

研磨方法および研磨装置

発明の背景

発明の技術分野

- 5 本発明は、ウェーハなどの基板を研磨する方法および装置に関し、特に基板からの反射光に含まれる光学情報に基づいて膜厚を決定する技術に関する。

関連技術の記載

- 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て形成され、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。
- 10

- 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、基板（例えば、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とを備える。基板を研磨するときは、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、研磨ヘッドにより基板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基板と研磨パッドとを相対移動させることにより、基板の表面を形成する膜を研磨する。
- 15

- 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、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基板の表面に導き、基板からの反射光のスペクトルを解析することで、基板の膜厚を決定するように構成される。
- 20

- 図22は、反射光のスペクトルから膜厚を決定する従来の方法の一例を説明する図である。光学式膜厚測定装置は、基板の研磨中に、基板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生成する。スペクトルは、反射光の強度と、反射光の波長との関係を示すグラフとして表される。光学式膜厚測定装置は、反射光のスペクトルと複数の参照スペクトルとを比較し、反射光のスペクトルに最も形状に近い1つの参照スペクトルを決定する。具体的には、光学式膜厚測定装置は、
- 25

反射光のスペクトルと各参照スペクトルとの差を算出し、算出された差が最も小さい参照スペクトルを決定する。そして、光学式膜厚測定装置は、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。

- 5 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予め関連付けられている。すなわち、各参照スペクトルは、異なる膜厚の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、反射光のスペクトルに最も形状の近い参照スペクトルを特定することにより、研磨中の基板の現在の膜厚を決定することができる。

【先行技術文献】

10 【特許文献】

【特許文献1】 日本国特開平5-128256号公報

【特許文献2】 日本国特開平5-342310号公報

【特許文献3】 日本国特開2006-254226号公報

- 15 しかしながら、基板の研磨中に得られるスペクトルは、種々の原因によりばらつきを生じやすい。例えば、外乱（スラリー、電氣的ノイズ、光学的ノイズなど）、パターン構造の違い、膜の下地構造の違いなどに起因して、研磨中に得られる反射光のスペクトルは大きく変わることがある。このため、スペクトルから決定された膜厚が、実際の膜厚から大きく異なることがある。

20 発明の要旨

そこで、本発明は、ウェーハなどの基板からの反射光のスペクトルのばらつきの影響を低減し、正確な膜厚を決定することができる基板の研磨方法および研磨装置を提供する。

- 25 一態様では、回転する研磨テーブル上の研磨パッドに基板を押し付けて該基板の表面を研磨し、前記研磨テーブルが一回転するたびに、前記基板の表面からの反射光のスペクトルを生成し、研磨時間に沿って並ぶ複数のスペクトルから構成される三次元データを作成し、前記三次元データに基づいて前記基板の膜厚を決定する、研磨方法が提供される。

一態様では、前記基板の膜厚を決定する工程は、前記三次元データを参照データと比較し、前記三次元データに最も一致する前記参照データ内のデータ領域の位置を決定し、前記決定された位置に関連付けられた膜厚を決定する工程を含み、前記参照データは、研磨時間に沿って並ぶ複数の参照スペクトルから構成されている。

5 一態様では、前記三次元データを前記参照データと比較する工程は、前記三次元データに含まれる前記複数のスペクトルと、前記参照データに含まれる複数の参照スペクトルとの差を算出する工程であり、前記三次元データに最も一致する前記参照データ内のデータ領域の位置を決定する工程は、前記差を最小とする前記参照データ内のデータ領域の位置を決定する工程である。

10 一態様では、前記研磨方法は、前記基板の研磨初期に作成された初期三次元データに最も一致するデータ領域を含む前記参照データを複数の参照データから選択する工程をさらに含み、前記複数の参照データのそれぞれは、予め用意された複数の参照基板のうちの1つを研磨しているときに生成された複数の参照スペクトルを含んでいる。

15 一態様では、前記基板の膜厚を決定する工程は、前記参照データおよび前記三次元データを参照画像および二次元画像にそれぞれ変換し、前記二次元画像に最も一致する前記参照画像内の画像領域の位置を決定し、前記決定された位置に関連付けられた膜厚を決定する工程を含む。

一態様では、前記研磨方法は、予め用意された複数の参照基板を研磨しているときに生成された複数の参照スペクトルを含む複数の参照データを複数の参照画像に変換し、前記基板の研磨初期に作成された初期三次元データを初期二次元画像に変換し、前記初期二次元画像に最も一致する画像領域を含む前記参照画像を前記複数の参照画像から選択する工程をさらに含む。

20

一態様では、前記基板の膜厚を決定する工程は、人工知能のアルゴリズムに従って構築された膜厚算定モデルに前記三次元データを入力し、前記膜厚算定モデルから膜厚を出力させる工程を含む。

25

一態様では、前記膜厚算定モデルは、複数の訓練用三次元データと、前記複数の訓練用三次元データにそれぞれ結びつけられた複数の膜厚との組み合わせを含む訓

練用データセットを用いて構築された学習済みモデルであり、前記複数の訓練用三次元データのそれぞれは、研磨時間に沿って並ぶ複数の参照スペクトルから構成されている。

- 一態様では、前記膜厚算定モデルは、複数の参照基板を研磨しているときに生成された複数の参照スペクトルをそれぞれ含む複数の訓練用三次元データを作成し、前記複数の訓練用三次元データを、クラスタリングのアルゴリズムに従って複数のグループに分け、テスト基板を研磨しているとき生成された複数のスペクトルを研磨時間に沿って並べてテスト三次元データを作成し、前記テスト三次元データに最も一致する訓練用三次元データを含む1つのグループを前記複数のグループから選択し、前記選択されたグループに属する複数の訓練用三次元データと、前記複数の訓練用三次元データにそれぞれ結びつけられた複数の膜厚との組み合わせを含む訓練用データセットを用いて構築された学習済みモデルである。

- 一態様では、研磨パッドを支持するための回転可能な研磨テーブルと、基板を前記研磨パッドに押し付けて該基板の表面を研磨する研磨ヘッドと、前記研磨テーブル内に配置され、前記基板の表面に光を導き、かつ前記基板の表面からの反射光を受けるセンサヘッドと、前記反射光のスペクトルを生成し、研磨時間に沿って並ぶ複数のスペクトルから構成される三次元データを作成し、前記三次元データに基づいて前記基板の膜厚を決定するためのプログラムが格納された記憶装置を有する処理システムを備えている、研磨装置が提供される。

- 一態様では、前記処理システムは、前記三次元データを参照データと比較し、前記三次元データに最も一致する前記参照データ内のデータ領域の位置を決定し、前記決定された位置に関連付けられた膜厚を決定するように構成され、前記参照データは、研磨時間に沿って並ぶ複数の参照スペクトルから構成されている。

- 一態様では、前記処理システムは、前記三次元データに含まれる前記複数のスペクトルと、前記参照データに含まれる複数の参照スペクトルとの差を算出し、前記差を最小とする前記参照データ内のデータ領域の位置を決定するように構成されている。

一態様では、前記処理システムは、前記基板の研磨初期に作成された初期三次元

データに最も一致するデータ領域を含む前記参照データを複数の参照データから選択するように構成されており、前記複数の参照データのそれぞれは、予め用意された複数の参照基板のうちの1つを研磨しているときに生成された複数の参照スペクトルを含んでいる。

- 5 一態様では、前記処理システムは、前記参照データおよび前記三次元データを参照画像および二次元画像にそれぞれ変換し、前記二次元画像に最も一致する前記参照画像内の画像領域の位置を決定し、前記決定された位置に関連付けられた膜厚を決定するように構成されている。

