

明 細 書

発明の名称：

研磨方法、研磨装置、および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

技術分野

[0001] 本発明は、ウェーハなどの基板を研磨する研磨方法および研磨装置に関する。また、本発明は、研磨装置に研磨方法を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に関する。

背景技術

[0002] 近年、半導体デバイスの高集積化・高密度化に伴い、回路の配線がますます微細化し、多層配線の層数も増加している。回路の微細化を図りながら多層配線を実現しようとすると、下側の層の表面凹凸を踏襲しながら段差がより大きくなるので、配線層数が増加するに従って、薄膜形成における段差形状に対する膜被覆性（ステップカバレッジ）が悪くなる。したがって、多層配線するためには、このステップカバレッジを改善し、然るべき過程で平坦化処理しなければならない。

[0003] したがって、半導体デバイスの製造工程においては、半導体デバイス表面の平坦化がますます重要になっている。この表面の平坦化において最も重要な技術は、化学機械研磨（CMP：Chemical Mechanical Polishing）である。この化学機械研磨（以下、CMPという）は、シリカ（ SiO_2 ）等の砥粒を含んだ研磨液を研磨パッドの研磨面上に供給しつつウェーハなどの基板を研磨面に摺接させて研磨を行うものである。

[0004] CMPを行うための研磨装置は、研磨面を有する研磨パッドを支持する研磨テーブルと、基板を保持するための研磨ヘッドを備えている。このような研磨装置は、研磨テーブルと研磨ヘッドとを相対運動させ、さらにスラリーなどの研磨液を研磨パッドの研磨面上に供給しながら、研磨ヘッドにより基板を研磨パッドの研磨面に押し付けるように構成される。基板の表面は、研

磨液の存在下で研磨面に摺接し、研磨液の化学的作用、および研磨液に含まれる砥粒の機械的作用により、基板の表面は平坦かつ鏡面に研磨される。

- [0005] ウェーハなどの基板は、半導体、導体、絶縁体などの異なる材質からなる積層構造を有している。基板の被研磨面の材質によって、基板と研磨パッドとの間に作用する摩擦力は変化する。そこで、従来から、研磨終点の決定方法として、基板の被研磨面の材質が異材質へ移行することによって生じる摩擦力の変化を検出し、摩擦力が変化した時点に基づいて研磨終点を決定する方法がある。上記摩擦力は、研磨テーブルの回転中心（軸心）から離れた位置に作用するため、摩擦力の変化は、研磨テーブルを回転させるためのトルクの変化として検出することができる。研磨テーブルを回転駆動させる手段が電動モータの場合には、上記トルクは電動モータに流れる電流として測定することができる。

先行技術文献

特許文献

- [0006] 特許文献1：特開2013-219248号公報
特許文献2：特開2005-11977号公報
特許文献3：特開2014-3063号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0007] しかしながら、基板の被研磨面を構成する膜の厚さが不均一である場合、基板と研磨パッドとの間に作用する摩擦力の変化が上記トルクの変化として顕著に現れず、研磨終点を正確に決定できないことがあった。
- [0008] そこで本発明は、基板の研磨終点を正確に決定することができる研磨方法、研磨装置、および研磨装置にそのような研磨方法を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を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

- [0009] 一態様では、研磨パッドを支持する研磨テーブルを回転させ、研磨ヘッドによって、絶縁膜と前記絶縁膜の下層に形成されたストッパ層を備えた積層構造を有する基板を、前記研磨パッドの研磨面に押し付けて前記基板を研磨し、前記基板を研磨する工程は、膜厚プロファイル調整工程と、前記膜厚プロファイル調整工程の後に行われる研磨終点検出工程を含み、前記膜厚プロファイル調整工程は、前記基板上の複数の測定点での複数の膜厚を測定し、前記複数の膜厚に基づいて前記基板の前記研磨面に対する押し付け力を調整し、前記複数の膜厚のうちの少なくとも1つから決定される膜厚指標値が膜厚しきい値に達した時点を決する工程を含み、前記研磨終点検出工程は、前記研磨テーブルを回転させるためのトルクを測定し、前記トルクに基づいて前記基板の研磨終点を決定する工程を含む、研磨方法が提供される。
- [0010] 一態様では、前記押し付け力を調整する工程は、前記複数の膜厚に基づいて前記基板の被研磨面が平坦になるように前記基板の前記研磨面に対する押し付け力を調整する工程を含む。
- 一態様では、前記複数の膜厚を測定する工程は、前記基板に光を照射し、前記基板上の複数の測定点からの反射光の複数のスペクトルを生成し、前記複数のスペクトルに基づいて前記複数の膜厚を決定する工程を含む。
- 一態様では、前記基板を研磨する工程は、前記膜厚プロファイル調整工程の前に行われる初期研磨工程をさらに含み、前記初期研磨工程は、前記研磨テーブルを回転させるためのトルクを測定し、前記トルクに基づいて初期研磨終点を決定する工程を含む。
- [0011] 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、複数の圧力レギュレータに連結された複数の圧力室を有する研磨ヘッドにより、基板を前記研磨パッドの研磨面に押し付けて該基板を研磨しているときに、前記基板上の複数の測定点での複数の膜厚に基づいて前記複数の圧力レギュレータに指令を発して、前記基板の前記研磨面に対する押し付け力を調整させるステップと、前記複数の膜厚のうちの少なくとも1つから決定される膜厚指標値が膜厚しきい値に達した時

