

膜厚差推定方法および光学式膜厚測定装置

発明の背景

発明の技術分野

- 5 [0001] 本発明は、半導体デバイスの製造に使用されるウェーハ、基板、パネルなどのワークピースを研磨する技術に関し、特に膜厚推定モデルを用いてワークピース内の膜厚差を推定する技術に関する。

関連技術の記載

- 10 [0002] 半導体デバイスの製造工程では、シリコンウェーハ上に種々の材料が膜状に繰り返し形成され、積層構造を形成する。この積層構造を形成するためには、最上層の表面を平坦にする技術が重要となっている。このような平坦化の一手段として、化学機械研磨（CMP）が使用されている。

- [0003] 化学機械研磨（CMP）は研磨装置によって実行される。この種の研磨装置は、一般に、研磨パッドを支持する研磨テーブルと、ワークピース（例えば、
15 膜を有するウェーハ）を保持する研磨ヘッドと、研磨液（例えばスラリー）を研磨パッド上に供給する研磨液供給ノズルを備える。ワークピースを研磨するときは、研磨液供給ノズルから研磨液を研磨パッド上に供給しながら、研磨ヘッドによりワークピースの表面を研磨パッドに押し付ける。研磨ヘッドと研磨テーブルをそれぞれ回転させてワークピースと研磨パッドとを相対移動させることにより、
20 ワークピースの表面を形成する膜を研磨する。

- [0004] ワークピースは、配線構造を構成するパターンを有しており、ワークピース表面は酸化膜や窒化膜などの絶縁膜や、銅、タングステンなどの金属膜などの異なる材料から構成された膜を有している。ワークピースの研磨は、その表面を構成する膜（絶縁膜、金属膜など）の厚さが所定の目標値に達したときに終了さ
25 れる。ワークピース表面の膜の厚さを測定するために、研磨装置は、一般に、光学式膜厚測定装置を備える。この光学式膜厚測定装置は、光源から発せられた光をワークピースの表面に導き、ワークピースからの反射光のスペクトルを解析することで、ワークピースの膜厚を決定するように構成される。

【先行技術文献】

【特許文献】

[0005] 【特許文献 1】 日本国特開 2 0 2 2 - 1 5 6 8 7 9 号公報

[0006] 異なる材料から構成された複数の膜を有するワークピースの研磨では、膜を構成する材料によって研磨レートが異なることや、研磨前の膜厚のばらつきなどに起因して、複数の膜の間で膜厚差（例えばディッシング）が生じることがある。従来、この膜厚差は、ワークピースの研磨後、高い測定精度を有するスタンダードアローンタイプの膜厚測定装置により測定されており、ワークピースの研磨中に測定することが困難であった。

10 発明の要旨

[0007] そこで、本発明は、ウェーハなどのワークピースの研磨中にワークピースを構成する複数の膜の膜厚差を推定する方法および光学式膜厚測定装置を提供する。

[0008] 一態様では、異なる材料から構成された第 1 膜と第 2 膜を有するワークピースを研磨しながら、同じ研磨時間において前記ワークピースからの反射光の複数の測定スペクトルを生成し、前記複数の測定スペクトルのそれぞれを分類モデルに入力し、前記分類モデルは、前記第 1 膜と前記第 2 膜を有するサンプルからの反射光の複数のサンプルスペクトルと、前記複数のサンプルスペクトルの分類ラベルを含む分類訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルであり、前記複数の測定スペクトルのそれぞれが第 1 グループまたは第 2 グループのいずれかに分類された分類結果を前記分類モデルから出力し、前記第 1 グループは前記第 1 膜からの反射光の測定スペクトルが属するグループであり、前記第 2 グループは前記第 2 膜からの反射光の測定スペクトルが属するグループであり、前記第 1 グループに分類された前記第 1 膜からの反射光の測定スペクトルと、前記第 2 グループに分類された前記第 2 膜からの反射光の測定スペクトルを、膜厚推定モデルに入力し、前記膜厚推定モデルは、前記複数のサンプルスペクトルと、前記複数のサンプルスペクトルに対応する膜厚を含む膜厚推定訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルであり、前記研磨時間における前記ワークピースの前記第 1 膜の推定膜厚および前記第 2 膜の推定膜厚を前記膜

厚推定モデルから出力し、前記第 1 膜の前記推定膜厚から前記第 2 膜の前記推定膜厚を減算することにより、前記研磨時間における前記ワークピースの前記第 1 膜と前記第 2 膜との推定膜厚差を算出する、膜厚差推定方法が提供される。

[0009] 一態様では、前記第 1 グループに分類された前記測定スペクトルと、前記第 2 グループに分類された前記測定スペクトルを、前記膜厚推定モデルに入力することは、前記第 1 グループに分類された前記測定スペクトルを第 1 膜厚推定モデルに入力し、かつ前記第 2 グループに分類された前記測定スペクトルを、第 2 膜厚推定モデルに入力することであり、前記第 1 膜厚推定モデルは、前記複数のサンプルスペクトルのうち、前記第 1 グループに属するサンプルスペクトルと、前記第 1 グループに属する前記サンプルスペクトルに対応する膜厚を含む第 1 膜厚推定訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルであり、前記第 2 膜厚推定モデルは、前記複数のサンプルスペクトルのうち、前記第 2 グループに属するサンプルスペクトルと、前記第 2 グループに属する前記サンプルスペクトルに対応する膜厚を含む第 2 膜厚推定訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルであり、前記研磨時間における前記ワークピースの前記第 1 膜の前記推定膜厚および前記第 2 膜の前記推定膜厚を前記膜厚推定モデルから出力することは、前記研磨時間における前記ワークピースの前記第 1 膜の前記推定膜厚を前記第 1 膜厚推定モデルから出力し、かつ前記研磨時間における前記ワークピースの前記第 2 膜の前記推定膜厚を前記第 2 膜厚推定モデルから出力することである。

一態様では、前記膜厚推定訓練データは、前記複数のサンプルスペクトルのそれぞれが属するグループを示す分類ラベルをさらに含み、前記第 1 グループに分類された前記測定スペクトルと、前記第 2 グループに分類された前記測定スペクトルを、前記膜厚推定モデルに入力することは、前記第 1 グループに分類された前記測定スペクトルおよび前記第 1 グループを示す分類ラベルを前記膜厚推定モデルに入力し、前記第 2 グループに分類された前記測定スペクトルおよび前記第 2 グループを示す分類ラベルを前記膜厚推定モデルに入力することである。

一態様では、前記複数のサンプルスペクトルの前記分類ラベルは、前記複数のサンプルスペクトルに対してクラスタリングを実行することで、前記複数のサン

プルスペクトルを前記第 1 グループと前記第 2 グループにグループ化することにより得られたラベルである。

5 [0010] 一態様では、前記複数のサンプルスペクトルは、前記サンプルの前記第 1 膜と前記第 2 膜との境界からの反射光のサンプルスペクトルを含み、前記複数の測定スペクトルのそれぞれが前記第 1 グループまたは前記第 2 グループのいずれかに分類された前記分類結果を前記分類モデルから出力することは、前記複数の測定スペクトルのそれぞれが前記第 1 グループ、前記第 2 グループ、または前記第 1 膜と前記第 2 膜との境界からの反射光の測定スペクトルが分類される第 3 グループのいずれかに分類された分類結果を前記分類モデルから出力することであり、前記膜厚推定訓練データは、前記複数のサンプルスペクトルから前記第 3 グループに属するサンプルスペクトルを除いたサンプルスペクトルと、前記複数のサンプルスペクトルから前記第 3 グループに属する前記サンプルスペクトルを除いた前記サンプルスペクトルに対応する膜厚を含む。

15 一態様では、前記複数のサンプルスペクトルの前記分類ラベルは、前記複数のサンプルスペクトルに対してクラスタリングを実行することで、前記複数のサンプルスペクトルを前記第 1 グループ、前記第 2 グループ、および前記第 3 グループにグループ化することにより得られたラベルである。

20 一態様では、前記第 1 膜は絶縁膜であり、前記第 2 膜は金属膜であり、前記膜厚差推定方法は、前記推定膜厚差が所定の許容値を超えたときに、前記ワークピースの研磨を終了するための研磨終了信号を出力することをさらに含む。

一態様では、前記第 1 膜は金属膜であり、前記第 2 膜は絶縁膜であり、前記膜厚差推定方法は、前記ワークピースの研磨終点の後であって、前記推定膜厚差が所定のしきい値以上であるときに、前記ワークピースの研磨を継続するための研磨継続信号を出力することをさらに含む。

25 [0011] 一態様では、光を発する光源と、前記光源から発せられた光を異なる材料から構成された第 1 膜と第 2 膜を有するワークピースに照射し、前記ワークピースからの反射光を受ける光学センサヘッドと、前記反射光のスペクトルを生成する処理システムを備え、前記処理システムは、前記ワークピースの研磨中に、同じ研磨時間において前記ワークピースからの反射光の複数の測定スペクトルを生

成し、前記複数の測定スペクトルのそれぞれを分類モデルに入力し、前記分類モデルは、前記第 1 膜と前記第 2 膜を有するサンプルからの反射光の複数のサンプルスペクトルと、前記複数のサンプルスペクトルの分類ラベルを含む分類訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルであり、前記複数の測定
5 スペクトルのそれぞれが第 1 グループまたは第 2 グループのいずれかに分類された分類結果を前記分類モデルから出力し、前記第 1 グループは前記第 1 膜からの反射光の測定スペクトルが属するグループであり、前記第 2 グループは前記第 2 膜からの反射光の測定スペクトルが属するグループであり、前記第 1 グループに分類された前記第 1 膜からの反射光の測定スペクトルと、前記第 2 グループに分類された前記第 2 膜からの反射光の測定スペクトルを、膜厚推定モデルに入力し、
10 前記膜厚推定モデルは、前記複数のサンプルスペクトルと、前記複数のサンプルスペクトルに対応する膜厚を含む膜厚推定訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルであり、前記研磨時間における前記ワークピースの前記第 1 膜の推定膜厚および前記第 2 膜の推定膜厚を前記膜厚推定モデルから出力し、
15 前記第 1 膜の前記推定膜厚から前記第 2 膜の前記推定膜厚を減算することにより、前記研磨時間における前記ワークピースの前記第 1 膜と前記第 2 膜との推定膜厚差を算出するように構成されている、光学式膜厚測定装置が提供される。

[0012] 一態様では、前記処理システムは、前記第 1 グループに分類された前記測定スペクトルを第 1 膜厚推定モデルに入力し、かつ前記第 2 グループに分類された前記測定スペクトルを第 2 膜厚推定モデルに入力し、前記研磨時間における前
20 記ワークピースの前記第 1 膜の前記推定膜厚を前記第 1 膜厚推定モデルから出力し、かつ前記研磨時間における前記ワークピースの前記第 2 膜の前記推定膜厚を前記第 2 膜厚推定モデルから出力するように構成されており、前記第 1 膜厚推定モデルは、前記複数のサンプルスペクトルのうち、前記第 1 グループに属するサン
25 プルスペクトルと、前記第 1 グループに属する前記サンプルスペクトルに対応する膜厚を含む第 1 膜厚推定訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルであり、前記第 2 膜厚推定モデルは、前記複数のサンプルスペクトルのうち、前記第 2 グループに属するサンプルスペクトルと、前記第 2 グループに属する前記サンプルスペクトルに対応する膜厚を含む第 2 膜厚推定訓練データを用