- 一態様では、前記処理システムは、予め用意された複数の参照基板を研磨しているときに生成された複数の参照スペクトルを含む複数の参照データを複数の参照画像に変換し、前記基板の研磨初期に作成された初期三次元データを初期二次元画像に変換し、前記初期二次元画像に最も一致する画像領域を含む前記参照画像を前記複数の参照画像から選択するように構成されている。
- 10

- 一態様では、前記記憶装置には、人工知能のアルゴリズムに従って構築された膜厚算定モデルが格納されており、前記処理システムは、前記三次元データを前記膜厚算定モデル入力し、前記膜厚算定モデルから膜厚を出力させるように構成されている。
- 15

- 一態様では、前記膜厚算定モデルは、複数の訓練用三次元データと、前記複数の訓練用三次元データにそれぞれ結びつけられた複数の膜厚との組み合わせを含む訓練用データセットを用いて構築された学習済みモデルであり、前記複数の訓練用三次元データのそれぞれは、研磨時間に沿って並ぶ複数の参照スペクトルから構成されている。
- 20

- 一態様では、前記膜厚算定モデルは、複数の参照基板を研磨しているときに生成された複数の参照スペクトルをそれぞれ含む複数の訓練用三次元データを作成し、前記複数の訓練用三次元データを、クラスタリングのアルゴリズムに従って複数のグループに分け、テスト基板を研磨しているときに生成された複数のスペクトルを研磨時間に沿って並べてテスト三次元データを作成し、前記テスト三次元データに最も一致する訓練用三次元データを含む1つのグループを前記複数のグループから選
- 25

択し、前記選択されたグループに属する複数の訓練用三次元データと、前記複数の訓練用三次元データにそれぞれ結びつけられた複数の膜厚との組み合わせを含む訓練用データセットを用いて構築された学習済みモデルである。

一態様では、基板の研磨中に、該基板からの反射光の強度測定データから複数の
5 スペクトルを生成するステップと、前記複数のスペクトルを研磨時間に沿って並べることで三次元データを作成するステップと、前記三次元データに基づいて前記基板の膜厚を決定するステップをコンピュータに実行させるためのプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体が提供される。

一態様では、前記基板の膜厚を決定するステップは、前記三次元データを参照デ
10 ータと比較するステップと、前記三次元データに最も一致する前記参照データ内のデータ領域の位置を決定するステップと、前記決定された位置に関連付けられた膜厚を決定するステップを含み、前記参照データは、研磨時間に沿って並ぶ複数の参照スペクトルから構成されている。

一態様では、前記三次元データを前記参照データと比較するステップは、前記三
15 次元データに含まれる前記複数のスペクトルと、前記参照データに含まれる複数の参照スペクトルとの差を算出するステップであり、前記三次元データに最も一致する前記参照データ内のデータ領域の位置を決定するステップは、前記差を最小とする前記参照データ内のデータ領域の位置を決定するステップである。

一態様では、前記プログラムは、前記基板の研磨初期に作成された初期三次元デ
20 ータに最も一致するデータ領域を含む前記参照データを複数の参照データから選択するステップをさらに前記コンピュータに実行させるように構成され、前記複数の参照データのそれぞれは、予め用意された複数の参照基板のうちの1つを研磨しているときに生成された複数の参照スペクトルを含んでいる。

一態様では、前記基板の膜厚を決定するステップは、前記参照データおよび前記
25 三次元データを参照画像および二次元画像にそれぞれ変換するステップと、前記二次元画像に最も一致する前記参照画像内の画像領域の位置を決定するステップと、前記決定された位置に関連付けられた膜厚を決定するステップを含む。

一態様では、前記プログラムは、予め用意された複数の参照基板を研磨している

ときに生成された複数の参照スペクトルを含む複数の参照データを複数の参照画像に変換するステップと、前記基板の研磨初期に作成された初期三次元データを初期二次元画像に変換するステップと、前記初期二次元画像に最も一致する画像領域を含む前記参照画像を前記複数の参照画像から選択するステップをさらに前記コンピュータに実行させるように構成されている。

一態様では、前記基板の膜厚を決定するステップは、人工知能のアルゴリズムに従って構築された膜厚算定モデルに前記三次元データを入力するステップと、前記膜厚算定モデルから膜厚を出力させるステップを含む。

一態様では、前記膜厚算定モデルは、複数の訓練用三次元データと、前記複数の訓練用三次元データにそれぞれ結びつけられた複数の膜厚との組み合わせを含む訓練用データセットを用いて構築された学習済みモデルであり、前記複数の訓練用三次元データのそれぞれは、研磨時間に沿って並ぶ複数の参照スペクトルから構成されている。

一態様では、前記膜厚算定モデルは、複数の参照基板を研磨しているときに生成された複数の参照スペクトルをそれぞれ含む複数の訓練用三次元データを作成し、前記複数の訓練用三次元データを、クラスタリングのアルゴリズムに従って複数のグループに分け、テスト基板を研磨しているとき生成された複数のスペクトルを研磨時間に沿って並べてテスト三次元データを作成し、前記テスト三次元データに最も一致する訓練用三次元データを含む1つのグループを前記複数のグループから選択し、前記選択されたグループに属する複数の訓練用三次元データと、前記複数の訓練用三次元データにそれぞれ結びつけられた複数の膜厚との組み合わせを含む訓練用データセットを用いて構築された学習済みモデルである。

本発明によれば、基板の膜厚は、1つのスペクトルではなく、時系列的な複数のスペクトルからなる三次元データに基づいて決定される。したがって、仮に形状の大きく異なるスペクトルが三次元データに含まれていても、そのようなスペクトルが膜厚決定に与える影響は低減される。結果として、基板の膜厚を正確に決定することができる。

図面の簡単な説明

- 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 A乃至図 3 Cは、処理システムの例を示す模式図である。
- 5 図 4 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 5 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 6 は、基板と研磨テーブルとの位置関係を示す平面図である。
- 図 7 は、研磨時間に沿って並べられた複数のスペクトルから構成される三次元データの一例を示す図である。
- 10 図 8 は、参照データの一例を示す図である。
- 図 9 は、三次元データを参照データと比較する工程を説明する図である。
- 図 10 は、三次元データに最も一致する参照データ内のデータ領域の位置を示す図である。
- 図 11 は、本実施形態の膜厚決定の方法を説明するフローチャートである。
- 15 図 12 は、下層構造が異なる複数の参照基板を用いて作成された複数の参照データを示す図である。
- 図 13 は、三次元データから二次元画像に変換される工程を示す図である。
- 図 14 は、参照データから参照画像に変換される工程を示す図である。
- 図 15 は、二次元画像を参照画像と比較する工程を説明する図である。
- 20 図 16 は、二次元画像に最も一致する参照画像内の画像領域の位置を示す図である。
- 図 17 は、本実施形態の膜厚決定の方法を説明するフローチャートである。
- 図 18 は、膜厚算定モデルの一例を示す模式図である。
- 図 19 は、参照データから訓練用データセットを作成する一例を説明する図である。
- 25 図 20 は、本実施形態の膜厚決定の方法を説明するフローチャートである。
- 図 21 は、複数の訓練用三次元データを、クラスタリングのアルゴリズムに従って複数のグループに分ける工程を説明する図である。

図 2 2 は、反射光のスペクトルから膜厚を決定する従来の方法の一例を説明する図である。

実施形態の説明

5 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、ウェーハなどの基板 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 を備えている。研磨パッド 2 の上面は、基板 W を研磨する研磨面 2 a を構成する。

