

ワークピースの膜厚推定に使用される参照スペクトルライブラリの作成方法

発明の背景

発明の技術分野

- 5 [0001] 本発明は、ウェーハ、基板などのワークピースの膜厚推定に使用される参照スペクトルライブラリの作成方法に関し、特に、ワークピースからの反射光の測定スペクトルと比較される複数の参照スペクトルを含む参照スペクトルライブラリの作成方法に関する。

関連技術の記載

- 10 [0002] 光学式膜厚測定装置は、ウェーハ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、その決定された参照スペクトルに予め関連付けられた膜厚を決定するように構成される。

- [0003] 図 1 2 は、測定スペクトルと複数の参照スペクトルとの比較から膜厚を決定するプロセスを説明する図である。光学式膜厚測定装置は、ウェーハの研磨中に生成された測定スペクトルと、予め用意された複数の参照スペクトルとを比較し、測定スペクトルに最も形状に近い参照スペクトルを決定し、この決定された参照スペクトルに予め関連付けられた膜厚を決定する。測定スペクトルに最も形状に近い参照スペクトルは、参照スペクトルと測定スペクトルとの間の形状の差が最も小さいスペクトルである。
- 15
- 20

- [0004] 複数の参照スペクトルは、研磨対象のウェーハと同じ表面構造を有する参照ウェーハを予め研磨することによって取得される。各参照スペクトルにはその参照スペクトルが取得されたときの膜厚が関連付けられる。すなわち、複数の参照スペクトルは、参照ウェーハの膜厚が異なるときに取得されたものであり、複数の参照スペクトルは複数の異なる膜厚に対応する。したがって、測定スペクトルに最も形状に近い参照スペクトルを特定することにより、ウェーハの現在の膜厚を推定することができる。
- 25

- [0005] 複数の参照スペクトルおよび対応する膜厚を取得する工程の一例について説明する。まず、研磨対象のウェーハと同じ表面構造を有する参照ウェーハが用意

される。参照ウェーハは、膜厚測定器に搬送され、参照ウェーハの初期膜厚が膜厚測定器によって測定される。次に、参照ウェーハは研磨装置に搬送され、研磨装置により参照ウェーハが研磨される。参照ウェーハの研磨中、参照ウェーハの表面に光が照射され、参照ウェーハからの反射光のスペクトル（すなわち参照スペクトル）

5 が生成される。参照スペクトルは、参照ウェーハの研磨中に周期的に生成される。したがって、参照ウェーハの研磨中、膜厚の減少とともに複数の参照スペクトルが取得される。参照ウェーハの研磨が終了した後、参照ウェーハは上記膜厚測定器に再び搬送され、研磨された参照ウェーハの膜厚（すなわち最終膜厚）が測定される。

[0006] 図 1 3 は、参照ウェーハの膜厚と研磨時間との関係を示すグラフである。

10 参照ウェーハの研磨レート（除去レートともいう）が一定である条件下では、図 1 3 に示すように、膜厚は研磨時間とともに初期膜厚 T_0 から最終膜厚 T_f まで直線的に減少する。言い換えれば、膜厚は、研磨時間を変数として含む一次関数で表すことができる。研磨レートは、初期膜厚 T_0 と最終膜厚 T_f との差を、最終膜厚 T_f での研磨時間 t_{fin} と初期膜厚 T_0 での研磨時間 t_{ini} との差で割り算することにより

15 算出することができる。

$$\text{研磨レート} = [T_0 - T_f] / [t_{fin} - t_{ini}]$$

[0007] 複数の参照スペクトルが生成された時間 t_1 , t_2 , $\dots$, t_n は、研磨時間 t_{ini} から研磨時間 t_{fin} までの範囲内である。初期膜厚 T_0 と、最終膜厚 T_f と、参照スペクトルが生成された時間 $t_1 \sim t_n$ から、参照スペクトルに対応する

