

研磨方法、ワークピースの研磨監視方法および研磨監視装置

発明の背景

発明の技術分野

- 5 本発明は、ウェーハ、基板、パネルなどのワークピースを研磨する方法に関し、特にワークピースからの反射光のスペクトルに基づいて研磨対象層の厚さを決定する技術に関する。

また、本発明は、ウェーハ、基板、パネルなどのワークピースを研磨する方法および装置に関し、特にワークピースからの反射光に含まれる光学情報に基づいて

- 10 ワークピースの研磨を監視する技術に関する。

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。裏面照射型CMOSセンサの製造工程では、絶縁膜や金属膜の研磨工程の他にも、シリ

15 コン層（シリコンウェーハ）を研磨する工程が含まれる。

- ワークピースの露出面を構成する研磨対象層（絶縁膜、金属膜、シリコン層など）の研磨は、研磨対象層の厚さが所定の目標値に達したときに終了される。研磨中における研磨対象層の厚さを測定する方法の例として、ワークピースの表面に光を照射し、ワークピースから反射してくる光の分光波形に対してフーリエ変換を実行し、
- 20 得られた周波数スペクトルのピークに基づいて厚さを決定する光学式監視方法がある（例えば特許文献1参照）。周波数スペクトルのピークは、研磨対象層の厚さに依存して変わる。したがって、ワークピースの研磨中に周波数スペクトルのピークを追跡することにより、研磨対象層の厚さを監視することができる。

- 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。
- 25 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、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。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

5 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、ワークピースの表面を形成する被研磨層を研磨する。

絶縁膜やシリコン層などの被研磨層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

10 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、ワークピースの被研磨層の厚さを決定するように構成される。

特許文献2は、反射光のスペクトルの変化量に基づいて膜厚を決定する技術を開示する。図21は、スペクトルの変化量と研磨時間との関係を示すグラフである。スペクトルの変化量は、単位時間当たりのスペクトルの形状の変化量である。反射

15 光のスペクトルは被研磨層の厚さに従って変化する。したがって、反射光のスペクトルの変化量は、単位時間当たりの被研磨層の除去量に相当する。

図22は、スペクトルの変化量を研磨時間に沿って積算して得られるスペクトル累積変化量を示すグラフである。図22から分かるように、スペクトル累積変化量は、研磨時間とともに概ね単調に増加する。したがって、スペクトル累積変化量か

20 ら、被研磨層の研磨量（すなわち、現在の厚さまたは現在の除去量）を決定することができる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【特許文献1】日本国特開2013-110390号公報

25 【特許文献2】日本国特開2015-156503号公報

しかしながら、スラリー等の研磨環境や、研磨対象層の下に存在する下地層などに起因して、周波数スペクトルに疑似ピークが現れることがある。従来の光学式監視方法では、そのような疑似ピークを誤って追跡することがあり、結果として正確

な厚さを決定できないことがあった。

さらに、従来の光学式監視方法は、ノイズに起因する疑似ピークが、研磨対象層の厚さに対応する目標ピークに重なったときに、研磨対象層の厚さの決定に失敗することがあった。

- 5 また、図 2 3 に示すように、ワークピースの表面に形成されているパターンの影響や、研磨環境（例えばスラリー）等の影響により、スペクトルの変化量に局所的なノイズが印加されることがある。このため、図 2 4 に示すように、スペクトルの累積変化量は、単調増加しないことがあり、結果として、被研磨層の研磨量の誤推定を引き起こす可能性がある。

10

発明の要旨

そこで本発明は、ノイズの影響を受けることなく、正確な研磨対象層の厚さを決定することができる研磨方法を提供することを目的とする。

- さらに、本発明は、ワークピースの表面に形成されているパターンや、研磨環境
15 （例えばスラリー）等の影響を排除して、ワークピースの研磨を正確に監視することができる方法および装置を提供する。

- 一態様では、ワークピースの研磨対象層を研磨するための研磨方法であって、研磨パッドを支持する研磨テーブルを回転させ、前記研磨パッドに前記ワークピースを押し付けて前記研磨対象層を研磨し、前記ワークピースに光を照射し、前記ワーク
20 ピースからの反射光を受け、前記反射光の強度を波長ごとに測定し、前記強度と前記反射光の波長との関係を示す分光波形を生成し、前記分光波形にフーリエ変換処理を行なって、周波数スペクトルを生成し、前記周波数スペクトルのピーク探索範囲を研磨時間に従って移動させ、前記ピーク探索範囲内にある前記周波数スペクトルのピークを決定し、前記決定されたピークに対応する前記研磨対象層の厚さを
25 決定する、研磨方法が提供される。

一態様では、前記ピーク探索範囲は、前回決定された前記研磨対象層の厚さおよび前記ワークピースの研磨レートに基づいて算出した値を含む範囲である。

一態様では、前記研磨レートは、予め設定された研磨レートである。

一態様では、前記研磨レートは、前記ワークピースの研磨中に算出された研磨レートである。

- 一態様では、ワークピースの研磨対象層を研磨するための研磨方法であって、研磨パッドを支持する研磨テーブルを回転させ、前記研磨パッドに前記ワークピース
- 5 を押し付けて前記研磨対象層を研磨し、前記ワークピースに光を照射し、前記ワークピースからの反射光を受け、前記反射光の強度を波長ごとに測定し、前記強度と前記反射光の波長との関係を示す分光波形を生成し、フィルタを用いて前記分光波形からノイズを除去し、前記ノイズが除去された前記分光波形にフーリエ変換処理を行なって、周波数スペクトルを生成し、前記周波数スペクトルのピークに基づいて
- 10 前記研磨対象層の厚さを決定し、前記ノイズの除去によって消失した前記周波数スペクトルのピークに対応する前記研磨対象層の厚さを、前記ワークピースの研磨中に取得した前記研磨対象層の厚さの複数の値を用いた外挿によって補完する、研磨方法が提供される。

- 一態様では、前記フィルタは、前記ワークピースの研磨時間とともに移動しない
- 15 前記周波数スペクトルのピークの周波数を持つノイズを前記分光波形から除去するように構成される。

一態様では、前記ノイズは、前記研磨対象層の下地層から反射した光に起因するノイズである。

- 一態様では、前記フィルタは、バンドストップフィルタである。
- 20 一態様では、前記研磨方法は、前記ワークピースを研磨する前に、該ワークピースと同じパターンを有する別のワークピースを研磨し、前記別のワークピースからの反射光の分光波形に含まれるノイズを除去するための前記フィルタを作成する工程をさらに含む。

- 一態様では、前記研磨方法は、前記ワークピースの研磨中に、前記ワークピース
- 25 からの反射光の分光波形に含まれるノイズを除去するための前記フィルタを作成する工程をさらに含む。

一態様では、ワークピースの研磨対象層を研磨するための研磨装置であって、研磨パッドを支持する回転可能な研磨テーブルと、前記研磨テーブル上の前記研磨

パッドに前記ワークピースを押し付ける研磨ヘッドと、前記研磨ヘッドに保持された前記ワークピースに光を照射し、かつ前記ワークピースからの反射光を受ける光センサヘッドと、前記反射光の強度を波長ごとに測定する分光器と、前記反射光の強度から前記研磨対象層の厚さを決定する研磨制御部を備え、前記研磨制御部は、

5 前記強度と前記反射光の波長との関係を示す分光波形を生成し、前記分光波形にフーリエ変換処理を行なって、周波数スペクトルを生成し、前記周波数スペクトルのピーク探索範囲を研磨時間に従って移動させ、前記ピーク探索範囲内にある前記周波数スペクトルのピークを決定し、前記決定されたピークに対応する前記研磨対象層の厚さを決定するように構成される、研磨装置が提供される。