10 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

15 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。

基板 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 2 a に供給される。基板 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基板 W は研磨ヘッド 1

20 によって研磨パッド 2 の研磨面 2 a に押し付けられる。基板 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の機械的作用により研磨される。

研磨装置は、基板 W の膜厚を決定する光学式膜厚測定装置 4 0 を備えている。光学式膜厚測定装置 4 0 は、光を発する光源 4 4 と、分光器 4 7 と、光源 4 4 および分光器 4 7 に連結された光学センサヘッド 7 と、分光器 4 7 に連結された処理システム 4 9 を備えている。光学センサヘッド 7、光源 4 4、および分光器 4 7 は研磨

25 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 上の基板 W の表面を横切る位置である。

処理システム49は、後述するスペクトルの生成および基板Wの膜厚決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処理装置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。処理装置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。

光源44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から基板Wの表面に導かれる。光は基板Wの表面で反射し、基板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。

処理システム49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。

図2は、処理システム49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。

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、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。

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 $R(\lambda)$ は、

10 次の式（1）を用いて求めることができる。

【数1】

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

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。

15

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、基板W上の所定の測定点に光を導き、上記所定の測定点からの反射光を受ける。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、反射光の強度測定データから図2に示すようなスペクトルを生成する。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。

20

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が複数回回転する間に上記所定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し、これら複数のスペクトルを研磨時間に沿って並べることで三次元データを作成する。処理システム49は、三次元デ

25

ータを用いて基板Wの膜厚を決定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 4 9 の記憶装置 4 9 a は、複数の参照スペクトルのデータを収容したデータベース 6 0 を有している。複数の参照スペクトルは、過去に研磨された複数の基板からの反射光のスペクトルであり、言い換えれば、基板Wとは別の基板を研磨しているときに生成された反射光のスペクトルである。以下の説明では、参照スペクトルの生成に使用された基板を、参照基板という。

処理システム 4 9 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 4 9 は、分光器 4 7 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。

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、データベース 6 0 は、処理装置 4 9 b から離れた場所にあるデータサーバ（図示せず）内に設けられてもよい。

図 3 A 乃至図 3 C は、処理システム 4 9 の例を示す模式図である。図 3 A は、処理システム 4 9 の全体が、研磨テーブル 3 および研磨ヘッド 1 が設置されている工場内に配置されたコントローラとして設けられている例を示す。この例では、処理システム 4 9 は、研磨テーブル 3 および研磨ヘッド 1 とともに、1 つの装置を構成する。

図 3 B は、処理システム 4 9 は、工場内に配置されたフォグサーバ 5 0 0 内に設けられた例を示している。フォグサーバ 5 0 0 は、ゲートウェイ 4 0 0 を通じて分光器 4 7 に接続されている。ゲートウェイ 4 0 0 の例としては、ルーターなどの通信接続機器が挙げられる。ゲートウェイ 4 0 0 は、有線で分光器 4 7 および／またはフォグサーバ 5 0 0 に接続されてもよいし、または無線により分光器 4 7 および

／または Fogサーバ 500 に接続されてもよい。一実施形態では、処理システム 49 は、ゲートウェイ 400 内に設けられてもよい。処理システム 49 がゲートウェイ 400 内に配置される実施形態は、分光器 47 から送られる反射光の強度測定データを高速処理する場合に適している。一方、処理システム 49 が Fogサーバ 500 内に配置される実施形態は、高速処理が必要とされない場合に用いられる。一実施形態では、処理システム 49 を構成する複数のコンピュータがゲートウェイ 400 と Fogサーバ 500 の両方に設けられてもよい。

図 3C は、処理システム 49 は、工場外に配置されたクラウドサーバ 600 内に設けられた例を示している。クラウドサーバ 600 は Fogサーバ 500 およびゲートウェイ 400 を介して分光器 47 に接続されている。Fogサーバ 500 はなくてもよい。図 3C に示す実施形態は、複数の研磨装置が通信ネットワークでクラウドサーバ 600 に接続されており、処理システム 49 が大量のデータを処理する場合に適している。

図 1 に戻り、処理システム 49 は、基板 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基板 W の膜厚に基づいて、基板 W の研磨動作を制御する。例えば、研磨制御部 9 は、基板 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、あるいは基板 W の膜厚が所定の値に達したときに基板 W の研磨条件を変更するように構成されている。

図 4 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。

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。

光学式膜厚測定装置 40 は、光源 44 から発せられた光を基板 W の表面に導く投

光用光ファイバケーブル3 1と、基板Wからの反射光を受け、反射光を分光器4 7に送る受光用光ファイバケーブル3 2を備えている。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の先端は、研磨テーブル3内に位置している。

- 5 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の先端は、光を基板Wの表面に導き、かつ基板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、基板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
- 10 射光の強度を測定するように構成されている。

- 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は光を基板Wに向けて放つ。基板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
- 15 の強度を測定する。分光器4 7は、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、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。

- 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
- 20 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、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
- 25 位置している。

基板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を通して通孔5 1に供給される。純水は、基板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50Bに流れ込み、ドレインライン54を通じて排出される。第1の孔50Aおよび通孔51内を流れる純水は、研磨液が第1の孔50Aに浸入することを防止し、これにより光路が確保される。

5 投光用光ファイバケーブル31は、光源44によって発せられた光を基板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31および受光用光ファイバケーブル32の先端は、第1の孔50A内に位置しており、基板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31および受光用光ファイバケーブル32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に保持された基板Wを向いて配置される。研磨テーブル3が回転するたびに基板W
10 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。

図5は、光学式膜厚測定装置40の原理を説明するための模式図であり、図6は、基板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5に示す例では、基
15 板Wは、下層膜と、その上に形成された上層膜とを有している。上層膜は、例えばシリコン層または絶縁膜である。投光用光ファイバケーブル31および受光用光ファイバケーブル32の各先端から構成される光学センサヘッド7は、基板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回転するたびに基板Wの表面に光を照射する。

20 基板Wに照射された光は、媒質（図5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、基板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。

25 基板Wの研磨中、研磨テーブル3が1回転するたびに、光学センサヘッド7は基板Wを横切って移動する。光学センサヘッド7が基板Wの下方にあるとき、光源44は光を発する。光は、光学センサヘッド7から基板Wの表面（被研磨面）に導かれ、基板Wからの反射光は光学センサヘッド7に受けられ、分光器47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。

- 次に、処理システム 4 9 が基板 W の膜厚を決定する工程について説明する。基板
- 5 W 上のある測定点での膜厚は、その測定点からの反射光のスペクトルに基づいて決定される。本実施形態では、基板 W 上の測定点での現在の膜厚を決定するために、その測定点で得られた時系列的な複数のスペクトルが使用される。すなわち、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、基板 W 上の所定の測定点
- 10 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、処理システム 4 9 は反射光の強度測定データからスペクトルを生成する。

- 光の基板 W への照射、反射光の受け取り、反射光の強度の測定、およびスペクトルの生成は、研磨テーブル 3 が回転するたびに繰り返される。処理システム 4 9 は、
- 15 研磨テーブル 3 が複数回回転したときに上記所定の測定点から返ってきた反射光の強度測定データから複数のスペクトルを生成し、これら複数のスペクトルを研磨時間に沿って並べることで三次元データを作成する。三次元データを構成する複数のスペクトルは、少なくとも直近の複数のスペクトルを含む。これは、基板 W の現在の膜厚を決定するためである。