20 膜厚を算出することができる。例えば、時間 t_2 において生成された参照スペクトルに対応する膜厚は、以下の式から算定することができる。

$$T_0 - [[T_0 - T_f] / [t_{fin} - t_{ini}]] \cdot [t_2 - t_{ini}]$$

[0008] このようにして、異なる膜厚に対応する複数の参照スペクトルが取得される。各参照スペクトルは、対応する膜厚に関連付けられる（結び付けられる）。光

25 学式膜厚測定装置は、ウェーハの研磨中に測定スペクトルに形状が最も近い参照スペクトルを特定することにより、その参照スペクトルに関連付けられた膜厚からウェーハの現在の膜厚を推定することができる。

【先行技術文献】

【特許文献】

[0009] 【特許文献 1】 日本国特開 2 0 2 2 - 1 0 5 5 3 号公報

【特許文献 2】 日本国特表 2 0 1 6 - 5 1 0 9 5 3 号公報

[0010] 図 1 3 から分かるように、参照スペクトルは、参照ウェーハの膜厚が初期膜厚 T_0 から最終膜厚 T_f まで減少している間に生成される。したがって、初期膜厚 T_0 よりも大きい膜厚に対応する参照スペクトル、および最終膜厚 T_f よりも小さい膜厚に対応する参照スペクトルは取得されない。研磨されるウェーハの現在の膜厚が初期膜厚 T_0 よりも大きい場合、または最終膜厚 T_f よりも小さい場合は、対応する参照スペクトルが存在しないため、ウェーハの現在の膜厚を推定することができない。

10

発明の要旨

[0011] そこで、本発明は、ウェーハなどのワークピースの膜厚推定に使用される複数の参照スペクトルの範囲を広げて、推定可能な膜厚の範囲を拡大する技術を提供する。

15 [0012] 一態様では、ワークピースの膜厚推定に使用される参照スペクトルライブラリの作成方法であって、参照ワークピースの研磨前に前記参照ワークピースの初期膜厚を測定し、前記参照ワークピースを研磨装置により研磨し、前記参照ワークピースの研磨内の複数の実研磨時間での前記参照ワークピースからの反射光の複数の実参照スペクトルを生成し、前記参照ワークピースの研磨後に前記参照ワークピースの最終膜厚を測定し、前記初期膜厚と前記最終膜厚と差を、前記参照ワークピースの研磨開始から研磨終了までの時間で除算することで研磨レートを算定し、前記参照ワークピースの研磨開始よりも前の研磨前時間に対応する研磨前参照スペクトルと、前記参照ワークピースの研磨終了よりも後の研磨後時間に対応する研磨後参照スペクトルを外挿により生成し、前記研磨レートに基づいて、前記研磨前参照
20 スペクトルと、前記複数の実参照スペクトルと、前記研磨後参照スペクトルにそれぞれ対応する複数の参照膜厚を算定し、前記複数の参照膜厚を、前記研磨前参照スペクトル、前記複数の実参照スペクトル、および前記研磨後参照スペクトルにそれぞれ関連付けることにより参照スペクトルライブラリを作成する、参照スペクトルライブラリの作成方法が提供される。

[0013] 一態様では、前記研磨前参照スペクトルおよび前記研磨後参照スペクトルは、外挿モデルにより生成される。

一態様では、前記研磨前参照スペクトルは、前記研磨前時間を前記外挿モデルに入力することにより、前記外挿モデルから出力され、前記研磨後参照スペクトルは、
5 前記研磨後時間を前記外挿モデルに入力することにより、前記外挿モデルから出力される。

一態様では、前記外挿モデルは、前記複数の実参照スペクトルおよび前記複数の実研磨時間を含む訓練データを用いた機械学習により構築された学習済みモデルである。

10 一態様では、前記機械学習は、長・短期記憶（L S T M）である。

一態様では、前記外挿モデルは、前記複数の実参照スペクトルおよび前記複数の実研磨時間を統計的アルゴリズムに従って解析し、解析結果に基づいて前記研磨前参照スペクトルおよび前記研磨後参照スペクトルを生成する統計モデルである。

