

圧力制御装置および該圧力制御装置を備えた研磨装置

発明の背景

発明の技術分野

- 5 本発明は、ウェハなどの基板を研磨パッドに対して押し付けるための圧力室内の圧力を制御する圧力制御装置に関する。また、本発明は、このような圧力制御装置を備えた研磨装置に関する。

関連技術の記載

- 図15は、ウェハを研磨するための研磨装置を示す模式図である。図15に示すように、研磨装置は、研磨パッド23を支持する研磨テーブル22と、ウェハWを研磨パッド23に押し付けるトップリング30とを備えている。研磨テーブル22は、テーブル軸22aを介してその下方に配置されるテーブルモータ29に連結されており、このテーブルモータ29により研磨テーブル22が矢印で示す方向に回転されるようになっている。研磨パッド23は研磨テーブル22の上
- 10 面に貼付されており、研磨パッド23の上面がウェハWを研磨する研磨面23aを構成している。トップリング30はトップリングシャフト27の下端に固定されている。トップリング30は、真空吸着によりその下面にウェハWを保持できるように構成されている。

- ウェハWの研磨は次のようにして行われる。トップリング30および研磨テーブル22をそれぞれ矢印で示す方向に回転させ、研磨液供給機構25から研磨パッド23上に研磨液（スラリー）を供給する。この状態で、下面にウェハWを保持したトップリング30が下降されてウェハWを研磨パッド23の研磨面23aに押し付ける。ウェハWの表面は、研磨液に含まれる砥粒の機械的作用と研磨液の化学的作用により研磨される。このような研磨装置は、CMP（化学機械研
- 15 磨）装置として知られている。

トップリング30の下部には弾性膜から形成された圧力室（図15には図示せず）が設けられている。この圧力室には加圧気体が供給され、圧力室内の圧力によりウェハWの研磨パッド23に対する研磨圧力が調整される。図16は、トッ

5 ブリング 30 の圧力室に気体（空気、または窒素など）を供給して圧力室内の圧力を制御する圧力制御装置 100 を示す模式図である。図 16 に示すように、圧力制御装置 100 は、気体供給源から供給される気体の圧力を調整する圧力調整弁 101 と、圧力調整弁 101 の下流側の気体の圧力（二次側圧力）を測定する圧力センサ 102 と、圧力センサ 102 により取得された圧力値に基づいて圧力調整弁 101 の動作を制御するレギュレータ制御部 103 とを備えている。このような構成の圧力制御装置 100 は、電空レギュレータとして知られている。

10 圧力調整弁 101 は、気体供給源から供給される気体の圧力を調整するパイロット弁 110 と、パイロット弁 110 に送られるパイロット空気の圧力を調整する給気用電磁弁 111 および排気用電磁弁 112 とを備えている。パイロット弁 110 は、一部がダイヤフラムから形成されたパイロット室 115 と、パイロット室 115 に連結された弁体 116 とを有している。パイロット空気は、給気用電磁弁 111 を通じてパイロット室 115 内に送られ、パイロット室 115 内のパイロット空気は排気用電磁弁 112 を通じて排気される。したがって、給気用電磁弁 111 および排気用電磁弁 112 を操作することにより、パイロット室 115 内の圧力が調整される。レギュレータ制御部 103 は電磁弁 111、112 の開閉動作を制御し、弁体 116 はパイロット室 115 内の圧力に従って移動する。弁体 116 の位置によって、気体供給源からの気体がパイロット弁 110 を通過し、またはパイロット弁 110 の下流側（二次側）の気体がパイロット弁 110 を通じて排気される。これによりパイロット弁 110 の下流側の気体の圧力、すなわち二次側圧力が調整される。

25 レギュレータ制御部 103 は、研磨装置の研磨制御部 50 に接続されており、研磨制御部 50 から送られる圧力指令値を受ける。レギュレータ制御部 103 は、圧力センサ 102 によって測定された気体の圧力現在値と圧力指令値との差がなくなるように給気用電磁弁 111 および排気用電磁弁 112 の動作を制御し、これによりトップリング 30 の圧力室内の圧力を調整する。

しかしながら、上述した構成を有する圧力制御装置では、圧力の安定性または入力信号に対する応答性のいずれか一方が低いという問題がある。すなわち、圧

力の安定性を向上させると、応答時間が長くなり、応答性を向上させると、圧力が不安定となる。

発明の要旨

- 5 本発明は、圧力の安定性および入力信号に対する応答性の両方を向上させることができる圧力制御装置を提供することを目的とする。また、本発明はそのような圧力制御装置を備えた研磨装置を提供することを目的とする。

本発明の一態様は、流体供給源から供給される流体の圧力を調整する圧力調整弁と、前記圧力調整弁によって調整された圧力を測定する第1の圧力センサと、
10 前記第1の圧力センサの下流側に配置された第2の圧力センサと、外部から入力された圧力指令値と、前記第2の圧力センサによって測定された前記流体の第2の圧力値との差をなくするための補正指令値を生成するPID制御部と、前記圧力指令値および前記補正指令値のうちのいずれか一方と、前記第1の圧力センサによって測定された前記流体の第1の圧力値との差がなくなるように前記圧力調整
15 弁の動作を制御するレギュレータ制御部とを備え、前記PID制御部は、前記圧力指令値が変化した時点からPID制御開始点まで、前記補正指令値の生成を停止し、前記PID制御開始点後は、前記補正指令値を生成するように構成され、前記レギュレータ制御部は、前記圧力指令値が変化した時点から前記PID制御開始点まで、前記圧力指令値と前記第1の圧力値との差がなくなるように前記圧
20 力調整弁の動作を制御し、前記PID制御開始点後は、前記補正指令値と前記第1の圧力値との差がなくなるように前記圧力調整弁の動作を制御するように構成され、前記PID制御開始点は、予め設定された遅延時間が経過した時点であることを特徴とする圧力制御装置である。