いて機械学習により構築された学習済みモデルである。

一態様では、前記膜厚推定訓練データは、前記複数のサンプルスペクトルのそれぞれが属するグループを示す分類ラベルをさらに含み、前記処理システムは、前記第 1 グループに分類された前記測定スペクトルおよび前記第 1 グループを示す分類ラベルを前記膜厚推定モデルに入力し、前記第 2 グループに分類された前記測定スペクトルおよび前記第 2 グループを示す分類ラベルを前記膜厚推定モデルに入力するように構成されている。

一態様では、前記複数のサンプルスペクトルの前記分類ラベルは、前記複数のサンプルスペクトルに対してクラスタリングを実行することで、前記複数のサンプルスペクトルを前記第 1 グループと前記第 2 グループにグループ化することにより得られたラベルである。

[0013] 一態様では、前記複数のサンプルスペクトルは、前記サンプルの前記第 1 膜と前記第 2 膜との境界からの反射光のサンプルスペクトルを含み、前記処理システムは、前記複数の測定スペクトルのそれぞれが前記第 1 グループ、前記第 2 グループ、または前記第 1 膜と前記第 2 膜との境界からの反射光の測定スペクトルが分類される第 3 グループのいずれかに分類された分類結果を前記分類モデルから出力するように構成されており、前記膜厚推定訓練データは、前記複数のサンプルスペクトルから前記第 3 グループに属するサンプルスペクトルを除いたサンプルスペクトルと、前記複数のサンプルスペクトルから前記第 3 グループに属する前記サンプルスペクトルを除いた前記サンプルスペクトルに対応する膜厚を含む。

一態様では、前記複数のサンプルスペクトルの前記分類ラベルは、前記複数のサンプルスペクトルに対してクラスタリングを実行することで、前記複数のサンプルスペクトルを前記第 1 グループ、前記第 2 グループ、および前記第 3 グループにグループ化することにより得られたラベルである。

一態様では、前記第 1 膜は絶縁膜であり、前記第 2 膜は金属膜であり、前記処理システムは、前記推定膜厚差が所定の許容値を超えたときに、前記ワークピースの研磨を終了するための研磨終了信号を出力するように構成されている。

一態様では、前記第 1 膜は金属膜であり、前記第 2 膜は絶縁膜であり、前記処

理システムは、前記ワークピースの研磨終点の後であって、前記推定膜厚差が所定のしきい値以上であるときに、前記ワークピースの研磨を継続するための研磨継続信号を出力するように構成されている。

[0014] 本発明によれば、ワークピースの研磨中、分類モデルを用いて、ワークピースからの反射光の複数の測定スペクトルを第1膜からの反射光の測定スペクトルが属する第1グループと、第2膜からの反射光の測定スペクトルが属する第2グループに分類する。さらに、膜厚推定モデルを用いて、第1グループに分類された測定スペクトルと、第2グループに分類された測定スペクトルから、ワークピースの第1膜および第2膜の推定膜厚を取得し、ワークピースの第1膜と第2膜との推定膜厚差を算出することができる。

図面の簡単な説明

[0015] 図1は、研磨装置の一実施形態を示す模式図である。

図2は、処理システムによって生成されたスペクトルの一例を示す図である。

図3は、図1に示す研磨装置の詳細な構成の一実施形態を示す断面図である。

図4は、光学式膜厚測定装置の原理を説明するための模式図である。

図5は、ワークピースと研磨テーブルとの位置関係を示す平面図である。

図6は、研磨前後のワークピースの第1膜および第2膜の膜厚の変化の一例を示す模式図である。

図7は、分類モデルの作成に用いる複数のサンプルスペクトルの分類ラベルの取得の一実施形態を説明する図である。

図8は、分類モデルの作成の一実施形態を説明する図である。

図9は、サンプルの第1膜の膜厚と研磨時間との関係、およびサンプルの第2膜の膜厚と研磨時間との関係の一例を示すグラフである。

図10は、膜厚推定モデルの作成の一実施形態を説明する図である。

図11は、分類モデルを用いた複数の測定スペクトルの分類の一実施形態を説明する図である。

図12は、膜厚推定モデルを用いたワークピースの第1膜および第2膜の膜厚の推定の一実施形態を説明する図である。

図 1 3 は、ワークピースの研磨中に、ワークピースの第 1 膜および第 2 膜との膜厚差を推定する方法の一実施形態を示すフローチャートである。

図 1 4 は、膜厚推定モデルの作成の他の実施形態を説明する図である。

図 1 5 は、図 1 4 に示す膜厚推定モデルを用いたワークピースの第 1 膜および第 2 膜の膜厚の推定の一実施形態を説明する図である。

図 1 6 は、図 1 4 および図 1 5 に示す膜厚推定モデルを用いて、ワークピースの研磨中に、ワークピースの第 1 膜および第 2 膜との膜厚差を推定する方法の一実施形態を示すフローチャートである。

図 1 7 は、分類モデルの作成に用いる複数のサンプルスペクトルの分類ラベルの取得の他の実施形態を説明する図である。

図 1 8 は、図 1 7 に示す分類ラベルを含む分類訓練データを用いた分類モデルの作成の一実施形態を説明する図である。

図 1 9 は、図 1 8 に示す分類モデルを用いた複数の測定スペクトルの分類の一実施形態を説明する図である。

15

実施形態の説明

[0016] 以下、本発明の実施形態について図面を参照して説明する。

図 1 は、研磨装置の一実施形態を示す模式図である。図 1 に示すように、研磨装置は、研磨パッド 2 を支持する研磨テーブル 3 と、半導体デバイスの製造に使用されるウェーハなどのワークピース W を研磨テーブル 3 上の研磨パッド 2 に押し付ける研磨ヘッド 1 と、研磨テーブル 3 を回転させるテーブルモータ 6 と、研磨パッド 2 上にスラリーなどの研磨液を供給するための研磨液供給ノズル 5 を備えている。研磨パッド 2 の上面は、ワークピース W を研磨する研磨面 2 a を構成する。

[0017] 研磨ヘッド 1 はヘッドシャフト 1 0 に連結されており、ヘッドシャフト 1 0 は図示しない研磨ヘッドモータに連結されている。研磨ヘッドモータは、研磨ヘッド 1 をヘッドシャフト 1 0 とともに矢印で示す方向に回転させる。研磨テーブル 3 はテーブルモータ 6 に連結されており、テーブルモータ 6 は研磨テーブル 3 および研磨パッド 2 を矢印で示す方向に回転させるように構成されている。

[0018] ワークピースWは次のようにして研磨される。研磨テーブル3および研磨ヘッド1を図1の矢印で示す方向に回転させながら、研磨液供給ノズル5から研磨液が研磨テーブル3上の研磨パッド2の研磨面2aに供給される。ワークピースWは研磨ヘッド1によって回転されながら、研磨パッド2上に研磨液が存在した状態でワークピースWは研磨ヘッド1によって研磨パッド2の研磨面2aに押し付けられる。ワークピースWの表面は、研磨液の化学的作用と、研磨液に含まれる砥粒および／または研磨パッド2の機械的作用により研磨される。

[0019] 研磨装置は、ワークピースWの膜厚を決定する光学式膜厚測定装置40を備えている。光学式膜厚測定装置40は、光を発する光源44と、分光器47と、光源44および分光器47に連結された光学センサヘッド7と、分光器47に連結された処理システム49を備えている。光学センサヘッド7、光源44、および分光器47は研磨テーブル3に取り付けられており、研磨テーブル3および研磨パッド2とともに一体に回転する。光学センサヘッド7の位置は、研磨テーブル3および研磨パッド2が一回転するたびに研磨パッド2上のワークピースWの中心を含むワークピースWの表面を横切る位置である。

[0020] 処理システム49は、後述するスペクトルの生成、分類モデルや膜厚推定モデルなどの各種モデルの作成、およびワークピースWの表面の膜厚差の推定を実行するためのプログラムが格納された記憶装置49aと、プログラムに含まれる命令に従って演算を実行する演算装置49bを備えている。処理システム49は、少なくとも1台のコンピュータから構成される。記憶装置49aは、RAMなどの主記憶装置と、ハードディスクドライブ（HDD）、ソリッドステートドライブ（SSD）などの補助記憶装置を備えている。演算装置49bの例としては、CPU（中央処理装置）、GPU（グラフィックプロセッシングユニット）が挙げられる。ただし、処理システム49の具体的構成はこれらの例に限定されない。

[0021] 処理システム49は、少なくとも1台のコンピュータから構成されている。前記少なくとも1台のコンピュータは、1台のサーバまたは複数台のサーバであってもよい。処理システム49は、分光器47に通信線で接続されたエッジサーバであってもよいし、インターネットまたはローカルエリアネットワークなどの

通信ネットワークによって分光器 4 7 に接続されたクラウドサーバまたはフォグサーバであってもよい。処理システム 4 9 は、ゲートウェイ、ルーターなどの中に配置されてもよい。

5 [0022] 処理システム 4 9 は、インターネットまたはローカルエリアネットワークなどの通信ネットワークにより接続された複数のサーバであってもよい。例えば、処理システム 4 9 は、エッジサーバとクラウドサーバとの組み合わせであってもよい。一実施形態では、記憶装置 4 9 a は、演算装置 4 9 b から離れた場所にあるサーバ（図示せず）内に設けられてもよい。

10 [0023] 光源 4 4 は、処理システム 4 9 に電氣的に接続されており、処理システム 4 9 から送られるトリガー信号を受けて光を発する。より具体的には、光学センサヘッド 7 が研磨パッド 2 上のワークピース W の表面を横切る間、光源 4 4 は複数のトリガー信号を受けて複数回光を発する。したがって、研磨テーブル 3 が一回転するたびに、ワークピース W 上の複数の測定点に光が照射される。光源 4 4 から発せられた光は、光学センサヘッド 7 に伝送され、光学センサヘッド 7 から
15 ワークピース W の表面に導かれる。光はワークピース W の表面で反射し、ワークピース W の表面からの反射光は光学センサヘッド 7 によって受けられ、分光器 4 7 に送られる。分光器 4 7 は反射光を波長に従って分解し、各波長での反射光の強度を測定する。反射光の強度測定データは、処理システム 4 9 に送られる。

[0024] 処理システム 4 9 は、反射光の強度測定データから反射光のスペクトルを
20 生成するように構成されている。反射光のスペクトルは、反射光の波長と強度との関係を示す線グラフ（すなわち分光波形）として表される。反射光の強度は、反射率または相対反射率などの相対値として表わすこともできる。

[0025] 図 2 は、処理システム 4 9 によって生成されたスペクトルの一例を示す図である。スペクトルは、光の波長と強度との関係を示す線グラフ（すなわち分光
25 波形）として表される。図 2 において、横軸は基板から反射した光の波長を表わし、縦軸は反射した光の強度から導かれる相対反射率を表わす。相対反射率とは、反射光の強度を示す指標値であり、光の強度と所定の基準強度との比である。各波長において光の強度（実測強度）を所定の基準強度で割ることにより、装置の光学系や光源固有の強度のばらつきなどの不要なノイズを実測強度から除去する

ことができる。

[0026] 基準強度は、各波長について予め測定された光の強度であり、相対反射率は各波長において算出される。具体的には、各波長での光の強度（実測強度）を、対応する基準強度で割り算することにより相対反射率が求められる。基準強度は、
5 例えば、光学センサヘッド7から発せられた光の強度を直接測定するか、または光学センサヘッド7から鏡に光を照射し、鏡からの反射光の強度を測定することによって得られる。あるいは、基準強度は、膜が形成されていないシリコン基板（ベア基板）を研磨パッド2上で水の存在下で水研磨しているとき、または上記シリコン基板（ベア基板）が研磨パッド2上に置かれているときに、分光器47
10 により測定されたシリコン基板からの反射光の強度としてもよい。

[0027] 実際の研磨では、実測強度からダークレベル（光を遮断した条件下で得られた背景強度）を引き算して補正実測強度を求め、さらに基準強度から上記ダークレベルを引き算して補正基準強度を求め、そして、補正実測強度を補正基準強度で割り算することにより、相対反射率が求められる。具体的には、相対反射率
15 $R(\lambda)$ は、次の式（1）を用いて求めることができる。

$$\text{【数1】} \quad R(\lambda) = \frac{E(\lambda) - D(\lambda)}{B(\lambda) - D(\lambda)} \quad (1)$$

ここで、 λ は基板から反射した光の波長であり、 $E(\lambda)$ は波長 λ での強度であり、 $B(\lambda)$ は波長 λ での基準強度であり、 $D(\lambda)$ は光を遮断した条件下で測定された波長 λ での背景強度（ダークレベル）である。

[0028] 光学センサヘッド7は、研磨テーブル3が一回転するたびに、ワークピースW上の複数の測定点に光を導き、上記複数の測定点からの反射光を受ける。ワークピースW上の複数の測定点は、ワークピースWの中心を含む。反射光は分光器47に送られる。分光器47は反射光を波長に従って分解し、各波長での反射光の強度を測定する。反射光の強度測定データは、処理システム49に送られる。
20 図2に示す例では、反射光のスペクトルは、相対反射率と反射光の波長との関係を示す分光波形であるが、反射光のスペクトルは、反射光の強度自体と、反射光の波長との関係を示す分光波形であってもよい。

[0029] さらに、処理システム49は、後述するように、研磨テーブル3が一回転

する間に上記複数の測定点から返ってきた反射光の強度測定データを受け取り、この強度測定データから複数のスペクトルを生成する。処理システム 49 は、各スペクトルからワークピース W の膜厚を推定（または決定）するように構成されている。本明細書中、研磨テーブル 3 が一回転する間に得られた複数のスペクトルは、同じ研磨時間における複数の測定点からの反射光の複数のスペクトルであるものと定義する。

[0030] 図 1 に示すように、処理システム 49 は、ワークピース W の研磨動作を制御するための研磨制御部 9 に接続されている。この研磨制御部 9 は、処理システム 49 によって決定されたワークピース W の膜厚に基づいて、ワークピース W の研磨動作を制御する。例えば、研磨制御部 9 は、ワークピース W の膜厚が目標膜厚に達した時点である研磨終点を決定する、あるいはワークピース W の膜厚が所定の値に達したときにワークピース W の研磨条件を変更するように構成されている。

[0031] 図 3 は、図 1 に示す研磨装置の詳細な構成の一実施形態を示す断面図である。ヘッドシャフト 10 は、ベルト等の連結手段 17 を介して研磨ヘッドモータ 18 に連結されて回転されるようになっている。このヘッドシャフト 10 の回転により、研磨ヘッド 1 が矢印で示す方向に回転する。

[0032] 分光器 47 は、光検出器 48 を備えている。一実施形態では、光検出器 48 は、フォトダイオード、CCD、または CMOS などから構成されている。光学センサヘッド 7 は、光源 44 および光検出器 48 に光学的に連結されている。光検出器 48 は処理システム 49 に電氣的に接続されている。

[0033] 光学式膜厚測定装置 40 は、光源 44 から発せられた光をワークピース W の表面に導く投光用光ファイバケーブル 31 と、ワークピース W からの反射光を受け、反射光を分光器 47 に送る受光用光ファイバケーブル 32 を備えている。投光用光ファイバケーブル 31 の先端および受光用光ファイバケーブル 32 の先端は、研磨テーブル 3 内に位置している。

[0034] 投光用光ファイバケーブル 31 の先端および受光用光ファイバケーブル 32 の先端は、光をワークピース W の表面に導き、かつワークピース W からの反射光を受ける光学センサヘッド 7 を構成する。投光用光ファイバケーブル 3

1 の他端は光源 4 4 に接続され、受光用光ファイバケーブル 3 2 の他端は分光器 4 7 に接続されている。分光器 4 7 は、ワークピース W からの反射光を波長に従って分解し、所定の波長範囲に亘って反射光の強度を測定するように構成されている。

- 5 [0035] 光源 4 4 は、光を投光用光ファイバケーブル 3 1 を通じて光学センサヘッド 7 に送り、光学センサヘッド 7 は光をワークピース W に向けて放つ。ワークピース W からの反射光は光学センサヘッド 7 に受けられ、受光用光ファイバケーブル 3 2 を通じて分光器 4 7 に送られる。分光器 4 7 は反射光をその波長に従って分解し、各波長での反射光の強度を測定する。分光器 4 7 は、反射光の強度
10 測定データを処理システム 4 9 に送る。処理システム 4 9 は、反射光の強度測定データから反射光のスペクトルを生成する。

- [0036] 研磨テーブル 3 は、その上面で開口する第 1 の孔 5 0 A および第 2 の孔 5 0 B を有している。また、研磨パッド 2 には、これら孔 5 0 A, 5 0 B に対応する位置に通孔 5 1 が形成されている。孔 5 0 A, 5 0 B と通孔 5 1 とは連通し、
15 通孔 5 1 は研磨面 2 a で開口している。第 1 の孔 5 0 A は液体供給ライン 5 3 に連結されており、第 2 の孔 5 0 B はドレインライン 5 4 に連結されている。投光用光ファイバケーブル 3 1 の先端および受光用光ファイバケーブル 3 2 の先端から構成される光学センサヘッド 7 は、第 1 の孔 5 0 A に配置されており、かつ通孔 5 1 の下方に位置している。

- 20 [0037] ワークピース W の研磨中は、リンス液として純水が液体供給ライン 5 3 を介して第 1 の孔 5 0 A に供給され、さらに第 1 の孔 5 0 A を通って通孔 5 1 に供給される。純水は、ワークピース W の表面（被研磨面）と光学センサヘッド 7 との間の空間を満たす。純水は、第 2 の孔 5 0 B に流れ込み、ドレインライン 5 4 を通じて排出される。第 1 の孔 5 0 A および通孔 5 1 内を流れる純水は、研磨液
25 が第 1 の孔 5 0 A に浸入することを防止し、これにより光路が確保される。

[0038] 投光用光ファイバケーブル 3 1 は、光源 4 4 によって発せられた光をワークピース W の表面まで導く光伝送部である。投光用光ファイバケーブル 3 1 および受光用光ファイバケーブル 3 2 の先端は、第 1 の孔 5 0 A 内に位置しており、ワークピース W の被研磨面の近傍に位置している。投光用光ファイバケ

ーブル 3 1 および受光用光ファイバーケーブル 3 2 の各先端から構成される光学センサヘッド 7 は、研磨ヘッド 1 に保持されたワークピース W を向いて配置される。研磨テーブル 3 が回転するたびにワークピース W の所定の測定点に光が照射される。本実施形態では、1 つの光学センサヘッド 7 のみが研磨テーブル 3 内に
5 設けられているが、複数の光学センサヘッド 7 が研磨テーブル 3 内に設けられてもよい。

[0039] 図 4 は、光学式膜厚測定装置 4 0 の原理を説明するための模式図であり、図 5 は、ワークピース W と研磨テーブル 3 との位置関係を示す平面図である。図 4 に示す例では、ワークピース W は、下層膜と、その上に形成された上層膜とを
10 有している。上層膜は、例えば絶縁膜、金属膜などである。投光用光ファイバーケーブル 3 1 および受光用光ファイバーケーブル 3 2 の各先端から構成される光学センサヘッド 7 は、ワークピース W の表面に対向して配置されている。光学センサヘッド 7 は、研磨テーブル 3 が 1 回転するたびに、ワークピース W の中心を含む複数の測定点に光を照射する。

15 [0040] ワークピース W に照射された光は、媒質（図 4 の例では水）と上層膜との界面、および上層膜と下層膜との界面で反射し、これらの界面で反射した光の波が互いに干渉する。この光の波の干渉の仕方は、上層膜の厚さ（すなわち光路長）に応じて変化する。このため、ワークピース W からの反射光から生成されるスペクトルは、上層膜の厚さに従って変化する。また、ワークピース W からの反射光
20 から生成されるスペクトルは、上層膜を構成する材料によっても形状が異なる。

[0041] ワークピース W の研磨中、研磨テーブル 3 が一回転するたびに、光学センサヘッド 7 はワークピース W を横切って移動する。光学センサヘッド 7 がワークピース W の下方にあるとき、光源 4 4 は光を発する。光は、光学センサヘッド 7 からワークピース W の表面（被研磨面）に導かれ、ワークピース W からの反射光
25 は光学センサヘッド 7 に受けられ、分光器 4 7 に送られる。分光器 4 7 は、各波長での反射光の強度を所定の波長範囲に亘って測定し、反射光の強度測定データを処理システム 4 9 に送る。処理システム 4 9 は、波長ごとの光の強度を表わす反射光のスペクトルを強度測定データから生成する。

[0042] ワークピース W は、配線構造を構成するパターンを有しており、ワークピ

ースWの表面は酸化膜や窒化膜などの絶縁膜や、銅、タングステンなどの金属膜などの異なる材料から構成された複数の膜を有している。図6は、研磨前後のワークピースWの第1膜F1および第2膜F2の膜厚の変化の一例を示す模式図である。図6に示す例では、ワークピースWは、その表面に異なる材料から構成された膜である第1膜F1と第2膜F2を有している。すなわち、ワークピースWの研磨対象膜である上層膜（図4参照）は、第1膜F1と第2膜F2から構成されている。例えば、第1膜F1は酸化膜であり、第2膜F2は金属膜である。ただし、第1膜F1と第2膜F2はこの例に限定されることなく、例えば、第1膜F1は酸化膜であり、第2膜F2は窒化膜であってもよい。本実施形態の第1膜F1および第2膜F2は、光学式膜厚測定装置40で測定可能な膜厚を有している。光学式膜厚測定装置40で測定可能な膜厚は、第1膜F1および第2膜F2を構成する材料（第1膜F1および第2膜F2の種類）によって異なる。例えば、金属膜では、数100nm以下の膜厚は、光学式膜厚測定装置40で測定可能である。