点を決定するステップと、前記膜厚指標値が膜厚しきい値に達した時点を決
定した後に、前記研磨テーブルを回転させるためのトルクに基づいて前記基
板の研磨終点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。

[0012] 一態様では、前記基板の前記研磨面に対する押し付け力を前記複数の圧力
レギュレータに調整させる前記ステップは、前記複数の測定点での複数の膜
厚に基づいて前記複数の圧力レギュレータに指令を発して、前記基板の被研
磨面が平坦になるように前記基板の前記研磨面に対する押し付け力を調整さ
せるステップを含む。

一態様では、前記プログラムは、前記基板を研磨しているときであって、
かつ前記基板の前記研磨面に対する押し付け力を前記複数の圧力レギュレー
タに調整させる前記ステップの前に、前記研磨テーブルを回転させるための
トルクに基づいて初期研磨終点を決定するステップを、コンピュータにさら
に実行させる。

[0013] 一態様では、絶縁膜と前記絶縁膜の下層に形成されたストッパ層を備えた
積層構造を有する基板を研磨するための研磨装置であって、研磨パッドを支
持する研磨テーブルと、前記研磨テーブルを回転させるテーブルモータと、
前記基板を前記研磨パッドの研磨面に押し付けるための複数の圧力室を有す
る研磨ヘッドと、前記基板上の複数の測定点での複数の膜厚を測定する膜厚
測定装置と、前記複数の圧力室に連結された複数の圧力レギュレータと、前
記研磨テーブルを回転させるためのトルクを測定するトルク測定装置と、前
記研磨装置の動作を制御する動作制御部とを備え、前記動作制御部は、前記
基板の研磨中、前記複数の膜厚に基づいて前記複数の圧力レギュレータに指
令を発して、前記基板の前記研磨面に対する押し付け力を調整させ、前記複
数の膜厚のうちの少なくとも1つから決定される膜厚指標値が膜厚しきい値
に達した時点を決する膜厚プロファイル調整工程を実行し、前記基板の研
磨中であって、かつ前記膜厚プロファイル調整工程後に、前記トルクに基づ
いて前記基板の研磨終点を決定するように構成されている、研磨装置が提供

される。

- [0014] 一態様では、前記動作制御部は、前記複数の膜厚に基づいて前記複数の圧力レギュレータに指令を発して、前記基板の被研磨面が平坦になるように前記基板の前記研磨面に対する押し付け力を調整させるように構成されている。

一態様では、前記膜厚測定装置は、前記基板からの反射光のスペクトルに基づいて前記基板の膜厚を測定する光学式膜厚測定装置である。

一態様では、前記動作制御部は、前記基板の研磨中であって、かつ前記膜厚プロファイル調整工程前に、前記研磨テーブルを回転させるためのトルクに基づいて初期研磨終点を決定するように構成されている。

発明の効果

- [0015] 本発明によれば、研磨装置は、基板上の複数の測定点での複数の膜厚に基づいて基板の研磨パッドに対する押し付け力を調整しながら基板を研磨する膜厚プロファイル調整工程の後、研磨テーブルを回転させるためのトルクに基づいて基板の研磨終点を決定する研磨終点検出工程を実行する。研磨装置は、基板の膜厚プロファイルが調整された状態で、上記トルクを測定することができ、基板の研磨終点を正確に決定することができる。

図面の簡単な説明

- [0016] [図1]研磨装置の一実施形態を示す模式図である。
- [図2]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]基板の表面（被研磨面）上の複数の測定点の一例を示す模式図である。
- [図4]図1に示す研磨ヘッドの断面図である。
- [図5A]図5Aは基板の研磨前の状態を示す図である。
- [図5B]図5Bは、絶縁膜を膜厚指標値が膜厚しきい値に達するまで研磨したときの基板の状態を示す図である。
- [図5C]図5Cは、研磨終点まで基板を研磨したときの基板の状態を示す図である。
- [図6]基板の研磨方法および基板の研磨終点の決定方法の一実施形態を示すフ

ローチャートである。

[図7]各研磨工程におけるテーブルモータの駆動電流の測定値を示す図である。

。

[図8]初期研磨終点まで基板を研磨したときの基板の状態を示す図である。

発明を実施するための形態

[0017] 以下、本発明の実施形態について図面を参照して詳細に説明する。

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、膜を有する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と、基板Wの膜厚を測定する膜厚測定装置40（光学式膜厚測定装置40）と、研磨テーブル3を回転させるためのトルクを測定するトルク測定装置8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、基板Wを研磨する研磨面2aを構成する。

[0018] 本実施形態では、被研磨対象は、積層構造を有する基板である。基板Wは、絶縁膜と絶縁膜の下層に形成されたストッパ層を備えた積層構造を有している。本実施形態では、絶縁膜は二酸化ケイ素（ SiO_2 ）から形成されており、ストッパ層は窒化ケイ素（ Si_3N_4 ）から形成されているが、絶縁膜およびストッパ層の構成は、本実施形態に限定されない。一実施形態では、ストッパ層は、絶縁膜を除去するためのエッチング液では除去されず、かつ絶縁膜にダメージを与えないエッチング液で除去される材料から形成されていればよい。

[0019] 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、ベルト等の連結手段を介して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および研磨テーブル3の回転方向は、本実施形態に限定されない。一実施形態では、研磨ヘッド1および研磨テーブル3は、図1の矢印で示す方向と逆方向に回転するように構成されていてもよい。

