

ワークピースの膜厚推定方法および研磨装置

発明の背景

発明の技術分野

- 5 【0001】 本発明は、ウェーハ、基板、パネルなどのワークピースからの反射光のスペクトルに基づいてワークピースの膜厚を推定する技術に関し、特に膜厚推定に使用される膜厚推定レシピを自動的に決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プロセスには、 SiO_2 などの絶縁膜を研磨する工程や、銅、タングステンなどの金属膜を研磨する工程などの様々な工程が含まれる。ウェーハの研磨は研磨装置を使用して行われる。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、ウェーハを研磨パッドに押し付ける研磨ヘッドと、スラリーを研磨パッド上に供給するスラリー供給ノズルを備えている。研磨テーブルを回転させながら、研磨テーブル上の研磨パッドにスラリーが供給され、研
15 磨ヘッドは、ウェーハを研磨パッドに押し付ける。ウェーハは、スラリーの存在下で研磨パッドと摺接される。ウェーハの表面は、スラリーの化学的作用と、スラリーに含まれる砥粒および／または研磨パッドの機械的作用との組み合わせにより平坦化される。

- 20 【0003】 ウェーハの研磨は、その表面を構成する膜（絶縁膜、金属膜、シリコン層など）の厚さが所定の目標値に達したときに終了される。研磨装置は、絶縁膜やシリコン層などの非金属膜の厚さを測定するために、一般に、光学式膜厚測定システムを備える。この光学式膜厚測定システムは、光源の光をウェーハの表面に導き、ウェーハからの反射光の強度を分光器で測定し、反射光のスペクトルを解析することで、ウェーハの膜厚を推定するように構成される。

- 25 【先行技術文献】

【特許文献】

- 【0004】 【特許文献1】 日本国特開2022-156879号公報

- 【0005】 上記膜厚測定では、研磨対象のウェーハに適した膜厚推定レシピを予め準備する必要がある。複数の膜厚推定レシピが準備されていると、最適な膜厚推定

レシピをユーザーが選択する作業は、ユーザーにとっては負担となりうる。また、ユーザーが誤った膜厚推定レシピを選択するというヒューマンエラーも発生しうる。

5 発明の要旨

[0006] そこで、本発明は、ウェーハなどのワークピースに最適な膜厚推定レシピを自動的に決定することができる技術を提供する。

[0007] 一態様では、複数の参照ワークピースの研磨中に、前記複数の参照ワークピースに光を照射しながら、前記複数の参照ワークピースからの反射光の複数の参照スペクトルを生成し、前記複数の参照スペクトルと、前記複数の参照ワークピースについてそれぞれ決定された複数の膜厚推定レシピを示す複数のレシピラベルを含む訓練データを作成し、前記訓練データを用いて機械学習を実行することによりレシピ分類モデルを作成し、ワークピースの研磨中に、前記ワークピース上の膜厚測定点に光を照射しながら、前記膜厚測定点からの反射光の測定スペクトルを生成し、前記測定スペクトルを前記レシピ分類モデルに入力し、かつ前記レシピ分類モデルから前記複数のレシピラベルのうちのいずれか1つを示す分類結果を出力し、前記分類結果に基づいて前記複数のレシピラベルのうちのいずれか1つを決定し、前記決定されたレシピラベルに対応する膜厚推定レシピを用いて、前記ワークピースの膜厚を推定する、ワークピースの膜厚推定方法が提供される。

[0008] 一態様では、前記分類結果に基づいて前記複数のレシピラベルのうちのいずれか1つを決定することは、前記ワークピースの研磨開始後の所定の判定時間内に前記レシピ分類モデルから出力された複数の分類結果に示される複数のレシピラベルのうち、最も数の多いレシピラベルを決定することである。

一態様では、前記分類結果は、前記複数のレシピラベルにそれぞれ対応する複数の確信度を含む。

一態様では、前記複数の確信度のすべてがしきい値よりも小さい場合には、前記測定スペクトルと、前記測定スペクトルに基づいて決定された新たな膜厚測定レシピを示す新たなレシピラベルを前記訓練データに追加して前記訓練データを

更新し、前記更新された訓練データを用いて機械学習を実行することにより前記レシピ分類モデルを更新することをさらに含む。

一態様では、前記ワークピース上の前記膜厚測定点は、前記ワークピースの表面の中心領域内に位置している。

5 一態様では、前記複数の参照スペクトルは、前記複数の参照ワークピースの研磨の初期段階に生成されたスペクトルである。

一態様では、前記複数の膜厚推定レシピのそれぞれは、機械学習により作成された膜厚推定モデルを用いた膜厚推定に使用されるレシピパラメータを含む。

[0009] 一態様では、研磨パッドを支持する研磨テーブルと、ワークピースを前記
10 研磨パッドに押し付けて前記ワークピースを研磨する研磨ヘッドと、前記ワーク
ピースの研磨中に、前記ワークピース上の膜厚測定点に光を照射し、前記膜厚測
定点からの反射光を受ける光学センサヘッドと、前記反射光の測定スペクトルを
生成する処理システムを備え、前記処理システムは、複数の参照ワークピースか
15 らの反射光の複数の参照スペクトルと、前記複数の参照ワークピースについてそ
れぞれ決定された複数の膜厚推定レシピを示す複数のレシピラベルを含む訓練デ
ータと、前記訓練データを用いた機械学習により作成されたレシピ分類モデルを
有し、前記処理システムは、前記ワークピースの研磨中に、前記測定スペクトル
を前記レシピ分類モデルに入力し、前記レシピ分類モデルから前記複数のレシピ
20 ラベルのうちのいずれか1つを示す分類結果を出力し、前記分類結果に基づいて
前記複数のレシピラベルのうちのいずれか1つを決定し、前記決定されたレシピ
ラベルに対応する膜厚推定レシピを用いて、前記ワークピースの膜厚を推定する
ように構成されている、ワークピースの研磨装置が提供される。