[0043] 図6に示す例では、研磨前のワークピースWの第1膜F1の膜厚（初期膜厚） $T1_{ini}$ と、研磨前のワークピースWの第2膜F2の膜厚（初期膜厚） $T2_{ini}$ は同じであり、研磨後のワークピースWの第1膜F1の膜厚（最終膜厚） $T1_{fin}$ は、研磨後のワークピースWの第2膜F2の膜厚（最終膜厚） $T2_{fin}$ よりも大きい。すなわち、ワークピースWの研磨後、第1膜F1と第2膜F2との間に膜厚差 $T1_{fin} - T2_{fin}$ が生じている。ワークピースWの研磨では、この膜厚差 $T1_{fin} - T2_{fin}$ を許容値内に収める必要がある。しかしながら、ワークピースWの研磨中、光学式膜厚測定装置40により第1膜F1と第2膜F2を特定して、第1膜F1と第2膜F2の膜厚を測定するのは困難であった。

[0044] そこで、本実施形態の光学式膜厚測定装置40は、ワークピースWの研磨中、機械学習により構築された分類モデルを用いて、ワークピースW上の複数の測定点からの反射光の複数のスペクトルを、第1膜F1からの反射光のスペクトルが属する第1グループと、第2膜F2からの反射光のスペクトルが属する第2グループに分類するように構成されている。さらに、光学式膜厚測定装置40は、ワークピースWの研磨中、機械学習により構築された膜厚推定モデルを用いて、

第 1 グループと第 2 グループに分類された反射光の複数のスペクトルから、第 1 膜 F 1 および第 2 膜 F 2 の膜厚を推定し、第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との膜厚差を算出するように構成されている。

5 [0045] 以下、光学式膜厚測定装置 4 0 の処理システム 4 9 による分類モデルの作成について説明する。分類モデルの作成では、ワークピース W と同種のサンプルが使用される。例えば、ワークピース W がウェーハである場合は、ウェーハからなるサンプルが使用される。他の例では、ワークピース W がパネルである場合には、パネルからなるサンプルが使用される。

10 [0046] ワークピース W と同様に、サンプルは、その表面に第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 を有する。サンプルは、図 1 に示す研磨装置によって研磨される。サンプルの研磨中、処理システム 4 9 は、サンプルからの反射光の複数のスペクトル（以下、サンプルスペクトルという）を生成する。サンプルスペクトルの生成は、図 1 乃至図 5 を参照して説明した、ワークピース W からの反射光のスペクトルの生成と同様にして実行される。すなわち、研磨テーブル 3 が一回転するたびに、光源 4
15 4 は光学センサヘッド 7 を通じて光を研磨パッド 2 上のサンプル上の複数の測定点に導き、サンプルからの反射光を光学センサヘッド 7 で受け、さらに反射光を分光器 4 7 に送る。分光器 4 7 は、サンプルからの反射光を波長に従って分解し、各波長での反射光の強度を測定する。反射光の強度測定データは、処理システム 4 9 に送られる。処理システム 4 9 は、サンプルからの反射光の強度測定データ
20 から、反射光のサンプルスペクトルを生成する。

[0047] 複数のサンプルスペクトルは、サンプルの第 1 膜 F 1 からの反射光のスペクトル、およびサンプルの第 2 膜 F 2 からの反射光のスペクトルを含む。複数のサンプルスペクトルは、複数のサンプルスペクトルが得られた研磨時間とともに、処理システム 4 9 の記憶装置 4 9 a に格納される。すなわち、複数のサンプルス
25 ぺクトルは、複数のサンプルスペクトルが得られた研磨時間にそれぞれ関連付けられて、記憶装置 4 9 a に格納される。複数のサンプルスペクトルは、分類モデルを作成するための分類訓練データおよび膜厚推定モデルを作成するための膜厚推定訓練データとして用いられる。分類モデルおよび膜厚推定モデルの精度を向上させるために、分類訓練データおよび膜厚推定訓練データとして多くのサンプ

ルスペクトルを用意することが好ましい。そこで、処理システム49は、複数のサンプルの研磨中に得られた複数のサンプルスペクトルを生成し、記憶装置49aに格納する。

5 [0048] 図7は、分類モデルの作成に用いる複数のサンプルスペクトルの分類ラベルの取得の一実施形態を説明する図である。図7に示すように、処理システム49は、第1膜F1と第2膜F2を有するサンプルからの反射光の複数のサンプルスペクトルに対してクラスタリングを実行して、複数のサンプルスペクトルを第1グループと第2グループにグループ化するように構成されている。このクラスタリングは教師なし機械学習であり、クラスタリングのアルゴリズムの例として
10 は、k平均法、混合ガウスモデル（GMM）、DBSCANなどが挙げられる。処理システム49の演算装置49bは、プログラムに含まれる命令に従って演算を実行することによってクラスタリングを実行する。

[0049] より具体的には、処理システム49は、複数のサンプルスペクトルに対してクラスタリングを実行したときのクラスタリング結果である複数のグループに
15 対して、第1膜F1からの反射光のサンプルスペクトルが属する第1グループと、第2膜F2からの反射光のサンプルスペクトルが属する第2グループとにラベリングを実行する。複数のグループに対するラベリングは、外部からの入力（例えばユーザからの指令）に基づいて行われてもよいし、膜の種類が既知の反射光のスペクトルに基づいて行われてもよいし、膜の種類から理論的に計算される理論
20 スペクトルに基づいて行われてもよい。

[0050] 処理システム49は、クラスタリング結果に基づいて、複数のサンプルスペクトルのそれぞれが属するグループを示す分類ラベルを取得するように構成されている。第1グループを示す分類ラベルは、第1膜F1からの反射光のサンプルスペクトルに関連付けられ、第2グループを示す分類ラベルは、第2膜F2か
25 らの反射光のサンプルスペクトルに関連付けられて、処理システム49の演算装置49bに格納される。

[0051] 図8は、分類モデルの作成の一実施形態を説明する図である。図8に示すように、処理システム49は、複数のサンプルスペクトルと、複数のサンプルスペクトルの分類ラベルを含む分類訓練データを用いた機械学習を実行して、分類

モデルを作成するように構成されている。機械学習のアルゴリズムの例としては、サポートベクター回帰法、ディープラーニング法、ランダムフォレスト法、および決定木法などが挙げられるが、本実施形態では機械学習の一例であるディープラーニング法が使用されている。ディープラーニング法は、中間層（隠れ層ともいう）が多層化されたニューラルネットワークをベースとする学習法である。本明細書では、入力層と、二層以上の中間層と、出力層で構成されるニューラルネットワークを用いた機械学習をディープラーニングと称する。

[0052] 分類モデルは、ニューラルネットワークから構成されている。処理システム49の記憶装置49aには、分類モデルを機械学習アルゴリズムに従って作成するためのプログラムが格納されている。処理システム49の演算装置49bは、プログラムに含まれる命令に従って演算を実行することによって分類モデルを作成する。機械学習によって分類モデルを作成することは、ニューラルネットワークの重みなどのパラメータを最適化する工程を含む。

[0053] 分類モデルの作成では、分類訓練データに含まれる複数のサンプルスペクトルは、説明変数として使用され、複数のサンプルスペクトルの分類ラベルは、目的変数（正解ラベル）として使用される。すなわち、処理システム49は、各サンプルスペクトルを分類モデルの入力層に入力し、入力されたサンプルスペクトルが属するグループを示す分類ラベルが出力層から出力されるように分類モデルのパラメータ（重みやバイアスなど）を調節する。

[0054] このような機械学習の結果、学習済みモデルとしての分類モデルが作成される。分類モデルは、処理システム49の記憶装置49a内に格納される。このように作成された分類モデルを用いることで、後述するように、ワークピースWの研磨中、ワークピースWからの反射光から生成されたスペクトルを第1グループと第2グループに分類することができる。

[0055] 次に、処理システム49による膜厚推定モデルの作成について説明する。膜厚推定モデルの作成では、上述した分類モデルの作成に用いられた複数のサンプルスペクトルと、複数のサンプルスペクトルに対応する膜厚を含む膜厚推定訓練データが用いられる。複数のサンプルスペクトルに対応する膜厚は、サンプルの第1膜F1の研磨前の膜厚（初期膜厚）および研磨後の膜厚（最終膜厚）、お

よびサンプルの第2膜F2の研磨前の膜厚（初期膜厚）および研磨後の膜厚（最終膜厚）に基づいて決定される。

5 [0056] サンプルの第1膜F1の初期膜厚および最終膜厚、およびサンプルの第2膜F2の初期膜厚および最終膜厚は、膜厚測定装置（図示せず）によって測定される。膜厚測定装置は、いわゆるスタンドアロンタイプの膜厚測定装置であり、サンプルの第1膜F1および第2膜F2を高い精度で測定することができるように構成されている。したがって、サンプルの第1膜F1および第2膜F2を特定して、第1膜F1および第2膜F2の膜厚を測定することができる。膜厚測定装置の構成およびタイプは、特に限定されない。例えば、膜厚測定装置は、サンプルが静止した状態で、サンプルの膜厚を測定するように構成された光学式膜厚測定装置である。膜厚測定装置は、研磨装置の外部に配置されてもよい。膜厚測定装置により測定されたサンプルの第1膜F1の初期膜厚および最終膜厚、および第2膜F2の初期膜厚および最終膜厚は、処理システム49の記憶装置49aに格納される。

15 [0057] サンプルは、研磨装置により一定の研磨レートで研磨される。研磨レートは、膜の厚さの単位時間当たりの減少量であり、除去レートとも呼ばれる。図9は、サンプルの第1膜F1の膜厚と研磨時間との関係、およびサンプルの第2膜F2の膜厚と研磨時間との関係の一例を示すグラフである。サンプルの研磨レートが一定である場合、図9の実線で示すように、実線で示す第1膜F1の膜厚は、研磨時間とともに初期膜厚 $T_{1\text{ ini}}$ から最終膜厚 $T_{1\text{ fin}}$ まで直線的に減少する。

20 また、図9の一点鎖線で示すように、第2膜F2の膜厚は、研磨時間とともに初期膜厚 $T_{2\text{ ini}}$ から最終膜厚 $T_{2\text{ fin}}$ まで直線的に減少する。したがって、第1膜F1の初期膜厚 $T_{1\text{ ini}}$ と最終膜厚 $T_{1\text{ fin}}$ との間の膜厚、および第2膜F2の初期膜厚 $T_{2\text{ ini}}$ と最終膜厚 $T_{2\text{ fin}}$ との間の膜厚は、研磨時間に基づいて内挿により算定することができる。