- 10 一態様では、ワークピースの研磨対象層を研磨するための研磨装置であって、研磨パッドを支持する回転可能な研磨テーブルと、前記研磨テーブル上の前記研磨パッドに前記ワークピースを押し付ける研磨ヘッドと、前記研磨ヘッドに保持された前記ワークピースに光を照射し、かつ前記ワークピースからの反射光を受ける光センサヘッドと、前記反射光の強度を波長ごとに測定する分光器と、前記反射光の
- 15 強度から前記研磨対象層の厚さを決定する研磨制御部を備え、前記研磨制御部は、前記強度と前記反射光の波長との関係を示す分光波形を生成し、フィルタを用いて前記分光波形からノイズを除去し、前記ノイズが除去された前記分光波形にフーリエ変換処理を行なって、周波数スペクトルを生成し、前記周波数スペクトルのピークに基づいて前記研磨対象層の厚さを決定し、前記ノイズの除去によって消失した
- 20 前記周波数スペクトルのピークに対応する前記研磨対象層の厚さを、前記ワークピースの研磨中に取得した前記研磨対象層の厚さの複数の値を用いた外挿によって補完するように構成されている、研磨装置が提供される。

- 一態様では、テーブルモータに指令を発して、研磨パッドを支持する研磨テーブルを回転させるステップと、研磨ヘッドに指令を発して、前記研磨パッドにワーク
- 25 ピースを押し付けて前記ワークピースの研磨対象層を研磨するステップと、光源に指令を発して、前記ワークピースに光を照射するステップと、前記ワークピースからの反射光の強度と前記反射光の波長との関係を示す分光波形を生成するステップと、前記分光波形にフーリエ変換処理を行なって、周波数スペクトルを生成するス

テップと、前記周波数スペクトルのピーク探索範囲を研磨時間に従って移動させるステップと、前記ピーク探索範囲内にある前記周波数スペクトルのピークを決定するステップと、前記決定されたピークに対応する前記研磨対象層の厚さ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、テーブルモータに指令を発して、研磨パッドを支持する研磨テーブルを回転させるステップと、研磨ヘッドに指令を発して、前記研磨パッドにワークピースを押し付けて前記ワークピースの研磨対象層を研磨するステップと、光源に指令を発して、前記ワークピースに光を照射するステップと、前記ワークピースからの反射光の強度と前記反射光の波長との関係を示す分光波形を生成するステップと、フィルタを用いて前記分光波形からノイズを除去するステップと、前記ノイズが除去された前記分光波形にフーリエ変換処理を行なって、周波数スペクトルを生成するステップと、前記周波数スペクトルのピークに基づいて前記研磨対象層の厚さを決定するステップと、前記ノイズの除去によって消失した前記周波数スペクトルのピークに対応する前記研磨対象層の厚さを、前記ワークピースの研磨中に取得した前記研磨対象層の厚さの複数の値を用いた外挿によって補完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、ワークピースの研磨を監視する方法であって、ワークピースの研磨中に前記ワークピースに光を照射し、前記ワークピースからの反射光のスペクトルを生成し、所定の時間当たりの前記スペクトルの変化量を算出し、前記スペクトルの変化量が所定の除外条件を満たすときに、前記スペクトルの変化量を補正し、前記除外条件を満たさない前記スペクトルの変化量および前記補正されたスペクトルの変化量を研磨時間に沿って積算してスペクトル累積変化量を算出する、ワークピースの研磨監視方法が提供される。

一態様では、前記除外条件は、前記スペクトルの変化量がしきい値よりも大きいこと、現在のスペクトルの変化量と、前記ワークピースの研磨中に既に得られたスペクトルの複数の変化量の平均値との差がしきい値よりも大きいこと、前記スペク

トルの変化量が、過去に得られたスペクトルの複数の変化量の正規分布の平均値から $\pm Z \sigma$ の範囲外にあること（ Z は予め定められた係数である）、および前記スペクトルの変化量が、スミルノフ・グラブス検定により外れ値と判定されること、のうちのいずれかである。

- 5 一態様では、前記スペクトルの変化量を補正する工程は、前記スペクトルの変化量を外挿または内挿により補正する工程である。

一態様では、前記外挿による補正は、研磨時間に沿って並ぶスペクトルの複数の変化量を使用し、前記内挿による補正は、前記ワークピース上に並ぶ複数の測定点で取得されたスペクトルの複数の変化量を使用する。

- 10 一態様では、ワークピースの研磨監視装置であって、ワークピースの研磨中に前記ワークピースに光を照射し、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、前記反射光の強度を波長ごとに測定する分光器と、プログラムが格納された記憶装置および前記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を有するデータ処理部を備え、前記データ処理部は、前記反射光の強度の測定
- 15 データから前記反射光のスペクトルを生成し、所定の時間当たりの前記スペクトルの変化量を算出し、前記スペクトルの変化量が所定の除外条件を満たすときに、前記スペクトルの変化量を補正し、前記除外条件を満たさない前記スペクトルの変化量および前記補正されたスペクトルの変化量を研磨時間に沿って積算してスペクトル累積変化量を算出するように構成されている、研磨監視装置が提供される。

- 20 一態様では、前記除外条件は、前記スペクトルの変化量がしきい値よりも大きいこと、現在のスペクトルの変化量と、前記ワークピースの研磨中に既に得られたスペクトルの複数の変化量の平均値との差がしきい値よりも大きいこと、前記スペクトルの変化量が、過去に得られたスペクトルの複数の変化量の正規分布の平均値から $\pm Z \sigma$ の範囲外にあること（ Z は予め定められた係数である）、および前記ス
- 25 펙トルの変化量が、スミルノフ・グラブス検定により外れ値と判定されること、のうちのいずれかである。

一態様では、前記データ処理部は、前記スペクトルの変化量を外挿または内挿により補正するように構成されている。

一態様では、前記データ処理部は、前記外挿による補正を、研磨時間に沿って並ぶスペクトルの複数の変化量を使用して実行し、前記内挿による補正を、前記ワークピース上に並ぶ複数の測定点で取得されたスペクトルの複数の変化量を使用して実行するように構成されている。

- 5 本発明によれば、研磨方法は、周波数スペクトルのピークの探索範囲を研磨時間に従って移動させることにより、ノイズに起因する疑似ピークを追跡することなく、研磨対象層の正確な厚さを決定することができる。

- 10 さらに、研磨方法は、ワークピースからの反射光から生成された分光波形にフィルタを用いてノイズを除去することにより、研磨対象層の正確な厚さを決定することができる。

さらに、本発明によれば、除外条件を満たす（すなわちノイズを含む）スペクトルの変化量は補正され、ワークピースの研磨を正確に監視することができる。

図面の簡単な説明

- 15 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原理を説明するための模式図である。
図3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4は、研磨制御部によって生成された分光波形の一例を示す図である。
図5は、研磨制御部によって生成された周波数スペクトルの一例を示す図である。
20 図6は、N回目の測定におけるピーク探索範囲を説明する図である。
図7は、N+1回目の測定におけるピーク探索範囲を説明する図である。
図8は、研磨時間に従ってピーク探索範囲を移動させる様子を説明する図である。
図9は、ピーク探索範囲を移動させて研磨対象層の厚さを決定する工程の一例を説明するフローチャートである。
25 図10は、フィルタ処理前の周波数スペクトルを示す図である。
図11は、フィルタ処理後の周波数スペクトルを示す図である。
図12は、消失したピークを外挿する様子を説明する図である。
図13は、フィルタを用いてノイズを除去する工程の一例を説明するフロー