[0010] 本発明によれば、レシピ分類モデルから出力された分類結果に基づいて最
適な膜厚推定レシピを自動で選択することができる。

25

図面の簡単な説明

[0011] 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、光学式膜厚測定装置の詳細な構成を示す断面図である。

図3は、光強度測定データから生成された測定スペクトルの一例を示す模式図

である。

図 4 は、ワークピース上の光の膜厚測定点の一例を示す図である。

図 5 は、レシピ分類モデルの機能を説明する図である。

図 6 は、ベイズニューラルネットワークから構成されたレシピ分類モデルの一
5 実施形態を示す模式図である。

図 7 は、レシピ分類モデルを作成する一実施形態を説明するフローチャートである。

図 8 は、ワークピースの研磨開始後の所定の判定時間内にレシピ分類モデルから出力された複数の分類結果の一例を示すテーブルである。

10 図 9 は、複数のレシピラベルについて同じ確信度がレシピ分類モデルから出力された一例を示す模式図である。

図 10 は、レシピ分類モデルを用いてワークピースの膜厚を推定する一実施形態を説明するフローチャートである。

15 実施形態の説明

[0012] 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、ワークピース W を研磨パッド 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 と、研磨装置の動作を制御するための動作制御部 9 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。ワークピース W は、その表面に、配線構造を構成する膜を有している。ワークピース W の例としては、半導体デバイスの製造に使用されるウェーハ、基板、配線基板、角基板などが挙げられ
20
25 る。一例では、ワークピース W は、多層膜または単層膜が形成された製品ウェーハである。

[0013] 研磨ヘッド 1 はヘッドシャフト 10 に連結されており、ヘッドシャフト 10 は研磨ヘッド回転装置 15 に連結されている。研磨ヘッド回転装置 15 は、研磨ヘッド 1 をヘッドシャフト 10 とともに矢印で示す方向に回転させるように構

成されている。研磨ヘッド回転装置 15 の構成は特に限定されないが、一例では、研磨ヘッド回転装置 15 は、電動機、ベルト、プーリなどを備えている。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。

- 5 研磨ヘッド 1、研磨ヘッド回転装置 15、およびテーブルモータ 6 は動作制御部 9 に接続されている。

[0014] ワークピース W は次のようにして研磨される。テーブルモータ 6 および研磨ヘッド回転装置 15 は、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、研磨液が研磨液供給ノズル 5 から研磨テーブル 3 上の
10 研磨パッド 2 の研磨面 2 a 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 2 a 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。

- 15 [0015] 動作制御部 9 は、プログラムが格納された記憶装置 9 a 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 9 b を備えている。動作制御部 9 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 9 a は、ランダムアクセスメモリ (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。
20 演算装置 9 b 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、動作制御部 9 の具体的構成はこれらの例に限定されない。

[0016] 研磨装置は、ワークピース W の膜厚を測定する光学式膜厚測定装置 20 を備えている。光学式膜厚測定装置 20 は、光を発する光源 22 と、光源 22 の光
25 をワークピース W に照射し、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 25 と、光学センサヘッド 25 に連結された分光器 27 と、ワークピース W からの反射光のスペクトルに基づいてワークピース W の膜厚を測定する処理システム 30 を備えている。光学センサヘッド 25 は、研磨テーブル 3 内に配置されており、研磨テーブル 3 とともに回転する。

[0017] 処理システム 30 は、プログラム、膜厚推定モデル 41、およびレシピ分類モデル 42 が格納された記憶装置 30a 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 30b を備えている。処理システム 30 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 30a は、ランダムアクセスメモリ (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 30b 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 30 の具体的構成はこれらの例に限定されない。

[0018] 動作制御部 9 および処理システム 30 のそれぞれは、複数のコンピュータから構成されてもよい。例えば、動作制御部 9 および処理システム 30 のそれぞれは、エッジサーバおよびクラウドサーバの組み合わせから構成されてもよい。一実施形態では、動作制御部 9 および処理システム 30 は、1 台のコンピュータから構成されてもよい。

[0019] 図 2 は、光学式膜厚測定装置 20 の詳細な構成を示す断面図である。光学式膜厚測定装置 20 は、光源 22 に連結された投光光ファイバーケーブル 31 と、分光器 27 に連結された受光光ファイバーケーブル 32 を備えている。投光光ファイバーケーブル 31 の先端 31a および受光光ファイバーケーブル 32 の先端 32a は、光学センサヘッド 25 を構成している。すなわち、投光光ファイバーケーブル 31 は、光源 22 によって発せられた光を研磨パッド 2 上のワークピース W に導き、受光光ファイバーケーブル 32 はワークピース W からの反射光を受け、分光器 27 に伝達する。

[0020] 分光器 27 は処理システム 30 に接続されている。投光光ファイバーケーブル 31、受光光ファイバーケーブル 32、光源 22、および分光器 27 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。投光光ファイバーケーブル 31 の先端 31a および受光光ファイバーケーブル 32 の先端 32a から構成される光学センサヘッド 25 は、研磨パッド 2 上のワークピース W の表面に対向して配置されている。