[0058] 処理システム49は、サンプルの第1膜F1の初期膜厚 $T_{1\text{ ini}}$ および最終膜厚 $T_{1\text{ fin}}$ 、第2膜F2の初期膜厚 $T_{2\text{ ini}}$ および最終膜厚 $T_{2\text{ fin}}$ 、および複数のサンプルスペクトルが得られた研磨時間（複数のサンプルスペクトルに関連付けられた研磨時間）から、複数のサンプルスペクトルに対応する膜厚を決定する

ように構成されている。具体的には、処理システム49は、サンプルの第1膜F1の初期膜厚 $T_{1\text{ini}}$ および最終膜厚 $T_{1\text{fin}}$ 、および複数のサンプルスペクトルが得られた研磨時間から、第1グループに属する複数のサンプルスペクトルに対応する複数の膜厚をそれぞれ決定する。同様に、処理システム49は、サンプル

5 第2膜F2の初期膜厚 $T_{2\text{ini}}$ および最終膜厚 $T_{2\text{fin}}$ 、および複数のサンプルスペクトルが得られた研磨時間から、第2グループに属する複数のサンプルスペクトルに対応する複数の膜厚をそれぞれ決定する。決定された複数のサンプルスペクトルに対応する膜厚は、複数のサンプルスペクトルにそれぞれ関連付けられて、記憶装置49aに格納される。

10 [0059] 図10は、膜厚推定モデルの作成の一実施形態を説明する図である。処理システム49は、複数のサンプルスペクトルと、複数のサンプルスペクトルに対応する膜厚を含む膜厚推定訓練データを用いて機械学習を実行して、膜厚推定モデルを作成するように構成されている。図10に示すように、本実施形態では、膜厚推定モデルは、第1膜F1の膜厚を推定するための第1膜厚推定モデル、お

15 よび第2膜F2の膜厚を推定するための第2膜厚推定モデルを含む。処理システム49は、複数のサンプルスペクトルのうち、第1グループに属するサンプルスペクトルと、第1グループに属するサンプルスペクトルに対応する膜厚を含む第1膜厚推定訓練データを用いて機械学習を実行して、第1膜厚推定モデルを作成する。同様に、処理システム49は、複数のサンプルスペクトルのうち、第2グ

20 ループに属するサンプルスペクトルと、第2グループに属するサンプルスペクトルに対応する膜厚を含む第2膜厚推定訓練データを用いて機械学習を実行して、第2膜厚推定モデルを作成する。

[0060] 機械学習のアルゴリズムの例としては、サポートベクター回帰法、ディープラーニング法、ランダムフォレスト法、および決定木法などが挙げられるが、

25 本実施形態では機械学習の一例であるディープラーニング法が使用されている。ディープラーニング法は、中間層（隠れ層ともいう）が多層化されたニューラルネットワークをベースとする学習法である。本明細書では、入力層と、二層以上の中間層と、出力層で構成されるニューラルネットワークを用いた機械学習をディープラーニングと称する。

[0061] 第1膜厚推定モデルおよび第2膜厚推定モデルは、ニューラルネットワークから構成されている。処理システム49の記憶装置49aには、第1膜厚推定モデルおよび第2膜厚推定モデルを機械学習アルゴリズムに従って作成するためのプログラムが格納されている。処理システム49の演算装置49bは、プログラムに含まれる命令に従って演算を実行することによって第1膜厚推定モデルおよび第2膜厚推定モデルを作成する。機械学習によって第1膜厚推定モデルおよび第2膜厚推定モデルを作成することは、ニューラルネットワークの重みなどのパラメータを最適化する工程を含む。

[0062] 第1膜厚推定モデルおよび第2膜厚推定モデルの作成では、第1膜厚推定訓練データおよび第2膜厚推定訓練データに含まれる複数のサンプルスペクトルは、説明変数として使用され、複数のサンプルスペクトルに対応する膜厚は、目的変数（正解ラベル）として使用される。すなわち、処理システム49は、各サンプルスペクトルを第1膜厚推定モデルおよび第2膜厚推定モデルの入力層に入力し、入力されたサンプルスペクトルに対応する膜厚が出力層から出力されるように第1膜厚推定モデルおよび第2膜厚推定モデルのパラメータ（重みやバイアスなど）を調節する。

[0063] このような機械学習の結果、学習済みモデルとしての第1膜厚推定モデルおよび第2膜厚推定モデルが作成される。第1膜厚推定モデルおよび第2膜厚推定モデルは、処理システム49の記憶装置49a内に格納される。このように作成された第1膜厚推定モデルおよび第2膜厚推定モデルを用いることで、後述するように、ワークピースWの研磨中、ワークピースWからの反射光から生成されたスペクトルから、ワークピースWの第1膜F1および第2膜F2の推定膜厚を取得することができる。

[0064] 次に、分類モデルおよび膜厚推定モデル（本実施形態では、第1膜厚推定モデルおよび第2膜厚推定モデル）を用いた、処理システム49によるワークピースWの第1膜F1と第2膜F2との膜厚差の算出について説明する。図1乃至図5を参照して説明したように、ワークピースWの研磨中、処理システム49は、研磨テーブル3が一回転する間に、同じ研磨時間においてワークピースWの複数の測定点からの反射光の複数のスペクトルを生成する。以下の説明では、ワーク

ピースWからの反射光のスペクトルを、測定スペクトルと称する。

[0065] 図 1 1 は、分類モデルを用いた複数の測定スペクトルの分類の一実施形態を説明する図である。図 1 1 に示すように、処理システム 4 9 は、同じ研磨時間における複数の測定スペクトルのそれぞれを学習済みの分類モデルに入力し、複数の測定スペクトルのそれぞれが第 1 グループまたは第 2 グループのいずれかに分類された分類結果を分類モデルから出力するように構成されている。これにより、ワークピースWの研磨中に生成された複数の測定スペクトルを、第 1 膜 F 1 からの反射光の測定スペクトルが属する第 1 グループと、第 2 膜 F 2 からの反射光の測定スペクトルが属する第 2 グループに分類することができる。

[0066] 図 1 2 は、膜厚推定モデルを用いたワークピースWの第 1 膜 F 1 および第 2 膜 F 2 の膜厚の推定の一実施形態を説明する図である。処理システム 4 9 は、分類モデルにより第 1 グループに分類された第 1 膜 F 1 からの反射光の測定スペクトルと、第 2 グループに分類された第 2 膜 F 2 からの反射光の測定スペクトルを、学習済みの膜厚推定モデルに入力し、同じ研磨時間におけるワークピースWの第 1 膜 F 1 の推定膜厚および第 2 膜 F 2 の推定膜厚を膜厚推定モデルから出力するように構成されている。図 1 2 に示すように、本実施形態では、処理システム 4 9 は、分類モデルにより第 1 グループに分類された第 1 膜 F 1 からの反射光の測定スペクトルを第 1 膜厚推定モデルに入力し、かつ第 2 グループに分類された第 2 膜 F 2 からの反射光の測定スペクトルを、第 2 膜厚推定モデルに入力するように構成されている。さらに、処理システム 4 9 は、同じ研磨時間におけるワークピースWの第 1 膜 F 1 の推定膜厚を第 1 膜厚推定モデルから出力し、かつ同じ研磨時間におけるワークピースWの第 2 膜 F 2 の推定膜厚を第 2 膜厚推定モデルから出力するように構成されている。

[0067] 複数の測定スペクトルのうち第 1 グループに分類された測定スペクトルが複数存在する場合、処理システム 4 9 は、第 1 グループに分類された複数の測定スペクトルのそれぞれを第 1 膜厚推定モデルに入力することで、ワークピースWの第 1 膜 F 1 の複数の推定膜厚を第 1 膜厚推定モデルから出力する。一実施形態では、処理システム 4 9 は、第 1 膜厚推定モデルから出力された第 1 膜 F 1 の複数の推定膜厚の平均値を算出して、同じ研磨時間における第 1 膜 F 1 の推定膜厚

を決定してもよい。他の実施形態では、処理システム 49 は、第 1 膜厚推定モデルから出力された第 1 膜 F 1 の複数の推定膜厚の中央値などの他の代表値を算出して、同じ研磨時間における第 1 膜 F 1 の推定膜厚を決定してもよい。さらに他の実施形態では、処理システム 49 は、第 1 グループに分類された複数の測定スペクトルのうちの 1 つのスペクトルを代表測定スペクトルとして決定し、代表測定スペクトルを第 1 膜厚推定モデルに入力し、ワークピース W の第 1 膜 F 1 の推定膜厚を第 1 膜厚推定モデルから出力してもよい。

[0068] 同様に、複数の測定スペクトルのうち第 2 グループに分類された測定スペクトルが複数存在する場合、処理システム 49 は、第 2 グループに分類された複数の測定スペクトルのそれぞれを第 2 膜厚推定モデルに入力することで、ワークピース W の第 2 膜 F 2 の複数の推定膜厚を第 2 膜厚推定モデルから出力する。一実施形態では、処理システム 49 は、第 2 膜厚推定モデルから出力された第 2 膜 F 2 の複数の推定膜厚の平均値を算出して、同じ研磨時間における第 2 膜 F 2 の推定膜厚を決定してもよい。他の実施形態では、処理システム 49 は、第 2 膜厚推定モデルから出力された第 2 膜 F 2 の複数の推定膜厚の中央値などの他の代表値を算出して、同じ研磨時間における第 2 膜 F 2 の推定膜厚を決定してもよい。さらに他の実施形態では、処理システム 49 は、第 2 グループに分類された複数の測定スペクトルのうちの 1 つのスペクトルを代表測定スペクトルとして決定し、代表測定スペクトルを第 2 膜厚推定モデルに入力し、ワークピース W の第 2 膜 F 2 の推定膜厚を第 2 膜厚推定モデルから出力してもよい。

[0069] 以上のようにして、処理システム 49 は、同じ研磨時間におけるワークピース W の第 1 膜 F 1 の推定膜厚および第 2 膜 F 2 の推定膜厚を取得することができる。処理システム 49 は、膜厚推定モデル（本実施形態では、第 1 膜厚推定モデルおよび第 2 膜厚推定モデル）から出力された第 1 膜 F 1 の推定膜厚から第 2 膜 F 2 の推定膜厚を減算することにより、同じ研磨時間におけるワークピース W の第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との推定膜厚差を算出するように構成されている。処理システム 49 は、研磨テーブル 3 が一回転するたびに、第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との推定膜厚差を算出することで、ワークピース W の研磨中に、第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との推定膜厚差を監視することができる。

