

過熱蒸気生成方法および過熱蒸気生成装置

発明の背景

発明の技術分野

- 5 [0001] 本発明は、ウェーハなどの基板を研磨するための研磨パッドの表面温度の調節に使用される過熱蒸気を生成する技術に関する。

関連技術の記載

- 10 [0002] CMP（Chemical Mechanical Polishing）装置は、半導体デバイスの製造において、ウェーハの表面を研磨する工程に使用される。CMP装置は、膜を有するウェーハを研磨ヘッドにより回転させ、さらに回転する研磨テーブル上の研磨パッドにウェーハを研磨ヘッドにより押し付けて、ウェーハの表面を構成する膜を研磨する。研磨中、研磨パッドには研磨液（スラリー）が供給される。ウェーハの膜は、研磨液の化学的作用と、研磨液に含まれる砥粒および／または研磨パッドの機械的作用により平坦化される。
- 15 [0003] ウェーハの研磨レートは、ウェーハの研磨パッドに対する研磨荷重のみならず、研磨パッドの表面温度にも依存する。これは、ウェーハの膜に対する研磨液の化学的作用が温度に依存するからである。したがって、膜の適切な研磨レートを達成するために、ウェーハ研磨中の研磨パッドの表面温度を最適に制御することが重要とされる。
- 20 [0004] そこで、研磨パッドの表面温度を調節するためのパッド温度調節装置が従来から使用されている（例えば、特許文献1参照）。パッド温度調節装置は、過熱蒸気および冷却流体を研磨パッドの表面に導くことで、ウェーハ研磨中の研磨パッドの表面温度を所望の温度に調節するように構成されている。

【先行技術文献】

- 25 【特許文献】

[0005] 【特許文献1】 日本国特開2022-170648号公報

[0006] 過熱蒸気は、ヒータにより水を加熱して飽和蒸気を生成し、さらに飽和蒸気を加熱することにより生成される。すなわち、液相である水はヒータにより加熱されて気化し、しばらくの間は液体と気体（飽和蒸気）が混在する。液体と

気体の混合物が存在している間は、ヒータからの熱エネルギーは相変化に費やされ、温度変化は生じない。この状態の熱エネルギーは潜熱である。液体と気体の混合物のエンタルピーが臨界点を超えると、液体のすべては蒸気になる。この蒸気がさらに加熱されることで、過熱蒸気が生成される。この状態の熱エネルギーは顕熱である。

[0007] 水から過熱蒸気を生成するのに要する時間は、水の量およびヒータの発熱温度に依存する。上述の通り、水は相変化を経て過熱蒸気に変化するため、水から過熱蒸気を生成するにはある程度の時間がかかる。ヒータの発熱温度を上げると、水から過熱蒸気を生成する時間を短くすることは可能である。しかしながら、潜熱から顕熱に移行した直後に、過熱蒸気は高温のