 2 a ピンホール、3 4 軸変換ミラー、3 8 観察用カメラ、3 9 表示部、4 0 対物レンズ、5 0 ステージ、5 1 可動機構、5 2 不透明 P a d、5 4 ピンホール光学系、5 6 投受光ファイバ、5 6 a , 5 6 b 分岐ファイバ、5 7 テーブル、5 8 溶液、6 0 分光測定部、6 2 回折格子、6 4 検出部、6 6 カットフィルタ、6 8 シャッタ、7 0 データ処理部、7 1 , 7 3 2 バッファ部、1 0 0 , 1 0 0 # 膜厚測定装置、2 0 0 C P U、2 0 2 バス、2 0 4 ディスプレイ部、2 0 8 入力部、2 1 0 ハードディスク部 (H D D)、2 1 2 メモリ部、2 1 4 C D - R O M ドライブ、2 1 4 a C D - R O M、2 1 6 フレキシブルディスクドライブ (F D D)、2 1 6 a フレキシブルディスク、7 2 1 , 7 2 1 A , 7 3 5 , 7 4 2 モデル化部、7 2 2 , 7 2 2 A , 7 3 6 , 7 4 3 フィッティング部、7 3 1 波数変換部、7 3 3 フーリエ変換部、7 3 4 ピーク探索部、7 4 1 , 7 5 1 最適化演算部、O B J 被測定物。