チャートである。

図 1 4 は、研磨装置の一実施形態を示す模式図である。

図 1 5 は、データ処理部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 1 6 は、単位時間の間に变化したスペクトルを示す図である。

- 5 図 1 7 は、ワークピースを研磨している間のスペクトル変化量の研磨時間に沿った変化を示すグラフである。

図 1 8 は、スペクトルの変化量を研磨時間に沿って積算して得られるスペクトル累積変化量を示すグラフである。

図 1 9 A は、ノイズを含むスペクトルの変化量が除去されたグラフである。

- 10 図 1 9 B は、除去により欠落したスペクトルの変化量が、ノイズの含まないスペクトルの変化量に置き換えられたグラフである。

図 2 0 は、ワークピースの研磨中に得られたスペクトルの複数の変化量から生成された近似式を示す図である。

図 2 1 は、スペクトルの変化量と研磨時間との関係を示すグラフである。

- 15 図 2 2 は、スペクトルの変化量を研磨時間に沿って積算して得られるスペクトル累積変化量を示すグラフである。

図 2 3 は、局所的なノイズを含むスペクトルの変化量と研磨時間との関係を示すグラフである。

- 20 図 2 4 は、図 2 3 に示すスペクトルの変化量を積算して得られるスペクトル累積変化量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

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。

- 25 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、研磨対象層を有するワークピース 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研磨制御部 4 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の例としては、ウェーハ、基板、パネルなどが挙げられる。

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
5 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。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、
研磨ヘッドモータ、およびテーブルモータ6は研磨制御部49に接続されている。

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
10 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。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研
15 磨パッド2の機械的作用により研磨される。

研磨装置は、ワークピースWの研磨対象層の厚さを測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を備えている。
光源44および分光器47は研磨制御部49に接続されている。光学センサヘッド
20 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の表面を横切る位置である。

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
25 ド7からワークピースWの表面に照射される。光はワークピースWで反射し、ワー
クピースW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、研磨制御部49に送られる。

研磨制御部 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。

- 5 図 2 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 3 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 2 に示す例では、ワークピース W は、下地層と、その上に形成された研磨対象層とを有している。研磨対象層は、例えばシリコン層または絶縁膜である。

- 10 光学センサヘッド 7 は、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 の各先端から構成され、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 回転するたびに光をワークピース W に照射し、かつワークピース W からの反射光を受ける。

- 15 ワークピース W に照射された光は、媒質（図 2 の例では水）と研磨対象層との界面、および研磨対象層と下地層との界面で反射し、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、研磨対象層の厚さ（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、研磨対象層の厚さに従って変化する。研磨制御部 4 9 は、分光波形に対してフーリエ変換処理（または高速フーリエ変換処理）を行って周波数スペクトルを生成し、周波数スペクトルのピークに基づいて研磨対象層の厚さを決定する。
- 20 研磨対象層がシリコン層であって、図 2 に示すように媒質が水である場合は、光が水に吸収されることを防ぐために、波長 1 1 0 0 n m 以下の光を使用することが好ましい。

- 25 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、投光用光ファイバケーブル 3 1 を通じて伝送され、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）に照射される。ワークピース W からの反射光は光学センサヘッド 7 で受光され、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、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研磨制御部 4 9 に送る。研磨制御部 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（すなわち分光波形）を強度測定データから生成する。

図 4 は、研磨制御部 4 9 によって生成された分光波形の一例を示す図である。図 4 において、横軸はワークピース W からの反射光の波長を表わし、縦軸は反射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。

- 10 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 から照射さ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 4 7 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。

- 20 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、次の式（1）を用いて求めることができる。

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

- 25 ここで、 λ はワークピース W 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。

5 研磨制御部 4 9 は、研磨テーブル 3 が一回転するたびに、光源 4 4 に指令を発して光を発生させる。光源 4 4 に光学的に接続された光学センサヘッド 7 は、ワーク
10 ピース W の表面（被研磨面）に光を照射し、さらに光学センサヘッド 7 はワーク
5 ピース W からの反射光を受ける。反射光は、光学センサヘッド 7 に光学的に接続された分光器 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、研磨制御部 4 9 に送られ、
10 研磨制御部 4 9 は反射光の強度測定データから図 4 に示すようなスペクトルを生成する。図 4 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
10 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。

15 研磨制御部 4 9 は、得られた分光波形に対してフーリエ変換処理（典型的には高速フーリエ変換処理）を行って分光波形を解析する。より具体的には、研磨制御部
4 9 は、分光波形に対してフーリエ変換処理（または高速フーリエ変換処理）を行って分光波形に含まれる周波数成分とその強さを抽出し、得られた周波数成分を
15 所定の関係式を用いて研磨対象層の厚さに変換し、そして、研磨対象層の厚さと周波数成分の強度との関係を示す周波数スペクトルを生成する。上述した所定の関係式は、周波数成分を変数とした、研磨対象層の厚さを表す関数であり、実測結果、
光学式膜厚測定シミュレーション、理論式などから求めることができる。

20 図 5 は、研磨制御部 4 9 によって生成された周波数スペクトルを示す図である。図 5 において、縦軸は、分光波形に含まれる周波数成分の強度を表し、横軸は、研磨対象層の厚さを表している。図 5 から分かるように、周波数スペクトルは、厚さ
t 1 においてピークを有する。つまり、この周波数スペクトルは、研磨対象層の厚さが t 1 であることを示している。このようにして、周波数スペクトルのピークか
25 ら、研磨対象層の厚さが決定される。

研磨制御部 4 9 は、研磨対象層の厚さの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 4 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処理装置 4 9 b を備えている。研磨制御部 4 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 49 a 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 49 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、研磨制御部 49 の具体的構成はこれらの例に限定されない。

研磨制御部 49 は、決定された研磨対象層の厚さに基づいて研磨終点を決定し、研磨装置の動作を制御する。例えば、研磨制御部 49 は、決定された研磨対象層の厚さが目標値に達した時点である研磨終点を決定する。一実施形態では、研磨対象層の厚さと下地層の厚さを合わせた厚さを測定して研磨終点を決定してもよい。研磨対象層の厚さを決定するための研磨制御部と、ワークピース W の研磨動作を制御する制御部は、別個に構成されてもよい。

図 6 は、N 回目の測定におけるピーク探索範囲 R 1 を説明する図である。図 6 において、縦軸は、分光波形に含まれる周波数成分の強度を表し、横軸は、研磨対象層の厚さを表している。図 6 に示す複数の周波数スペクトルのそれぞれは、ワークピース W の研磨中に、研磨テーブル 3 が一回転するたびに、研磨制御部 49 によって生成されたものである。ピーク P 1 は、N 回目の測定（研磨テーブル 3 が N 回転目の時）で現れたピークであり、ピーク P 2 は、N + 1 回目の測定（研磨テーブル 3 が N + 1 回転目の時）で現れたピークであり、ピーク P 3 は、N + 2 回目の測定（研磨テーブル 3 が N + 2 回転目の時）で現れたピークであり、ピーク P 4 は、N + 3 回目の測定（研磨テーブル 3 が N + 3 回転目の時）で現れたピークである。図 6 では、周波数成分の強度が小さいピークは省略されている。符号 N は自然数であり、例えば 1 である。