[0021] 光学センサヘッド 25 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 の表面を横切る位置である。研磨パッド 2 は、光学センサヘッド 2 5 の上方に位置した通孔 2 b を有している。光学センサヘッド 2 5 は、研磨テーブル 3 が一回転するたびに光を通孔 2 b を通じてワークピース W に照射し、かつワークピース W からの反射光を通孔 2 b を通じて受ける。

[0022] 一実施形態では、研磨液および研磨屑が光学センサヘッド 2 5 に接触することを防止するために、研磨パッド 2 の通孔 2 b 内に純水の流れが形成されてもよい。光は、光学センサヘッド 2 5 から純水を通してワークピース W に導かれ、ワークピース W からの反射光は純水を通して光学センサヘッド 2 5 によって受けられる。他の実施形態では、研磨パッド 2 の通孔 2 b 内に透明窓（図示せず）が嵌め込まれてもよい。透明窓は、光の透過を許容する材料（例えば、透明な樹脂）から構成されている。この場合は、光は、光学センサヘッド 2 5 から透明窓を通してワークピース W に導かれ、ワークピース W からの反射光は透明窓を通して光学センサヘッド 2 5 によって受けられる。

[0023] 光源 2 2 は、短い時間間隔で繰り返し発光するフラッシュ光源である。光源 2 2 の例としては、キセノンフラッシュランプが挙げられる。光源 2 2 は、動作制御部 9 に電氣的に接続されており、動作制御部 9 から送られるトリガー信号を受けて発光する。より具体的には、光学センサヘッド 2 5 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 2 2 は複数のトリガー信号を受けて複数回発光する。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 上の中心点を含む複数の膜厚測定点に光が照射される。

[0024] 光源 2 2 によって発せられた光は、光学センサヘッド 2 5 に伝達される。すなわち、光は、投光光ファイバケーブル 3 1 を通って光学センサヘッド 2 5 に伝達され、光学センサヘッド 2 5 から放射される。光は、研磨パッド 2 の通孔 2 b を通って研磨パッド 2 上のワークピース W に入射する。ワークピース W から反射した光は、研磨パッド 2 の通孔 2 b を再び通過し、光学センサヘッド 2 5 によって受けられる。ワークピース W からの反射光は、受光光ファイバケーブル 3 2 を通って分光器 2 7 に伝達される。

[0025] 分光器 2 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

所定の波長範囲に亘って測定するように構成される。すなわち、分光器 27 は、ワークピース W 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所定の波長範囲に亘って測定して、光強度測定データを生成する。各波長での反射光の強度は、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。

5 光強度測定データは、処理システム 30 に送られる。

[0026] 処理システム 30 は、光強度測定データから、図 3 に示すような反射光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。ワークピース W からの反射光の測定スペクトルは、ワークピース W の膜厚の情報を含む。言い換えれば、反射光の測定スペクトルは、ワークピース W の膜厚に依存して変化する。処理システム 30 は、反射光の測定スペクトルに基づいてワークピース W の膜厚を決定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 30 は、反射光の測定スペクトルを膜厚推定モデル 41 に入力し、ワークピース W の膜厚の推定値を膜厚推定モデル 41 から出力する。

15 [0027] 図 4 は、ワークピース W 上の複数の膜厚測定点の一例を示す図である。上述したように、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 25 はワークピース W の表面を横切って移動しながら、光学センサヘッド 25 はワークピース W の表面に光を複数回照射する。したがって、図 4 に示すように、光学センサヘッド 25 からの光が照射される複数の膜厚測定点 M は、ワークピース W の表面上に半径方向に並ぶ。複数の膜厚測定点 M のうちの 1 つは、ワークピース W の中心点上に位置する。研磨テーブル 3 が一回転するたびに、光学センサヘッド 25 は複数の膜厚測定点 M からの反射光を受け、処理システム 30 は、複数の膜厚測定点 M からの反射光の複数の測定スペクトルを生成する。

25 [0028] 処理システム 30 は、反射光の複数の測定スペクトルから複数の膜厚測定点 M での複数の膜厚を決定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 30 は、記憶装置 30 a 内に格納された膜厚推定モデル 41 に各測定スペクトルを入力し、膜厚推定モデル 41 から膜厚の推定値を出力するように構成されている。膜厚推定モデル 41 は、機械学習により作成された学習済みモデルで

ある。

[0029] 膜厚推定モデル 4 1 の機械学習は次のようにして実行される。サンプルの研磨中に生成された複数のスペクトルと、対応する膜厚の測定値を含む膜厚推定用訓練データが用意される。対応する膜厚の測定値は、機械学習で用いられる正解ラベルである。処理システム 3 0 は、膜厚推定用訓練データを使用して、機械学習を実行する。すなわち、処理システム 3 0 はスペクトルを膜厚推定モデル 4 1 に入力し、スペクトルに対応する膜厚を膜厚推定モデル 4 1 から出力する。処理システム 3 0 は、膜厚推定モデル 4 1 から出力された膜厚と、入力されたサンプルに対応する正解ラベルとを比較し、その誤差を最小とするように各ノード（ニューロン）のパラメータ（重みやしきい値など）を調整する。このようにして、膜厚推定モデル 4 1 は、膜厚推定モデル 4 1 に入力されたスペクトルに基づいて、適切な膜厚を出力するように学習される。