本発明の他の態様は、研磨パッドを支持する研磨テーブルと、基板を前記研磨
25 テーブル上の前記研磨パッドに押し付けるトップリングと、前記トップリングの動作を制御する研磨制御部と、前記トップリングに接続された圧力制御装置とを備え、前記トップリングは、前記基板を前記研磨パッドに対して押し付けるための圧力室を備えた研磨装置であって、前記圧力室内の圧力は、前記圧力制御装置

によって調整され、前記圧力制御装置は、流体供給源から供給される流体の圧力を調整する圧力調整弁と、前記圧力調整弁によって調整された圧力を測定する第1の圧力センサと、前記第1の圧力センサの下流側に配置された第2の圧力センサと、前記研磨制御部から入力された圧力指令値と、前記第2の圧力センサによって測定された前記流体の第2の圧力値との差をなくするための補正指令値を生成するP I D制御部と、前記圧力指令値および前記補正指令値のうちのいずれか一方と、前記第1の圧力センサによって測定された前記流体の第1の圧力値との差がなくなるように前記圧力調整弁の動作を制御するレギュレータ制御部とを備え、前記P I D制御部は、前記圧力指令値が変化した時点からP I D制御開始点まで、前記補正指令値の生成を停止し、前記P I D制御開始点後は、前記補正指令値を生成するように構成され、前記レギュレータ制御部は、前記圧力指令値が変化した時点から前記P I D制御開始点まで、前記圧力指令値と前記第1の圧力値との差がなくなるように前記圧力調整弁の動作を制御し、前記P I D制御開始点後は、前記補正指令値と前記第1の圧力値との差がなくなるように前記圧力調整弁の動作を制御するように構成され、前記P I D制御開始点は、予め設定された遅延時間が経過した時点であることを特徴とする。

第1の圧力センサおよびレギュレータ制御部によって第1のループ制御が構成され、第2の圧力センサおよびP I D制御部によって第2のループ制御が構成される。外部からの圧力指令値（すなわち、目標圧力値）が変化した時点からP I D制御開始点までは、第2のループ制御は圧力の制御に関与せず、第1のループ制御のみが関与する。したがって、圧力制御装置は、圧力指令値の変化に迅速に追従して圧力を調整することができる。P I D制御開始点後は、第1のループ制御および第2のループ制御の両方が圧力の制御に関与する。したがって、圧力制御装置は、安定して圧力を調整することができる。

25

図面の簡単な説明

図1は、本発明の一実施形態に係る圧力制御装置を備えた研磨装置を示す図である。

- 図 2 は、研磨装置のトップリングを示す断面図である。
- 図 3 は、研磨装置の一部を示す斜視図である。
- 図 4 は、本発明の一実施形態に係る圧力制御装置を示す模式図である。
- 図 5 は、圧力制御装置の制御フローを示す図である。
- 5 図 6 は、P I D 制御部が動作せず、レギュレータ制御部のみが動作しているときの圧力制御装置の制御フローを示す図である。
- 図 7 は、研磨制御部から入力される圧力指令値の変化に従って変化する圧力現在値（第 2 の圧力値）を示すグラフである。
- 図 8 A および図 8 B は、リニアリティ評価およびヒステリシス評価を説明する
- 10 図である。
- 図 9 A および図 9 B は、安定性評価を説明する図である。
- 図 10 A および図 10 B は、繰り返し性評価を説明する図である。
- 図 11 A および図 11 B は、温度特性評価を説明する図である。
- 図 12 は、図 16 に示す従来の圧力制御装置の評価結果と、図 4 に示す圧力制
- 15 御装置の評価結果を示す図である。
- 図 13 は、誤差を含むインライン圧力センサの出力値を正しい出力値に補正するための補正式を説明するための図である。
- 図 14 A はインライン圧力センサの出力値が補正される前のリニアリティおよびヒステリシスのグラフを示す図であり、図 14 B はインライン圧力センサの出力値が補正された後のリニアリティおよびヒステリシスのグラフを示す図である。
- 20 図 15 は、ウェハを研磨するための研磨装置を示す模式図である。
- 図 16 は、従来の圧力制御装置を示す模式図である。

実施形態の説明

- 25 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、本発明の一実施形態に係る圧力制御装置を備えた研磨装置を示す図である。図 1 に示すように、研磨装置は、研磨パッド 23 を支持する研磨テーブル 22 と、研磨対象物であるウェハ等の基板を保持して研磨テーブル 22 上の研磨

パッド23に押圧するトップリング（基板保持装置）30とを備えている。

研磨テーブル22は、テーブル軸22aを介してその下方に配置されるテーブルモータ29に連結されており、そのテーブル軸22a周りに回転可能になっている。研磨パッド23は研磨テーブル22の上面に貼付されており、研磨パッド
5 23の表面23aがウェハWを研磨する研磨面を構成している。研磨テーブル22の上方には研磨液供給機構25が設置されており、この研磨液供給機構25によって研磨テーブル22上の研磨パッド23上に研磨液Qが供給されるようになっている。

トップリング30は、ウェハWを研磨面23aに対して押圧するトップリング
10 本体31と、ウェハWを保持してウェハWがトップリング30から飛び出さないようにするリテーナリング32とを備えている。トップリング30は、トップリングシャフト27に接続されており、このトップリングシャフト27は、上下動機構81によりトップリングヘッド64に対して上下動するようになっている。このトップリングシャフト27の上下動により、トップリングヘッド64に対し
15 てトップリング30の全体を昇降させ位置決めするようになっている。トップリングシャフト27の上端にはロータリージョイント82が取り付けられている。