図 6 に示すように、ワークピース W の研磨の進捗に伴い、周波数スペクトルのピークは移動する。研磨テーブル 3 が一回転する間にも、ワークピース W の研磨対象層は研磨される。したがって、研磨テーブル 3 が一回転するたびに研磨対象層の厚さは小さくなる。ピーク P 1 に対応する厚さ t_1 、ピーク P 2 に対応する厚さ t_2 、ピーク P 3 に対応する厚さ t_3 、ピーク P 4 に対応する厚さ t_4 の関係は、 $t_1 > t_2 > t_3 > t_4$ となる。

- 研磨対象層の厚さは、研磨テーブル3が一回転するたびに、光学式膜厚測定装置40により周波数スペクトルのピークに基づいて決定される。しかしながら、ワークピースWの研磨中におけるノイズ(スラリー等の研磨環境に起因するもの、下地層に起因するもの等)による疑似ピークによって、研磨制御部49は、誤って研磨
- 5 対象層の厚さを決定してしまうことがある。図6において、疑似ピークP f 1は、ワークピースWの研磨中に発生するノイズに起因するピークであり、N回目の測定で現れた疑似ピークである。この場合、N回目の測定において、ピークP 1よりも強度が大きい疑似ピークP f 1に対応する厚さt f 1は、研磨対象層の厚さとして誤って決定されてしまう。
- 10 そこで、研磨制御部49は、ピーク探索範囲R 1内で周波数スペクトルのピークを探索するように構成されている。図6に示す例では、研磨制御部49は、ピーク探索範囲R 1内にあるピークP 1を決定し、決定したピークP 1に対応する厚さt 1(すなわち正確な厚さ)を研磨対象層の厚さに決定する。このとき、疑似ピークP f 1はピーク探索範囲R 1内にないため、誤って疑似ピークP f 1が決定される
- 15 ことはない。
- 図6において、ピーク探索範囲R 1は、N回目の測定におけるピーク探索範囲を表している。一実施形態では、研磨制御部49は、研磨対象層の初期厚さの値に基づいて、ピーク探索範囲R 1を決定する。例えば、ピーク探索範囲R 1は、ワークピースWの研磨対象層の初期厚さの値を含む範囲としてもよい。研磨対象層の初期
- 20 厚さは、ワークピースWの研磨開始前の研磨対象層の厚さであり、スタンドアローン型膜厚測定装置(図示せず)によって予め測定されるか、またはワークピースWの基本情報として与えられる。
- 図7は、N+1回目の測定におけるピーク探索範囲R 2を説明する図である。図7において、ピークP 1～P 4は、図6を参照して説明したピークと同様である。
- 25 疑似ピークP f 2は、ワークピースWの研磨中に発生するノイズに起因するピークを表しており、N+1回目の測定時に現れた疑似ピークである。この疑似ピークP f 2は、前回のN回目の測定におけるピーク探索範囲R 1内にあるため、研磨制御部49は、疑似ピークP f 2に対応する厚さt f 2を研磨対象層の厚さとして誤っ

て決定してしまう。

そこで、本実施形態では、周波数スペクトルのピーク探索範囲を研磨時間に従って移動させるように構成されている。上述した通り、ワークピースWの研磨が進行するにつれて、研磨対象層の厚さが小さくなる、すなわち周波数スペクトルのピークは移動する。研磨制御部49は、研磨対象層の厚さの変化に追従するようにピーク探索範囲を移動させることで、疑似ピークが存在しても正確に研磨対象層の厚さを決定することができる。

図7において、ピーク探索範囲R2は、N+1回目の測定におけるピーク探索範囲を表している。研磨制御部49は、研磨時間に従って変化する研磨対象層の厚さに追従するようにピーク探索範囲を移動させる。N+1回目の測定では、ピーク探索範囲を図6のピーク探索範囲R1からピーク探索範囲R2に移動させている。例えば、ピーク探索範囲R2は、後述するように、前回決定された研磨対象層の厚さt1およびワークピースWの研磨レートに基づいて算出されてもよい。

研磨制御部49は、ピーク探索範囲R2内にあるピークP2を決定し、決定したピークP2に対応するt2（すなわち正確な厚さ）を研磨対象層の厚さに決定する。このとき、疑似ピークPf2はピーク探索範囲R2内にないため、誤って疑似ピークPf2が決定されることはない。同様に、N+2回目以降の測定においても、ピーク探索範囲を研磨時間に従って移動させることにより、研磨対象層の正確な厚さを決定することができる。

図8は、研磨時間に従ってピーク探索範囲を移動させる様子を説明する図である。図8において、ピークP1～P4、疑似ピークPf1、Pf2、およびピーク探索範囲R1、R2は、図6、図7で示した同一の符号に対応している。図8のグラフは、研磨時間と各ピークに対応する厚さとの関係を表したものである。疑似ピークPf3は、N+2回目の測定時に現れた疑似ピークを表している。疑似ピークPf4は、N+3回目の測定時に現れた疑似ピークを表している。ピーク探索範囲R3は、N+2回目の測定時に移動させたピーク探索範囲を表している。ピーク探索範囲R4は、N+3回目の測定時に移動させたピーク探索範囲を表している。

図8において、初期値t0は、ワークピースWの研磨前の研磨対象層の厚さを表

面 2 a に押しつけてワークピースWの研磨を開始する。このとき、図 1 を参照して説明したように、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。

- 5 次に、ワークピースWの研磨中に、光学式膜厚測定装置 4 0 によって研磨対象層の厚さを測定する。

ステップ S 1 0 3 では、光源 4 4 は光を発し、光を光センサヘッド 7 からワークピースWの表面に照射する。

- 10 ステップ S 1 0 4 では、光センサヘッド 7 は、ワークピースWからの反射光を受ける。

ステップ S 1 0 5 では、分光器 4 7 は、ワークピースWからの反射光の強度を波長毎に測定する。

ステップ S 1 0 6 では、研磨制御部 4 9 は、反射光の強度測定データから分光波形を生成する。

- 15 ステップ S 1 0 7 では、研磨制御部 4 9 は、分光波形にフーリエ変換処理を行なって、周波数スペクトルを生成する。

ステップ S 1 0 8 では、研磨制御部 4 9 は、研磨時間に従ってピーク探索範囲を移動させる。ピーク探索範囲は、図 8 を参照して説明した方法によりピーク探索範囲を算出して移動させる。

- 20 ステップ S 1 0 9 では、研磨制御部 4 9 は、ピーク探索範囲内にある周波数スペクトルのピークを決定する。

ステップ S 1 1 0 では、研磨制御部 4 9 は、決定したピークに対応する研磨対象層の厚さを決定する。

- 25 研磨制御部 4 9 は、記憶装置 4 9 a 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、研磨制御部 4 9 は、テーブルモータ 6 に指令を発して、研磨パッド 2 を支持する研磨テーブル 3 を回転するステップ（ステップ S 1 0 1 参照）と、研磨ヘッド 1 に指令を発して、ワークピースWの研磨を開始するステップ（ステップ S 1 0 2 参照）と、光源 4 4 に指令を発して、ワークピースW

に光を照射するステップ（ステップS 1 0 3 参照）と、ワークピースWからの反射光の強度測定データから分光波形を生成するステップ（ステップS 1 0 6 参照）と、分光波形にフーリエ変換処理を行なって、周波数スペクトルを生成するステップ（ステップS 1 0 7 参照）と、ピーク探索範囲を研磨時間に従って移動するステップ（ステップS 1 0 8 参照）と、ピーク探索範囲内にある周波数スペクトルのピークを決定するステップ（ステップS 1 0 9 参照）と、決定したピークに対応する研磨対象層の厚さを決定するステップ（ステップS 1 1 0 参照）を実行する。

これらステップを研磨制御部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、記録媒体を介して研磨制御部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研磨制御部49に入力されてもよい。