[0070] 第1膜F 1または第2膜F 2のいずれかが金属膜である場合、金属膜が他の膜に対して相対的に過研磨となること、金属膜が他の膜に対して相対的に研磨不足となることを防止する必要がある。第1膜F 1が絶縁膜であり、第2膜F 2が金属膜である場合、処理システム4 9は、ワークピースWの第1膜F 1と第2膜F 2との推定膜厚差が所定の許容値を超えたときに、ワークピースWの研磨を終了するための研磨終了信号を出力するように構成されている。研磨制御部9は、処理システム4 9からの研磨終了信号に基づいて、ワークピースWの研磨を終了するように構成されている。一実施形態では、処理システム4 9は、ワークピースWの第1膜F 1と第2膜F 2との推定膜厚差が所定の許容値を超えたときに警報を発するように構成されてもよい。これにより、金属膜である第2膜F 2が絶縁膜である第1膜F 1に対して相対的に過研磨となることを防止することができる。

[0071] 第1膜F 1が金属膜であり、第2膜F 2が絶縁膜である場合、処理システム4 9は、ワークピースWの研磨終点の後であって、ワークピースWの第1膜F 1と第2膜F 2との推定膜厚差が所定のしきい値以上であるときに、ワークピースWの研磨を継続するための研磨継続信号を出力するように構成されている。研磨制御部9は、処理システム4 9からの研磨継続信号に基づいて、ワークピースWの研磨を継続するように構成されている。一実施形態では、研磨制御部9は、ワークピースWの研磨終点の後、ワークピースWをさらに所定の時間だけ研磨するオーバーポリッシング中に、処理システム4 9からの研磨継続信号に基づいて、上記所定の時間を延長してワークピースWの研磨（オーバーポリッシング）を継続してもよい。これにより、金属膜である第1膜F 1が絶縁膜である第2膜F 2に対して相対的に研磨不足となることを防止することができる。

[0072] 図1 3は、ワークピースWの研磨中に、ワークピースWの第1膜F 1と第2膜F 2との膜厚差を推定する方法の一実施形態を示すフローチャートである。本実施形態のワークピースWの第1膜F 1と第2膜F 2との膜厚差の推定は、図1乃至図1 2を参照して説明した光学式膜厚測定装置4 0により行われる。

ステップ1-1では、第1膜F 1と第2膜F 2を有するワークピースWを図1に示す研磨装置に搬送し、研磨装置によりワークピースWの研磨を開始する。

ステップ 1 - 2 では、ワークピース W の研磨中、処理システム 49 は、研磨テーブル 3 が一回転する間に、同じ研磨時間においてワークピース W からの反射光の複数の測定スペクトルを生成する。

[0073] ステップ 1 - 3 では、処理システム 49 は、複数の測定スペクトルのそれぞれを分類モデルに入力する（図 11 参照）。分類モデルは、第 1 膜 F1 と第 2 膜 F2 を有するサンプルからの反射光の複数のサンプルスペクトルと、複数のサンプルスペクトルの分類ラベルを含む分類訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルである（図 8 参照）。複数のサンプルスペクトルの分類ラベルは、複数のサンプルスペクトルに対してクラスタリングを実行することで、
5 複数のサンプルスペクトルを第 1 グループと第 2 グループにグループ化することにより得られたラベルである（図 7 参照）。

ステップ 1 - 4 では、処理システム 49 は、複数の測定スペクトルのそれぞれが第 1 グループまたは第 2 グループのいずれかに分類された分類結果を分類モデルから出力する（図 11 参照）。第 1 グループは、第 1 膜 F1 からの反射光の測定スペクトルが属するグループであり、第 2 グループは、第 2 膜 F2 からの反射光の測定スペクトルが属するグループである。
15

[0074] ステップ 1 - 5 では、処理システム 49 は、第 1 グループに分類された第 1 膜 F1 からの反射光の測定スペクトルと、第 2 グループに分類された第 2 膜 F2 からの反射光の測定スペクトルを、膜厚推定モデルに入力する（図 12 参照）。
20 本実施形態では、処理システム 49 は、第 1 グループに分類された第 1 膜 F1 からの反射光の測定スペクトルを第 1 膜厚推定モデルに入力し、かつ第 2 グループに分類された第 2 膜 F2 からの反射光の測定スペクトルを、第 2 膜厚推定モデルに入力する。第 1 膜厚推定モデルは、複数のサンプルスペクトルのうち、第 1 グループに属するサンプルスペクトルと、第 1 グループに属するサンプルスペクトルに対応する膜厚を含む第 1 膜厚推定訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルである。第 2 膜厚推定モデルは、複数のサンプルスペクトルのうち、第 2 グループに属するサンプルスペクトルと、第 2 グループに属するサンプルスペクトルに対応する膜厚を含む第 2 膜厚推定訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルである（図 10 参照）。
25

[0075] ステップ 1－6 では、処理システム 4 9 は、同じ研磨時間におけるワーク
ピース W の第 1 膜 F 1 の推定膜厚および第 2 膜 F 2 の推定膜厚を膜厚推定モデル
から出力する（図 1 2 参照）。本実施形態では、処理システム 4 9 は、同じ研磨
時間におけるワークピース W の第 1 膜 F 1 の推定膜厚を第 1 膜厚推定モデルから
5 出力し、かつ同じ研磨時間におけるワークピース W の第 2 膜 F 2 の推定膜厚を第
2 膜厚推定モデルから出力する。

ステップ 1－7 では、処理システム 4 9 は、膜厚推定モデル（本実施形態では、
第 1 膜厚推定モデルおよび第 2 膜厚推定モデル）から出力された第 1 膜 F 1 の推
定膜厚から第 2 膜 F 2 の推定膜厚を減算することにより、同じ研磨時間における
10 ワークピース W の第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との推定膜厚差を算出する。

本実施形態では、第 1 膜 F 1 は絶縁膜であり、第 2 膜 F 2 は金属膜である。ス
テップ 1－8 では、処理システム 4 9 は、算出されたワークピース W の第 1 膜 F
1 と第 2 膜 F 2 との推定膜厚差が所定の許容値を超えたか否かを判定する。処理
システム 4 9 は、ワークピース W の第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との推定膜厚差が所
15 定の許容値を超えたとき（ステップ 1－8 の「Y e s」）に、ワークピース W の
研磨を終了するための研磨終了信号を出力する（ステップ 1－9）。研磨制御部
9 は、処理システム 4 9 からの研磨終了信号に基づいて、ワークピース W の研磨
を終了するように構成されている。一実施形態では、処理システム 4 9 は、ワー
クピース W の第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との推定膜厚差が所定の許容値を超えた
20 ときに警報を発してもよい。

[0076] 処理システム 4 9 は、ワークピース W の第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との推定
膜厚差が所定の許容値以下であるとき（ステップ 1－8 の「N o」）に、再び同
じ研磨時間において複数の測定スペクトルを生成する（ステップ 1－2 に戻る）。
一実施形態では、ステップ 1－2 ～ステップ 1－8 の処理は、研磨制御部 9 に
25 り研磨終点が決定されるまで繰り返される。

[0077] 他の実施形態では、第 1 膜 F 1 が金属膜であり、第 2 膜 F 2 が絶縁膜であ
る場合、処理システム 4 9 は、ワークピース W の研磨終点の後であって、ワーク
ピース W の第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との推定膜厚差が所定のしきい値以上である
ときに、ワークピース W の研磨を継続するための研磨継続信号を出力してもよい。

この場合、研磨制御部 9 は、処理システム 4 9 からの研磨継続信号に基づいて、ワークピース W の研磨を継続するように構成されている。一実施形態では、研磨制御部 9 は、ワークピース W の研磨終点の後、ワークピース W をさらに所定の時間だけ研磨するオーバーポリッシング中に、処理システム 4 9 からの研磨継続信号に基づいて、上記所定の時間を延長してワークピース W の研磨（オーバーポリッシング）を継続してもよい。

[0078] 本実施形態によれば、分類モデルおよび膜厚推定モデルを用いて、ワークピース W の研磨中にワークピース W の第 1 膜 F 1 および第 2 膜 F 2 の膜厚を推定し、第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との推定膜厚差を算出することができる。処理システム 4 9 は、研磨テーブル 3 が一回転するたびに、以上のようにして第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との推定膜厚差を算出することで、ワークピース W の研磨中に、第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との推定膜厚差を監視することができる。

[0079] 図 1 4 は、膜厚推定モデルの作成の他の実施形態を説明する図である。特に説明しない本実施形態の構成および動作は、図 1 0 を参照して説明した実施形態と同じであるので、その重複する説明を省略する。本実施形態の膜厚推定モデルは、第 1 膜 F 1 の膜厚および第 2 膜 F 2 の膜厚の両方を推定するためのモデルである。本実施形態の膜厚推定モデルの作成に用いられる膜厚推定訓練データは、複数のサンプルスペクトルと、複数のサンプルスペクトルに対応する膜厚に加えて、複数のサンプルスペクトルのそれぞれが属するグループを示す分類ラベルをさらに含む。分類ラベルは、図 7 を参照して説明したように、複数のサンプルスペクトルに対してクラスタリングを実行することにより得られたラベルである。図 1 4 に示すように、処理システム 4 9 は、複数のサンプルスペクトルと、複数のサンプルスペクトルに対応する膜厚と、複数のサンプルスペクトルのそれぞれが属するグループを示す分類ラベルを含む膜厚推定訓練データを用いて機械学習を実行して、膜厚推定モデルを作成するように構成されている。

[0080] 膜厚推定モデルは、ニューラルネットワークから構成されている。処理システム 4 9 の記憶装置 4 9 a には、膜厚推定モデルを機械学習アルゴリズムに従って作成するためのプログラムが格納されている。処理システム 4 9 の演算装置 4 9 b は、プログラムに含まれる命令に従って演算を実行することによって膜厚

推定モデルを作成する。機械学習によって膜厚推定モデルを作成することは、ニューラルネットワークの重みなどのパラメータを最適化する工程を含む。

[0081] 膜厚推定モデルの作成では、膜厚推定訓練データに含まれる複数のサンプルスペクトルおよび複数のサンプルスペクトルのそれぞれが属するグループを示す分類ラベルは、説明変数として使用され、複数のサンプルスペクトルに対応する膜厚は、目的変数（正解ラベル）として使用される。膜厚推定モデルは、処理システム 49 の記憶装置 49 a 内に格納される。

[0082] 図 15 は、図 14 に示す膜厚推定モデルを用いたワークピース W の第 1 膜 F1 および第 2 膜 F2 の膜厚の推定の一実施形態を説明する図である。特に説明しない本実施形態の構成および動作は、図 12 を参照して説明した実施形態と同じであるので、その重複する説明を省略する。図 15 に示すように、処理システム 49 は、第 1 グループに分類された第 1 膜 F1 からの反射光の測定スペクトルおよび第 1 グループを示す分類ラベルを学習済みの膜厚推定モデルに入力し、第 2 グループに分類された第 2 膜 F2 からの反射光の測定スペクトルおよび第 2 グループを示す分類ラベルを膜厚推定モデルに入力し、同じ研磨時間におけるワークピース W の第 1 膜 F1 の推定膜厚および第 2 膜 F2 の推定膜厚を膜厚推定モデルからそれぞれ出力するように構成されている。