トップリングシャフト27およびトップリング30を上下動させる上下動機構81は、軸受83を介してトップリングシャフト27を回転可能に支持するブリッジ84と、ブリッジ84に取り付けられたボールねじ88と、支柱86により
20 支持された支持台85と、支持台85上に設けられたサーボモータ90とを備えている。サーボモータ90を支持する支持台85は、支柱86を介してトップリングヘッド64に固定されている。

ボールねじ88は、サーボモータ90に連結されたねじ軸88aと、このねじ軸88aが螺合するナット88bとを備えている。トップリングシャフト27は、
25 ブリッジ84と一体となって上下動するようになっている。したがって、サーボモータ90を駆動すると、ボールねじ88を介してブリッジ84が上下動し、これによりトップリングシャフト27およびトップリング30が上下動する。

トップリングシャフト27はキー（図示せず）を介して回転筒66に連結され

ている。この回転筒 66 はその外周部にタイミングプーリ 67 を備えている。ト
ップリングヘッド 64 にはトップリング回転モータ 68 が固定されており、上記
タイミングプーリ 67 は、タイミングベルト 69 を介してトップリング回転モー
タ 68 に設けられたタイミングプーリ 70 に接続されている。したがって、トッ
5 プリング回転モータ 68 を回転駆動することによってタイミングプーリ 70、タ
イミングベルト 69、およびタイミングプーリ 67 を介して回転筒 66 およびト
ップリングシャフト 27 が一体に回転し、トップリング 30 が回転する。トッ
プリングヘッド 64 は、フレーム（図示せず）に回転可能に支持されたトップリン
グヘッドシャフト 80 によって支持されている。研磨装置は、トップリング回転
10 モータ 68、サーボモータ 90 をはじめとする装置内の各機器を制御する研磨制
御部 50 を備えている。

トップリング 30 は、その下面にウェハ W を保持できるようになっている。ト
ップリングヘッド 64 はトップリングヘッドシャフト 80 を中心として旋回可能
に構成されており、下面にウェハ W を保持したトップリング 30 は、トッ
15 プリングヘッド 64 の旋回によりウェハ W の受取位置から研磨テーブル 22 の上方位置
に移動される。ウェハ W の研磨は次のようにして行われる。トップリング 30 お
よび研磨テーブル 22 をそれぞれ回転させ、研磨テーブル 22 の上方に設けられ
た研磨液供給機構 25 から研磨パッド 23 上に研磨液 Q を供給する。この状態で、
トップリング 30 を下降させてウェハ W を研磨パッド 23 の研磨面 23a に押圧
20 する。ウェハ W は研磨パッド 23 の研磨面 23a に摺接され、これによりウェハ
W の表面が研磨される。

次に、トップリング 30 について説明する。図 2 は、トップリング 30 を示す
断面図である。トップリング 30 は、トップリングシャフト 27 に自由継手 39
を介して連結されるトップリング本体 31 と、トップリング本体 31 の下方に配
25 置されたリテーナリング 32 とを備えている。

トップリング本体 31 の下方には、ウェハ W に当接する柔軟なメンブレン（弾
性膜） 34 と、メンブレン 34 を保持するチャッキングプレート 35 とが配置さ
れている。メンブレン 34 とチャッキングプレート 35 との間には、4 つの圧力

室（エアバッグ）C 1, C 2, C 3, C 4が設けられている。圧力室C 1, C 2, C 3, C 4はメンブレン3 4とチャッキングプレート3 5とによって形成されている。中央の圧力室C 1は円形であり、他の圧力室C 2, C 3, C 4は環状である。これらの圧力室C 1, C 2, C 3, C 4は、同心上に配列されている。

- 5 圧力室C 1, C 2, C 3, C 4にはそれぞれ流体路F 1, F 2, F 3, F 4を介して気体供給源（流体供給源）4 0により加圧空気等の加圧気体（加圧流体）が供給されるようになっている。また、圧力室C 1, C 2, C 3, C 4には、図示しない真空源によって負圧が形成されるようになっている。圧力室C 1, C 2, C 3, C 4の内部圧力は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、ウェハ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、および周縁部に対する研磨圧力を独立に調整することができる。また、トップリング3 0の全体を昇降させることにより、リテーナリング3 2を所定の圧力で研磨パッド2 3に押圧できるようになっている。
- 10

- チャッキングプレート3 5とトップリング本体3 1との間には圧力室C 5が形成され、この圧力室C 5には流体路F 5を介して上記気体供給源4 0により加圧気体が供給されるようになっている。また、圧力室C 5には、図示しない真空源によって負圧が形成されるようになっている。これにより、チャッキングプレート3 5およびメンブレン3 4全体が上下方向に動くことができる。ウェハWの周端部はリテーナリング3 2に囲まれており、研磨中にウェハWがトップリング3 0から飛び出さないようになっている。圧力室C 3を構成する、メンブレン3 4の部位には開口が形成されており、圧力室C 3に真空を形成することによりウェハWがトップリング3 0に吸着保持されるようになっている。また、この圧力室C 3に窒素ガスやクリーンエアなどを供給することにより、ウェハWがトップリング3 0からリリースされるようになっている。
- 15
- 20

- 25 トップリング本体3 1とリテーナリング3 2の間には、環状のローリングダイヤフラム3 6が配置されおり、このローリングダイヤフラム3 6の内部には圧力室C 6が形成されている。圧力室C 6は、流体路F 6を介して上記気体供給源4 0に連結されている。気体供給源4 0は加圧気体を圧力室C 6内に供給し、こ

れによりリテーナリング 3 2 を研磨パッド 2 3 に対して押圧する。

圧力室 C 1, C 2, C 3, C 4, C 5, C 6 に連通する流体路 F 1, F 2, F 3, F 4, F 5, F 6 には、それぞれ電空レギュレータ R 1, R 2, R 3, R 4, R 5, R 6 が設けられている。気体供給源 4 0 からの加圧気体は、電空レギュレータ R 1 ~ R 6 を通って圧力室 C 1 ~ C 6 内に供給される。電空レギュレータ R 1 ~ R 6 は、気体供給源 4 0 から供給される加圧気体の圧力を調整することによって、圧力室 C 1 ~ C 6 内の圧力を制御する。電空レギュレータ R 1 ~ R 6 は P I D 制御部 5 に接続されており、P I D 制御部 5 は研磨制御部 5 0 に接続されている。なお、P I D 制御部 5 は研磨制御部 5 0 内に組み込まれてもよい。圧力室 C 1 ~ C 6 は大気開放弁（図示せず）にも接続されており、圧力室 C 1 ~ C 6 を大気開放することも可能である。

電空レギュレータ R 1, R 2, R 3, R 4, R 5, R 6 と、加圧気体のユースポイントであるトップリング 3 0 との間には、インライン圧力センサ P 1, P 2, P 3, P 4, P 5, P 6 が設けられている。これらインライン圧力センサ P 1 ~ P 6 は、圧力室 C 1 ~ C 6 に連通する流体路 F 1 ~ F 6 にそれぞれ設けられており、流体路 F 1 ~ F 6 内および圧力室 C 1 ~ C 6 内の圧力を計測する。

図 3 は、電空レギュレータ R 1 ~ R 6 およびインライン圧力センサ P 1 ~ P 6 の配置を示す斜視図である。図 3 に示すように、電空レギュレータ R 1 ~ R 6 は、トップリング回転モータ 6 8 に取り付けられているが、インライン圧力センサ P 1 ~ P 6 は電空レギュレータ R 1 ~ R 6 およびトップリングヘッド 6 4 から離間して配置されている。これは、トップリング回転モータ 6 8、ロータリージョイント 8 2 などの熱源から発せられる熱に起因するインライン圧力センサ P 1 ~ P 6 の温度ドリフトを防ぐためである。これらの熱源から遠ざけるために、インライン圧力センサ P 1 ~ P 6 は、トップリングヘッド 6 4 から離れて配置されている。より具体的には、インライン圧力センサ P 1 ~ P 6 は、トップリングヘッドカバー 7 1 の外側であって、研磨装置の内部に配置されている。

インライン圧力センサ P 1 ~ P 6 は、温度が一定に保たれた雰囲気内に設置されることが好ましい。例えば、インライン圧力センサ P 1 ~ P 6 は、トップリン

グカバー 7 1 の外などの研磨装置内の開放空間内に設置される。一般に、研磨装置が設置されるクリーンルームには調温装置が備えられており、クリーンルーム内の温度が一定に保たれる。したがって、インライン圧力センサ P 1 ~ P 6 の周囲雰囲気温度が一定に保たれるように、これらインライン圧力センサ P 1 ~ P 5 6 をクリーンルーム内の温度に近い、研磨装置内の開放空間内に配置することが好ましい。例えば、インライン圧力センサ P 1 ~ P 6 を研磨装置の天井に配置してもよい。さらに、インライン圧力センサ P 1 ~ P 6 を研磨装置の外に設置してもよい。例えば、インライン圧力センサ P 1 ~ P 6 を研磨装置の外面上または研磨装置から離れた場所に置いてもよい。インライン圧力センサ P 1 ~ P 6 の計測点 10 は、加圧気体のユースポイントであるトップリング 3 0 にできるだけ近いことが好ましい。

研磨制御部 5 0 は、各圧力室 C 1 ~ C 6 の目標圧力値である圧力指令値を生成するように構成されている。圧力室 C 1, C 2, C 3, C 4 の圧力指令値は、各圧力室 C 1, C 2, C 3, C 4 に対応するウェハ表面の領域での膜厚測定値に基づいて生成される。研磨制御部 5 0 は P I D 制御部 5 に圧力指令値を送信し、P I D 制御部 5 は、インライン圧力センサ P 1 ~ P 6 によって計測された圧力現在値と、対応する圧力指令値との差をなくするための補正指令値を生成する。P I D 制御部 5 は補正指令値を上記電空レギュレータ R 1 ~ R 6 に送り、圧力室 C 1 ~ C 6 内の圧力が対応する補正指令値に一致するように電空レギュレータ R 1 ~ R 20 6 が作動する。このように、複数の圧力室を持つトップリング 3 0 は、研磨の進捗に従ってウェハの表面上の各領域を独立に研磨パッド 2 3 に押圧できるので、ウェハ W の膜を均一に研磨することができる。

電空レギュレータ R 1 ~ R 6, インライン圧力センサ P 1 ~ P 6, および P I D 制御部 5 は、トップリング 3 0 の圧力室 C 1 ~ C 6 内の圧力を調整する圧力制御装置 1 を構成する。電空レギュレータ R 1 ~ R 6 は互いに同一の構成を有し、25 並列に接続されている。同様に、インライン圧力センサ P 1 ~ P 6 は互いに同一の構成を有し、並列に接続されている。インライン圧力センサ P 1 ~ P 6 は、それぞれ電空レギュレータ R 1 ~ R 6 に直列に接続されている。複数の電空レギュ