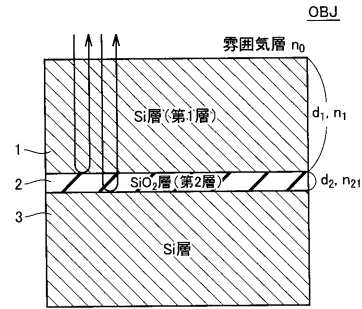
20

30

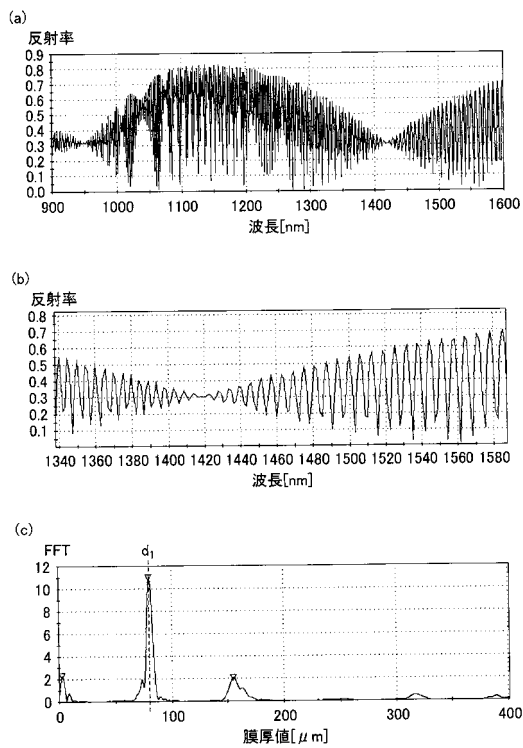
【図 1】



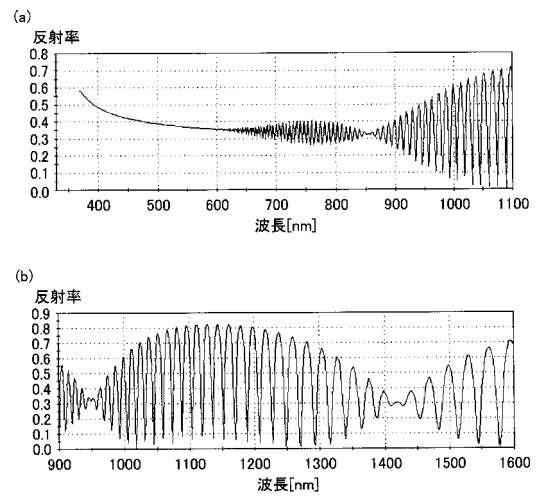
【図 2】



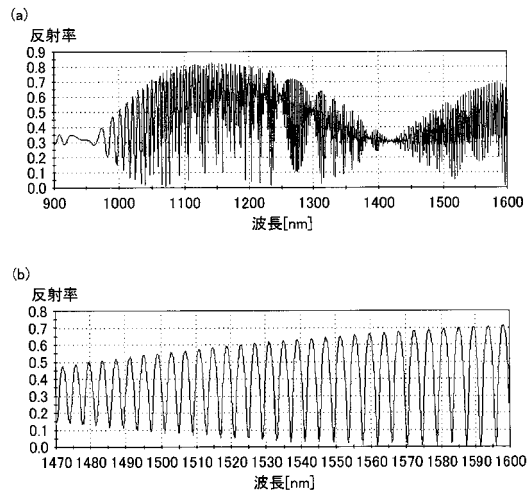
【図 3】



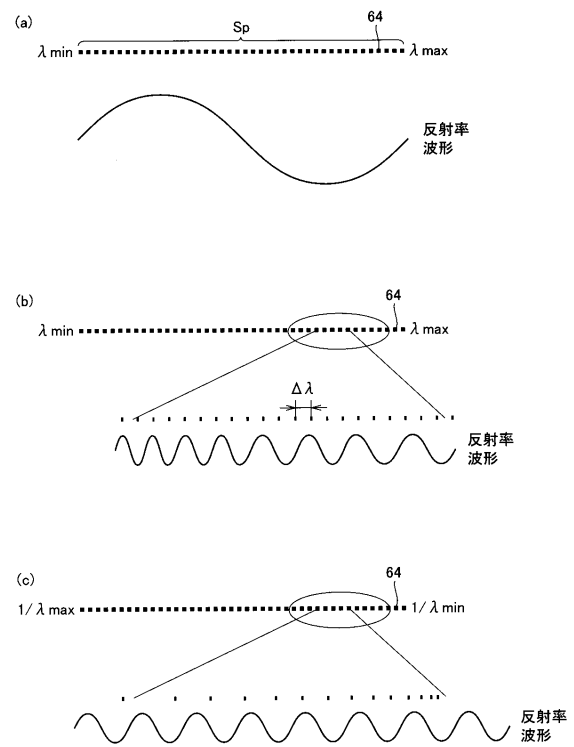
【図 4】



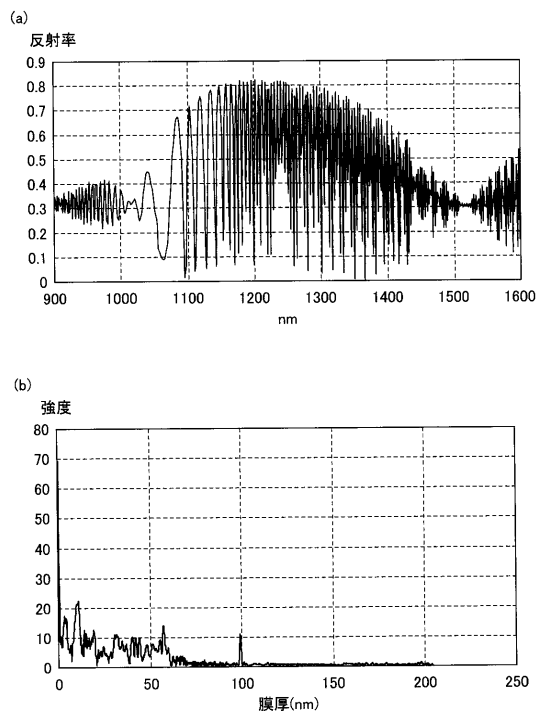
【図 5】



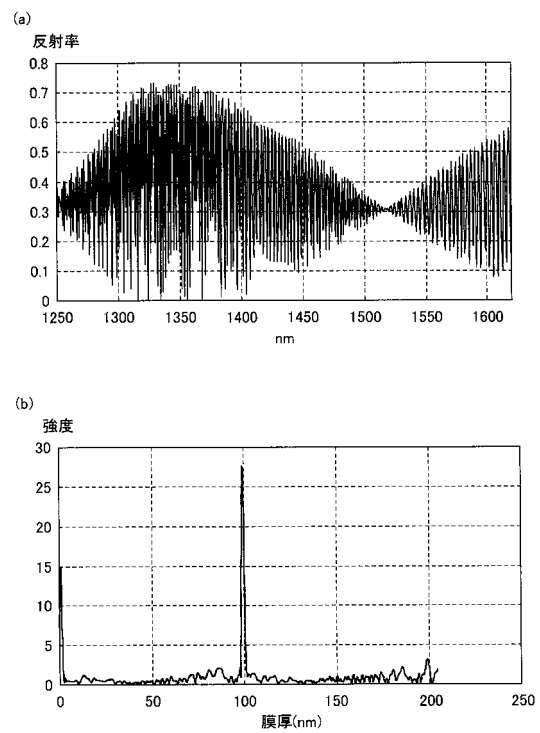