- [0020] 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2a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によって研磨パッド2の研磨面2a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または研磨パッド2の機械的作用により研磨される。
- [0021] 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。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。演算装置9bは、記憶装置9aに格納されているプログラムに含まれている命令に従って演算を行うCPU（中央処理装置）またはGPU（グラフィックプロセッシングユニット）などを含む。記憶装置9aは、演算装置9bがアクセス可能な主記憶装置（例えばランダムアクセスメモリ）と、データおよびプログラムを格納する補助記憶装置（例えば、ハードディスクドライブまたはソリッドステートドライブ）を備えている。
- [0022] トルク測定装置8は、テーブルモータ6に接続されている。基板Wの研磨中、研磨テーブル3は、一定の速度で回転するようにテーブルモータ6によって駆動される。したがって、研磨テーブル3を一定の速度で回転させるために必要なトルクが変化すると、テーブルモータ6の駆動電流が変化する。
- [0023] 研磨テーブル3を回転させるためのトルクは、研磨テーブル3をその軸心CP周りに回転させる力のモーメントである。研磨テーブル3を回転させるためのトルクは、テーブルモータ6の駆動電流に相当する。したがって、本実施形態では、トルク測定装置8は、テーブルモータ6の駆動電流を測定す

る電流測定器である。一実施形態では、トルク測定装置 8 は、テーブルモータ 6 を駆動するモータドライバの少なくとも一部から構成されてもよい。この場合、モータドライバは、研磨テーブル 3 を一定の速度で回転させるために必要な電流値を決定し、この決定された電流値を出力する。決定された電流値は、研磨テーブル 3 を回転させるためのトルクに相当する。一実施形態では、トルク測定装置 8 は、研磨テーブル 3 をその軸心 C P 周りに回転させるトルクを直接測定するトルク測定装置であってもよい。

[0024] トルク測定装置 8 は、動作制御部 9 に接続されている。動作制御部 9 は、トルク測定装置 8 によって測定されたトルクに基づいて、基板 W の研磨動作を制御する。例えば、動作制御部 9 は、トルク測定装置 8 によって測定されたトルクに基づいて基板 W の研磨終点を決定する。

[0025] 本実施形態の膜厚測定装置 40 は、基板 W の表面に光を導き、基板 W からの反射光の強度測定データに基づいて基板 W の膜厚を決定する光学式膜厚測定装置である。光学式膜厚測定装置 40 は、光を発する光源 44 と、分光器 47 と、光源 44 および分光器 47 に連結された光学センサヘッド 7 と、分光器 47 に連結された処理システム 49 を備えている。光学センサヘッド 7、光源 44、および分光器 47 は研磨テーブル 3 に取り付けられており、研磨テーブル 3 および研磨パッド 2 とともに一体に回転する。光学センサヘッド 7 の位置は、研磨テーブル 3 および研磨パッド 2 が一回転するたびに研磨パッド 2 上の基板 W の表面を横切る位置である。

[0026] 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 の膜厚検出を実行するためのプログラムが格納された記憶装置 49a と、プログラムに含まれる命令に従って演算を実行する演算装置 49b を備えている。処理システム 49 は、少なくとも 1 台のコンピュータから構成される。記憶装置 49a は、RAM などの主記憶装置と、ハードディスクドライブ (HDD)、ソリッドステートドライブ (SSD) などの補助記憶装置を備えている。演算装置 49b の例としては、CPU (中央処理装置)、GPU (グラフィックプロセッシングユニット) が挙げられる。ただし、処理システム 49 の具

体的構成はこれらの例に限定されない。

- [0027] 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。
- [0028] 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。
- [0029] 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。
- [0030] 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。

- [0031] 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。

[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。

- [0032] 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 の表面（被研磨面）に光を導き、基板 W 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、処理システム 49 は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。さらに、処理システム 49 は、反射光のスペクトルから基板 W の膜厚を決定する。反射光のスペクトルは、基板 W の膜厚に従って変化する。したがって、処理システム 49 は、反射光のスペクトルから基板 W の膜厚を決定することができる。反射光のスペクトルから基板 W の膜厚を決定する具体的な方法は、公知の技術を用いることができる。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。

- [0033] 処理システム 49 は、少なくとも 1 台のコンピュータから構成されている。前記少なくとも 1 台のコンピュータは、1 台のサーバまたは複数台のサーバであってもよい。処理システム 49 は、分光器 47 に通信線で接続された

エッジサーバであってもよいし、インターネットまたはローカルエリアネットワークなどの通信ネットワークによって分光器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に接続されたネットワーク内に設置されたフォグコンピューティングデバイス（ゲートウェイ、フォグサーバ、ルーターなど）であってもよい。

[0034] 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。

[0035] 処理システム49は、動作制御部9に接続されている。動作制御部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、動作制御部9は、後述する圧力レギュレータに指令を発して基板Wの膜厚に基づいて基板Wの研磨面2aに対する押し付け力を調整させる。

[0036] 本実施形態の光学式膜厚測定装置40は、基板W上の複数の測定点での複数の膜厚を測定するように構成されている。本実施形態では、光学センサヘッド7が基板Wを一回横切る間、光学センサヘッド7は基板W上の複数の測定点に光を放ち、これら複数の測定点からの反射光を受ける。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。

[0037] 図3は、基板Wの表面（被研磨面）上の複数の測定点の一例を示す模式図である。図3に示すように、光学センサヘッド7は、基板Wを横切るたびに、複数の測定点MPに光を導き、これら複数の測定点MPからの反射光を受ける。したがって、処理システム49は、光学センサヘッド7が基板Wを横切るたびに（すなわち、研磨テーブル3が一回転するたびに）、複数の測定点MPからの反射光の複数のスペクトルを生成し、複数のスペクトルに基づいて、それぞれの測定点MPにおける膜厚を決定する。各測定点MPの位置は、光の照射タイミング、研磨テーブル3の回転速度、研磨ヘッド1の位置

、および研磨ヘッド１の回転速度等に基づいて決定される。

[0038] 後述のように研磨ヘッド１は、基板Wを研磨パッド２の研磨面２aに対して押し付ける基板押圧面を複数の領域に区分して、各領域毎に基板Wに加える荷重を独立に調整可能に構成されている。研磨ヘッド１は、各領域に対応する基板Wの膜厚に基づいて基板Wの研磨面２aに対する押し付け力を調整することができる。本実施形態では、膜厚測定装置４０は光学式膜厚測定装置であるが、基板W上の複数の測定点での絶縁膜の複数の膜厚を測定可能であれば、膜厚測定装置４０は光学式膜厚測定装置に限定されない。

[0039] 次に、研磨ヘッド１の詳細について説明する。図４は、図１に示す研磨ヘッド１の断面図である。図４に示すように、研磨ヘッド１は、基板Wを研磨パッド２の研磨面２aに対して押し付けるための弾性膜６５と、弾性膜６５を保持するヘッド本体２１と、ヘッド本体２１の下方に配置された環状のドライブリング６２と、ドライブリング６２の下面に固定された環状のリテーナリング６０とを備えている。弾性膜６５は、ヘッド本体２１の下部に取り付けられている。ヘッド本体２１は、ヘッドシャフト１０の端部に固定されており、ヘッド本体２１、弾性膜６５、ドライブリング６２、およびリテーナリング６０は、ヘッドシャフト１０の回転により一体に回転するように構成されている。リテーナリング６０およびドライブリング６２は、ヘッド本体２１に対して相対的に上下動可能に構成されている。ヘッド本体２１は、エンジニアリングプラスチック（例えば、PEEK）などの樹脂により形成されている。

[0040] 弾性膜６５の下面は、基板Wを研磨パッド２の研磨面２aに対して押し付ける基板押圧面６５aを構成する。リテーナリング６０は、基板押圧面６５aを囲むように配置され、基板Wはリテーナリング６０によって囲まれている。弾性膜６５とヘッド本体２１との間には、４つの圧力室７０、７１、７２、７３が設けられている。圧力室７０、７１、７２、７３は弾性膜６５とヘッド本体２１によって形成されている。中央の圧力室７０は円形であり、他の圧力室７１、７２、７３は環状である。これらの圧力室７０、７１、７

2, 73は、同心上に配列されている。本実施形態では、弾性膜65は、4つの圧力室70~73を形成するが、上述の圧力室の数は例示であり、適宜変更してもよい。

[0041] 圧力室70, 71, 72, 73にはそれぞれ気体移送ラインF1, F2, F3, F4が接続されている。気体移送ラインF1, F2, F3, F4の一端は、研磨装置が設置されている工場に設けられたユーティリティとしての圧縮気体供給源（図示せず）に接続されている。圧縮空気等の圧縮気体は、気体移送ラインF1, F2, F3, F4を通じて圧力室70, 71, 72, 73にそれぞれ供給されるようになっている。圧力室70~73に圧縮気体が供給されることで、弾性膜65が膨らみ、圧力室70~73内の圧縮気体は、弾性膜65を介して基板Wを研磨パッド2の研磨面2aに押し付ける。圧力室70~73は、基板Wを研磨パッド2の研磨面2aに押し付けるためのアクチュエータとして機能する。

[0042] 圧力室72に連通する気体移送ラインF3は、図示しない真空ラインに接続されており、圧力室72内に真空を形成することが可能となっている。圧力室72を構成する、弾性膜65の部位には開口が形成されており、圧力室72に真空を形成することにより基板Wが研磨ヘッド1に吸着保持される。また、この圧力室72に圧縮気体を供給することにより、基板Wが研磨ヘッド1からリリースされる。弾性膜65は、エチレンプロピレングム（EPDM）、ポリウレタングム、シリコングム等の強度および耐久性に優れたゴム材によって形成されている。

[0043] リテーナリング60は、弾性膜65の周囲に配置されており、研磨パッド2の研磨面2aに接触する環状の部材である。リテーナリング60は、基板Wの外周縁を囲むように配置されており、基板Wの研磨中に基板Wが研磨ヘッド1から飛び出してしまうことを防止する。

[0044] ドライブリング62の上部は、環状のリテーナリング押圧装置80に連結されている。リテーナリング押圧装置80は、ドライブリング62を介してリテーナリング60の上面60bの全体に下向きの荷重を与え、これにより

リテーナリング60の下面60aを研磨パッド2の研磨面2aに押し付ける。
。

[0045] リテーナリング押圧装置80は、ドライブリング62の上部に固定された環状のピストン81と、ピストン81の上面に接続された環状のローリングダイヤフラム82とを備えている。ローリングダイヤフラム82の内部にはリテーナリング圧力室83が形成されている。このリテーナリング圧力室83は、気体移送ラインF5を介して上記圧縮気体供給源に連結されている。圧縮気体は、気体移送ラインF5を通じてリテーナリング圧力室83内に供給される。