レータおよび複数のインライン圧力センサに対応して複数のPID制御部5を設けてもよい。本実施形態に係る圧力制御装置1は、複数の電空レギュレータR1～R6および複数のインライン圧力センサP1～P6を備えているが、1つの電空レギュレータおよび1つのインライン圧力センサのみを備えてもよい。

- 5 以下、説明を簡略化するために、1つの電空レギュレータR1および1つのインライン圧力センサP1を備えた圧力制御装置1の一実施形態について、図4を参照して説明する。図4に示すように、圧力制御装置1は、電空レギュレータR1と、この電空レギュレータR1の下流側（二次側）に配置されたインライン圧力センサP1と、このインライン圧力センサP1に接続されたPID制御部5と
- 10 を備えている。

- 電空レギュレータR1は、気体供給源40から供給される気体の圧力を調整する圧力調整弁6と、圧力調整弁6の下流側の気体の圧力（二次側圧力）を測定する内部圧力センサ（第1の圧力センサ）7と、内部圧力センサ7によって取得された圧力値に基づいて圧力調整弁6の動作を制御するレギュレータ制御部8とを
- 15 備えている。

- 圧力調整弁6は、気体供給源40から供給される気体の圧力を調整するパイロット弁10と、パイロット弁10に送られるパイロット空気の圧力を調整する給気用電磁弁11および排気用電磁弁12とを備えている。パイロット弁10は、一部がダイヤフラムから形成されたパイロット室14と、パイロット室14に連
- 20 結された弁体15とを有している。パイロット空気は、給気用電磁弁11を通じてパイロット室14内に送られ、パイロット室14内のパイロット空気は排気用電磁弁12を通じて排気される。したがって、給気用電磁弁11および排気用電磁弁12を操作することにより、パイロット室14内の圧力が調整される。レギュレータ制御部8は電磁弁11、12の開閉動作を制御し、弁体15はパイロ
- 25 ット室14内の圧力に従って移動する。弁体15の位置によって、気体供給源40からの気体がパイロット弁10を通過し、またはパイロット弁10の下流側（二次側）の気体がパイロット弁10を通じて排気される。これによりパイロット弁10の下流側の気体の圧力、すなわち二次側圧力が調整される。このような構成

を有する電空レギュレータR 1は、給気用電磁弁1 1および排気用電磁弁1 2のデューティ比を制御して圧力を調整するタイプの電空レギュレータであるが、本発明はこのタイプに限らず、比例制御弁式、フォースバランス式などの他のタイプの電空レギュレータにも本発明を適用することが可能である。

- 5 圧力調整弁6、レギュレータ制御部8、および内部圧力センサ（第1の圧力センサ）7は、一体に組み付けられて電空レギュレータR 1を構成しているが、インライン圧力センサ（第2の圧力センサ）P 1は電空レギュレータR 1から分離している。インライン圧力センサP 1は、内部圧力センサ7の下流側に配置され、電空レギュレータR 1とトップリング3 0との間に設置されている。このインラ
- 10 インライン圧力センサP 1の圧力計測点は、ユースポイントであるトップリング3 0の近くであることが好ましい。インライン圧力センサP 1は、電空レギュレータR 1の下流側の気体の圧力、すなわち流体路F 1および圧力室C 1内の現在の圧力を測定し、得られた圧力現在値をP I D制御部5に送る。

- インライン圧力センサP 1は、内部圧力センサ7よりも高い圧力測定精度を有
- 15 している。より具体的には、圧力センサの圧力測定精度を表す指標として一般に使用されるリニアリティ、ヒステリシス、安定性、繰り返し性などのすべての評価項目において、インライン圧力センサP 1は内部圧力センサ7を上回る精度を有している。

- 内部圧力センサ7およびインライン圧力センサP 1は、圧力調整弁6の下流側
- 20 に配置されている。したがって、内部圧力センサ（第1の圧力センサ）7は、圧力調整弁6の二次側の圧力を測定してその測定値（第1の圧力値）を取得し、さらにインライン圧力センサ（第2の圧力センサ）P 1は、圧力調整弁6の二次側の圧力を測定してその測定値（第2の圧力値）を取得する。

- 図4に示すように、インライン圧力センサP 1は研磨制御部5 0にも接続され
- 25 ており、インライン圧力センサP 1によって取得された圧力現在値は研磨制御部5 0にも送られるようになっている。研磨制御部5 0は、この圧力現在値を、トップリングの圧力室P 1内の現在の圧力を示す値として使用し、圧力現在値に基づいて上述の圧力指令値を生成する。

P I D制御部 5 は、研磨装置の研磨制御部 5 0 に接続されている。研磨制御部 5 0 によって生成された圧力指令値は P I D制御部 5 に送られるようになっている。P I D制御部 5 は、圧力現在値と圧力指令値との差をなくすための補正指令値（アナログ信号）を生成し、その補正指令値をレギュレータ制御部 8 に送る。

- 5 レギュレータ制御部 8 は、内部圧力センサ 7 から送られてくる圧力値と補正指令値との差をなくすように給気用電磁弁 1 1 および排気用電磁弁 1 2 の動作を制御する。

- パイロット室 1 4 内のパイロット空気は、パイロット弁 1 0 の弁体 1 5 を作動させ、これにより気体（空気、窒素など）の圧力が調整される。パイロット弁 1 0 10 の下流側の気体の圧力は内部圧力センサ 7 により測定され、さらに内部圧力センサ 7 の下流側に配置されたインライン圧力センサ P 1 により測定される。内部圧力センサ 7 により取得された圧力現在値はレギュレータ制御部 8 にフィードバックされ、インライン圧力センサ P 1 により取得された圧力現在値は P I D制御部 5 にフィードバックされる。すなわち、圧力制御装置 1 は、二重ループ制御構造を有している。
- 15