[0030] 処理システム 3 0 は、ワークピース W の研磨中に生成された測定スペクトルを膜厚推定モデル 4 1 に入力し、膜厚推定モデル 4 1 からワークピース W の膜厚を出力する。一実施形態では、処理システム 3 0 は、膜厚推定モデル 4 1 に入力される前に、測定スペクトルに対する前処理を実行する。前処理は、複数の測定スペクトルのばらつきを低減させて、膜厚推定モデル 4 1 に正しい膜厚を出力させることを目的として行われる。前処理の例としては、測定スペクトルの平滑化、測定スペクトルの正規化処理などが挙げられる。平滑化の例としては、測定スペクトルの移動平均が挙げられる。

[0031] 前処理は、膜厚推定レシピに含まれるレシピパラメータに従って実行される。例えば、測定スペクトルの移動平均では、移動平均の算定時間がレシピパラメータとして膜厚推定レシピに含まれる。処理システム 3 0 は、膜厚推定レシピに従って算定時間内の複数の測定スペクトルの平均を算定し、得られた平均を測定スペクトルとして膜厚推定モデル 4 1 に入力し、膜厚推定モデル 4 1 から膜厚の推定値を出力する。ただし、レシピパラメータは移動平均の算定時間に限られず、他のパラメータを含むこともある。

[0032] 一実施形態では、処理システム 3 0 は、膜厚推定モデル 4 1 に代えて、公知の膜厚推定技術を用いてワークピース W の膜厚を決定（推定）してもよい。例

例えば、処理システム 30 は、反射光の測定スペクトルの形状に最も形状に近い参照スペクトルを参照スペクトルライブラリの中から決定し、この決定された参照スペクトルに関連付けられた膜厚を決定する。他の例では、処理システム 30 は、反射光の測定スペクトルに対してフーリエ変換を実行し、得られた周波数スペクトルから膜厚を決定する。

[0033] 上述した公知の膜厚推定技術における膜厚を決定（推定）する処理も、膜厚推定レシピに含まれるレシピパラメータに従って実行される。例えば、レシピパラメータは、ワークピース W の研磨中に取得された複数の測定スペクトルの移動平均を算出するための時間幅、ワークピース W の研磨中に取得された複数の測定スペクトルの空間的平均を算出するためのデータ点数、ワークピース W の研磨中に取得された複数の測定スペクトルに適用されるフィルターのパラメータ、ワークピース W の研磨中に取得された複数の測定スペクトルを規格化するための規格化パラメータ、膜厚の決定に使用される測定スペクトルの波長範囲、膜厚の決定に使用される参照スペクトルを含む参照スペクトルライブラリ内の参照スペクトルグループの番号などが挙げられる（日本国特開 2021-3789 号公報参照）。

[0034] 膜厚推定レシピは、研磨されるワークピース W のタイプによって変わりうる。より具体的には、研磨されるワークピース W の表面構造に従って最適な膜厚推定レシピを選択する必要がある。そこで、処理システム 30 は、その記憶装置 30 a 内に格納されているレシピ分類モデル 42 を用いて、ワークピース W に最適な膜厚推定レシピを決定するように構成されている。レシピ分類モデル 42 は、機械学習により作成された学習済みモデルである。

[0035] 図 5 は、レシピ分類モデル 42 の機能を説明する図である。図 5 に示すように、ワークピース W の研磨中に、ワークピース W 上の膜厚測定点に光を照射しながら、処理システム 30 は、膜厚測定点からの反射光の測定スペクトルを生成し、測定スペクトルをレシピ分類モデル 42 に入力し、レシピ分類モデル 42 からレシピラベルを出力し、レシピラベルに予め関連付けられた膜厚推定レシピを用いて、ワークピース W の膜厚を推定する。

[0036] 以下、レシピ分類モデル 42 を作成する一実施形態について説明する。ま

ず、レシピ分類モデル 4 2 の機械学習に使用される訓練データが作成される。すなわち、研磨装置を用いて、複数の参照ワークピースを一枚ずつ研磨する。複数の参照ワークピースの研磨中に、複数の参照ワークピースに光を照射しながら、複数の参照ワークピースからの反射光の複数の参照スペクトルを生成する。複数の参照ワークピースは、異なる表面構造を有する。したがって、複数の参照ワークピースからの反射光の複数の参照スペクトルは、異なる形状（または特徴）を有する。

[0037] より具体的には、第 1 参照ワークピースの研磨中に、光学センサヘッド 2 5 により第 1 参照ワークピース上の複数の第 1 測定点（図 4 の複数の膜厚測定点 M 参照）に光を照射しながら、複数の第 1 測定点からの反射光を光学センサヘッド 2 5 により受け、各反射光の各波長での強度を分光器により測定し、処理システム 3 0 は光強度測定データから複数の第 1 参照スペクトルを生成する。

[0038] 処理システム 3 0 は、第 1 参照ワークピースについて決定された第 1 膜厚推定レシピを示す第 1 レシピラベルを作成する。第 1 膜厚推定レシピは、複数の第 1 参照スペクトルに基づいてユーザーにより決定される。第 1 レシピラベルは、複数の第 1 参照スペクトルについての正解ラベルである。同様にして、第 2 参照ワークピース、第 3 参照ワークピース、・・・を含む複数の参照ワークピースが研磨装置により研磨され、処理システム 3 0 は、複数の参照ワークピースに適した複数の膜厚推定レシピにそれぞれ対応する複数のレシピラベル（複数の正解ラベル）を作成する。