[0046] 上記圧縮気体供給源からリテーナリング圧力室83に圧縮気体を供給すると、ローリングダイヤフラム82がピストン81を下方に押し下げ、ピストン81はドライブリング62を押し下げ、さらにドライブリング62はリテーナリング60の全体を下方に押し下げる。このようにして、リテーナリング押圧装置80は、リテーナリング60の下面60aを研磨パッド2の研磨面2aに押し付ける。ドライブリング62は、リテーナリング押圧装置80に着脱可能に連結されている。

[0047] 気体移送ラインF1, F2, F3, F4, F5は、ヘッドシャフト10に取り付けられたロータリージョイント25を経由して延びている。研磨装置は、圧力レギュレータR1, R2, R3, R4, R5をさらに備えており、圧力レギュレータR1, R2, R3, R4, R5は、気体移送ラインF1, F2, F3, F4, F5にそれぞれ設けられている。圧縮気体供給源からの圧縮気体は、圧力レギュレータR1～R5を通して圧力室70～73、およびリテーナリング圧力室83内にそれぞれ独立に供給される。圧力レギュレータR1～R5は、圧力室70～73、およびリテーナリング圧力室83内の圧縮気体の圧力を調節するように構成されている。圧力レギュレータR1～R5は、動作制御部9に接続されている。

[0048] 圧力レギュレータR1～R5は、圧力室70～73、およびリテーナリング圧力室83の内部圧力を互いに独立して変化させることが可能であり、こ

れにより、基板Wの対応する4つの領域、すなわち、中央部、内側中間部、外側中間部、およびエッジ部における基板Wの研磨面2 aに対する押し付け力、およびリテーナリング6 0の研磨パッド2 への押し付け力を独立に調整することができる。気体移送ラインF 1, F 2, F 3, F 4, F 5は大気開放弁（図示せず）にもそれぞれ接続されており、圧力室7 0～7 3、およびリテーナリング圧力室8 3を大気開放することも可能である。本実施形態では、弾性膜6 5は、4つの圧力室7 0～7 3を形成するが、一実施形態では、弾性膜6 5は4つよりも少ない、または4つよりも多い圧力室を形成してもよい。

[0049] 図1に示す膜厚測定装置4 0によって測定された基板Wの複数の測定点での複数の膜厚に関する膜厚データは、動作制御部9に送られる。動作制御部9は、圧力レギュレータR 1～R 4に指令を発して、膜厚測定装置4 0によって測定された複数の膜厚に基づいて基板Wの対応する4つの領域における基板Wの研磨面2 aに対する押し付け力を独立に調整させる。一例として、動作制御部9は、基板Wの中央部の膜厚を他の領域の膜厚と比較し、中央部の膜厚が他の領域の膜厚よりも大きいときは、動作制御部9は、圧力レギュレータR 1に指令を発し、圧力室7 0の内部圧力を増加させる。

[0050] 以下、基板の研磨方法および基板の研磨終点の決定方法の詳細について、図5 A～図5 Cに示す基板を例に説明する。図5 A～図5 Cに示す基板は、表面段差を有するシリコン（Si）層1 0 0の凸部上に窒化ケイ素（Si₃N₄）から成るストッパ層1 0 3が形成されており、ストッパ層1 0 3の上に二酸化ケイ素（SiO₂）からなる絶縁膜1 0 7が形成されている。ストッパ層1 0 3は、絶縁膜1 0 7を除去するためのエッチング液では除去されない性質を有している。本実施形態では、ストッパ層1 0 3の表面が露出するまで絶縁膜1 0 7を研磨する方法について説明する。図5 Aは基板Wの研磨前の状態を示し、図5 Bは、後述のように膜厚指標値が膜厚しきい値に達するまで絶縁膜1 0 7を研磨したときの基板Wの状態を示し、図5 Cは、研磨終点まで基板Wを研磨したときの基板Wの状態を示す。図5 Bおよび図5 Cに示

す積層構造の例としては、シャロートレンチアイソレーション（STI）が挙げられる。したがって、本実施形態の研磨方法は、シャロートレンチアイソレーション（STI）を製作する工程に適用することができる。

[0051] 図6は、基板Wの研磨方法および基板Wの研磨終点の決定方法の一実施形態を示すフローチャートである。

ステップ1では研磨装置は、研磨を開始する。すなわち、テーブルモータ6は、研磨テーブル3を研磨パッド2と一体に一定の回転速度で回転させ、研磨ヘッド1は基板Wを一定の回転速度で回転させる。研磨ヘッド1は、さらに基板Wを研磨パッド2の研磨面2aに押し付けて、基板Wの研磨を開始する。

[0052] ステップ2～5では、研磨装置は膜厚プロファイル調整工程を実行する。膜厚プロファイル調整工程は、基板Wを研磨しながら基板W上の複数の測定点での複数の膜厚を測定し、複数の膜厚に基づいて基板Wの研磨面2aに対する押し付け力を調整し、複数の膜厚のうちの少なくとも1つから決定される膜厚指標値が膜厚しきい値に達した時点を決する工程である。膜厚プロファイル調整工程で測定される膜厚は、絶縁膜107の厚さである。