- 図 5 は、圧力制御装置 1 の制御フローを示す図である。研磨装置の研磨制御部 5 0 にて生成された圧力指令値 M 1 は P I D制御部 5 に入力され、インライン圧力センサ P 1 により取得された圧力現在値（第 2 の圧力値）N 2 も P I D制御部 5 に入力される。P I D制御部 5 は、P I D演算を行って、圧力指令値 M 1 と圧力現在値 N 2 との差をなくすための補正指令値 M 2 を生成する。この補正指令値 M 2 は電空レギュレータ R 1 のレギュレータ制御部 8 に送られる。
- 20

- レギュレータ制御部 8 は、補正指令値 M 2 と内部圧力センサ 7 によって取得された圧力現在値（第 1 の圧力値）N 1 との差とを比較し、圧力現在値 N 1 が補正指令値 M 2 に等しくなるまで、電磁弁 1 1, 1 2 の操作および圧力現在値 N 1 の取得を繰り返す（第 1 のループ制御）。圧力現在値 N 1 が補正指令値 M 2 に等しい場合は、P I D制御部 5 は、圧力指令値 M 1 と圧力現在値 N 2 とを比較する。圧力現在値 N 2 が圧力指令値 M 1 と等しくない場合は、P I D制御部 5 は、圧力指令値 M 1 と圧力現在値 N 2 を再度取り込み、圧力指令値 M 1 と圧力現在値 N 2
- 25

との差をなくすための補正指令値M2を再度生成する。圧力現在値N2が圧力指令値M1に等しくなるまで、補正指令値M2の生成、第1のループ制御、および圧力現在値N2の取得が繰り返される（第2のループ制御）。第1のループ制御における圧力現在値N1のサンプリングタイムは、第2のループ制御における圧力現在値N2のサンプリングタイムよりも短いことが好ましい。

圧力指令値M1は研磨制御部50からPID制御部5に入力される。この圧力指令値M1は、ウェハの研磨の進捗によって変わりうる。圧力制御装置1には、このような圧力指令値M1の変化に迅速に応答してトップリング30の圧力室C1～C6内の圧力を変化させることが必要とされる。加えて、圧力制御装置1には、圧力室C1～C6内の圧力を変化させた後にその圧力を安定させることも必要とされる。

そこで、圧力指令値M1の変化に迅速に応答するために、圧力制御装置1は、圧力指令値M1が変化したとき、PID制御部5のPID動作を停止させ、レギュレータ制御部8のみを動作させる。図6は、PID制御部5が動作せず、レギュレータ制御部8のみが動作しているときの圧力制御装置1の制御フローを示す図である。圧力指令値M1が変化した直後は、図6に示すように、第1のループ制御のみが動作して圧力を調整する。第2のループ制御は動作しないので、圧力室C1～C6内の圧力は圧力指令値M1の変化に速やかに追従して変化する。圧力指令値M1が変化し、さらに予め定められた遅延時間が経過した後は、第1のループ制御および第2のループ制御の両方が動作して圧力が制御される。したがって、圧力室C1～C6内の圧力が安定する。

図7は、研磨制御部50から入力される圧力指令値の変化に従って変化する圧力現在値（第2の圧力値）N2を示すグラフである。図7に示すように、時点t1からPID制御開始点t3まで、PID制御部5は補正指令値M2の生成を停止する。時点t1は、圧力指令値M1がSV1からSV2に変化した時点であり、PID制御開始点t3は、上述した遅延時間（符号DTで示される）が経過した時点である。PID制御部5が補正指令値M2の生成を停止している間、レギュレータ制御部8は、圧力指令値M1と圧力現在値（第1の圧力値）N1との差が

なくなるように圧力調整弁 6 の動作を制御する。したがって、圧力指令値 $M1$ が変化した時点 $t1$ から PID 制御開始点 $t3$ まで、圧力調整弁 6 の二次側圧力は、レギュレータ制御部 8 によって制御される。

遅延時間 DT は、圧力指令値 $M1$ が変化した後に最初に所定の条件が満たされたときに始まる。この所定の条件は、変化した圧力指令値 $M1$ からの圧力現在値（第 2 の圧力値） $N2$ の偏差が所定の範囲（ $-E \sim +E$ ）内にあることである。図 7 に示すグラフでは、時点 $t2$ が遅延時間 DT の始点である。この時点 $t2$ では、変化した圧力指令値 $M1$ からの圧力現在値 $N2$ の偏差は所定の範囲（ $-E \sim +E$ ）内にある。したがって、時点 $t2$ は、圧力指令値 $M1$ が変化した後に初めて上記所定の条件が満たされた時点である。

図 7 の時点 $t3$ は、予め設定された遅延時間 DT が終了した（経過した）時点である。この時点 $t3$ が上述した PID 制御開始点である。この PID 制御開始点 $t3$ で、 PID 制御部 5 は、補正指令値 $M2$ の生成を開始する。したがって、 PID 制御開始点 $t3$ 以降では、レギュレータ制御部 8 は、補正指令値 $M2$ と圧力現在値 $N1$ との差がなくなるように圧力調整弁 6 の動作を制御する。すなわち、 PID 制御開始点 $t3$ 以降では、第 1 のループ制御と第 2 のループ制御が同時に実行される。