[0039] 複数の参照ワークピースの研磨は、図 1 および図 2 に示す研磨装置により実行されてもよいし、あるいは図 1 および図 2 に示す研磨装置と同じ構成を有する複数の研磨装置により実行されてもよい。訓練データの作成に使用される複数の参照ワークピースの数は特に限定されない。一実施形態では、表面構造が異なる 2 枚の参照ワークピースを研磨しながら、複数の参照スペクトルを生成し、得られた参照スペクトルから 2 つの膜厚推定レシピを作成し、2 つの膜厚推定レシピを示す 2 つのレシピラベルを作成してもよい。

[0040] 処理システム 3 0 は、複数の参照ワークピースの研磨中に生成された複数の参照スペクトルと、複数の参照ワークピースについてそれぞれ決定された複数の

の膜厚推定レシピを示す複数のレシピラベルを含む訓練データを作成する。一実施形態では、訓練データに含まれる複数の参照スペクトルは、複数の参照ワークピースの研磨の初期段階に生成されたスペクトルである。これは、後述するように、レシピ分類モデル42は、ワークピースWの研磨の初期段階において使用されるからである。

[0041] 処理システム30は、訓練データを用いて機械学習を実行することによりレシピ分類モデル42を作成する。より具体的には、処理システム30は、各参照スペクトルをレシピ分類モデル42に入力し、その参照スペクトルに対応するレシピラベルをレシピ分類モデル42から出力する。処理システム30は、レシピ分類モデル42から出力されたレシピラベルと、入力された参照スペクトルに対応する正解ラベルとを比較し、その誤差をなくすように各ノード（ニューロン）のパラメータ（重みやしきい値など）を調整する。

[0042] このようにして、レシピ分類モデル42は、レシピ分類モデル42に入力された参照スペクトルに基づいて、適切なレシピラベルを出力するように学習される。レシピラベルは、対応する膜厚推定レシピに予め関連付けられているので、処理システム30は、レシピ分類モデル42から出力されたレシピラベルに対応する最適な膜厚推定レシピを決定することができる。

[0043] レシピ分類モデル42を作成するための機械学習の例としては、SVR法（サポートベクター回帰法）、PLS法（部分最小二乗法：Partial Least Squares）、ディープラーニング、ランダムフォレスト、および決定木法などが挙げられる。一実施形態では、レシピ分類モデル42は、ディープラーニングによって作成されたベイズニューラルネットワークから構成されている。ベイズニューラルネットワークは、レシピラベルの分類結果として、複数のレシピラベルにそれぞれ対応する複数の確信度を出力するように構成される。

[0044] 図6は、ベイズニューラルネットワークから構成されたレシピ分類モデル42の一実施形態を示す模式図である。あるスペクトルがレシピ分類モデル42に入力されると、レシピ分類モデル42は、複数のレシピラベルA、B、Cにそれぞれ対応する複数の確信度（%）を出力する。複数のレシピラベルA、B、Cは、レシピ分類モデル42の機械学習に使用された訓練データに含まれたレシピ

ラベルである。

[0045] 図 6 に示す例では、レシピラベル A の確信度は 90 % であり、レシピラベル B の確信度は 8 % であり、レシピラベル C の確信度は 2 % である。レシピラベル A の確信度が最も高いので、処理システム 30 は、入力されたスペクトルに適した膜厚推定レシピは、レシピラベル A に対応する膜厚推定レシピ A であると決定する。

[0046] 図 7 は、レシピ分類モデル 42 を作成する一実施形態を説明するフローチャートである。

ステップ S 101 では、複数の参照ワークピースの研磨中に、光学センサヘッド 25 から複数の参照ワークピースに光を照射しながら、処理システム 30 は、複数の参照ワークピースからの反射光の複数の参照スペクトルを生成する。得られた複数の参照スペクトルは、処理システム 30 の記憶装置 30a に格納される。

[0047] ステップ S 102 では、ユーザーは、複数の参照ワークピースについて得られた複数の参照スペクトルに基づいて、複数の参照ワークピースにそれぞれ対応する複数の膜厚推定レシピを決定（作成）する。膜厚推定レシピには、例えば、膜厚推定モデル 41 に入力される前に実行される前処理に使用されるレシピパラメータ（例えば、移動平均の算定時間）が含まれる。他の例では、膜厚推定レシピに含まれるレシピパラメータは、複数の参照スペクトルの移動平均を算出するための時間幅、複数の参照スペクトルの空間的平均を算出するためのデータ点数、複数の参照スペクトルに適用されるフィルターのパラメータ、複数の参照スペクトルを規格化するための規格化パラメータ、膜厚の決定に使用される参照スペクトルの波長範囲のうちの少なくとも 1 つを含む。ユーザーによって決定された複数の膜厚推定レシピは、機械学習において正解ラベルとして使用される。

[0048] ステップ S 103 では、処理システム 30 は、ステップ S 101 で生成された複数の参照スペクトルと、ステップ S 102 で決定された複数の膜厚推定レシピを示す複数のレシピラベルを含む訓練データを作成する。

ステップ S 104 では、処理システム 30 は、ステップ S 103 で作成された訓練データを用いて機械学習を実行することにより、レシピ分類モデル 42 を作成する。レシピ分類モデル 42 は、学習済みモデルとして記憶装置 30a 内に格

納される。

[0049] 処理システム 30 は、機械学習により作成されたレシピ分類モデル 42 を使用して、ワークピース W の研磨中にワークピース W に適した膜厚推定レシピを決定し、その膜厚推定レシピに従って膜厚を推定する。すなわち、図 1 および図 2 に示す研磨装置によりワークピース W を研磨しながら、光学センサヘッド 25 によりワークピース W 上の複数の膜厚測定点（図 4 参照）に光を照射し、複数の膜厚測定点からの複数の反射光を光学センサヘッド 25 により受け、各反射光の各波長での強度を分光器 27 により測定する。処理システム 30 は、複数の膜厚測定点からの反射光の複数の測定スペクトルを光強度測定データから生成する。