次に、フィルタを用いてノイズを除去することにより、研磨対象層の厚さを正確に決定する実施形態について説明する。

図10は、フィルタ処理前の周波数スペクトルを示す図である。図10において、縦軸は、分光波形に含まれる周波数成分の強度を表し、横軸は、研磨対象層の厚さを表している。図10に示す複数の周波数スペクトルのそれぞれは、ワークピースWの研磨中に、研磨テーブル3が一回転するたびに、研磨制御部49によって生成されたものである。ピークP1は、N回目の測定（研磨テーブル3がN回転目の時）で現れたピークであり、ピークP2は、N+1回目の測定（研磨テーブル3がN+1回転目の時）で現れたピークであり、ピークP3は、N+2回目の測定（研磨テーブル3がN+2回転目の時）で現れたピークであり、ピークP4は、N+3回目の測定（研磨テーブル3がN+3回転目の時）で現れたピークである。図10では、周波数成分の強度が小さいピークは省略されている。符号Nは自然数であり、例えば1である。

研磨対象層の厚さは、研磨テーブル3が一回転するたびに、光学式膜厚測定装置40により周波数成分のピークに基づいて決定される。しかしながら、研磨対象層の下に存在する下地層に起因するノイズの影響により、正確に研磨対象層の厚さを

決定できないことがある。図10において、下層ピーク P_u は、研磨対象層の下地層からの反射光によるピークであり、研磨対象層の厚さの決定に不要なノイズである。ワークピースWの研磨中、下地層は研磨されないので、研磨対象層の研磨が行しても、下層ピーク P_u の位置は変化しない。図10に示す例では、下層ピーク P_u がピーク P_3 と重複する位置に現れているため、研磨制御部49は、ピーク P_3 に対応する研磨対象層の厚さを正しく決定することができない。

そこで、本実施形態では、研磨制御部49は、フィルタを用いて下地層に起因するノイズを、ワークピースWからの反射光の分光波形から除去し、さらにノイズの除去により消失した周波数スペクトルのピークに対応する研磨対象層の厚さを外挿により補完することによって、研磨対象層の厚さを決定する。

ノイズを反射光の分光波形から除去するためのフィルタは、以下のように予め作成される。ワークピースWを研磨する前に、ワークピースWと同じパターンを有する別のワークピースW'を研磨する。別のワークピースW'の研磨中に、光学式膜厚測定装置40によって研磨対象層の厚さを測定する。研磨制御部49は、別のワークピースW'からの反射光の分光波形から生成した周波数スペクトルに基づいて、ノイズである下層ピークを特定し、特定したノイズを除去するためのフィルタを作成する。具体的には、研磨制御部49は、別のワークピースW'の研磨時間とともに移動しない周波数スペクトルのピークを特定し、特定されたピークの周波数を持つ成分（ノイズ）を反射光の分光波形から除去するフィルタを作成する。このフィルタは、デジタルフィルタであり、一例としてバンドストップフィルタである。

一実施形態では、ワークピースWと同じパターンを有する別のワークピースW'を用いることなく、研磨制御部49は、ワークピースWの研磨の初期段階において、ノイズである下層ピークを特定することによりフィルタを作成してもよい。具体的には、ワークピースWの研磨中に、研磨制御部49は、研磨時間とともに移動しない周波数スペクトルのピークを特定し、特定されたピークの周波数を持つ成分（ノイズ）を反射光の分光波形から除去するフィルタを作成する。

図11は、フィルタ処理後の周波数スペクトルを示す図である。研磨制御部49は、ワークピースWからの反射光の分光波形に対して、予め作成されたフィル

タを適用し、ノイズを除去する。図 1 1 に示す複数の周波数スペクトルは、ノイズを除去した後の分光波形にフーリエ変換処理（または高速フーリエ変換処理）を行なって研磨制御部 4 9 によって生成された周波数スペクトルである。ノイズを反射光の分光波形から除去したことによって、下層ピーク P_u とともに、下層ピーク P_u と重複した位置にあるピーク P₃ も消失している。したがって、研磨制御部 4 9 は、ピーク P₃ に対応する研磨対象層の厚さを正確に決定することができない。

そこで、研磨制御部 4 9 は、ピーク P₃ に対応する研磨対象層の厚さを、外挿によって補完するように構成されている。図 1 2 は、消失したピーク P₃ を外挿する様子を説明する図である。図 1 2 において、ピーク P₁ ~ P₄ は、図 1 0、図 1 1 で示した同一の符号に対応しており、図 1 2 に示すグラフは、研磨時間と各ピークに対応する厚さとの関係を表したものである。図 1 1 を参照して説明したように、ノイズである下層ピーク P_u を除去したことによって、ピーク P₃ が消失した場合に、研磨制御部 4 9 は、ピーク P₁ およびピーク P₂ に対応する研磨対象層の厚さの値から、ピーク P₃ の消失した部分に対応する研磨対象層の厚さを外挿によって補完する。図 1 0 乃至図 1 2 では、ピーク P₃ が消失した場合について説明したが、これに限らない。ワークピース W の研磨中に研磨対象層の厚さの複数の値を取得していれば、取得した複数の値を用いて外挿により研磨対象層の厚さを補完することができる。

上述した実施形態では、研磨時間とともに変化しないピーク（ノイズ）は、研磨対象層の下地層に起因するものであるが、本発明は本実施形態に限らない。例えば、研磨時間とともに変化しないピーク（ノイズ）は、光源 4 4 または分光器 4 7 などの装置に固有のノイズであることもある。

図 1 3 は、フィルタを用いてノイズを除去する工程の一例を説明するフローチャートである。

ステップ S 2 0 1 では、研磨装置は、研磨対象のワークピース W と同じパターンを有する別のワークピース W' を研磨する。

ステップ S 2 0 2 では、研磨制御部 4 9 は、別のワークピース W' の研磨中に、光学式膜厚測定装置 4 0 によって研磨対象層の厚さを測定する。研磨制御部 4 9 は、

別のワークピースW'からの反射光から得られた分光波形をフーリエ変換して周波数スペクトルを生成する。ステップS201～S202の工程は、図9のステップS101～S107の工程と同様である。

5 ステップS203では、研磨制御部49は、研磨時間とともに変化しない周波数スペクトルのピークを特定する。

ステップS204では、研磨制御部49は、特定したピークの周波数を持つノイズを別のワークピースW'からの反射光の分光波形から除去するフィルタを作成する。

10 ステップS205では、研磨装置は、研磨対象のワークピースWの研磨を開始する。

ステップS206では、ワークピースWの研磨中に、光学式膜厚測定装置40によって研磨対象層の厚さを測定する。研磨制御部49は、上記ステップS204で作成されたフィルタを用いて、ワークピースWからの反射光の分光波形からノイズを除去する。ステップS205からS206の分光波形を生成するまでの工程は、
15 図9のステップS101～S106の工程と同様である。

ステップS207では、研磨制御部49は、ノイズを除去した分光波形にフーリエ変換処理を行い、周波数スペクトルを生成する。

ステップS208では、研磨制御部49は、周波数スペクトルのピークに基づいて研磨対象層の厚さを決定する。

20 ステップS209では、研磨制御部49は、ノイズの除去により消失した周波数スペクトルのピークに対応する研磨対象層の厚さを外挿により補完する。

研磨制御部49は、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、研磨制御部49は、テーブルモータ6に指令を発して、研磨パッド2を支持する研磨テーブル3を回転するステップと、研磨ヘッド1に指令を発して、ワークピースWの研磨を開始するステップ（ステップS205参照）と、光源44に指令を発して、ワークピースWに光を照射するステップと、ワークピースWからの反射光の強度測定データから分光波形を生成するステップと、フィルタを用いて分光波形からノイズを除去するステップ（ステップS
25