[0083] 図 16 は、ワークピース W の研磨中に、図 14 および図 15 に示す膜厚推定モデルを用いて第 1 膜および第 2 膜との膜厚差を推定する方法の一実施形態を示すフローチャートである。

本実施形態のステップ 2-1 ～ステップ 2-4 は、図 13 に示すフローチャートのステップ 1-1 ～ステップ 1-4 と同じであるので、その重複する説明を省略する。

ステップ 2-5 では、処理システム 49 は、第 1 グループに分類された第 1 膜 F1 からの反射光の測定スペクトルおよび第 1 グループを示す分類ラベルを膜厚推定モデルに入力し、第 2 グループに分類された第 2 膜 F2 からの反射光の測定スペクトルおよび第 2 グループを示す分類ラベルを膜厚推定モデルに入力する（図 15 参照）。膜厚推定モデルは、複数のサンプルスペクトルと、複数のサンプルスペクトルに対応する膜厚と、複数のサンプルスペクトルのそれぞれが属す

るグループを示す分類ラベルを含む膜厚推定訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルである（図 1 4 参照）。

[0084] ステップ 2 - 6 では、処理システム 4 9 は、同じ研磨時間におけるワークピース W の第 1 膜 F 1 の推定膜厚および第 2 膜 F 2 の推定膜厚を膜厚推定モデルから出力する（図 1 5 参照）。

本実施形態のステップ 2 - 7 ～ステップ 2 - 9 は、図 1 3 に示すフローチャートのステップ 1 - 7 ～ステップ 1 - 9 と同じであるので、その重複する説明を省略する。

[0085] ワークピース W の研磨中、光学式膜厚測定装置 4 0 により測定されるワークピース W 上の測定点は、ワークピース W の第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との境界に位置することがある。第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との境界からの反射光の測定スペクトルからは、第 1 膜 F 1 および第 2 膜 F 2 の膜厚を正確に推定することができないことがある。そこで、以下に説明する実施形態では、処理システム 4 9 は、第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 の膜厚の推定において、第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との境界からの反射光の測定スペクトルが属する測定スペクトルを除外するように構成される。

[0086] 図 1 7 は、分類モデルの作成に用いる複数のサンプルスペクトルの分類ラベルの取得の他の実施形態を説明する図である。特に説明しない本実施形態の構成および動作は、図 7 を参照して説明した実施形態と同じであるので、その重複する説明を省略する。本実施形態では、分類モデルの作成に用いられる反射光の複数のサンプルスペクトルは、サンプルの第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との境界からの反射光のサンプルスペクトルを含む。サンプルの第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との境界からの反射光のサンプルスペクトルは、第 1 膜 F 1 からの反射光のサンプルスペクトルおよび第 2 膜 F 2 からの反射光のサンプルスペクトルとは形状が異なっている。

[0087] 図 1 7 に示すように、処理システム 4 9 は、第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 を有するサンプルからの反射光の複数のサンプルスペクトルに対してクラスタリングを実行して、複数のサンプルスペクトルを第 1 グループ、第 2 グループ、および第 3 グループにグループ化するように構成されている。より具体的には、処理シ

システム 4 9 は、複数のサンプルスペクトルに対してクラスタリングを実行したときのクラスタリング結果である複数のグループに対して、第 1 膜 F 1 からの反射光のサンプルスペクトルが属する第 1 グループと、第 2 膜 F 2 からの反射光のサンプルスペクトルが属する第 2 グループと、第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との境界からの反射光のサンプルスペクトルが属する第 3 グループにラベリングを実行する。

[0088] 処理システム 4 9 は、クラスタリング結果に基づいて、複数のサンプルスペクトルのそれぞれが属するグループを示す分類ラベルを取得するように構成されている。第 1 グループを示す分類ラベルは、第 1 膜 F 1 からの反射光のサンプルスペクトルに関連付けられ、第 2 グループを示す分類ラベルは、第 2 膜 F 2 からの反射光のサンプルスペクトルに関連付けられ、第 3 グループを示す分類ラベルは、第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との境界からの反射光のサンプルスペクトルに関連付けられて、処理システム 4 9 の演算装置 4 9 b に格納される。

[0089] 図 1 8 は、図 1 7 に示す分類ラベルを含む分類訓練データを用いた分類モデルの作成の一実施形態を説明する図である。特に説明しない本実施形態の構成および動作は、図 8 を参照して説明した実施形態と同じであるので、その重複する説明を省略する。図 1 8 に示すように、処理システム 4 9 は、サンプルの第 1 膜 F 1 からの反射光のスペクトル、第 2 膜 F 2 からの反射光のスペクトルに加えて、第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との境界からの反射光のサンプルスペクトルと、複数のサンプルスペクトルの分類ラベルを含む分類訓練データを用いた機械学習を実行して、分類モデルを作成する。

[0090] 処理システム 4 9 は、複数のサンプルスペクトルから第 3 グループに属するサンプルスペクトルを除いた、第 1 グループおよび第 2 グループに属するサンプルスペクトルと、複数のサンプルスペクトルから第 3 グループに属するサンプルスペクトルを除いた、第 1 グループおよび第 2 グループに属するサンプルスペクトルに対応する膜厚を含む膜厚推定訓練データを用いて機械学習を実行して、膜厚推定モデルを作成するように構成されている。このような膜厚推定訓練データを用いた膜厚推定モデルの作成は、図 1 0 を参照して説明した第 1 膜厚推定モデルおよび第 2 膜厚推定モデルの作成、および図 1 4 を参照して説明した膜厚推定モデルの作成のいずれにも適用可能である。

[0091] 図 1 9 は、図 1 8 に示す分類モデルを用いた複数の測定スペクトルの分類の一実施形態を説明する図である。特に説明しない本実施形態の構成および動作は、図 1 1 を参照して説明した実施形態と同じであるので、その重複する説明を省略する。図 1 9 に示すように、処理システム 4 9 は、同じ研磨時間における複数の測定スペクトルのそれぞれを学習済みの分類モデルに入力し、複数の測定スペクトルのそれぞれが第 1 グループ、第 2 グループ、または第 3 グループのいずれかに分類された分類結果を分類モデルから出力するように構成されている。これにより、ワークピース W の研磨中に生成された複数の測定スペクトルを、第 1 膜 F 1 からの反射光の測定スペクトルが属する第 1 グループと、第 2 膜 F 2 からの反射光の測定スペクトルが属する第 2 グループと、第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との境界からの反射光のサンプルスペクトルが属する第 3 グループに分類することができる。

[0092] 処理システム 4 9 は、複数の測定スペクトルから第 3 グループに属する測定スペクトルを除いた、第 1 グループおよび第 2 グループに属する複数の測定スペクトルを膜厚推定モデルに入力し、同じ研磨時間におけるワークピース W の第 1 膜 F 1 の推定膜厚および第 2 膜 F 2 の推定膜厚を膜厚推定モデルから出力するように構成されている。このような第 1 膜 F 1 および第 2 膜 F 2 の膜厚の推定は、図 1 2 を参照して説明した第 1 膜厚推定モデルおよび第 2 膜厚推定モデルを用いた第 1 膜 F 1 および第 2 膜 F 2 の膜厚の推定、および図 1 5 を参照して説明した膜厚推定モデルを用いた第 1 膜 F 1 および第 2 膜 F 2 の膜厚の推定のいずれにも適用可能である。

[0093] 図 1 7 乃至図 1 9 を参照して説明した実施形態では、図 1 3 に示すフローチャートのステップ 1 - 4 において、処理システム 4 9 は、複数の測定スペクトルが第 1 グループ、第 2 グループ、または第 3 グループのいずれかに分類された分類結果を、分類モデルから出力する。さらに、ステップ 1 - 5 において、処理システム 4 9 は、複数の測定スペクトルから第 3 グループに属する測定スペクトルを除いた、第 1 グループに属する測定スペクトルを第 1 膜厚推定モデルに入力し、かつ第 2 グループに属する測定スペクトルを第 2 膜厚推定モデルに入力する。

[0094] 図 1 7 乃至図 1 9 を参照して説明した実施形態では、図 1 6 に示すフロー

チャートのステップ 2 - 4 において、処理システム 49 は、複数の測定スペクトルが第 1 グループ、第 2 グループ、または第 3 グループのいずれかに分類された分類結果を、分類モデルから出力する。さらに、ステップ 2 - 5 において、処理システム 49 は、複数の測定スペクトルから第 3 グループに属する測定スペクトルを除いた、第 1 グループに属する測定スペクトルおよび第 1 グループを示す分類ラベルを膜厚推定モデルに入力し、第 2 グループに属する測定スペクトルおよび第 2 グループを示す分類ラベルを膜厚推定モデルに入力する。

[0095] 本実施形態によれば、ワークピース W の第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 との境界からの反射光の測定スペクトルを除外することで、膜厚推定モデルを用いて、ワークピース W の第 1 膜 F 1 および第 2 膜 F 2 の膜厚を精度よく推定することができる。

[0096] 上述した実施形態では、ワークピース W は、第 1 膜 F 1 と第 2 膜 F 2 を有しているが、ワークピース W は、異なる材料から構成された 3 つ（種類）以上の膜を有してもよい。この場合、処理システム 49 は、ワークピース W の 3 つ以上の膜からの反射光のスペクトルがそれぞれ属する 3 つ以上のグループに分類された分類結果を出力する分類モデルを作成する。一実施形態では、処理システム 49 は、上記 3 つ以上のグループに加えて、異なる材料から構成された 3 つ以上の膜のうちの隣接する 2 つの膜の境界からの反射光のスペクトルが属するグループをさら含む複数のグループに分類された分類結果を出力する分類モデルを作成してもよい。

[0097] 上述した実施形態は、本発明が属する技術分野における通常の知識を有する者が本発明を実施できることを目的として記載されたものである。上記実施形態の種々の変形例は、当業者であれば当然になしうることであり、本発明の技術的思想は他の実施形態にも適用しうる。したがって、本発明は、記載された実施形態に限定されることはなく、特許請求の範囲によって定義される技術的思想に従った最も広い範囲に解釈されるものである。

特許請求の範囲

1. 異なる材料から構成された第1膜と第2膜を有するワークピースを研磨しながら、同じ研磨時間において前記ワークピースからの反射光の複数の測定スペクトルを生成し、

前記複数の測定スペクトルのそれぞれを分類モデルに入力し、前記分類モデルは、前記第1膜と前記第2膜を有するサンプルからの反射光の複数のサンプルスペクトルと、前記複数のサンプルスペクトルの分類ラベルを含む分類訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルであり、

10 前記複数の測定スペクトルのそれぞれが第1グループまたは第2グループのいずれかに分類された分類結果を前記分類モデルから出力し、前記第1グループは前記第1膜からの反射光の測定スペクトルが属するグループであり、前記第2グループは前記第2膜からの反射光の測定スペクトルが属するグループであり、