[0014] 参照スペクトルライブラリは、参照ワークピースの研磨中に得られた複数の
15 の実参照スペクトルに加え、外挿によって生成された研磨前参照スペクトルおよび研磨後参照スペクトルを含む。研磨前参照スペクトルは、参照ワークピースの初期膜厚よりも大きい膜厚に対応する仮想的な参照スペクトルであり、研磨後参照スペクトルは、参照ワークピースの最終膜厚よりも小さい膜厚に対応する仮想的な参照スペクトルである。したがって、参照スペクトルライブラリに含まれる参照スペク
20 トルの範囲が広がり、ワークピースの研磨中に推定可能な膜厚の範囲が広がる。

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、光学式膜厚測定装置の詳細な構成を示す断面図である。

25 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、参照スペクトルライブラリの作成方法に使用される研磨装置と膜厚測定装置を含むワークピース処理システムの一実施形態を示す模式図である。

図 5 は、参照ワークピースの研磨中の異なる研磨時間で生成された複数の実参照

スペクトルの一例を示す図である。

図 6 は、参照ワークピースの研磨時間に伴う参照ワークピースの膜厚の減少の一例を示すグラフである。

図 7 は、研磨前時間に対応する研磨前参照スペクトルと、参照ワークピースの研
5 磨中に生成された複数の実参照スペクトルの一例を示すグラフである。

図 8 は、研磨後時間に対応する研磨後参照スペクトルと、参照ワークピースの研
磨中に生成された複数の実参照スペクトルの一例を示すグラフである。

図 9 は、図 7 および図 8 に示す研磨前参照スペクトルおよび研磨後参照スペクト
10 ルと、参照ワークピースの研磨中に生成された複数の実参照スペクトルを含む複数の
の参照スペクトルの一例を示すグラフである。

図 10 は、図 9 に示す複数の参照スペクトルに対応する複数の時間での複数の参
照膜厚の一例を示すグラフである。

図 11 は、参照スペクトルライブラリを作成する方法の一実施形態を説明するフ
ローチャートである。

15 図 12 は、測定スペクトルと複数の参照スペクトルとの比較から膜厚を決定する
プロセスを説明する図である。

図 13 は、参照ウェーハの膜厚と研磨時間との関係を示すグラフである。

実施形態の説明

20 [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 100 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
25 5 と、研磨装置 100 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。

[0017] 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る。一例では、ワークピース W は、多層膜が形成

された製品ウェーハである。

5 [0018] 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。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

10 ている。

[0019] 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

15 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。

[0020] 動作制御部9は、プログラムが格納された記憶装置9a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9bを備えている。動作制御部9は、

20 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9a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9b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

25 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。

[0021] 研磨装置100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 の膜厚を決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。

- 5 [0022] 処理システム 30 は、プログラム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。
- 10 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。

- [0023] 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
- 15 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。

- [0024] 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、
- 20 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
- 25 27 に伝達する。

- [0025] 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 3 2 の先端 3 2 a から構成される光学センサヘッド 2 5 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。

[0026] 光学センサヘッド 2 5 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。

[0027] 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。

[0028] 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。

[0029] 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、投光光ファイバーケーブル 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、受光光ファイバーケーブル32を通過して分光器27に伝達される。

[0030] 分光器27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。光強度測定データは、処理システム30に送られる。

[0031] 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（推定）するように構成されている。より具体的には、処理システム30は、反射光の測定スペクトル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38（図1参照）の中から決定し、この決定された参照スペクトルに予め関連付けられた膜厚を決定する。参照スペクトルライブラリ38は、ワークピースWの研磨前に予め作成され、処理システム30の記憶装置30a内に格納される。

[0032] 以下、参照スペクトルライブラリ38の作成方法の一実施形態について説明する。図4は、参照スペクトルライブラリ38の作成方法に使用される研磨装置100と膜厚測定装置101を含むワークピース処理システムの一実施形態を示す模式図である。