206参照)と、ノイズが除去された分光波形にフーリエ変換処理を行なって、周波数スペクトルを生成するステップ(ステップS207参照)と、周波数スペクトルのピークから研磨対象層の厚さを決定するステップ(ステップS208参照)と、ノイズの除去によって消失した周波数スペクトルのピークに対応する研磨対象層の厚さを、外挿によって補完するステップ(ステップS209参照)を実行する。

10 これらステップを研磨制御部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、記録媒体を介して研磨制御部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研磨制御部49に入力されてもよい。

図6乃至図9で説明した実施形態と、図10乃至図13で説明した実施形態は、組み合わせて実施してもよい。すなわち、フィルタを用いて分光波形からノイズを除去し周波数スペクトルを生成するとともに、周波数スペクトルのピーク探索範囲を移動させて、研磨対象層の厚さを決定してもよい。

15 図14は、研磨装置の一実施形態を示す模式図である。図14に示すように、研磨装置は、研磨パッド102を支持する研磨テーブル103と、被研磨層を有するウェーハ、基板、またはパネルなどのワークピースWを研磨パッド102に押し付ける研磨ヘッド101と、研磨テーブル103を回転させるテーブルモータ106と、研磨パッド102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105を備えている。研磨パッド102の上面は、ワークピースWを研磨する研磨面102aを構成する。

25 研磨ヘッド101はヘッドシャフト110に連結されており、ヘッドシャフト110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101をヘッドシャフト110とともに矢印で示す方向に回転させる。研磨テーブル103はテーブルモータ106に連結されており、テーブルモータ106は研磨テーブル103および研磨パッド102を矢印で示す方向に回転させるように構成されている。

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103および研磨

ヘッド101を図14の矢印で示す方向に回転させながら、研磨液供給ノズル105から研磨液が研磨テーブル103上の研磨パッド102の研磨面102aに供給される。ワークピースWは研磨ヘッド101によって回転されながら、研磨パッド102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101によって研磨パッド102の研磨面102aに押し付けられる。ワークピースWの露出面を構成する被研磨層は、研磨液の化学的作用と、研磨液に含まれる砥粒および研磨パッド102の機械的作用により研磨される。ワークピースWの被研磨層の例としては、絶縁膜、シリコン層が挙げられるが、これに限定されない。

研磨装置は、ワークピースWの研磨を監視する光学式研磨監視装置140を備えている。光学式研磨監視装置140は、光を発する光源144と、分光器147と、光源144および分光器147に光学的に連結された光学センサヘッド107と、分光器147に連結されたデータ処理部149を備えている。光学センサヘッド107、光源144、および分光器147は研磨テーブル103に取り付けられており、研磨テーブル103および研磨パッド102とともに一体に回転する。光学センサヘッド107の位置は、研磨テーブル103および研磨パッド102が一回転するたびに研磨パッド102上のワークピースWを横切る位置である。

データ処理部149は、後述するスペクトルの生成およびワークピースWの研磨監視を実行するためのプログラムが格納された記憶装置149a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149bを備えている。データ処理部149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149a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149b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、データ処理部149の具体的構成はこれらの例に限定されない。

光源144から発せられた光は、光学センサヘッド107に伝送され、光学センサヘッド107からワークピースWに導かれる。光はワークピースWで反射し、ワークピースWからの反射光は光学センサヘッド107によって受けられ、分光器

1 4 7に送られる。分光器 1 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、データ処理部 1 4 9に送られる。

データ処理部 1 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
5 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 1 5は、データ処理部 1 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（すなわち分光波形）として表される。図 1 5において、横軸はワークピースWからの反射光の波長を表
10 わし、縦軸は反射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。

15 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 1 0 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 1 0 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
20 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 1 0 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 1 0 2上に置かれているときに、分光器 1 4 7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
25 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、次の式（4）を用いて求めることができる。

$$R(\lambda) = \frac{E(\lambda) - D(\lambda)}{B(\lambda) - D(\lambda)} \quad (4)$$

ここで、 λ はワークピースWからの反射光の波長であり、 $E(\lambda)$ 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。

- 光学センサヘッド107は、研磨テーブル103が一回転するたびに、ワーク
- 5 ピースWを横切りながら、ワークピースW上の複数の測定点に光を導き、これら複数の測定点からの反射光を受ける。反射光は分光器147に送られる。分光器147は各測定点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、データ処理部149に送られ、データ処理部149は反射光の強度測定データから図15に示すようなスペクトルを生成する。
- 10 図15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。

- 反射光のスペクトルは、ワークピースWの被研磨層の厚さに従って変化する。そこで、データ処理部149は、反射光のスペクトルから、次のようにしてワーク
- 15 ピースWの研磨を監視する。データ処理部149は、次の式（5）を用いて、単位時間当たりのスペクトル変化量 $\Delta S(T)$ を算定する。

$$\Delta S(T) = \sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} |R(\lambda, T + \Delta T) - R(\lambda, T)| \quad (5)$$

- ここで、 λ は反射光の波長であり、 λ_1 、 λ_2 は監視対象とするスペクトルの波長範囲を指定する最小波長および最大波長であり、 T は研磨時間であり、 ΔT は所定の単位時間であり、 $R(\lambda, T)$ は、波長 λ 、時間 T のときの相対反射率（反射
- 20 光の強度）である。 ΔT としては、例えば、研磨テーブルが p 回転（ p は小さな自然数（例えば1））するのに要する時間とすることができる。

図16は、単位時間 ΔT の間に变化したスペクトルを示す図である。上記式（5）によって算出されるスペクトル変化量 $\Delta S(T)$ は、2つの異なる時点で取得された2つのスペクトルによって囲まれる領域（ハッチングで示す）に相当する。この

領域の面積は、単位時間 ΔT 当たりに変化した被研磨層の厚さに相当する。したがって、研磨中にスペクトル変化量 $\Delta S(T)$ を積算することにより、被研磨層の厚さの変化を捉えられることが期待される。

- 5 図 1 7 は、ワークピース W を研磨している間のスペクトル変化量 $\Delta S(T)$ の研磨時間に沿った変化を示すグラフである。図 1 7 に示すように、スペクトル変化量 $\Delta S(T)$ は、周期的に変動するが、スペクトル変化量 $\Delta S(T)$ の平均レベルはほぼ一定である。データ処理部 1 4 9 は、次の式 (6) を用いて、スペクトル変化量 $\Delta S(T)$ の研磨時間に沿った累積値であるスペクトル累積変化量を算定する。

$$A(T) = \sum_{T=T_0}^T \Delta S(T) \Delta T \quad (6)$$

ここで、 T_0 は膜厚変化の監視を開始する時間である。

- 10 図 1 8 は、上記式 (6) を用いて算出したスペクトル累積変化量 $A(T)$ を示すグラフである。上述のように、スペクトル変化量が周期的に変動するため、変動による平均レベルからの誤差はほとんど累積されない。したがって、図 1 8 に示すように、スペクトル累積変化量 $A(T)$ は、研磨時間とともにほぼ直線的に増加する。スペクトル累積変化量 $A(T)$ は、ワークピース W の研磨量（すなわち被研磨層の除去量）に相当する。上述したデータ処理部 1 4 9 は、スペクトル累積変化量をワークピース W の研磨中に算出し、スペクトル累積変化量に基づいてワークピース W の研磨の進捗を監視する。さらにデータ処理部 1 4 9 は、スペクトル累積変化量からワークピース W の研磨終点を決定してもよい。研磨終点は、スペクトル累積変化量が所定の目標値に達した時点とすることができる。