10 [0050] 処理システム 30 は、各測定スペクトルをレシピ分類モデル 42 に入力し、レシピ分類モデル 42 から複数のレシピラベルのうちのいずれか 1 つを示す分類結果を出力する。例えば、レシピ分類モデル 42 の機械学習に使用された訓練データが 3 つのレシピラベル A, B, C を含む場合は、レシピ分類モデル 42 は、レシピラベル A, B, C のうちのいずれか 1 つを示す分類結果を出力する。一実施形態では、図 6 に示すように、レシピ分類モデル 42 は、複数のレシピラベル A, B, C にそれぞれ対応する複数の確信度 (%) を出力する。

[0051] 処理システム 30 は、分類結果に基づいてレシピラベルを決定する。図 6 に示す例では、最も高い確信度を伴うレシピラベル A は、レシピ分類モデル 42 に入力された測定スペクトルに適したレシピラベルである。処理システム 30 は、決定されたレシピラベルに対応する膜厚推定レシピを用いて、ワークピース W の膜厚を推定する。一実施形態では、処理システム 30 は、膜厚推定レシピに示されるレシピパラメータに従って測定スペクトルに対して前処理を実行し、得られた測定スペクトルを膜厚推定モデル 41 に入力し、膜厚推定モデル 41 からワークピース W の膜厚の推定値を出力する。他の実施形態では、処理システム 30 は、膜厚推定レシピに示されるレシピパラメータを用いて、反射光の測定スペクトルの形状に最も形状が近い参照スペクトルを参照スペクトルライブラリの中から決定し、この決定された参照スペクトルに関連付けられた膜厚を決定する。さらに他の実施形態では、処理システム 30 は、膜厚推定レシピに示されるレシピパラメータを用いて、反射光の測定スペクトルに対してフーリエ変換を実行し、得ら

れた周波数スペクトルから膜厚を決定する。

5 [0052] 分類結果に基づくレシピラベルの決定は、ワークピースWの研磨の初期段階において行われる。一旦レシピラベルが決定されると、処理システム30は、ワークピースWの研磨終点が到達するまで、決定されたレシピラベルに関連付けられた膜厚推定レシピを用いて、ワークピースWの膜厚を推定する。

[0053] 一実施形態では、ワークピースWの研磨の初期段階は、ワークピースWの研磨開始から所定の判定時間までである。処理システム30は、ワークピースWの研磨開始後の所定の判定時間内にレシピ分類モデル42から出力された分類結果に基づいて、レシピラベル（すなわち膜厚推定レシピ）を決定する。

10 [0054] ワークピースWの研磨の初期段階では、ワークピースWの表面内で膜厚のばらつきが存在することがある。このため、ワークピースWの研磨の初期段階に生成された測定スペクトルは変わりやすく、結果として、ワークピースWの研磨の初期段階にレシピ分類モデル42から出力された分類結果も変わりやすい。

15 [0055] そこで、一実施形態では、処理システム30は、ワークピースWの研磨開始後の所定の判定時間内にレシピ分類モデル42から出力された複数の分類結果に示される複数のレシピラベルのうち、最も数の多いレシピラベルを決定するように構成される。

20 [0056] 図8は、ワークピースWの研磨開始後の所定の判定時間内にレシピ分類モデル42から出力された複数の分類結果の一例を示すテーブルである。図8のテーブルに示す秒数は、ワークピースWの研磨開始からの経過時間を表し、図8のテーブルに示すM1, M2, M3, …は、ワークピースWの表面上の膜厚測定点（図4の記号M参照）を表している。図8のテーブル内のA, B, Cは、レシピ分類モデル42から出力された分類結果を示すレシピラベルを表している。

25 [0057] 図8に示す例では、ワークピースWの研磨開始後の所定の判定時間（例えば5秒）内にレシピ分類モデル42から出力された複数の分類結果に示される複数のレシピラベルのうち、最も数の多いレシピラベルは、レシピラベルAである。したがって、処理システム30は、レシピラベルAに関連付けられた膜厚推定レシピを決定する。このようにして膜厚推定レシピが決定された後は、処理システム30は、膜厚推定レシピを用いて、ワークピースWの表面上の複数の膜厚測定

点での膜厚を推定する。

[0058] 上記所定の判定時間が経過する前は、処理システム 30 は、各膜厚測定点で得られたレシピラベルに関連付けられた膜厚推定レシピを用いて各膜厚測定点での膜厚を推定する。例えば、研磨開始から 2 秒が経過したときの膜厚測定点 M 3 5 3 では、処理システム 30 は、レシピラベル C に関連付けられた膜厚推定レシピを用いて膜厚測定点 M 3 での膜厚を推定する。

[0059] ワークピース W の研磨中、研磨テーブル 3 およびワークピース W はそれぞれ回転する。したがって、研磨テーブル 3 が一回転するたびに、光学センサヘッド 2 5 は異なる経路でワークピース W の表面を横切る。その一方で、研磨テーブル 3 が一回転するたびに、光学センサヘッド 2 5 はワークピース W の表面の中心を必ず横切る（図 4 参照）。通常、ワークピース W の表面構造は、ワークピース W の表面内の領域ごとに異なる。例えば、ワークピース W の表面内のある領域にはメモリセルが存在し、他の領域にはスクライブラインが存在することがある。このような表面構造の違いに起因して、反射光の測定スペクトルは変わりうる。