[0033] まず、ワークピースWと同じ表面構造を有する参照ワークピースRWが用意される。より具体的には、参照ワークピースRWは、ワークピースWと同じ材料から構成された露出面を有し、同じ積層構造を有する。次に、参照ワークピースRWは、搬送装置103により膜厚測定装置101に搬送され、研磨前の参照ワークピースRWの膜厚である初期膜厚が膜厚測定装置101によって測定される。

[0034] 膜厚測定装置101は、静止している参照ワークピースRWに光を照射し、

参照スペクトルからの反射光のスペクトルを生成し、スペクトルを分析することで参照ワークピースRWの膜厚を決定する。この膜厚測定装置101の基本的な構成は、光学式膜厚測定装置20と同じであるが、静止している参照ワークピースRWの膜厚を測定する点で、光学式膜厚測定装置20とは異なっている。参照ワークピースRWの初期膜厚の測定値は、膜厚測定装置101から処理システム30に送信される。

[0035] 初期膜厚の測定後、参照ワークピースRWは、搬送装置103により研磨装置100に搬送され、研磨装置100により研磨される。参照ワークピースRWの研磨は、ワークピースWの研磨と同様に実行される。すなわち、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上の研磨パッド2の研磨面2aに供給される。参照ワークピースRW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参照ワークピースRWは研磨ヘッド1によって研磨パッド2の研磨面2aに押し付けられることで、参照ワークピースRWの表面が研磨される。

[0036] 参照ワークピースRWの研磨中は、ワークピースWの研磨と同様に、光学センサヘッド25から参照ワークピースRWに光が照射され、参照ワークピースRWからの反射光のスペクトルが生成される。以下の説明では、参照ワークピースRWの研磨中に得られる参照ワークピースRWからの反射光のスペクトルを、実参照スペクトルと称する。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から参照ワークピースRW上の中心点を含む複数の膜厚測定点に光が照射される。処理システム30は、研磨テーブル3が一回転するたびに、分光器27によって生成された光強度測定データから、実参照スペクトルを生成する。

[0037] 図5は、参照ワークピースRWの研磨中の異なる研磨時間で生成された複数の実参照スペクトルの一例を示す図である。図5において縦軸は参照ワークピースRWからの反射光の強度を表し、横軸は反射光の波長を表している。図5に示すように、実参照スペクトルは、研磨されている参照ワークピースRWからの反射光から生成されるので、実参照スペクトルは、参照ワークピースRWの膜厚の減少とともに（すなわち研磨時間とともに）少しずつ変化する。したがって、参照ワーク

ピースRWの研磨中の異なる研磨時間での反射光から生成された複数の実参照スペクトルの形状は、少しずつ異なっている。

[0038] このようにして、参照ワークピースRWの研磨中、参照ワークピースRWの膜厚の減少とともに、複数の研磨時間に対応する複数の実参照スペクトルが生成される。以下の説明では、これら複数の実参照スペクトルが生成される複数の研磨時間を、複数の実研磨時間と称することがある。参照ワークピースRWの研磨後、参照ワークピースRWは、搬送装置103により膜厚測定装置101に搬送され、研磨後の参照ワークピースRWの膜厚である最終膜厚が膜厚測定装置101によって測定される。最終膜厚の測定値は、膜厚測定装置101から処理システム30に送信される。処理システム30は、初期膜厚と最終膜厚と差を、参照ワークピースRWの研磨開始から研磨終了までの時間で除算することで参照ワークピースRWの研磨レートを算定する。