- 20 図 2 3 を参照して説明したように、ワークピース W の表面に形成されているパターンの影響や、研磨環境（例えばスラリー）等の影響により、スペクトルの変化量に局所的なノイズが印加されることがある。このようなノイズは、ワークピース W の研磨の正確な監視を妨げてしまう。

- 25 そこで、データ処理部 1 4 9 は、ノイズが加わったスペクトルの変化量を補正するように構成されている。すなわち、データ処理部 1 4 9 は、図 1 9 A に示すように、ノイズを含むスペクトルの変化量を除去し、図 1 9 B に示すように、除去によ

り欠落したスペクトルの変化量を、ノイズの含まないスペクトルの変化量に置き換えるように構成されている。より具体的には、データ処理部149は、スペクトルの変化量が所定の除外条件を満たすときに、スペクトルの変化量を補正し、除外条件を満たさないスペクトルの変化量および上記補正されたスペクトルの変化量を研磨時間に沿って積算してスペクトル累積変化量を算出するように構成されている。

所定の除外条件とは、算出されたスペクトルの変化量にノイズが含まれていることを決定するための条件である。所定の除外条件には以下の具体例が挙げられる。

- (i) スペクトルの変化量がしきい値よりも大きいこと
 - (ii) 現在のスペクトルの変化量と、ワークピースWの研磨中に既に得られたスペクトルの複数の変化量の平均値との差がしきい値よりも大きいこと
 - (iii) スペクトルの変化量が、過去に得られたスペクトルの複数の変化量の正規分布の平均値から $\pm Z\sigma$ の範囲外にあること（Zは予め定められた係数である）
 - (iv) スペクトルの変化量が、スミルノフ・グラブス検定により外れ値と判定されること
- 15 上記(i)に関して、しきい値は予め設定された固定値であり、過去に得られたスペクトルの変化量のデータに基づいて決定される。例えば、過去に得られたスペクトルの変化量のデータを、ノイズを含まないスペクトルの変化量のグループと、ノイズを含むスペクトルの変化量のグループに有意に分けることができる値がしきい値とされる。
- 20 上記(ii)に関して、ワークピースWの研磨中に既に得られたスペクトルの複数の変化量は、例えば、現在のスペクトルの変化量を含まない、直近のL個のスペクトルの変化量である。個数Lは予め設定された値である。現在のスペクトルの変化量と、既に得られたスペクトルの複数の変化量の平均値との差がしきい値よりも大きいとき、現在のスペクトルの変化量はノイズを含む可能性が高い。このしきい値
- 25 は、固定値であってもよい。またはしきい値は、上記平均値に従って変動する値であってもよい。例えば、しきい値は、予め定められた割合(%)だけ上記平均値からずれた値であってもよい。

上記(iii)に関して、過去に得られたスペクトルの複数の変化量は、ワーク

ピースWと同じ構造を持つ少なくとも1つのワークピースを研磨しているときに得られたスペクトルの複数の変化量であってもよいし、またはワークピースWの研磨中に既に得られたスペクトルの複数の変化量であってもよい。

- 上記 (iv) に関して、スミルノフ・グラブス検定において使用されるサンプル
- 5 データは、ワークピースWと同じ構造を持つ少なくとも1つのワークピースを研磨しているときに得られたスペクトルの複数の変化量であってもよいし、またはワークピースWの研磨中に既に得られたスペクトルの複数の変化量であってもよい。

- 上述した除外条件 (i) ~ (iv) のいずれかを満たすスペクトルの変化量は、ノイズを含むと推定される。そこで、データ処理部 149 は、ワークピースWの研
- 10 磨中に算定したスペクトルの変化量が上記複数の除外条件のうちのいずれかを満たすときに、そのスペクトルの変化量を補正する。このスペクトルの変化量の補正は、ノイズを除去する処理である。除外条件は、上記除外条件 (i) ~ (iv) から予め選択された1つであってもよい。

- 一実施形態では、データ処理部 149 は、除外条件を満たすスペクトルの変化量
- 15 を、外挿または内挿により補正する。より具体的には、データ処理部 149 は、除外条件を満たす（すなわちノイズを含む）スペクトルの変化量を除外し、除外されたスペクトルの変化量に対応する、除外条件を満たさない（すなわちノイズを含まない）スペクトルの変化量を外挿または内挿により求める。外挿による補正は、研磨時間に沿って並ぶスペクトルの複数の変化量を使用し、内挿による補正は、ワー
- 20 クピースW上に並ぶ複数の測定点で取得されたスペクトルの複数の変化量を使用する。

データ処理部 149 は、除外条件を満たすスペクトルの変化量を、次のうちのいずれかの動作を実行することにより、補正するように構成されている。

- (I) 除外条件を満たす（すなわちノイズを含む）スペクトルの変化量を、除外条
- 25 件を満たさない（すなわちノイズを含まない）スペクトルの変化量に置き換える動作

(II) 除外条件を満たすスペクトルの変化量を、ワークピースWの研磨中に既に得られたスペクトルの複数の変化量の平均値に置き換える動作

(III) 除外条件を満たすスペクトルの変化量を、ワークピースW上の隣接する複数の測定点で得られたスペクトルの複数の変化量の平均値に置き換える動作

(IV) ワークピースWの研磨中に既に得られたスペクトルの複数の変化量から近似式を生成し、除外条件を満たすスペクトルの変化量を、前記近似式で求められる値

5 に置き換える動作

上記（I）に関して、除外条件を満たさない（すなわちノイズを含まない）スペクトルの変化量は、ワークピースWの研磨中に既に得られたスペクトルの変化量である。一実施形態では、除外条件を満たさない（すなわちノイズを含まない）スペクトルの変化量は、除外条件を満たすスペクトルの変化量が取得される直前に取得された直近のスペクトルの変化量である。

上記（II）に関して、ワークピースWの研磨中に既に得られたスペクトルの複数の変化量は、除外条件を満たさない（すなわちノイズを含まない）スペクトルの複数の変化量である。一実施形態では、ワークピースWの研磨中に既に得られたスペクトルの複数の変化量は、現在のスペクトルの変化量を含まない、直近のM個のスペクトルの変化量である。個数Mは予め設定された値である。

上記（III）に関して、ワークピースW上の隣接する測定点とは、除外条件を満たすスペクトルの変化量が取得されたワークピースW上の測定点に隣接する複数の測定点である。上述したように、光学センサヘッド107は、研磨テーブル103が一回転するたびに、ワークピースWを横切りながら、ワークピースW上の複数の測定点に光を導き、これら複数の測定点からの反射光を受ける。ワークピースW上の隣接する測定点は、例えば、除外条件を満たす（すなわちノイズを含む）スペクトルの変化量が取得された測定点の両側に位置する複数の測定点であってもよい。隣接する各測定点で取得されたスペクトルの変化量は、除外条件を満たさない（すなわちノイズを含まない）スペクトルの変化量である。

上記（IV）に関して、近似式は、図7に示すように、スペクトルの変化量と研磨時間を表す座標軸を持つ座標系上の式である。近似式は、研磨時間を変数に持つ。近似式は、除外条件を満たさない（すなわちノイズを含まない）スペクトルの複数の変化量と、対応する複数の研磨時間とによって特定される座標系上の複数のデー