測定スペクトルの違いは、レシピ分類モデル 4 2 が正しいレシピラベルを出力することを妨げることがある。

[0060] そこで、一実施形態では、処理システム 30 は、ワークピース W の表面の中心領域内に位置している膜厚測定点で得られた複数の分類結果を選択し、選択された複数の分類結果に示される複数のレシピラベルのうち、最も数の多いレシピラベルを決定するように構成されている。上述したように、研磨テーブル 3 が一回転するたびに、光学センサヘッド 2 5 はワークピース W の表面の中心を横切る（図 4 参照）。

[0061] 図 8 に示す例では、膜厚測定点 M 2 9, M 3 0, M 3 1 は、ワークピース W の表面の中心領域内に位置している。処理システム 30 は、これら膜厚測定点 M 2 9, M 3 0, M 3 1 で得られた複数の分類結果を示すレシピラベルを用い、その他の膜厚測定点で得られた分類結果を示すレシピラベルは用いない。膜厚測定点 M 2 9, M 3 0, M 3 1 からの反射光の測定スペクトルは、研磨時間の経過にかかわらず同じ表面構造からの反射光のスペクトルである。したがって、レシピ分類モデル 4 2 は、ワークピース W に最適な膜厚推定レシピを正しく決定する

ことができる。

[0062] 研磨中のワークピースWが、訓練データの作成に使用された複数の参照ワークピースのいずれとも異なる表面構造を有している場合、そのワークピースWからの反射光の測定スペクトルは、レシピ分類モデル42にとっては未知のスペクトルである。このためレシピ分類モデル42は、そのワークピースWに適した膜厚推定レシピを決定することができない。このような場合は、レシピ分類モデル42は、図9に示すように、複数のレシピラベルについて同じ確信度を出力する。

[0063] そこで、処理システム30は、ワークピースWの研磨中に生成された測定スペクトルをレシピ分類モデル42に入力し、レシピ分類モデル42から出力された複数のレシピラベルのそれぞれの複数の確信度のすべてがしきい値よりも小さい場合には、ワークピースWからの反射光の測定スペクトルと、測定スペクトルに基づいて決定された新たな膜厚測定レシピを示す新たなレシピラベルを訓練データに追加して訓練データを更新し、更新された訓練データを用いて機械学習を実行することによりレシピ分類モデル42を更新するように構成されている。更新された訓練データに含まれる新たなレシピラベルは、機械学習で正解ラベルとして使用される。新たな膜厚測定レシピは、測定スペクトルに基づいてユーザーにより決定される。

[0064] しきい値は、処理システム30に予め設定される。しきい値は、訓練データに正解ラベルとして使用されたレシピラベルの数に依存して変わる。図9に示す例では、レシピラベルの数が3つであるので、しきい値は、例えば34%に設定される。他の例では、レシピラベルの数が2つである場合は、しきい値は、例えば51%に設定される。

[0065] 表面構造の異なるワークピースWの研磨中に生成された測定スペクトルは、レシピ分類モデル42にとっては未知のスペクトルであるで、レシピ分類モデル42は膜厚推定レシピを決定することができない。そこで、処理システム30は、研磨装置に指令を与えて、固定された研磨条件でワークピースWを研磨させ、予め設定された研磨時間に到達したときにワークピースWの研磨を終了させる。固定された研磨条件の例としては、研磨ヘッド1からワークピースWに加えられる

押圧力が一定であることが挙げられる。

[0066] ワークピースWの研磨が終了するまで、処理システム30は、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し、これらの測定スペクトルを記憶装置30a内に格納する。ワークピースWの研磨中に生成された複数の測定
5 スペクトルは、上述した新たな膜厚測定レシピの決定に使用することができる。訓練データの更新およびレシピ分類モデル42の更新は、ワークピースWの研磨終了後に実行される。

[0067] 研磨中の他のワークピースからの反射光の測定スペクトルが、レシピ分類モデル42にとって未知のスペクトルである場合には、同じようにして、処理シ
10 ステム30は、測定スペクトルを訓練データに追加して訓練データを更新し、更新された訓練データを用いて機械学習を実行することによりレシピ分類モデル42を更新する。更新されたレシピ分類モデル42は、より多様なワークピースに最適な膜厚推定レシピを決定することができる。

[0068] 図10は、レシピ分類モデル42を用いてワークピースWの膜厚を推定す
15 る一実施形態を説明するフローチャートである。

ステップS201では、研磨装置によるワークピースWの研磨を開始する。

ステップS202では、ワークピースWの研磨中に、光学センサヘッド25からワークピースWに光を照射しながら、処理システム30は、ワークピースWの膜厚測定点からの反射光の測定スペクトルを生成する。一実施形態では、ワーク
20 ピースWの膜厚測定点は、ワークピースWの中心領域内に位置する。

[0069] ステップS203では、処理システム30は、測定スペクトルをレシピ分類モデル42に入力し、複数のレシピラベルのうちのいずれか1つを示す分類結果をレシピ分類モデル42から出力する。