[0039] 図6は、参照ワークピースRWの研磨時間に伴う参照ワークピースRWの膜厚の減少の一例を示すグラフである。膜厚は研磨時間とともに初期膜厚 T_{ini} から最終膜厚 T_{fin} まで直線的に減少する。言い換えれば、膜厚は、研磨時間を変数として含む一次関数で表すことができる。研磨レートは、初期膜厚 T_{ini} と最終膜厚 T_{fin} との差を、参照ワークピースRWの研磨開始から研磨終了までの時間で割り算することにより算出される。参照ワークピースRWの研磨開始から研磨終了までの時間は、最終膜厚 T_{fin} での研磨時間 t_n と初期膜厚 T_{ini} での研磨時間 t_m との差に相当する。研磨レートは以下の式で表される。

$$\text{研磨レート} = [T_{ini} - T_{fin}] / [t_n - t_m]$$

[0040] 処理システム30は、参照ワークピースRWの研磨開始よりも前の研磨前時間（例えば、 t_{m-1} , t_{m-2} など）に対応する研磨前参照スペクトルと、参照ワークピースRWの研磨終了よりも後の研磨後時間（例えば、 t_{n+1} , t_{n+2} など）に対応する研磨後参照スペクトルを外挿により生成するように構成されている。図1に示すように、処理システム30は、その記憶装置30a内に予め格納された外挿モデル40を有しており、外挿モデル40を用いて研磨前参照スペクトルおよび研磨後参照スペクトルを生成する。研磨時間は、研磨テーブル3の回転回数に比例するので、研磨前時間、研磨後時間、および参照ワークピースRWの研磨中の複数の実研磨時

間 ($t_m \sim t_n$) は、研磨テーブル 3 の回転回数によって表されてもよい。

[0041] 一実施形態では、外挿モデル 40 は、訓練データを用いた機械学習により構築された学習済みモデルである。訓練データは、参照ワークピース RW の研磨から得られた複数の実参照スペクトル (図 5 参照)、および複数の実参照スペクトル
5 に対応する複数の実研磨時間 ($t_m \sim t_n$) を含む。訓練データに含まれる複数の実参照スペクトルは、対応する複数の実研磨時間にそれぞれ関連付けられる。処理システム 30 は、その記憶装置 30a 内に格納されているプログラムに含まれる命令に従って機械学習を実行することで、外挿モデル 40 を構築する。機械学習は、上記訓練データを使用した教師あり機械学習である。

10 [0042] 各実参照スペクトルは、図 5 を参照して説明したように、複数の波長に対応する反射光の複数の強度を表している。複数の波長に対応する反射光の複数の強度は、その実参照スペクトルの特徴を表す数値データとして扱うことができる。外挿モデル 40 は、訓練データに含まれる複数の実参照スペクトルの特徴を学習し、学習した特徴に従って未知のスペクトルである研磨前参照スペクトルおよび研磨後
15 参照スペクトルを生成する。訓練データに含まれる各実参照スペクトルは、対応する実研磨時間に関連付けられているので、外挿モデル 40 は、実参照スペクトルと実研磨時間との相関関係を学習する。したがって、学習済みモデルとしての外挿モデル 40 は、参照ワークピース RW の実研磨時間 $t_m \sim t_n$ の範囲外の研磨時間に対応する参照スペクトルを生成することができる。

20 [0043] 本実施形態では、外挿モデル 40 は機械学習によって構築されている。本実施形態に適用可能な機械学習の例としては、長・短期記憶 (LSTM)、畳み込みニューラルネットワーク (CNN)、リカレントニューラルネットワーク (RNN) などが挙げられる。本実施形態では、機械学習として長・短期記憶 (LSTM) が使用されている。

25 [0044] 他の実施形態では、外挿モデル 40 は、統計的なアルゴリズムに従って構築された統計モデルであってもよい。統計モデルは、複数の実参照スペクトルおよび複数の実研磨時間を統計的アルゴリズムに従って解析し、解析結果に基づいて研磨前参照スペクトルおよび研磨後参照スペクトルを生成するように構成される。統計モデルの構築に使用される統計的なアルゴリズムの例としては、自己回帰、移動