タ点から決定される。近似式は、多項式によって表されてもよい。近似式の求め方は特に限定されない。データ処理部 149 は、ワークピース W の研磨中に近似式を生成し、除外条件を満たす（すなわちノイズを含む）スペクトルの変化量が取得された研磨時間を近似式に入力することにより、スペクトルの変化量を補正することができる。

データ処理部 149 は、除外条件を満たさない（すなわちノイズを含まない）スペクトルの変化量および上記補正されたスペクトルの変化量を研磨時間に沿って積算してスペクトル累積変化量を算出し、スペクトル累積変化量に基づいてワークピース W の研磨量を監視する。スペクトル累積変化量は、ノイズを含まないスペクトルの変化量の累積値であるので、データ処理部 149 はワークピース W の研磨量を正確に監視することができる。

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. ワークピースの研磨対象層を研磨するための研磨方法であって、
研磨パッドを支持する研磨テーブルを回転させ、
- 5 前記研磨パッドに前記ワークピースを押し付けて前記研磨対象層を研磨し、
前記ワークピースに光を照射し、
前記ワークピースからの反射光を受け、
前記反射光の強度を波長ごとに測定し、
前記強度と前記反射光の波長との関係を示す分光波形を生成し、
- 10 前記分光波形にフーリエ変換処理を行なって、周波数スペクトルを生成し、
前記周波数スペクトルのピーク探索範囲を研磨時間に従って移動させ、
前記ピーク探索範囲内にある前記周波数スペクトルのピークを決定し、
前記決定されたピークに対応する前記研磨対象層の厚さを決定する、研磨方法。
- 15 2. 前記ピーク探索範囲は、前回決定された前記研磨対象層の厚さおよび前記
ワークピースの研磨レートに基づいて算出した値を含む範囲である、請求項1に記載
の研磨方法。
3. 前記研磨レートは、予め設定された研磨レートである、請求項2に記載の研
20 磨方法。
4. 前記研磨レートは、前記ワークピースの研磨中に算出された研磨レートであ
る、請求項2に記載の研磨方法。
- 25 5. ワークピースの研磨対象層を研磨するための研磨方法であって、
研磨パッドを支持する研磨テーブルを回転させ、
前記研磨パッドに前記ワークピースを押し付けて前記研磨対象層を研磨し、
前記ワークピースに光を照射し、

- 前記ワークピースからの反射光を受け、
前記反射光の強度を波長ごとに測定し、
前記強度と前記反射光の波長との関係を示す分光波形を生成し、
フィルタを用いて前記分光波形からノイズを除去し、
- 5 前記ノイズが除去された前記分光波形にフーリエ変換処理を行なって、周波数スペクトルを生成し、
前記周波数スペクトルのピークに基づいて前記研磨対象層の厚さを決定し、
前記ノイズの除去によって消失した前記周波数スペクトルのピークに対応する前記研磨対象層の厚さを、前記ワークピースの研磨中に取得した前記研磨対象層の厚
- 10 さの複数の値を用いた外挿によって補完する、研磨方法。
6. 前記フィルタは、前記ワークピースの研磨時間とともに移動しない前記周波数スペクトルのピークの周波数を持つノイズを前記分光波形から除去するように構成される、請求項5に記載の研磨方法。
- 15
7. 前記ノイズは、前記研磨対象層の下地層から反射した光に起因するノイズである、請求項5または6に記載の研磨方法。
8. 前記フィルタは、バンドストップフィルタである、請求項5乃至7のいずれ
- 20 か一項に記載の研磨方法。
9. 前記ワークピースを研磨する前に、該ワークピースと同じパターンを有する別のワークピースを研磨し、
前記別のワークピースからの反射光の分光波形に含まれるノイズを除去するため
- 25 の前記フィルタを作成する工程をさらに含む、請求項5乃至8のいずれか一項に記載の研磨方法。
10. 前記ワークピースの研磨中に、前記ワークピースからの反射光の分光波形

に含まれるノイズを除去するための前記フィルタを作成する工程をさらに含む、請求項 5 乃至 8 のいずれか一項に記載の研磨方法。

- 1 1. ワークピースの研磨を監視する方法であって、
- 5 ワークピースの研磨中に前記ワークピースに光を照射し、
前記ワークピースからの反射光のスペクトルを生成し、
所定の時間当たりの前記スペクトルの変化量を算出し、
前記スペクトルの変化量が所定の除外条件を満たすときに、前記スペクトルの変化量を補正し、
- 10 前記除外条件を満たさない前記スペクトルの変化量および前記補正されたスペクトルの変化量を研磨時間に沿って積算してスペクトル累積変化量を算出する、ワークピースの研磨監視方法。
- 1 2. 前記除外条件は、
- 15 前記スペクトルの変化量がしきい値よりも大きいこと、
現在のスペクトルの変化量と、前記ワークピースの研磨中に既に得られたスペクトルの複数の変化量の平均値との差がしきい値よりも大きいこと、
前記スペクトルの変化量が、過去に得られたスペクトルの複数の変化量の正規分布の平均値から $\pm Z \sigma$ の範囲外にあること（ Z は予め定められた係数である）、
- 20 および
前記スペクトルの変化量が、スミルノフ・グラブス検定により外れ値と判定されること、
のうちのいずれかである、請求項 1 1 に記載のワークピースの研磨監視方法。
- 25 1 3. 前記スペクトルの変化量を補正する工程は、前記スペクトルの変化量を外挿または内挿により補正する工程である、請求項 1 1 または 1 2 に記載のワークピースの研磨監視方法。

14. 前記外挿による補正は、研磨時間に沿って並ぶスペクトルの複数の変化量を使用し、前記内挿による補正は、前記ワークピース上に並ぶ複数の測定点で取得されたスペクトルの複数の変化量を使用する、請求項13に記載のワークピースの研磨監視方法。

5

15. ワークピースの研磨監視装置であって、
ワークピースの研磨中に前記ワークピースに光を照射し、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、
前記反射光の強度を波長ごとに測定する分光器と、

10 プログラムが格納された記憶装置および前記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を有するデータ処理部を備え、

前記データ処理部は、

前記反射光の強度の測定データから前記反射光のスペクトルを生成し、
所定の時間当たりの前記スペクトルの変化量を算出し、

15 前記スペクトルの変化量が所定の除外条件を満たすときに、前記スペクトルの変化量を補正し、

前記除外条件を満たさない前記スペクトルの変化量および前記補正されたスペクトルの変化量を研磨時間に沿って積算してスペクトル累積変化量を算出するように構成されている、研磨監視装置。

20

16. 前記除外条件は、

前記スペクトルの変化量がしきい値よりも大きいこと、

現在のスペクトルの変化量と、前記ワークピースの研磨中に既に得られたスペクトルの複数の変化量の平均値との差がしきい値よりも大きいこと、

25 前記スペクトルの変化量が、過去に得られたスペクトルの複数の変化量の正規分布の平均値から $\pm Z\sigma$ の範囲外にあること（ Z は予め定められた係数である）、および

前記スペクトルの変化量が、スミルノフ・グラブス検定により外れ値と判定さ

れること、

のうちのいずれかである、請求項 1 5 に記載の研磨監視装置。

1 7. 前記データ処理部は、前記スペクトルの変化量を外挿または内挿により補
5 正するように構成されている、請求項 1 5 または 1 6 に記載の研磨監視装置。

1 8. 前記データ処理部は、前記外挿による補正を、研磨時間に沿って並ぶスペ
クトルの複数の変化量を使用して実行し、前記内挿による補正を、前記ワークピー
ス上に並ぶ複数の測定点で取得されたスペクトルの複数の変化量を使用して実行す
10 るように構成されている、請求項 1 7 に記載の研磨監視装置。