【図 6】



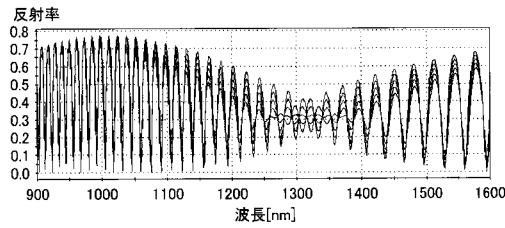
【図 7】



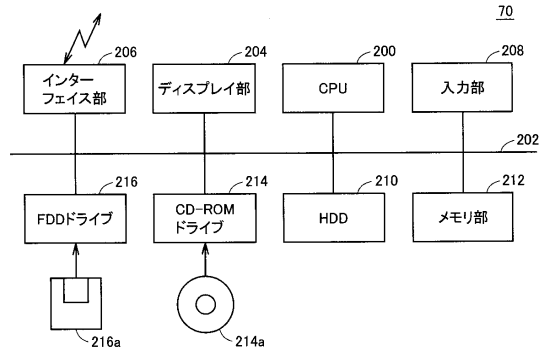
【図 8】



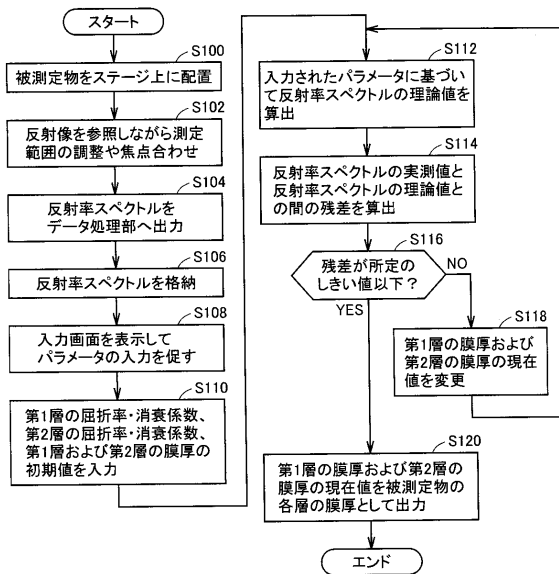
【図 9】



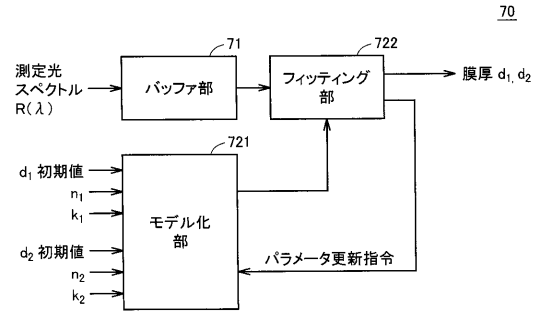
【図 10】



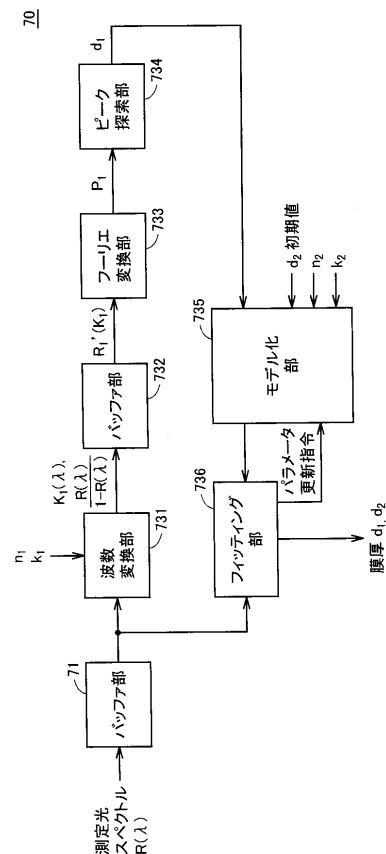
【図 12】



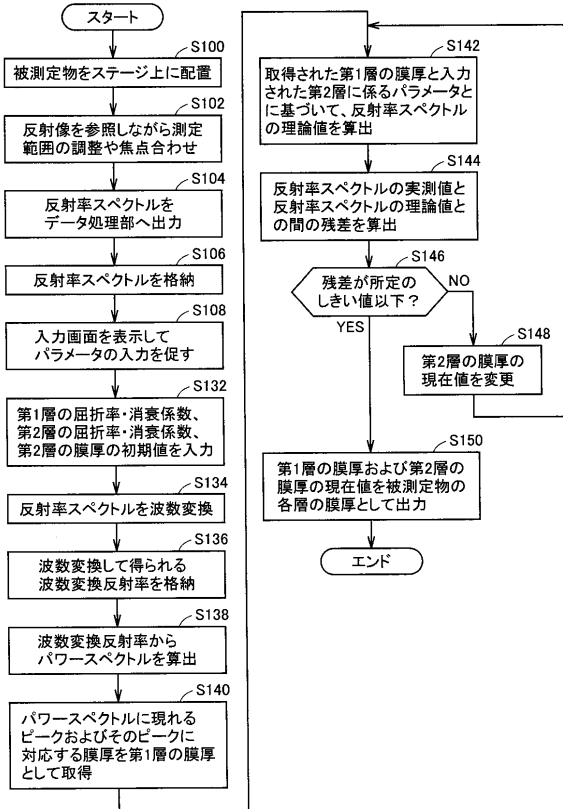
【図 11】



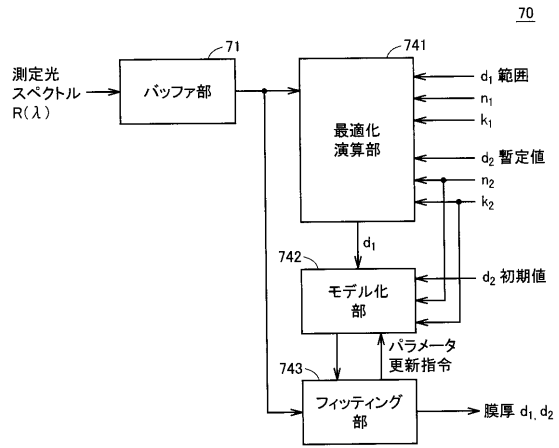