平均、自己回帰移動平均、状態空間などが挙げられる。

[0045]ただし、外挿モデル40が、研磨前時間に対応する研磨前参照スペクトル、および研磨後時間に対応する研磨後参照スペクトルを生成することができる限りにおいて、外挿モデル40の具体的構成は特に限定されない。

- 5 [0046] 図6に示す例において、処理システム30は、参照ワークピースRWの研磨開始よりも前の研磨前時間 t_{m-1} を外挿モデル40に入力することにより、研磨前時間 t_{m-1} に対応する研磨前参照スペクトルを外挿モデル40から出力する。さらに、処理システム30は、参照ワークピースRWの研磨終了よりも後の研磨後時間 t_{n+1} を外挿モデル40に入力することにより、研磨後時間 t_{n+1} に対応する研磨後参照スペクトルを外挿モデル40から出力する。同様に、処理システム30は、研磨前時間 t_{m-2} 、研磨後時間 t_{n+2} などの実研磨時間 $t_m \sim t_n$ の範囲外の研磨時間に対応する参照スペクトルを生成することができる。

- 15 [0047] 外挿モデル40によって生成された参照スペクトルは、仮想スペクトルである。外挿モデル40によって生成すべき研磨前参照スペクトルの数、および研磨後参照スペクトルの数は特に限定されない。3つ以上の研磨前参照スペクトル、および3つ以上の研磨後参照スペクトルが生成されてもよいし、あるいは1つの研磨前参照スペクトル、および1つの研磨後参照スペクトルが生成されてもよい。

- 20 [0048] 図7は、研磨前時間 t_{m-1} 、 t_{m-2} に対応する研磨前参照スペクトルと、参照ワークピースRWの研磨中に生成された複数の実参照スペクトルの一例を示すグラフであり、図8は、研磨後時間 t_{n+1} 、 t_{n+2} に対応する研磨後参照スペクトルと、参照ワークピースRWの研磨中に生成された複数の実参照スペクトルの一例を示すグラフであり、図9は、図7および図8に示す研磨前参照スペクトルおよび研磨後参照スペクトルと、参照ワークピースRWの研磨中に生成された複数の実参照スペクトルを含む複数の参照スペクトルの一例を示すグラフである。

- 25 [0049] 研磨前参照スペクトルは、参照ワークピースRWの初期膜厚よりも大きい膜厚に対応する仮想的な参照スペクトルであり、研磨後参照スペクトルは、参照ワークピースRWの最終膜厚よりも小さい膜厚に対応する仮想的な参照スペクトルである。処理システム30は、図7および図8に示す研磨前参照スペクトルおよび研磨後参照スペクトルを、参照ワークピースRWの研磨中に生成された複数の実参照

スペクトルに加えることで、図 9 に示すような研磨前参照スペクトル、研磨後参照スペクトル、および複数の実参照スペクトルを含む複数の参照スペクトルを取得する。

[0050] 次に、処理システム 30 は、図 9 に示す複数の参照スペクトル（研磨前参照スペクトル、研磨後参照スペクトル、および複数の実参照スペクトルを含む）に対応する複数の時間 $t_{m-2} \sim t_{n+2}$ での複数の参照膜厚を算定する。図 10 は、図 9 に示す複数の参照スペクトルに対応する複数の時間での複数の参照膜厚の一例を示すグラフである。処理システム 30 は、研磨レートと、複数の参照スペクトルに対応する複数の時間 $t_{m-2} \sim t_{n+2}$ から、複数の時間 $t_{m-2} \sim t_{n+2}$ での参照膜厚を算定する。

研磨レートは、図 10 のグラフの傾きに相当する。参照膜厚の算定に使用される時間 $t_{m-2} \sim t_{n+2}$ は、研磨前時間 t_{m-1} 、 t_{m-2} 、研磨後時間 t_{n+1} 、 t_{n+2} 、および実研磨時間 $t_m \sim t_n$ を含む。