- 20 図 7 は、研磨時間に沿って並べられた複数のスペクトルから構成される三次元データの一例を示す図である。この三次元データは、研磨時間と、反射光の波長、と反射光の強度（例えば相対反射率）との関係を示すデータである。図 7 の X 軸は反射光の波長を表す波長軸であり、Y 軸は反射光の強度を表す強度軸であり、Z 軸は、研磨時間を表す研磨時間軸である。図 7 では、三次元データは、X Y Z 座標系上の
- 25 立体的なグラフによって表されている。

三次元データは、図 2 に示すようなスペクトルが、研磨時間に沿って並べられた構造を有している。スペクトルの形状は、基板 W の膜厚に従って変化するので、研磨時間に沿って並べられているスペクトルの形状は少しずつ異なっている。したが

って、三次元データの全体も、基板Wの膜厚に従って変化する。三次元データを構成するスペクトルの数は特に限定されないが、一例では、5個～10個のスペクトルから三次元データが構成される。

処理システム49は、データベース60に格納されている複数の参照データから
5 1つの参照データを選択し、三次元データを参照データと比較する。図8は、参照データの一例を示す図である。参照データは、三次元データと同様に、研磨時間と、反射光の波長と、反射光の強度（例えば相対反射率）との関係を示すデータである。図8のX軸は反射光の波長を表す波長軸であり、Y軸は反射光の強度を表す強度軸であり、Z軸は、研磨時間を表す研磨時間軸である。図8では、反射光の強度は、
10 等値線で表されている。図8では、参照データは、XYZ座標系上の立体的なグラフによって表されている。

各参照データは、研磨パッド上で参照基板を研磨しながら、光学センサヘッド7から光を参照基板の上記所定の測定点に導き、参照基板の上記所定の測定点からの反射光を光学センサヘッド7で受け、波長ごとの反射光の強度を分光器47で測定
15 し、得られた強度測定データからスペクトルを生成し、生成したスペクトルを研磨時間に沿って並べることで作成される。以下の説明では、参照データを構成するスペクトルを、参照スペクトルという。

処理システム49は、三次元データを参照データと比較する。より具体的には、
処理システム49は、三次元データを参照データに重ね合わせ、三次元データに含まれる複数のスペクトルと、参照データ内で三次元データに重なり合うデータ領域
20 に含まれる複数の参照スペクトルとの差を算出する。上記差は、三次元データに含まれる複数のスペクトル上の強度と、対応する複数の参照スペクトル上の強度との差である。

図9は、三次元データを参照データと比較する工程を説明する図である。処理シ
25 ステム49は、三次元データを、参照データの研磨時間軸に沿って少しずつ移動させながら、上記差を算出する。差は絶対値として表される。すなわち、処理システム49は、三次元データを研磨時間軸に沿って少しずつ移動させながら、処理システム49は、三次元データに含まれる複数のスペクトルと、参照データ内で三次元

データに重なり合うデータ領域に含まれる複数の参照スペクトルとの差の絶対値を算出する。図9に示す実施形態では、三次元データの全体を参照データと比較しているが、一実施形態では三次元データの一部（例えば特徴的なデータ領域）を抽出し、抽出された部分を参照データと比較してもよい。

- 5 処理システム49は、三次元データに最も一致する参照データ内のデータ領域の位置を決定する。三次元データに最も一致する参照データ内のデータ領域の位置は、上記差を最小とする位置である。処理システム49は、三次元データを参照データの研磨時間軸に沿って少しずつ移動させながら、上記差を算出し、最も小さい差に対応する三次元データの参照データ上の位置を決定する。
- 10 図10は、三次元データに最も一致する参照データ内のデータ領域の位置を示す図である。三次元データに最も一致する参照データ内のデータ領域の位置は、三次元データに含まれる複数のスペクトルと、参照データに含まれる複数の参照スペクトルとの差を最小とする位置である。参照データ内のデータ領域の位置は、参照データの研磨時間軸上の研磨時間によって表すことができる。処理システム49は、
- 15 上記差を最小とするデータ領域の位置を決定し、この決定された位置に対応する研磨時間を決定する。より具体的には、処理システム49は、決定されたデータ領域の位置を特定する複数の研磨時間のうち、最新の研磨時間を決定する。

- 処理システム49は、決定された研磨時間から、基板Wの膜厚を決定する。参照データの研磨時間軸は、参照基板の膜厚の変化を表す軸としても機能する。すなわ
- 20 ち、研磨時間が0のときの参照基板の膜厚は、参照基板の初期膜厚であり、研磨時間が研磨終了点のときの参照基板の膜厚は、参照基板の研磨後の膜厚である。参照基板の初期膜厚および研磨後の膜厚は、図示しない膜厚測定装置によって測定される。参照基板が一定の研磨レートで研磨されたとき、参照データの研磨時間軸上の各時点における参照基板の膜厚は、参照基板の初期膜厚および研磨後の膜厚のそれ
- 25 ぞれの測定値と、研磨時間軸上の各時点から計算により求めることができる。したがって、参照データの研磨時間軸上の研磨時間は、参照基板の膜厚に一意に対応し、各研磨時間は対応する膜厚に関連付けられる。研磨時間軸上の各時点に対応する各膜厚は、予め計算により求めてもよいし、または三次元データに最も一致するデー

タ領域の位置が決定された後に、当該決定された位置に対応する膜厚を計算により求めてもよい。

処理システム49は、上記差を最小とするデータ領域の位置に対応する研磨時間を決定し、決定された研磨時間に関連付けられた膜厚を決定する。決定された膜厚は、研磨制御部9に送られる。研磨制御部9は、決定された膜厚に基づいて基板Wの研磨終点を決定する、あるいは研磨条件を変更する。

本実施形態によれば、基板の膜厚は、1つのスペクトルではなく、時系列的な複数のスペクトルからなる三次元データに基づいて決定される。したがって、仮に形状の大きく異なるスペクトルが三次元データに含まれていても、そのようなスペクトルが膜厚決定に与える影響は低減される。結果として、処理システム49は、基板Wの膜厚を正確に決定することができる。

図11は、本実施形態の膜厚決定の方法を説明するフローチャートである。

ステップ1では、研磨テーブル3および研磨ヘッド1をそれぞれ回転させ、回転する研磨テーブル3上の研磨パッド2に基板Wを押し付けて該基板Wの表面を研磨する。

ステップ2では、研磨テーブル3が一回転するたびに、処理システム49は、基板Wの表面からの反射光の強度測定データを分光器47から受け取り、強度測定データから反射光のスペクトルを生成する。

ステップ3では、処理システム49は、研磨時間に沿って並ぶ複数のスペクトルから構成される三次元データを作成する。

ステップ4では、処理システム49は、三次元データを参照データと比較し、三次元データに最も一致する参照データ内のデータ領域の位置を決定する。

ステップ5では、処理システム49は、前記決定された位置に関連付けられた膜厚を決定する。

少なくとも1台のコンピュータからなる処理システム49は、その記憶装置49aに電氣的に格納されたプログラムに含まれる命令に従って動作する。すなわち、処理システム49は、基板Wの研磨中に、該基板Wからの反射光の強度測定データから複数のスペクトルを生成するステップと、複数のスペクトルを研磨時間に沿っ

て並べることで三次元データを作成するステップと、三次元データに基づいて基板Wの膜厚を決定するステップを実行する。

5 これらステップを処理システム49に実行させるためのプログラムは、非一時的な有形物であるコンピュータ読み取り可能な記録媒体に記録され、記録媒体を介して処理システム49に提供される。または、プログラムは、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を介して処理システム49に入力されてもよい。