【図 13】



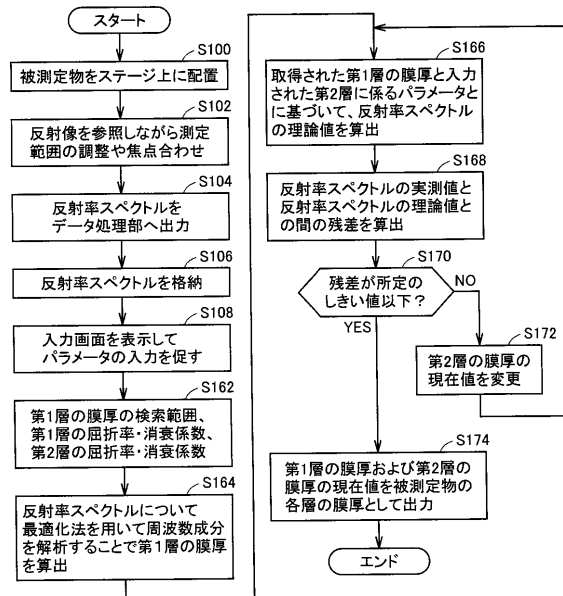
【図 14】



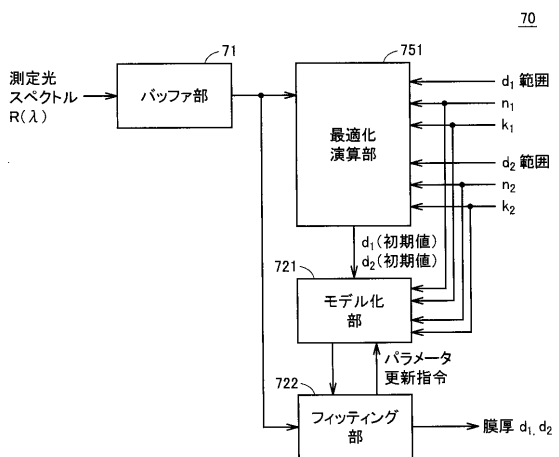
【図 15】



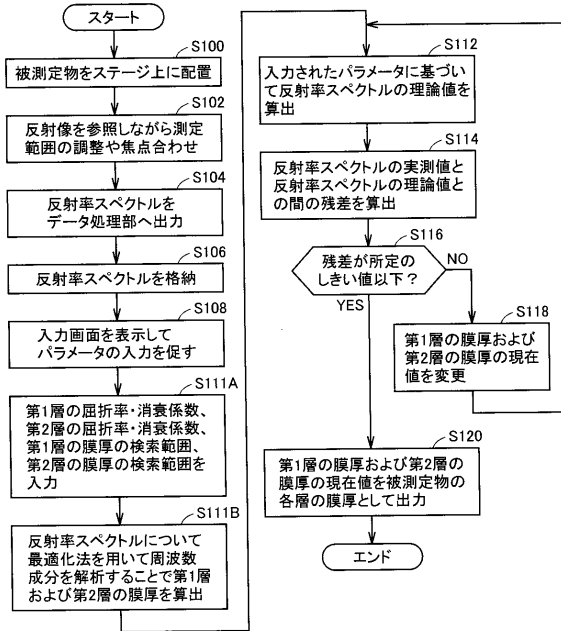
【図 16】



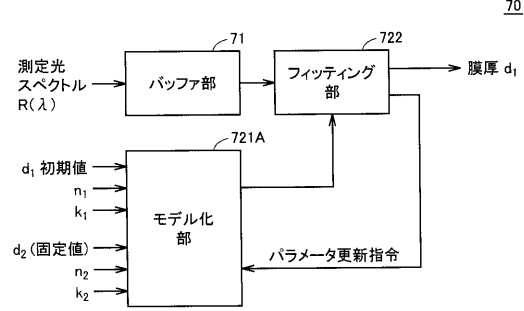
【図 17】



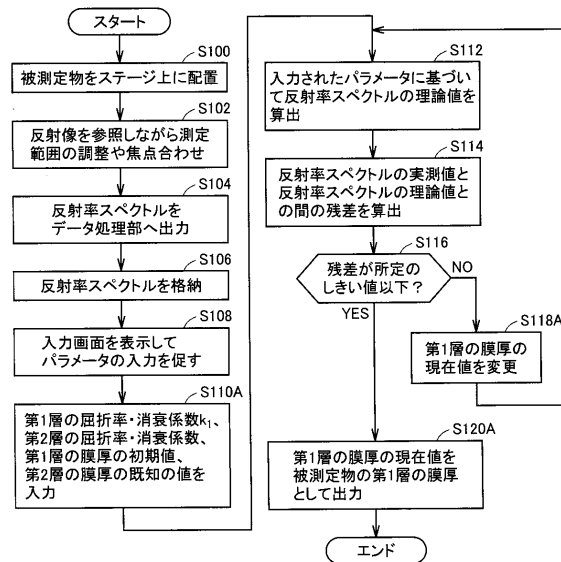
【図 18】



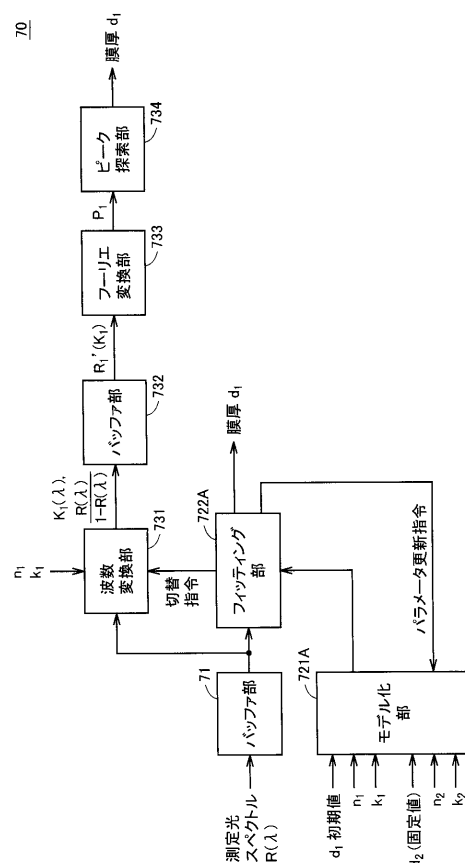
【図 19】