図 7 の時点 $t4$ は、圧力指令値 $M1$ がさらに $SV2$ から $SV3$ に変化した時点である。この時点 $t4$ では、圧力指令値 $M1$ が変化すると同時に上述した所定の条件が満たされる。すなわち、圧力指令値 $M1$ が変化したとき、変化した圧力指令値 $M1$ からの圧力現在値（第 2 の圧力値） $N2$ の偏差が所定の範囲（ $-E \sim +E$ ）内にある。したがって、遅延時間 DT は時点 $t4$ で始まり、時点 $t5$ で終わる。この時点 $t5$ は上述した PID 制御開始点である。この PID 制御開始点 $t5$ で、 PID 制御部 5 は、補正指令値 $M2$ の生成を再び開始する。 PID 制御開始点 $t5$ 以降では、レギュレータ制御部 8 は、補正指令値 $M2$ と圧力現在値 $N1$ との差がなくなるように圧力調整弁 6 の動作を制御する。

次に、このように構成された圧力制御装置 1 の評価結果について説明する。上記構成の圧力制御装置 1 の評価を、リニアリティ、ヒステリシス、安定性、およ

び繰り返し性の4項目について実施した。図8 Aおよび図8 Bは、リニアリティ評価およびヒステリシス評価を説明する図である。リニアリティ評価は次のようにして実施した。図8 Aに示すように、気体の圧力を0から500 hPaに直線的に上昇させ、その後0 hPaに直線的に減少させ、その間インライン圧力センサP1によって気体の圧力を測定した。

図8 Bは、気体の圧力を0 hPa→500 hPa→0 hPaと直線的に変化させたときにインライン圧力センサP1によって測定された圧力の値（センサ出力値）を示すグラフである。図8 Bに示す理想直線は、気体の圧力を直線的に変化させたときに、理想的な圧力センサの出力値によって描かれる理想的な直線である。リニアリティは、理想直線上の理想値とインライン圧力センサP1の対応する出力値との差の最大値である。ヒステリシスは、圧力上昇時のセンサ出力値と圧力減少時のセンサ出力値との差の最大値である。

図9 Aおよび図9 Bは、安定性評価を説明する図である。安定性評価は次のようにして実施した。図9 Aに示すように、気体の圧力を250 hPaに2時間維持し、その間インライン圧力センサP1によって気体の圧力を測定した。

図9 Bは、250 hPaに維持された気体の圧力を2時間測定したときのインライン圧力センサP1の出力値を示すグラフである。図9 Bに示すように、気体の圧力は一定であるが、インライン圧力センサP1の出力値は僅かに変動する。安定性は、圧力一定に維持された気体の圧力を所定時間測定したときのインライン圧力センサP1の出力値の最大値と最小値との差である。

図10 Aおよび図10 Bは、繰り返し性評価を説明する図である。繰り返し性評価は次のようにして実施した。図10 Aに示すように、気体の圧力を0 hPaと250 hPaとの間で所定の時間間隔で切り替え、その間インライン圧力センサP1によって気体の圧力を測定した。

図10 Bは、気体の圧力を0 hPaと250 hPaとの間で定期的に切り替えたときにインライン圧力センサP1によって測定された圧力の値（センサ出力値）を示すグラフである。図10 Bに示すように、繰り返し性評価は、圧力を0 hPaと所定の値との間で繰り返し切り替え、圧力が上記所定の値にあるときに

取得されたセンサ出力値の平均値である。

評価項目に、以下に説明する温度特性評価を含ませてもよい。図11Aおよび図11Bは、温度特性評価を説明する図である。温度特性評価は次のようにして実施される。図11Aに示すように、圧力250hPaに維持した気体の温度を
5 25度から80度に上昇させ、さらに25度に低下させ、その間インライン圧力センサP1によって気体の圧力が測定される。

図11Bは、気体の温度を25度から80度に上昇させ、さらに25度に低下させたときにインライン圧力センサP1によって測定された圧力の値（センサ出力値）を示すグラフである。図11Bに示すように、気体の圧力は一定であるが、
10 センサ出力値は温度によって僅かに変動する。温度特性は、一定圧力の気体の温度を変化させたときのセンサ出力値の最大値と最小値との差である。

図12は、図16に示す従来の圧力制御装置の評価結果と、図4に示す圧力制御装置の評価結果を示す図である。図12に示す総合評価点数は、リニアリティ、ヒステリシス、安定性、および繰り返し性の各評価項目の点数のうち最も悪い数
15 値（最も大きな数値）を合計した数であり、点数が小さいほど測定精度が高いことを示している。図12から分かるように、すべての評価項目において、本実施形態に係る圧力制御装置は、従来の圧力制御装置を上回っている。したがって、本発明に係る圧力制御装置は、トップリングの圧力室内の圧力を正確に制御することができる。

20 インライン圧力センサP1は、上述したように高精度の圧力センサではあるが、何らの原因によりインライン圧力センサP1の出力値が正しい値からずれることがある。このような場合には、インライン圧力センサP1の較正が行われる。インライン圧力センサP1の較正は、インライン圧力センサP1よりもさらに高精度の圧力センサ（以下、超高精度圧力センサという）を用いて行われる。超高精
25 度圧力センサはインライン圧力センサP1に接続され、この状態で、気体の圧力を直線的に変化させる。気体の圧力は、超高精度圧力センサおよびインライン圧力センサP1により同時に測定され、これら圧力センサの出力値はPID制御部5に送られる。

P I D制御部 5 は、予め定められた複数の圧力値での超高精度圧力センサの出力値とインライン圧力センサ P 1 の出力値とを比較し、複数の圧力値での出力値間の差を決定する。P I D制御部 5 は、さらに、上記複数の圧力値での出力値間の差をなくすための変換式を生成する。この変換式は、インライン圧力センサ P 1 の出力値を超高精度圧力センサの対応する出力値に変換するための式である。言い換えれば、変換式は、誤差を含むインライン圧力センサ P 1 の出力値を正しい出力値に補正する補正式である。