[0051] 例えば、時間 t_{m+1} での参照膜厚は、以下の式から算定することができる。

$$T_{ini} - [T_{ini} - T_{fin}] / [t_n - t_m] \cdot [t_{m+1} - t_m]$$

同様にして、処理システム 30 は、研磨前時間 t_{m-1} 、 t_{m-2} および研磨後時間 t_{n+1} 、 t_{n+2} に対応する参照膜厚 $T-1$ 、 $T-2$ 、 $T+1$ 、 $T+2$ を算出することができる。時間は、研磨テーブル 3 の回転回数に比例するので、図 10 の横軸に示される時間は、研磨テーブル 3 の回転回数によって表されてもよい。

[0052] 処理システム 30 は、図 10 に示す複数の参照膜厚を、図 9 に示す複数の参照スペクトル（研磨前参照スペクトル、複数の実参照スペクトル、および研磨後参照スペクトルを含む）にそれぞれ関連付けることで、参照スペクトルライブラリ 38 を作成する。複数の参照膜厚は、複数の参照スペクトルに一意に対応する。参照スペクトルライブラリ 38 は、処理システム 30 の記憶装置 30 a 内に格納される。

[0053] 図 1 に示すワークピース W の研磨中、ワークピース W の膜厚は、参照スペクトルライブラリ 38 を用いて推定される。すなわち、光学センサヘッド 25 はワークピース W に光を照射し、ワークピース W からの反射光を受ける。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。処理システム 30

は、光強度測定データから、ワークピースWからの反射光の測定スペクトルを生成する。処理システム30は、反射光の測定スペクトル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38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参照膜厚を決定する。この参照膜厚は、ワークピースWの推
5 定膜厚である。

[0054] 参照スペクトルライブラリ38は、参照ワークピースRWの研磨中に得られた複数の実参照スペクトルに加え、外挿によって生成された仮想スペクトルである研磨前参照スペクトルおよび研磨後参照スペクトルを含む。したがって、参照スペクトルライブラリ38に含まれる参照スペクトルの範囲が広がり、ワークピース
10 Wの研磨中に推定可能な膜厚の範囲が広がる。

[0055] 図11は、参照スペクトルライブラリ38を作成する方法の一実施形態を説明するフローチャートである。

ステップS101では、ワークピースWと同じ表面構造を有する参照ワークピースRWが用意される。参照ワークピースRWは、ワークピースWと同じ材料から構成された露出面を有し、同じ積層構造を有する。
15

ステップS102では、研磨前の参照ワークピースRWの膜厚である初期膜厚が膜厚測定装置101によって測定される（図4参照）。

[0056] ステップS103では、参照ワークピースRWは、図1に示す研磨装置100により化学機械的に研磨される。

ステップS104では、参照ワークピースRWの研磨中の異なる実研磨時間において、参照ワークピースRWに光が照射される。処理システム30は、参照ワークピースRWからの反射光の実参照スペクトルを生成する。
20

ステップS105では、参照ワークピースRWの研磨後、研磨された参照ワークピースRWの膜厚である最終膜厚が膜厚測定装置101によって測定される（図4
25 参照）。

ステップS106では、処理システム30は、初期膜厚と最終膜厚と差を、参照ワークピースRWの研磨開始から研磨終了までの時間で除算することで参照ワークピースRWの研磨レートを算定する。参照ワークピースRWの研磨レートは、図6に示すグラフの傾きに相当する。

[0057] ステップS 1 0 7では、処理システム3 0は、参照ワークピースRWの研磨開始よりも前の研磨前時間に対応する研磨前参照スペクトルと、参照ワークピースRWの研磨終了よりも後の研磨後時間に対応する研磨後参照スペクトルを外挿により生成する（図7および図8参照）。一実施形態では、処理システム3 0は、研磨前時間を外挿モデル4 0に入力することにより、その研磨前時間に対応する研磨前参照スペクトルを外挿モデル4 0から出力する。さらに、処理システム3 0は、研磨後時間を外挿モデル4 0に入力することにより、その研磨後時間に対応する研磨後参照スペクトルを外挿モデル4 0から出力する。