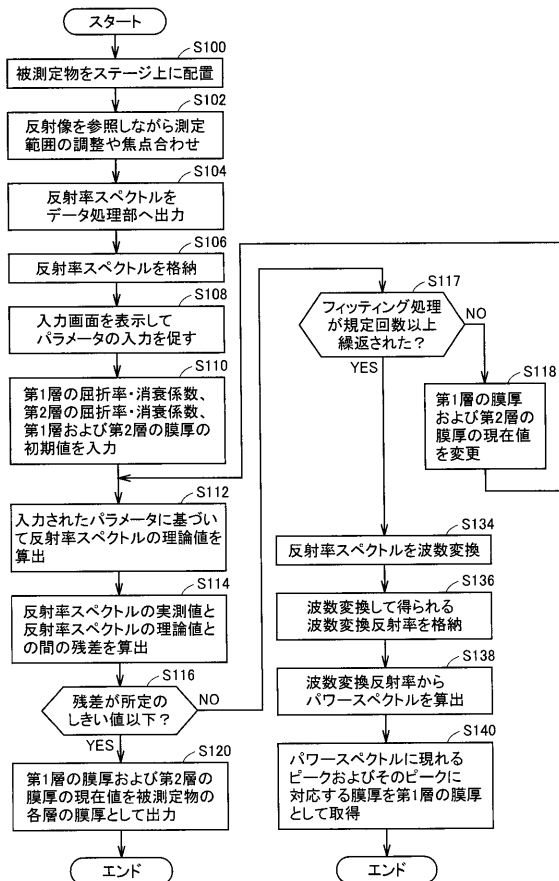
【図 20】



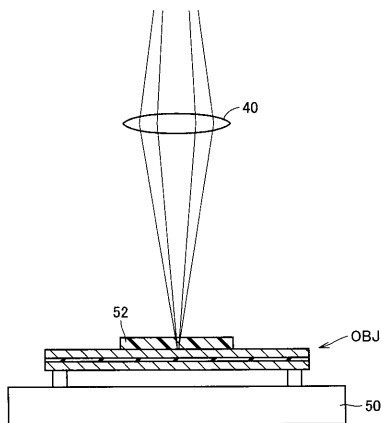
【図 21】



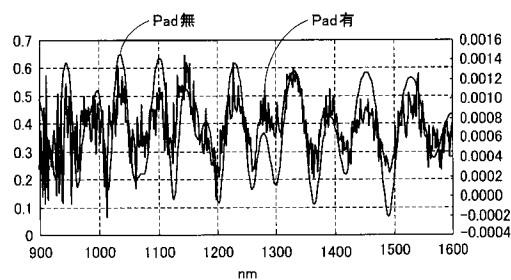
【図 22】



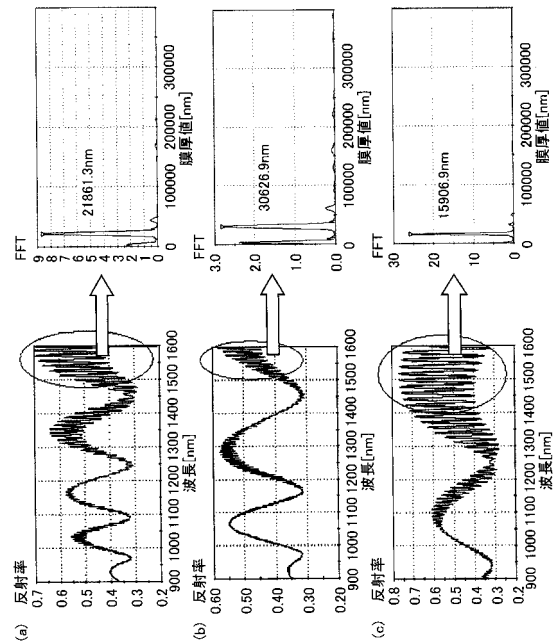
【図 24】



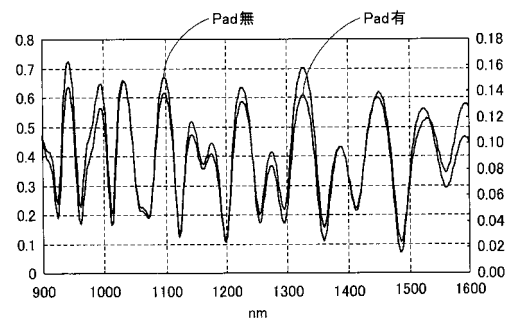
【図 25】



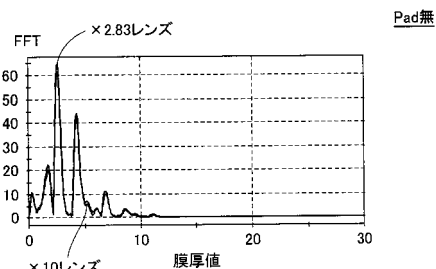
【図 23】



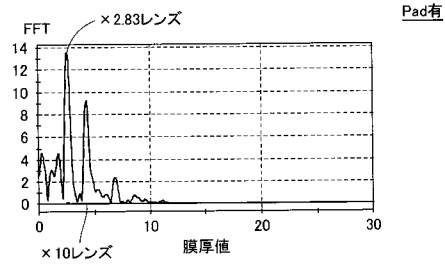