前記第1グループに分類された前記第1膜からの反射光の測定スペクトルと、
15 前記第2グループに分類された前記第2膜からの反射光の測定スペクトルを、膜厚推定モデルに入力し、前記膜厚推定モデルは、前記複数のサンプルスペクトルと、前記複数のサンプルスペクトルに対応する膜厚を含む膜厚推定訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルであり、

前記研磨時間における前記ワークピースの前記第1膜の推定膜厚および前記第2膜の推定膜厚を前記膜厚推定モデルから出力し、

前記第1膜の前記推定膜厚から前記第2膜の前記推定膜厚を減算することにより、前記研磨時間における前記ワークピースの前記第1膜と前記第2膜との推定膜厚差を算出する、膜厚差推定方法。

25 2. 前記第1グループに分類された前記測定スペクトルと、前記第2グループに分類された前記測定スペクトルを、前記膜厚推定モデルに入力することは、前記第1グループに分類された前記測定スペクトルを第1膜厚推定モデルに入力し、かつ前記第2グループに分類された前記測定スペクトルを、第2膜厚推定モデルに入力することであり、

前記第 1 膜厚推定モデルは、前記複数のサンプルスペクトルのうち、前記第 1 グループに属するサンプルスペクトルと、前記第 1 グループに属する前記サンプルスペクトルに対応する膜厚を含む第 1 膜厚推定訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルであり、

- 5 前記第 2 膜厚推定モデルは、前記複数のサンプルスペクトルのうち、前記第 2 グループに属するサンプルスペクトルと、前記第 2 グループに属する前記サンプルスペクトルに対応する膜厚を含む第 2 膜厚推定訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルであり、

10 前記研磨時間における前記ワークピースの前記第 1 膜の前記推定膜厚および前記第 2 膜の前記推定膜厚を前記膜厚推定モデルから出力することは、前記研磨時間における前記ワークピースの前記第 1 膜の前記推定膜厚を前記第 1 膜厚推定モデルから出力し、かつ前記研磨時間における前記ワークピースの前記第 2 膜の前記推定膜厚を前記第 2 膜厚推定モデルから出力することである、請求項 1 に記載の膜厚差推定方法。

- 15 3. 前記膜厚推定訓練データは、前記複数のサンプルスペクトルのそれぞれが属するグループを示す分類ラベルをさらに含み、

20 前記第 1 グループに分類された前記測定スペクトルと、前記第 2 グループに分類された前記測定スペクトルを、前記膜厚推定モデルに入力することは、前記第 1 グループに分類された前記測定スペクトルおよび前記第 1 グループを示す分類ラベルを前記膜厚推定モデルに入力し、前記第 2 グループに分類された前記測定スペクトルおよび前記第 2 グループを示す分類ラベルを前記膜厚推定モデルに入力することである、請求項 1 に記載の膜厚差推定方法。

- 25 4. 前記複数のサンプルスペクトルの前記分類ラベルは、前記複数のサンプルスペクトルに対してクラスタリングを実行することで、前記複数のサンプルスペクトルを前記第 1 グループと前記第 2 グループにグループ化することにより得られたラベルである、請求項 1 に記載の膜厚差推定方法。

5. 前記複数のサンプルスペクトルは、前記サンプルの前記第1膜と前記第2膜との境界からの反射光のサンプルスペクトルを含み、

前記複数の測定スペクトルのそれぞれが前記第1グループまたは前記第2グループのいずれかに分類された前記分類結果を前記分類モデルから出力することは、

5 前記複数の測定スペクトルのそれぞれが前記第1グループ、前記第2グループ、または前記第1膜と前記第2膜との境界からの反射光の測定スペクトルが分類される第3グループのいずれかに分類された分類結果を前記分類モデルから出力することであり、

10 前記膜厚推定訓練データは、前記複数のサンプルスペクトルから前記第3グループに属するサンプルスペクトルを除いたサンプルスペクトルと、前記複数のサンプルスペクトルから前記第3グループに属する前記サンプルスペクトルを除いた前記サンプルスペクトルに対応する膜厚を含む、請求項1に記載の膜厚差推定方法。

15 6. 前記複数のサンプルスペクトルの前記分類ラベルは、前記複数のサンプルスペクトルに対してクラスタリングを実行することで、前記複数のサンプルスペクトルを前記第1グループ、前記第2グループ、および前記第3グループにグループ化することにより得られたラベルである、請求項5に記載の膜厚差推定方法。

20 7. 前記第1膜は絶縁膜であり、
前記第2膜は金属膜であり、

前記膜厚差推定方法は、前記推定膜厚差が所定の許容値を超えたときに、前記ワークピースの研磨を終了するための研磨終了信号を出力することをさらに含む、請求項1に記載の膜厚差推定方法。

25 8. 前記第1膜は金属膜であり、
前記第2膜は絶縁膜であり、
前記膜厚差推定方法は、前記ワークピースの研磨終点の後であって、前記推定膜厚差が所定のしきい値以上であるときに、前記ワークピースの研磨を継続する

ための研磨継続信号を出力することをさらに含む、請求項 1 に記載の膜厚差推定方法。

9. 光を発する光源と、

5 前記光源から発せられた光を異なる材料から構成された第 1 膜と第 2 膜を有するワークピースに照射し、前記ワークピースからの反射光を受ける光学センサヘッドと、

前記反射光のスペクトルを生成する処理システムを備え、

前記処理システムは、

10 前記ワークピースの研磨中に、同じ研磨時間において前記ワークピースからの反射光の複数の測定スペクトルを生成し、

前記複数の測定スペクトルのそれぞれを分類モデルに入力し、前記分類モデルは、前記第 1 膜と前記第 2 膜を有するサンプルからの反射光の複数のサンプルスペクトルと、前記複数のサンプルスペクトルの分類ラベルを含む分類訓練データ

15 を用いて機械学習により構築された学習済みモデルであり、

前記複数の測定スペクトルのそれぞれが第 1 グループまたは第 2 グループのいずれかに分類された分類結果を前記分類モデルから出力し、前記第 1 グループは前記第 1 膜からの反射光の測定スペクトルが属するグループであり、前記第 2 グループは前記第 2 膜からの反射光の測定スペクトルが属するグループであり、

20 前記第 1 グループに分類された前記第 1 膜からの反射光の測定スペクトルと、前記第 2 グループに分類された前記第 2 膜からの反射光の測定スペクトルを、膜厚推定モデルに入力し、前記膜厚推定モデルは、前記複数のサンプルスペクトルと、前記複数のサンプルスペクトルに対応する膜厚を含む膜厚推定訓練データを用いて機械学習により構築された学習済みモデルであり、

25 前記研磨時間における前記ワークピースの前記第 1 膜の推定膜厚および前記第 2 膜の推定膜厚を前記膜厚推定モデルから出力し、

前記第 1 膜の前記推定膜厚から前記第 2 膜の前記推定膜厚を減算することにより、前記研磨時間における前記ワークピースの前記第 1 膜と前記第 2 膜との推定膜厚差を算出するように構成されている、光学式膜厚測定装置。

10. 前記処理システムは、

前記第1グループに分類された前記測定スペクトルを第1膜厚推定モデルに
入力し、かつ前記第2グループに分類された前記測定スペクトルを第2膜厚推定
5 モデルに入力し、

前記研磨時間における前記ワークピースの前記第1膜の前記推定膜厚を前記
第1膜厚推定モデルから出力し、かつ前記研磨時間における前記ワークピースの
前記第2膜の前記推定膜厚を前記第2膜厚推定モデルから出力するように構成され
ており、

10 前記第1膜厚推定モデルは、前記複数のサンプルスペクトルのうち、前記第1
グループに属するサンプルスペクトルと、前記第1グループに属する前記サンプ
ルスペクトルに対応する膜厚を含む第1膜厚推定訓練データを用いて機械学習に
より構築された学習済みモデルであり、

前記第2膜厚推定モデルは、前記複数のサンプルスペクトルのうち、前記第2
15 グループに属するサンプルスペクトルと、前記第2グループに属する前記サンプ
ルスペクトルに対応する膜厚を含む第2膜厚推定訓練データを用いて機械学習に
より構築された学習済みモデルである、請求項9に記載の光学式膜厚測定装置。

11. 前記膜厚推定訓練データは、前記複数のサンプルスペクトルのそれぞれ
20 が属するグループを示す分類ラベルをさらに含み、

前記処理システムは、前記第1グループに分類された前記測定スペクトルおよ
び前記第1グループを示す分類ラベルを前記膜厚推定モデルに入力し、前記第2
グループに分類された前記測定スペクトルおよび前記第2グループを示す分類ラ
ベルを前記膜厚推定モデルに入力するように構成されている、請求項9に記載の
25 光学式膜厚測定装置。

12. 前記複数のサンプルスペクトルの前記分類ラベルは、前記複数のサンプ
ルスペクトルに対してクラスタリングを実行することで、前記複数のサンプ
ルスペクトルを前記第1グループと前記第2グループにグループ化することにより得

られたラベルである、請求項 9 に記載の光学式膜厚測定装置。

1 3. 前記複数のサンプルスペクトルは、前記サンプルの前記第 1 膜と前記第 2 膜との境界からの反射光のサンプルスペクトルを含み、

5 前記処理システムは、前記複数の測定スペクトルのそれぞれが前記第 1 グループ、前記第 2 グループ、または前記第 1 膜と前記第 2 膜との境界からの反射光の測定スペクトルが分類される第 3 グループのいずれかに分類された分類結果を前記分類モデルから出力するように構成されており、

10 前記膜厚推定訓練データは、前記複数のサンプルスペクトルから前記第 3 グループに属するサンプルスペクトルを除いたサンプルスペクトルと、前記複数のサンプルスペクトルから前記第 3 グループに属する前記サンプルスペクトルを除いた前記サンプルスペクトルに対応する膜厚を含む、請求項 9 に記載の光学式膜厚測定装置。

15 1 4. 前記複数のサンプルスペクトルの前記分類ラベルは、前記複数のサンプルスペクトルに対してクラスタリングを実行することで、前記複数のサンプルスペクトルを前記第 1 グループ、前記第 2 グループ、および前記第 3 グループにグループ化することにより得られたラベルである、請求項 1 3 に記載の光学式膜厚測定装置。

20

1 5. 前記第 1 膜は絶縁膜であり、

前記第 2 膜は金属膜であり、

前記処理システムは、前記推定膜厚差が所定の許容値を超えたときに、前記ワークピースの研磨を終了するための研磨終了信号を出力するように構成されている、請求項 9 に記載の光学式膜厚測定装置。

25

1 6. 前記第 1 膜は金属膜であり、

前記第 2 膜は絶縁膜であり、

前記処理システムは、前記ワークピースの研磨終点の後であって、前記推定膜

厚差が所定のしきい値以上であるときに、前記ワークピースの研磨を継続するための研磨継続信号を出力するように構成されている、請求項 9 に記載の光学式膜厚測定装置。