10 一般に、スペクトルは、基板の露出表面を構成する膜の厚さに依存して変わる。しかしながら、スペクトルは、膜の下に存在する下層構造にも影響を受けることがある。これは、光学センサヘッド7から放出された光が基板の膜を透過し、下層構造で反射するからである。例えば、膜の厚さが同じであっても、下層構造が違うと、光の反射の仕方が変わり、膜厚の測定結果が変わってしまう。

15 このような下層構造の違いに起因する膜厚測定の精度低下を防ぐために、一実施形態では、処理システム49は、図12に示すように、下層構造が異なる複数の参照基板を用いて作成された複数の参照データを備えてもよい。複数の参照データのそれぞれは、予め用意された上記複数の参照基板のうちの1つを研磨しているときに生成された複数の参照スペクトルを含んでいる。これら複数の参照データは、データベース60に格納されている。

20 図12に示すように、処理システム49は、基板の研磨初期に作成された初期三次元データに最も一致するデータ領域を含む1つの参照データを複数の参照データから選択する。より具体的には、処理システム49は、基板の研磨初期に作成された初期三次元データに含まれる複数のスペクトルと、参照基板の研磨初期に作成された複数の参照スペクトルとの差を算出し、差が最も小さい1つの参照データを上記複数の参照データから選択する。そして、処理システム49は、選択された参照
25 データを使用して基板Wの膜厚を決定する。すなわち、処理システム49は、基板Wの研磨中に作成された三次元データを、上記選択された参照データと比較し、三次元データに最も一致する参照データ内のデータ領域の位置を決定し、この決定された位置に関連付けられた膜厚を決定する。

本実施形態によれば、下層構造が異なる複数の参照基板を用いて作成された複数の参照データが用意され、初期三次元データに最も一致するデータ領域を含む1つの参照データが複数の参照データから選択される。この選択された参照データの作成に使用された参照基板は、研磨中の基板の下層構造によく似た下地構造を有する
5 と推定される。したがって、そのような参照基板を用いて生成された参照データを用いることにより、処理システム49は、基板の正確な膜厚を決定することができる。

次に、基板の膜厚を決定する方法の他の実施形態について説明する。上述した実施形態における各要素と同じ要素には同じ名称を付し、その重複する説明を省略す
10 る。また、特に説明しない本実施形態の構成および動作は、上述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。

本実施形態において膜厚を決定する方法の基本的概念は、上述した実施形態と同じであるが、本実施形態は、三次元データおよび参照データをそれぞれ二次元画像および参照画像に変換する点で、上記実施形態と異なっている。図13は、三次元
15 データから二次元画像に変換される工程を示す図であり、図14は、参照データから参照画像に変換される工程を示す図である。

処理システム49は、三次元データおよび参照データをそれぞれ二次元画像および参照画像に変換するように構成されている。より具体的には、図13および図14に示すように、処理システム49は、三次元データおよび参照データにそれぞれ
20 含まれている反射光の強度を色分けし、色が付された二次元画像および参照画像を生成する。二次元画像および参照画像は、カラー画像であってもよいし、またはグレースケール画像であってもよい。図13では、色分けされた強度は、等値線で表されている。

一実施形態では、処理システム49は、二次元画像および参照画像に対して、平滑化処理などのフィルタリング、すなわちノイズ低減処理を施してもよい。例えば、
25 二次元画像を構成する各ピクセルの色指標値（例えばグレースケール値）を、そのピクセルの周囲にある複数のピクセルの色指標値の平均で置き換える。あるいは、周囲の複数のピクセルの色指標値に重み係数をそれぞれ乗算し、得られた値の平均

を各ピクセルの色指標値に使用してもよい。このようなノイズ低減処理（フィルタリング）によれば、スパイクノイズなどの局所的なノイズを低減することができる。

- 処理システム49は、二次元画像に最も一致する参照画像内の画像領域の位置を決定する。より具体的には、図15に示すように、処理システム49は、二次元画像を参照画像に重ね合わせ、参照画像の研磨時間軸に沿って二次元画像を少しずつ移動させながら、二次元画像に最も一致する参照画像内の画像領域の位置を決定する。具体的には、処理システム49は、二次元画像を少しずつ移動させながら、二次元画像と参照画像との差を算出し、差が最も小さい位置を決定する。差が最も小さい位置は、二次元画像に最も一致する参照画像内の画像領域の位置である。二次元画像に最も一致する参照画像内の画像領域を決定する方法には、公知の画像処理技術を使用することができる。例えば、パターンマッチング技術、または正規化相互相関法などのテンプレートマッチング技術を用いることができる。図15に示す実施形態では、二次元画像の全体を参照画像と比較しているが、一実施形態では二次元画像の一部（例えば特徴的な画像領域）を抽出し、抽出された部分を参照画像と比較してもよい。

- 図16に示すように、処理システム49は、二次元画像に最も一致する参照画像内の画像領域の位置に対応する研磨時間を決定する。より具体的には、処理システム49は、二次元画像に最も一致する参照画像内の画像領域の位置を特定する複数の研磨時間のうち、最新の研磨時間を決定する。さらに、処理システム49は、決定された研磨時間に関連付けられた膜厚を決定する。決定された膜厚は、基板Wの現在の膜厚であり、研磨制御部9に送られる。研磨制御部9は、決定された膜厚に基づいて基板の研磨終点を決定する、あるいは研磨条件を変更する。さらに、処理システム49は、現在の膜厚と目標膜厚との差から、研磨終点までの予測研磨時間を算出してもよい。

- 図17は、本実施形態の膜厚決定の方法を説明するフローチャートである。

ステップ1では、研磨テーブル3および研磨ヘッド1をそれぞれ回転させ、回転する研磨テーブル3上の研磨パッド2に基板Wを押し付けて該基板Wの表面を研磨する。

ステップ2では、研磨テーブル3が一回転するたびに、処理システム49は、基板Wの表面からの反射光の強度測定データを分光器47から受け取り、強度測定データから反射光のスペクトルを生成する。

ステップ3では、処理システム49は、研磨時間に沿って並ぶ複数のスペクトル
5 から構成される三次元データを作成する。

ステップ4では、処理システム49は、参照データおよび三次元データを参照画像および二次元画像にそれぞれ変換する。

ステップ5では、二次元画像に最も一致する参照画像内の画像領域の位置を決定する。

10 ステップ6では、決定された位置に関連付けられた膜厚を決定する。

図12を参照して説明した実施形態は、図13乃至図17を参照して説明した本実施形態にも適用できる。すわち、処理システム49は、予め用意された複数の参照基板を研磨しているときに生成された複数の参照スペクトルを含む複数の参照データを複数の参照画像に変換し、基板Wの研磨初期に作成された初期三次元データを初期二次元画像に変換し、初期二次元画像に最も一致する画像領域を含む1つの
15 参照画像を前記複数の参照画像から選択する。上記複数の参照基板は、異なる下層構造を有する。処理システム49は、選択された参照画像を使用して基板Wの膜厚を決定する。すなわち、処理システム49は、基板Wの研磨中に生成した二次元画像を、上記選択された参照画像と比較し、二次元画像に最も一致する参照画像内の
20 画像領域の位置を決定し、この決定された位置に関連付けられた膜厚を決定する。

次に、基板の膜厚を決定する方法のさらに他の実施形態について説明する。上述した実施形態における各要素と同じ要素には同じ名称を付し、その重複する説明を省略する。また、特に説明しない本実施形態の構成および動作は、上述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。