【図 26】



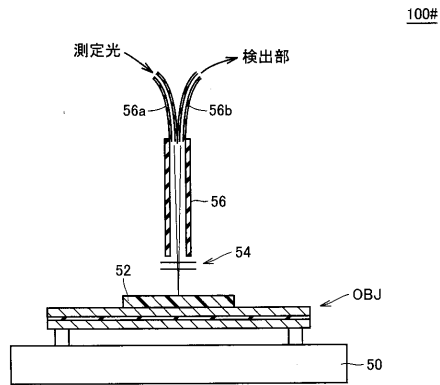
【図 27】



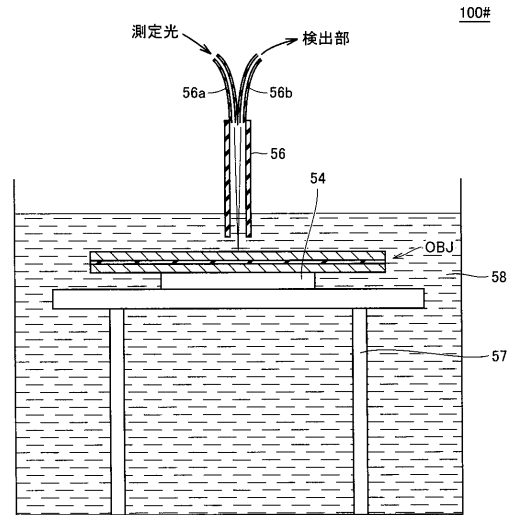
【図 28】



【図 29】



【図 30】



フロントページの続き

(74)代理人 100111246

弁理士 荒川 伸夫

(72)発明者 藤森 匡嘉

大阪府枚方市招提田近三丁目2番3号 大塚電子株式会社内

(72)発明者 澤村 義巳

大阪府枚方市招提田近三丁目2番3号 大塚電子株式会社内

審査官 有家 秀郎

(56)参考文献 特開平07-055435(JP,A)

特開2003-240515(JP,A)

特開2000-310512(JP,A)

特開2005-201634(JP,A)

特開2004-119452(JP,A)

特開2004-205242(JP,A)

特開2010-002328(JP,A)

特開平05-306910(JP,A)

特開平05-308096(JP,A)

特開2005-019920(JP,A)

特開平10-125634(JP,A)

特開2002-228420(JP,A)

特開2003-114107(JP,A)

特開昭62-071804(JP,A)

特開平07-294220(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B 11/00 - 11/30

H01L 21/66