図 1 3 は、変換式を表す図である。図 1 3 において、横軸は、インライン圧力センサ P 1 の出力値（すなわち、補正前のセンサ出力値）を表し、縦軸は、超高精度圧力センサの出力値（すなわち、補正後のセンサ出力値）を表している。インライン圧力センサ P 1 の出力値を補正するための変換式は、インライン圧力センサ P 1 の出力値の関数として表され、図 1 3 に示すように曲線グラフまたは折れ線グラフとして描かれる。インライン圧力センサ P 1 の出力値を変換式に入力することにより、補正されたセンサ出力値を得ることができる。

図 1 4 A はインライン圧力センサ P 1 の出力値が補正される前のリニアリティおよびヒステリシスのグラフを示す図であり、図 1 4 B はインライン圧力センサ P 1 の出力値が補正された後のリニアリティおよびヒステリシスのグラフを示す図である。図 1 4 A のグラフと図 1 4 B のグラフとから分かるように、変換式によってリニアリティが改善される。したがって、補正されたセンサ出力値に基づいて、より正確な圧力制御が可能になる。

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. 流体供給源から供給される流体の圧力を調整する圧力調整弁と、
前記圧力調整弁によって調整された圧力を測定する第1の圧力センサと、
5 前記第1の圧力センサの下流側に配置された第2の圧力センサと、
外部から入力された圧力指令値と、前記第2の圧力センサによって測定された
前記流体の第2の圧力値との差をなくすための補正指令値を生成するP I D制御
部と、
前記圧力指令値および前記補正指令値のうちのいずれか一方と、前記第1の圧
10 力センサによって測定された前記流体の第1の圧力値との差がなくなるように前
記圧力調整弁の動作を制御するレギュレータ制御部とを備え、
前記P I D制御部は、前記圧力指令値が変化した時点からP I D制御開始点ま
で、前記補正指令値の生成を停止し、前記P I D制御開始点後は、前記補正指令
値を生成するように構成され、
15 前記レギュレータ制御部は、前記圧力指令値が変化した時点から前記P I D制
御開始点まで、前記圧力指令値と前記第1の圧力値との差がなくなるように前記
圧力調整弁の動作を制御し、前記P I D制御開始点後は、前記補正指令値と前記
第1の圧力値との差がなくなるように前記圧力調整弁の動作を制御するように構
成され、
20 前記P I D制御開始点は、予め設定された遅延時間が経過した時点であることを
特徴とする圧力制御装置。

2. 前記遅延時間は、前記圧力指令値が変化した後に最初に所定の条件が満た
されたときに始まり、前記所定の条件は、前記変化した圧力指令値からの前記第
25 2の圧力値の偏差が所定の範囲内にあることであることを特徴とする請求項1に
記載の圧力制御装置。

3. 前記第2の圧力センサは、リニアリティ、ヒステリシス、安定性、および

繰返し性を含む評価項目に関して、前記第 1 の圧力センサよりも高い圧力測定精度を有していることを特徴とする請求項 1 に記載の圧力制御装置。

4. 研磨パッドを支持する研磨テーブルと、
- 5 基板を前記研磨テーブル上の前記研磨パッドに押し付けるトップリングと、
前記トップリングの動作を制御する研磨制御部と、
前記トップリングに接続された圧力制御装置とを備え、
前記トップリングは、前記基板を前記研磨パッドに対して押し付けるための圧力室を備えた研磨装置であって、
- 10 前記圧力室内の圧力は、前記圧力制御装置によって調整され、
前記圧力制御装置は、
流体供給源から供給される流体の圧力を調整する圧力調整弁と、
前記圧力調整弁によって調整された圧力を測定する第 1 の圧力センサと、
前記第 1 の圧力センサの下流側に配置された第 2 の圧力センサと、
- 15 前記研磨制御部から入力された圧力指令値と、前記第 2 の圧力センサによって測定された前記流体の第 2 の圧力値との差をなくするための補正指令値を生成する P I D 制御部と、
前記圧力指令値および前記補正指令値のうちのいずれか一方と、前記第 1 の圧力センサによって測定された前記流体の第 1 の圧力値との差がなくなるように
- 20 前記圧力調整弁の動作を制御するレギュレータ制御部とを備え、
前記 P I D 制御部は、前記圧力指令値が変化した時点から P I D 制御開始点まで、前記補正指令値の生成を停止し、前記 P I D 制御開始点後は、前記補正指令値を生成するように構成され、
前記レギュレータ制御部は、前記圧力指令値が変化した時点から前記 P I D 制御開始点まで、前記圧力指令値と前記第 1 の圧力値との差がなくなるように前記圧力調整弁の動作を制御し、前記 P I D 制御開始点後は、前記補正指令値と前記第 1 の圧力値との差がなくなるように前記圧力調整弁の動作を制御するように構成され、
- 25

前記P I D制御開始点は、予め設定された遅延時間が経過した時点であることを特徴とする研磨装置。

5. 前記遅延時間は、前記圧力指令値が変化した後に最初に所定の条件が満たされたときに始まり、前記所定の条件は、前記変化した圧力指令値からの前記第2の圧力値の偏差が所定の範囲内にあることであることを特徴とする請求項4に記載の研磨装置。

6. 前記第2の圧力センサは、リニアリティ、ヒステリシス、安定性、および繰り返し性を含む評価項目に関して、前記第1の圧力センサよりも高い圧力測定精度を有していることを特徴とする請求項4に記載の研磨装置。