25 処理システム49は、その記憶装置49aに格納された膜厚算定モデルを備えている。処理システム49は、人工知能のアルゴリズムに従って構築された膜厚算定モデルに三次元データを入力し、膜厚算定モデルから膜厚を出力させるように構成されている。

人工知能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、または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。

図 1 8 は、膜厚算定モデルの一例を示す模式図である。膜厚算定モデルは、入力層 2 0 1 と、複数の中間層 2 0 2 と、出力層 2 0 3 を有したニューラルネットワークである。

膜厚算定モデルの入力層 2 0 1 には、三次元データに含まれる反射光の強度が入力される。より具体的には、三次元データを構成する各スペクトルに示される反射光の強度が入力層 2 0 1 に入力される。処理システム 4 9 は、ニューラルネットワークに定義されるアルゴリズムに従って演算を実行し、膜厚算定モデルの出力層 2 0 3 は、基板の膜厚を表す数値を出力する。ただし、図 1 8 に示す膜厚算定モデルの構成は一例であって、本発明は、図 1 8 に示す例に限定されない。

膜厚算定モデルは、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、膜厚算定モデルを機械学習アルゴリズムに従って構築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 の処理装置 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算定モデルを構築する。機械学習アルゴリズムに従って膜厚算定モデルを構築することは、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。

膜厚算定モデルは、複数の訓練用三次元データと、複数の訓練用三次元データにそれぞれ結びつけられた複数の膜厚との組み合わせを含む訓練用データセットを用いて構築される。より具体的には、膜厚算定モデルの構築では、訓練用データセットに含まれる複数の訓練用三次元データは説明変数として使用され、訓練用データセットに含まれる複数の膜厚は、目的変数（正解データ）として使用される。すなわち、処理システム 4 9 は、訓練用三次元データを膜厚算定モデルの入力層に入力

し、入力された訓練用三次元データに対応する膜厚（正解データ）が出力層から出力されるように膜厚算定モデルのパラメータ（重みやバイアスなど）を調節する。このような機械学習の結果、学習済みモデルとしての膜厚算定モデルが作成される。膜厚算定モデルは、処理システム49の記憶装置49a内に格納される。

- 5 訓練用データセットは、参照データから作成することができる。図19は、参照データから訓練用データセットを作成する一例を説明する図である。上述したように、参照データは、研磨パッド上で参照基板を研磨しながら、光学センサヘッド7から光を参照基板に導き、参照基板からの反射光を光学センサヘッド7で受け、波長ごとの反射光の強度を分光器47で測定し、得られた強度測定データから参照スペクトルを生成し、生成した参照スペクトルを研磨時間に沿って並べることで作成される。

- 15 処理システム49は、参照データをデータベース60から読み出し、図19に示すように、参照データを研磨時間軸に沿って分割し、複数の訓練用三次元データを作成する。各訓練用三次元データの時間幅は、基板Wの研磨中に作成される三次元データの時間幅と同じである。各訓練用三次元データは、対応する膜厚と関連付けられる。研磨時間が0のときの参照基板の膜厚は、参照基板の初期膜厚であり、研磨時間が研磨終了点のときの参照基板の膜厚は、参照基板の研磨後の膜厚である。参照基板の初期膜厚および研磨後の膜厚は、図示しない膜厚測定装置によって測定される。参照基板が一定の研磨レートで研磨されたとき、参照データの研磨時間軸
- 20 上の各時点における参照基板の膜厚は、参照基板の初期膜厚および研磨後の膜厚のそれぞれの測定値と、研磨時間軸上の各時点から計算により求めることができる。したがって、研磨時間軸に沿って分割された訓練用三次元データは、膜厚に一意に対応する。処理システム49は、訓練用三次元データに、対応する膜厚を割り振ることで、各訓練用三次元データを、対応する膜厚に関連付ける。

- 25 膜厚算定モデルの精度を向上させるために、多くの訓練用三次元データを用意することが好ましい。そこで、複数の参照基板が用意され、これら参照基板の研磨から複数の参照データが作成され、図19に示す例に従って、複数の訓練用三次元データが各参照データから作成される。各訓練用三次元データは、対応する膜厚に関

連付けられる（結びつけられる）。対応する膜厚は、各訓練用三次元データに関する正解データである。このようにして作成された訓練用三次元データおよび対応する膜厚の組み合わせから構成された訓練用データセットは、データベース 60 に保存される。

5 処理システム 49 は、訓練用三次元データと、正確データである膜厚とを含む訓練用データセットを用いて、機械学習アルゴリズムに従って膜厚算定モデルを構築する。膜厚算定モデルのパラメータには、重みの他に、バイアスが含まれることがある。このようにして構築された膜厚算定モデルは、記憶装置 49 a 内に格納される。

10 基板 W の研磨中、処理システム 49 は、研磨テーブル 3 が一回転するたびに分光器 47 から送られてくる強度測定データからスペクトルを生成し、複数のスペクトルを研磨時間に沿って並べて三次元データを作成し、この三次元データを膜厚算定モデルに入力し、膜厚算定モデルから基板 W の膜厚を出力させる。

本実施形態によれば、今まで説明した実施形態と同様に、基板 W の膜厚は、1 つ
15 のスペクトルではなく、時系列的な複数のスペクトルからなる三次元データに基づいて決定される。したがって、仮に形状の大きく異なるスペクトルが三次元データに含まれていても、そのようなスペクトルが膜厚決定に与える影響は低減される。結果として、処理システム 49 は、基板 W の膜厚を正確に決定することができる。

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ている。前記
20 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 47 に接続されたクラウドサーバであってもよいし、あるいは分光器 47 に接続されたゲートウェイ、フォグサーバ、ルーターなどであっても
25 よい。処理システム 49 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 49 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。

本実施形態の膜厚算定モデルは、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、膜厚算定モデルを機械学習アルゴリズムに従って構築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の処理装置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膜厚算定モデルを構築する。機械学習アルゴリズムに従って膜厚算定モデルを構築する

- 5 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。

図20は、本実施形態の膜厚決定の方法を説明するフローチャートである。

ステップ1では、研磨テーブル3および研磨ヘッド1をそれぞれ回転させ、回転する研磨テーブル3上の研磨パッド2に基板Wを押し付けて該基板Wの表面を研磨する。

- 10 ステップ2では、研磨テーブル3が一回転するたびに、処理システム49は、基板Wの表面からの反射光の強度測定データを分光器47から受け取り、強度測定データから反射光のスペクトルを生成する。

ステップ3では、処理システム49は、研磨時間に沿って並ぶ複数のスペクトルから構成される三次元データを作成する。

- 15 ステップ4では、処理システム49は、人工知能のアルゴリズムに従って構築された膜厚算定モデルに三次元データを入力する。

ステップ5では、膜厚算定モデルから基板Wの膜厚を出力させる。

一実施形態では、処理システム49は、基板Wの研磨中に生成された反射光のスペクトルから、参照データを作成してもよい。具体的には、処理システム49は、

- 20 基板Wの研磨中に生成された反射光のスペクトルを研磨時間に沿って並べることで、図19に示すような参照データを作成し、さらに参照データを研磨時間軸に沿って分割し、複数の訓練用三次元データを作成する。基板Wの初期膜厚および研磨後の膜厚は、図示しない膜厚測定装置によって測定される。処理システム49は、訓練用三次元データに、対応する膜厚を割り振ることで、各訓練用三次元データを、対応する膜厚に関連付ける。このようにして、処理システム49は、基板を研磨するたびに、参照データを作成し、訓練用三次元データおよび対応する膜厚のセットを作成する。さらに、処理システム49は、新たに作成された訓練用三次元データおよび対応する膜厚のセットを、訓練用データセットに追加することで、該訓練用デ
- 25