[0053] ステップ2では、膜厚測定装置40は、基板W上の複数の測定点での複数の膜厚を測定する。具体的には、光学式膜厚測定装置40は、光学センサヘッド7が基板Wを横切るとき、基板Wに複数回光を照射し、複数の反射光の各波長での強度を測定する。光学式膜厚測定装置40は、複数の反射光の強度測定データから反射光の複数のスペクトルを生成する。光学式膜厚測定装置40は、複数のスペクトルに基づいて、各測定点における複数の膜厚を決する。動作制御部9は、光学式膜厚測定装置40に指令を発してステップ2を実行させる。

[0054] ステップ3では、ステップ2で測定された複数の膜厚に基づいて基板Wの研磨面2aに対する押し付け力を調整する。具体的には、動作制御部9は、ステップ2で測定された膜厚データを光学式膜厚測定装置40から取得し、複数の膜厚に基づいて、研磨ヘッド1の圧力室70～73の内部圧力を決定

し、圧力レギュレータ R 1 ～ R 4 のうちの少なくとも 1 つに指令を発して基板 W の研磨面 2 a に対する押し付け力を調整させる。

[0055] 動作制御部 9 は、基板 W 上の複数の位置と、複数の位置における複数の膜厚の関係を表す膜厚プロファイルを生成してもよい。動作制御部 9 は、膜厚プロファイルに基づいて、研磨ヘッド 1 の圧力室 7 0 ～ 7 3 の内部圧力を決定してもよい。指令を発する圧力レギュレータは、1 つでもよく、2 つ以上でもよい。上述した基板 W の 4 つの領域のうちのいずれかの領域内に測定点が複数存在する場合は、動作制御部 9 は、その領域内の複数の測定点での膜厚の平均値を算出することにより当該領域における膜厚を決定してもよい。一実施形態では、各領域内の複数の測定点から任意に選択された 1 つの測定点における膜厚を当該領域における膜厚としてもよく、さらに一実施形態では、各領域内の複数の膜厚の最大値または最小値を当該領域における膜厚としてもよい。

[0056] ステップ 3 の一例を以下に説明する。動作制御部 9 は、ステップ 2 で測定された膜厚データを光学式膜厚測定装置 4 0 から受け取り、基板 W 上の複数の位置と、複数の位置における複数の膜厚との関係を表す膜厚プロファイルを生成する。動作制御部 9 は、膜厚プロファイルに基づいて基板 W の対応する 4 つの領域、すなわち、中央部、内側中間部、外側中間部、およびエッジ部の膜厚を決定する。各領域内に測定点が複数存在する場合は、各領域における複数の測定点での膜厚の平均値を算出することにより各領域の膜厚を決定する。

[0057] 一例として、動作制御部 9 は、基板 W の中央部の膜厚を他の領域の膜厚と比較する。中央部の膜厚が他の領域の膜厚よりも大きいときは、動作制御部 9 は、圧力レギュレータ R 1 に指令を発し、圧力室 7 0 の内部圧力を増加させ、中央部の膜厚が他の領域の膜厚よりも小さいときは、動作制御部 9 は、圧力レギュレータ R 1 に指令を発し、圧力室 7 0 の内部圧力を減少させる。

[0058] このように、基板 W 上の複数の膜厚に基づいて圧力室 7 0 ～ 7 3 の内部圧力のそれぞれを互いに独立して変化させることにより、研磨装置は基板 W の

膜厚プロファイルを調整することができる。本実施形態では、基板Wの複数の膜厚に基づいて基板Wの被研磨面が平坦になるように（すなわち、基板Wの被研磨面を構成する膜の厚さが均一となるように）、動作制御部9は、圧力レギュレータR1～R4に指令を発して、基板Wの研磨面2aに対する押し付け力を調整する。その結果、研磨装置は、後述する研磨終点検出工程を精度良く実行することができる。

[0059] ステップ4では、動作制御部9は、ステップ2で測定された基板W上の複数の測定点での複数の膜厚のうちの少なくとも1つから膜厚指標値を決定する。本実施形態では、複数の膜厚の平均値を算出することにより、膜厚指標値を決定する。一実施形態では、複数の測定点から任意に選択された1つの測定点における膜厚を膜厚指標値としてもよく、さらに一実施形態では、複数の膜厚の最大値または最小値を膜厚指標値としてもよい。

[0060] ステップ5では、動作制御部9は、膜厚指標値が膜厚しきい値に達した時点を決する。具体的には、動作制御部9は、膜厚指標値を膜厚しきい値と比較し、膜厚指標値が膜厚しきい値に達していない場合、ステップ2に戻り、ステップ2～ステップ5を再び実行する。膜厚指標値が膜厚しきい値に達した場合、研磨装置は、膜厚プロファイル調整工程を終了し、研磨終点検出工程を実行する。

[0061] 上記膜厚しきい値は、実験や過去の研磨実績に基づいて予め決定される。上記膜厚しきい値は、後述する研磨終点検出工程において、研磨終点を精度良く検出できるまで絶縁膜107の膜厚が薄くなる時点に基づいて決定される。図5Bに、絶縁膜107を膜厚指標値が膜厚しきい値に達するまで研磨したときの基板Wの状態を示す。

[0062] ステップ6～8では、研磨装置は研磨終点検出工程を実行する。研磨終点検出工程は、基板Wを研磨しながら研磨テーブル3を回転させるためのトルクを測定し、上記トルクに基づいて基板Wの研磨終点を決定する工程である。