ステップS204では、処理システム30は、レシピ分類モデル42から出力
25 された複数のレシピラベルの確信度のすべてがしきい値よりも大きいか否かを判定する。

ステップS205では、処理システム30は、上記ステップS202乃至S204をワークピースWの研磨開始から所定の判定時間が経過するまでに繰り返す。

ステップS206では、処理システム30は、判定時間内にレシピ分類モデル

4 2 から出力された複数の分類結果に示される複数のレシピラベルのうち、最も数の多いレシピラベルを決定する。

[0070] ステップ S 2 0 7 では、処理システム 3 0 は、上記ステップ S 2 0 6 で決定されたレシピラベルに対応する膜厚推定レシピを用いて、ワークピース W の膜厚を推定する。一実施形態では、処理システム 3 0 は、処理システム 3 0 は、研磨中のワークピース W からの反射光の測定スペクトルを膜厚推定モデル 4 1 に入力し、膜厚推定モデル 4 1 から膜厚の推定値を出力する。他の実施形態では、処理システム 3 0 は、反射光の測定スペクトルの形状に最も形状に近い参照スペクトルを参照スペクトルライブラリの中から決定し、この決定された参照スペクトルに関連付けられた膜厚を決定する。さらに他の実施形態では、処理システム 3 0 は、反射光の測定スペクトルに対してフーリエ変換を実行し、得られた周波数スペクトルから膜厚を決定する。

[0071] ステップ S 2 0 8 では、上記ステップ S 2 0 4 において、複数のレシピラベルの確信度のすべてがしきい値よりも小さいときは、処理システム 3 0 は、ワークピース W の膜厚を推定することなく、ワークピース W の研磨終点までワークピース W からの反射光の複数の測定スペクトルを生成する。

ステップ S 2 0 9 では、処理システム 3 0 は、上記ステップ S 2 0 2 乃至 S 2 0 8 で得られた複数の測定スペクトルを訓練データに追加して訓練データを更新し、さらに更新された訓練データを用いて機械学習を実行することにより、レシピ分類モデル 4 2 を更新する。

[0072] 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. 複数の参照ワークピースの研磨中に、前記複数の参照ワークピースに光を照射しながら、前記複数の参照ワークピースからの反射光の複数の参照スペクトルを生成し、

前記複数の参照スペクトルと、前記複数の参照ワークピースについてそれぞれ決定された複数の膜厚推定レシピを示す複数のレシピラベルを含む訓練データを作成し、

前記訓練データを用いて機械学習を実行することによりレシピ分類モデルを作成し、

ワークピースの研磨中に、前記ワークピース上の膜厚測定点に光を照射しながら、前記膜厚測定点からの反射光の測定スペクトルを生成し、

前記測定スペクトルを前記レシピ分類モデルに入力し、かつ前記レシピ分類モデルから前記複数のレシピラベルのうちのいずれか1つを示す分類結果を出力し、

前記分類結果に基づいて前記複数のレシピラベルのうちのいずれか1つを決定し、

前記決定されたレシピラベルに対応する膜厚推定レシピを用いて、前記ワークピースの膜厚を推定する、ワークピースの膜厚推定方法。

2. 前記分類結果に基づいて前記複数のレシピラベルのうちのいずれか1つを決定することは、前記ワークピースの研磨開始後の所定の判定時間内に前記レシピ分類モデルから出力された複数の分類結果に示される複数のレシピラベルのうち、最も数の多いレシピラベルを決定することである、請求項1に記載のワークピースの膜厚推定方法。

3. 前記分類結果は、前記複数のレシピラベルにそれぞれ対応する複数の確信度を含む、請求項1に記載のワークピースの膜厚推定方法。

4. 前記複数の確信度のすべてがしきい値よりも小さい場合には、前記測定ス

ペクトルと、前記測定スペクトルに基づいて決定された新たな膜厚測定レシピを示す新たなレシピラベルを前記訓練データに追加して前記訓練データを更新し、

前記更新された訓練データを用いて機械学習を実行することにより前記レシピ分類モデルを更新することをさらに含む、請求項 3 に記載のワークピースの膜厚
5 推定方法。

5. 前記ワークピース上の前記膜厚測定点は、前記ワークピースの表面の中心領域内に位置している、請求項 1 に記載のワークピースの膜厚推定方法。

10 6. 前記複数の参照スペクトルは、前記複数の参照ワークピースの研磨の初期段階に生成されたスペクトルである、請求項 1 に記載のワークピースの膜厚推定方法。

7. 前記複数の膜厚推定レシピのそれぞれは、機械学習により作成された膜厚
15 推定モデルを用いた膜厚推定に使用されるレシピパラメータを含む、請求項 1 に記載のワークピースの膜厚推定方法。

8. 研磨パッドを支持する研磨テーブルと、

ワークピースを前記研磨パッドに押し付けて前記ワークピースを研磨する研磨
20 ヘッドと、

前記ワークピースの研磨中に、前記ワークピース上の膜厚測定点に光を照射し、前記膜厚測定点からの反射光を受ける光学センサヘッドと、

前記反射光の測定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、

25 複数の参照ワークピースからの反射光の複数の参照スペクトルと、前記複数の参照ワークピースについてそれぞれ決定された複数の膜厚推定レシピを示す複数のレシピラベルを含む訓練データと、

前記訓練データを用いた機械学習により作成されたレシピ分類モデルを有し、前記処理システムは、

前記ワークピースの研磨中に、前記測定スペクトルを前記レシピ分類モデルに入力し、

前記レシピ分類モデルから前記複数のレシピラベルのうちのいずれか1つを示す分類結果を出力し、

- 5 前記分類結果に基づいて前記複数のレシピラベルのうちのいずれか1つを決定し、

前記決定されたレシピラベルに対応する膜厚推定レシピを用いて、前記ワークピースの膜厚を推定するように構成されている、ワークピースの研磨装置。