ータセットを更新する。処理システム49は、定期的に更新された訓練用データセットを用いて、膜厚算定モデルを再構築し、膜厚算定モデルを更新してもよい。

膜厚算定モデルの膜厚算出精度は、訓練用データセットに依存しうる。そこで、膜厚算定モデルの膜厚算出精度を向上させるために、訓練用データセットの前処理を次のように行ってもよい。複数の参照基板を図1に示す研磨装置で研磨する。処理システム49は、これら複数の参照基板を研磨しているときに複数の参照スペクトルを生成し、これら参照スペクトルを含む複数の訓練用三次元データを作成する。訓練用三次元データの作成は、図19を参照して説明した方法に従って実施される。

図21に示すように、処理システム49は、作成した複数の訓練用三次元データを、クラスタリングのアルゴリズムに従って複数のグループに分ける。図21において、黒丸は訓練用三次元データを表している。クラスタリングはクラスター分析とも呼ばれ、クラスタリングのアルゴリズムは、複数の訓練用三次元データを、ある特徴に基づいて分類する人工知能のアルゴリズムの一種である。処理システム49の記憶装置49aには、複数の訓練用三次元データを、クラスタリングのアルゴリズムに従って複数のグループに分けるためのプログラムが格納されている。処理システム49の処理装置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複数の訓練用三次元データを複数のグループに分ける。図21に示す例では、複数の訓練用三次元データは3つのグループに分けられているが、2つのグループ、または4つ以上のグループに分けられることもある。

次に、テスト基板を図1に示す研磨装置で研磨する。テスト基板は、研磨すべき基板Wと同じ露出膜および下層構造を有する基板である。ここで、露出膜は、基板の露出面を構成する膜であり、下層構造は、露出膜の下に存在する構造物である。一般に、露出膜および下層構造は、基板のタイプによって変わる。

処理システム49は、テスト基板を研磨しているとき生成された複数のスペクトルを研磨時間に沿って並べてテスト三次元データを作成する。さらに、処理システム49は、テスト三次元データに最も一致する訓練用三次元データを含む1つのグループを上記複数のグループから選択する。そして、処理システム49は、選択されたグループに属する複数の訓練用三次元データと、これら複数の訓練用三次元デ

ータにそれぞれ結びつけられた複数の膜厚との組み合わせを含む訓練用データセットを用いて、機械学習アルゴリズムに従って膜厚算定モデルを構築する。

訓練用三次元データの作成に使用される上記複数の参照基板には、同じ下層構造を有しているものもあれば、異なる下層構造を有しているものもある。これらの
5 種々の参照基板からの反射光から生成されるスペクトルは、下層構造の違いに起因して変わりうる。結果として、複数のスペクトルを含む訓練用三次元データも下層構造の違いに起因して変わりうる。

本実施形態によれば、下層構造の違いに依存して変わる訓練用三次元データは、クラスタリングのアルゴリズムに従って複数のグループに分けられる。処理システム
10 49は、テスト三次元データに最も一致する訓練用三次元データを含む1つのグループを上記複数のグループから選択する。選択されたグループに属する訓練用三次元データの作成に使用された参照基板は、テスト基板と同じ、または類似する下層構造を有すると推定される。したがって、このような訓練用三次元データを含む
15 訓練用データセットを用いて構築された膜厚算定モデルは、テスト基板と同じ構造を持つ基板Wの膜厚を正確に出力することができる。

一実施形態では、処理システム49は、図19に示す複数の訓練用三次元データを複数のグループに分け、それぞれのグループに属する訓練用三次元データを用いて複数の膜厚算定モデルを機械学習により作成してもよい。各グループに対応する膜厚算定モデルは、基板の下層構造の違いを反映した膜厚を出力することができる。
20 これら複数の膜厚算定モデルは、記憶装置49a内に格納される。一例では、複数の膜厚算定モデルは、記憶装置49a内に構築されたライブラリ内に格納される。処理システム49は、研磨される基板に最適な1つの膜厚算定モデルを複数の膜厚算定モデルから選択し、選択された膜厚算定モデルを用いて膜厚を算定する。基板の研磨中に、処理システム49は、研磨されている基板により適した他の膜厚算定
25 モデルに切り替えてもよい。

膜厚算定モデルの入力と出力の関係は、1:1であってもよいし、1:複数であってもよいし、複数:1であってもよいし、または複数:複数であってもよい。膜厚算定モデルの入力および出力の例には、次のものが挙げられる。

入力：三次元データ

研磨動作パラメータ

環境パラメータ

出力：膜厚

5 研磨プロセス制御値（制御パラメータ）

研磨終点までの予測研磨時間

プログラム（例えば、研磨パラメータや係数を出力するための関数を記述するプログラム）

研磨レシピ

10 基板に対する押圧力

訓練用データセットは、訓練用三次元データに加えて、研磨動作パラメータ、環境パラメータなどの付加入力データを説明変数として含んでもよい。研磨動作パラメータの例としては、研磨テーブル3の回転速度、研磨ヘッド1の回転速度、研磨ヘッド1が基板Wに加える押圧力などが挙げられる。環境パラメータとしては、研磨液供給ノズル5から供給される研磨液の温度、研磨パッド2の温度などが挙げられる。

訓練用データセットは、膜厚に加えて、研磨プロセス制御値（制御パラメータ）、予測研磨時間、プログラム、研磨レシピ、基板に対する押圧力などの付加出力データを目的変数としてさらに含んでもよい。予測研磨時間は、研磨中のある時点から
20 研磨終点までの予測時間である。プログラムは、例えば、研磨パラメータや係数を出力するための関数を記述するプログラムである。研磨レシピは、基板を研磨するための研磨装置の動作フローなどを含む。

膜厚算定モデルは、訓練用三次元データおよび上記付加入力データに対応するニューロンを有する入力層と、膜厚および上記付加出力データに対応するニューロン
25 を有する出力層を備えている。処理システム49は、訓練用三次元データ、膜厚、付加入力データ、および付加出力データを含む訓練用データセットを用いて機械学習を実施し、膜厚算定モデルを構築する。具体的には、訓練用三次元データおよび付加入力データを膜厚算定モデルの入力層に入力し、訓練用三次元データおよび付

加入力データに対応する膜厚および付加出力データが出力層から出力されるように膜厚算定モデルのパラメータ（重みやバイアスなど）を調節する。このような機械学習の結果、学習済みモデルとしての膜厚算定モデルが作成される。膜厚算定モデルは、処理システム49の記憶装置49a内に格納される。

- 5 さらに、処理システム49は、基板の研磨中に、三次元データおよび付加入力データを学習済みモデルとしての膜厚算定モデルの入力層に入力し、膜厚および付加出力データを膜厚算定モデルの出力層から出力する。