[0063] ステップ6では、トルク測定装置8は、研磨テーブル3を回転させるため

のトルクを測定する。具体的には、動作制御部 9 は、トルク測定装置 8 に指令を発して研磨テーブル 3 を回転させるためのトルクを測定させる。本実施形態では、トルク測定装置 8 は、電流測定器であり、トルク測定装置 8 は、研磨テーブル 3 を回転させるためのトルクに相当するテーブルモータ 6 の駆動電流を測定する。

[0064] ステップ 7 および 8 では、動作制御部 9 は、ステップ 6 で測定されたトルクに基づいて基板 W の研磨終点を決定する。具体的には、動作制御部 9 は、トルク測定装置 8 から上記トルクの測定値を取得し、上記トルクの測定値を予め設定されたトルクしきい値と比較する（ステップ 7）。このトルクの測定値は、研磨テーブル 3 を一定の速度で回転させるために必要なトルクを表している。上記トルクの測定値がトルクしきい値に達していない場合、動作制御部 9 は、ステップ 6 に戻り、ステップ 6 および 7 を再び実行する。上記トルクの測定値がトルクしきい値に達した場合、動作制御部 9 は、上記トルクの測定値がトルクしきい値に達した時点である研磨終点を決定する（ステップ 8）。その後、動作制御部 9 は研磨終点検出工程を終了する。

[0065] 一実施形態では、動作制御部 9 は、ステップ 6 で測定されたトルクに基づいて、研磨テーブル 3 を回転させるためのトルクの変化割合を算出し、算出されたトルクの変化割合を予め設定された変化割合しきい値と比較してもよい。トルクの変化割合は、単位時間当たりのトルクの変化量を表す。トルクの変化割合が変化割合しきい値に達していない場合、動作制御部 9 は、ステップ 6 に戻り、ステップ 6 および 7 を再び実行する。トルクの変化割合が変化割合しきい値に達した場合、動作制御部 9 は、上記トルクの変化割合が変化割合しきい値に達した時点である研磨終点を決定してもよい。

[0066] 図 5 C に、研磨終点まで基板 W を研磨したときの基板 W の状態を示す。研磨終点は、ストッパ層 103 上の絶縁膜 107 が研磨によって除去され、ストッパ層 103 の表面の全体が露出した時点である。研磨テーブル 3 を回転させるためのトルク（研磨パッド 2 と基板 W の間に作用する摩擦力に比例する）は、ストッパ層 103 上の絶縁膜 107 の膜厚が小さくなるにつれて変

化し、ストッパ層103の表面が完全に露出すると、上記トルクは変化しなくなる。したがって、動作制御部9は、トルクが変化しなくなる時点のトルクの測定値またはトルクの測定値の変化割合に基づいて研磨終点を決定することができる。トルクしきい値および変化割合しきい値は、実験や過去の研磨実績に基づいて予め決定される。

[0067] ステップ9では、研磨装置は、延長研磨工程を実行する。延長研磨工程では、研磨装置はステップ1で説明した方法で、基板Wを予め定められた延長時間だけ研磨する。研磨終点が経過した後も基板Wを研磨することにより、完全にストッパ層103上の絶縁膜107を除去することができる。延長時間は、実験や過去の研磨実績に基づいて予め決定される。延長時間経過後、研磨装置は延長研磨工程を終了する。これにより基板Wの研磨が終了される。延長研磨工程は省略してもよい。延長研磨工程を省略する場合は、ステップ8において研磨終点が検出されたときに、基板Wの研磨が終了される。

[0068] 基板Wの被研磨面を構成する膜（図5Aに示す例では絶縁膜107）の厚さが不均一である場合、基板Wと研磨パッド2との間に作用する摩擦力の変化は、研磨テーブル3を回転させるトルクの変化（テーブルモータ6の駆動電流の変化）として顕著に現れず、研磨終点を正確に決定できないことがある。本実施形態によれば、研磨終点検出工程の前に、膜厚プロファイル調整工程が実行されるので、基板Wの膜厚プロファイルが所望の状態に制御された状態で研磨終点検出工程を実行することができる。例えば、研磨装置は、基板Wの被研磨面を平坦にした状態（基板Wの面内均一性が良い状態）で研磨終点検出工程を実行することができる。その結果、動作制御部9は、基板Wの研磨終点を正確に決定することができる。

[0069] 図7は、各研磨工程におけるテーブルモータ6の駆動電流の測定値を示す図である。点線で表される曲線は、膜厚プロファイル調整工程を実行せずに研磨終点検出工程を実行した場合のテーブルモータ6の駆動電流の測定値を示し、実線で表される曲線は、膜厚プロファイル調整工程の後、研磨終点検出工程を実行した場合のテーブルモータ6の駆動電流の測定値を示している。

。図 7 に示すように、膜厚プロファイル調整工程を実行しなかった場合（点線で示す）、テーブルモータ 6 の駆動電流の測定値は、ストッパ層 103 上の絶縁膜 107 が除去された時点である研磨終点を過ぎた後も、低下し続けている。これに対し、膜厚プロファイル調整工程の後に研磨終点検出工程を実行した場合（実線で示す）、ストッパ層 103 上の絶縁膜 107 が除去されたときに、テーブルモータ 6 の駆動電流の測定値が一定となる。したがって、動作制御部 9 は、テーブルモータ 6 の駆動電流の測定値が一定となった時点である基板 W の研磨終点を正確に決定することができる。