ステップS 1 0 6とステップS 1 0 7の順番は、逆であってもよく、あるいはステップS 1 0 6とステップS 1 0 7は同時に実行されてもよい。

[0058] ステップS 1 0 8では、処理システム3 0は、研磨前参照スペクトルおよび研磨後参照スペクトルを実参照スペクトルに加えて、参照スペクトルライブラリ3 8を構成する複数の参照スペクトルを作成する（図9参照）。

ステップS 1 0 9では、処理システム3 0は、研磨レート、および複数の参照スペクトル（研磨前参照スペクトル、複数の実参照スペクトル、および研磨後参照スペクトルを含む）に対応する複数の時間から、これら複数の時間にそれぞれ対応する参照膜厚を算定する（図10参照）。複数の時間は、研磨前参照スペクトルに対応する研磨前時間、複数の実参照スペクトルに対応する複数の実研磨時間、および研磨後参照スペクトルに対応する研磨後時間を含む。

ステップS 1 1 0では、処理システム3 0は、複数の参照膜厚を、複数の参照スペクトル（研磨前参照スペクトル、複数の実参照スペクトル、および研磨後参照スペクトルを含む）にそれぞれ関連付けることで、参照スペクトルライブラリ3 8を作成する。

[0059] 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. ワークピースの膜厚推定に使用される参照スペクトルライブラリの作成方法であって、

- 5 参照ワークピースの研磨前に前記参照ワークピースの初期膜厚を測定し、
前記参照ワークピースを研磨装置により研磨し、
前記参照ワークピースの研磨内の複数の実研磨時間での前記参照ワークピースからの反射光の複数の実参照スペクトルを生成し、
前記参照ワークピースの研磨後に前記参照ワークピースの最終膜厚を測定し、
10 前記初期膜厚と前記最終膜厚と差を、前記参照ワークピースの研磨開始から研磨終了までの時間で除算することで研磨レートを算定し、
前記参照ワークピースの研磨開始よりも前の研磨前時間に対応する研磨前参照スペクトルと、前記参照ワークピースの研磨終了よりも後の研磨後時間に対応する研磨後参照スペクトルを外挿により生成し、
15 前記研磨レートに基づいて、前記研磨前参照スペクトルと、前記複数の実参照スペクトルと、前記研磨後参照スペクトルにそれぞれ対応する複数の参照膜厚を算定し、
前記複数の参照膜厚を、前記研磨前参照スペクトル、前記複数の実参照スペクトル、および前記研磨後参照スペクトルにそれぞれ関連付けることにより参照スペクトルライブラリを作成する、参照スペクトルライブラリの作成方法。
20

2. 前記研磨前参照スペクトルおよび前記研磨後参照スペクトルは、外挿モデルにより生成される、請求項 1 に記載の参照スペクトルライブラリの作成方法。

- 25 3. 前記研磨前参照スペクトルは、前記研磨前時間を前記外挿モデルに入力することにより、前記外挿モデルから出力され、
前記研磨後参照スペクトルは、前記研磨後時間を前記外挿モデルに入力することにより、前記外挿モデルから出力される、請求項 2 に記載の参照スペクトルライブラリの作成方法。

4. 前記外挿モデルは、前記複数の実参照スペクトルおよび前記複数の実研磨時間を含む訓練データを用いた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2に記載の参照スペクトルライブラリの作成方法。

5

5. 前記機械学習は、長・短期記憶（LSTM）である、請求項4に記載の参照スペクトルライブラリの作成方法。

6. 前記外挿モデルは、前記複数の実参照スペクトルおよび前記複数の実研磨時間を統計的アルゴリズムに従って解析し、解析結果に基づいて前記研磨前参照スペクトルおよび前記研磨後参照スペクトルを生成する統計モデルである、請求項2に記載の参照スペクトルライブラリの作成方法。

10