本実施形態によれば、膜厚算定モデルは、膜厚のみならず、予測研磨時間、研磨レシピなどの付加情報を出力することができる。結果として、研磨装置の最適な運

- 10 転が達成される。

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

- 15 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. 回転する研磨テーブル上の研磨パッドに基板を押し付けて該基板の表面を研磨し、
- 5 前記研磨テーブルが一回転するたびに、前記基板の表面からの反射光のスペクトルを生成し、
研磨時間に沿って並ぶ複数のスペクトルから構成される三次元データを作成し、
前記三次元データに基づいて前記基板の膜厚を決定する、研磨方法。
- 10 2. 前記基板の膜厚を決定する工程は、
前記三次元データを参照データと比較し、
前記三次元データに最も一致する前記参照データ内のデータ領域の位置を決定し、
前記決定された位置に関連付けられた膜厚を決定する工程を含み、
- 15 前記参照データは、研磨時間に沿って並ぶ複数の参照スペクトルから構成されている、請求項 1 に記載の研磨方法。
3. 前記三次元データを前記参照データと比較する工程は、前記三次元データに含まれる前記複数のスペクトルと、前記参照データに含まれる複数の参照スペクトルとの差を算出する工程であり、
- 20 前記三次元データに最も一致する前記参照データ内のデータ領域の位置を決定する工程は、前記差を最小とする前記参照データ内のデータ領域の位置を決定する工程である、請求項 2 に記載の研磨方法。
- 25 4. 前記研磨方法は、前記基板の研磨初期に作成された初期三次元データに最も一致するデータ領域を含む前記参照データを複数の参照データから選択する工程をさらに含み、
前記複数の参照データのそれぞれは、予め用意された複数の参照基板のうちの 1

つを研磨しているときに生成された複数の参照スペクトルを含んでいる、請求項 2 または 3 に記載の研磨方法。

5. 前記基板の膜厚を決定する工程は、

5 前記参照データおよび前記三次元データを参照画像および二次元画像にそれぞれ変換し、

前記二次元画像に最も一致する前記参照画像内の画像領域の位置を決定し、

前記決定された位置に関連付けられた膜厚を決定する工程を含む、請求項 2 に記載の研磨方法。

10

6. 前記研磨方法は、

予め用意された複数の参照基板を研磨しているときに生成された複数の参照スペクトルを含む複数の参照データを複数の参照画像に変換し、

前記基板の研磨初期に作成された初期三次元データを初期二次元画像に変換し、

15 前記初期二次元画像に最も一致する画像領域を含む前記参照画像を前記複数の参照画像から選択する工程をさらに含む、請求項 5 に記載の研磨方法。

7. 前記基板の膜厚を決定する工程は、

人工知能のアルゴリズムに従って構築された膜厚算定モデルに前記三次元デー

20 タを入力し、

前記膜厚算定モデルから膜厚を出力させる工程を含む、請求項 1 に記載の研磨方法。

8. 前記膜厚算定モデルは、複数の訓練用三次元データと、前記複数の訓練用三

25 次元データにそれぞれ結びつけられた複数の膜厚との組み合わせを含む訓練用データセットを用いて構築された学習済みモデルであり、

前記複数の訓練用三次元データのそれぞれは、研磨時間に沿って並ぶ複数の参照スペクトルから構成されている、請求項 7 に記載の研磨方法。

9. 前記膜厚算定モデルは、
複数の参照基板を研磨しているときに生成された複数の参照スペクトルをそれぞれ含む複数の訓練用三次元データを作成し、
- 5 前記複数の訓練用三次元データを、クラスタリングのアルゴリズムに従って複数のグループに分け、
テスト基板を研磨しているとき生成された複数のスペクトルを研磨時間に沿って並べてテスト三次元データを作成し、
前記テスト三次元データに最も一致する訓練用三次元データを含む1つのグループを前記複数のグループから選択し、
- 10 前記選択されたグループに属する複数の訓練用三次元データと、前記複数の訓練用三次元データにそれぞれ結びつけられた複数の膜厚との組み合わせを含む訓練用データセットを用いて構築された学習済みモデルである、請求項8に記載の研磨方法。
- 15
10. 研磨パッドを支持するための回転可能な研磨テーブルと、
基板を前記研磨パッドに押し付けて該基板の表面を研磨する研磨ヘッドと、
前記研磨テーブル内に配置され、前記基板の表面に光を導き、かつ前記基板の表面からの反射光を受けるセンサヘッドと、
- 20 前記反射光のスペクトルを生成し、研磨時間に沿って並ぶ複数のスペクトルから構成される三次元データを作成し、前記三次元データに基づいて前記基板の膜厚を決定するためのプログラムが格納された記憶装置を有する処理システムを備えている、研磨装置。
- 25
11. 前記処理システムは、
前記三次元データを参照データと比較し、
前記三次元データに最も一致する前記参照データ内のデータ領域の位置を決定し、

前記決定された位置に関連付けられた膜厚を決定するように構成され、
前記参照データは、研磨時間に沿って並ぶ複数の参照スペクトルから構成されて
いる、請求項 10 に記載の研磨装置。

5 12. 前記処理システムは、前記三次元データに含まれる前記複数のスペクトル
と、前記参照データに含まれる複数の参照スペクトルとの差を算出し、前記差を最
小とする前記参照データ内のデータ領域の位置を決定するように構成されている、
請求項 11 に記載の研磨装置。

10 13. 前記処理システムは、前記基板の研磨初期に作成された初期三次元データ
に最も一致するデータ領域を含む前記参照データを複数の参照データから選択する
ように構成されており、

前記複数の参照データのそれぞれは、予め用意された複数の参照基板のうちの 1
つを研磨しているときに生成された複数の参照スペクトルを含んでいる、請求項 1

15 1 または 12 に記載の研磨装置。

14. 前記処理システムは、前記参照データおよび前記三次元データを参照画像
および二次元画像にそれぞれ変換し、前記二次元画像に最も一致する前記参照画像
内の画像領域の位置を決定し、前記決定された位置に関連付けられた膜厚を決定す
20 るように構成されている、請求項 11 に記載の研磨装置。

15. 前記処理システムは、

予め用意された複数の参照基板を研磨しているときに生成された複数の参照ス
ペクトルを含む複数の参照データを複数の参照画像に変換し、

25 前記基板の研磨初期に作成された初期三次元データを初期二次元画像に変換し、
前記初期二次元画像に最も一致する画像領域を含む前記参照画像を前記複数の
参照画像から選択するように構成されている、請求項 14 に記載の研磨装置。

16. 前記記憶装置には、人工知能のアルゴリズムに従って構築された膜厚算定モデルが格納されており、

前記処理システムは、前記三次元データを前記膜厚算定モデル入力し、前記膜厚算定モデルから膜厚を出力させるように構成されている、請求項11に記載の研磨装置。

17. 前記膜厚算定モデルは、複数の訓練用三次元データと、前記複数の訓練用三次元データにそれぞれ結びつけられた複数の膜厚との組み合わせを含む訓練用データセットを用いて構築された学習済みモデルであり、

10 前記複数の訓練用三次元データのそれぞれは、研磨時間に沿って並ぶ複数の参照スペクトルから構成されている、請求項16に記載の研磨装置。

18. 前記膜厚算定モデルは、

15 複数の参照基板を研磨しているときに生成された複数の参照スペクトルをそれぞれ含む複数の訓練用三次元データを作成し、

前記複数の訓練用三次元データを、クラスタリングのアルゴリズムに従って複数のグループに分け、

テスト基板を研磨しているとき生成された複数のスペクトルを研磨時間に沿って並べてテスト三次元データを作成し、

20 前記テスト三次元データに最も一致する訓練用三次元データを含む1つのグループを前記複数のグループから選択し、

前記選択されたグループに属する複数の訓練用三次元データと、前記複数の訓練用三次元データにそれぞれ結びつけられた複数の膜厚との組み合わせを含む訓練用データセットを用いて構築された学習済みモデルである、請求項16に記載の研磨装置。

25