[0070] 基板 W の研磨終点に近づくと、ストッパ層 103 上の絶縁膜 107 の厚さは極めて小さくなる。膜厚測定装置 40 の測定精度の限界近くまで絶縁膜 107 の厚さが低下した場合、膜厚測定装置 40 の膜厚測定精度は低下する。したがって、膜厚測定装置 40 によって測定された膜厚のみに基づいて基板 W の研磨終点を決定することは難しい。本実施形態によれば、膜厚プロファイル調整工程と、研磨終点検出工程を組み合わせることによって、研磨装置は、基板 W の研磨終点を正確に決定することができる。

[0071] 一実施形態では、研磨装置は、膜厚プロファイル調整工程の前に、初期研磨工程を実行してもよい。初期研磨工程は、基板 W を研磨しながら研磨テーブル 3 を回転させるためのトルクを測定し、上記トルクに基づいて基板 W の初期研磨終点を決定する工程である。特に説明しない初期研磨工程の詳細は、ステップ 6～8 を参照して説明した研磨終点検出工程と同じであるので、その重複する説明を省略する。初期研磨工程では、動作制御部 9 は、トルクの測定値（またはトルクの変化割合）を予め設定された初期トルクしきい値（または初期変化割合しきい値）と比較する。上記トルクの測定値（トルクの変化割合）が初期トルクしきい値（初期変化割合しきい値）に達した場合、動作制御部 9 は、上記トルクの測定値が初期トルクしきい値に達した時点である初期研磨終点を決定する。

[0072] 図 8 は、初期研磨終点まで基板 W を研磨したときの基板 W の状態を示す図である。初期研磨終点は、表面段差を有する絶縁膜 107 の凸部が研磨され

て絶縁膜 107 の表面が平坦になった時点である。図 8 は、図 5 A に示す基板 W の状態と、図 5 B に示す基板 W の状態の間の状態を示している。図 5 A 乃至図 5 C に示すように、下地のシリコン層 100 が凹凸段差を有する場合、上層の絶縁膜 107 が図 5 A に示すような表面段差を有することがある。絶縁膜 107 が表面段差を有する場合、絶縁膜 107 の表面の凸部のみが研磨パッド 2 と接触する。このため、絶縁膜 107 が表面段差を有するときの絶縁膜 107 の研磨パッド 2 との接触面積は、絶縁膜 107 が表面段差を有さないとき（絶縁膜 107 の表面が平坦なとき）の接触面積よりも小さくなる。結果として、絶縁膜 107 が表面段差を有するときの基板 W と研磨パッド 2 との間に作用する摩擦力（研磨テーブル 3 を回転させるためのトルク）は、絶縁膜 107 が表面段差を有さないときの上記摩擦力（上記トルク）とは異なる。したがって、動作制御部 9 は、トルクの測定値（またはトルクの変化割合）の変化に基づいて初期研磨終点を決定することができる。初期トルクしきい値（または初期変化割合しきい値）は、実験や過去の研磨実績に基づいて予め決定される。

[0073] 絶縁膜 107 が表面段差を有する場合、膜厚測定装置 40 による絶縁膜 107 の膜厚の測定精度が低下することがある。上述のように膜厚プロファイル調整工程の前に初期研磨工程を実行することにより、膜厚測定装置 40 によって精度良く絶縁膜 107 の膜厚を測定することができる。

[0074] 上述した初期研磨工程、膜厚プロファイル調整工程、研磨終点検出工程、および延長研磨工程のすべては、図 1 に示す研磨装置によって実行される。すなわち、基板 W が同じ研磨テーブル 3 上の研磨パッド 2 に研磨ヘッド 1 によって押し付けられながら、初期研磨工程、膜厚プロファイル調整工程、研磨終点検出工程、および延長研磨工程が順次実行される。基板 W は、同じ研磨テーブル 3 上の研磨パッド 2 に接触したまま上記複数の工程が実行されるので、スループットが向上される。

[0075] 動作制御部 9 は、記憶装置 9 a に格納されたプログラムに含まれる命令に従って上述した各ステップを実行する。上述した各ステップを動作制御部 9

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、記録媒体を介して動作制御部 9 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動作制御部 9 に入力されてもよい。

[0076] 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。

産業上の利用可能性

[0077] 本発明は、ウェーハなどの基板を研磨する研磨方法および研磨装置に利用可能である。また、本発明は、研磨装置に研磨方法を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に利用可能である。

符号の説明

- [0078]
- | | |
|-----|-------------------|
| 1 | 研磨ヘッド |
| 2 | 研磨パッド |
| 2 a | 研磨面 |
| 3 | 研磨テーブル |
| 5 | 研磨液供給ノズル |
| 6 | テーブルモータ |
| 7 | 光学センサヘッド |
| 8 | トルク測定装置 |
| 9 | 動作制御部 |
| 10 | ヘッドシャフト |
| 21 | ヘッド本体 |
| 25 | ロータリージョイント |
| 40 | 膜厚測定装置（光学式膜厚測定装置） |

- 4 4 光源
- 4 7 分光器
- 4 9 処理システム
- 6 0 リテーナリング
- 6 0 a 下面
- 6 2 ドライブリング
- 6 5 弾性膜
- 7 0, 7 1, 7 2, 7 3 圧力室
- 8 0 リテーナリング押圧装置
- 8 1 ピストン
- 8 2 ローリングダイヤフラム
- 8 3 リテーナリング圧力室
- 1 0 0 シリコン層
- 1 0 3 ストップ層
- 1 0 7 絶縁膜
- R 1, R 2, R 3, R 4, R 5 圧力レギュレータ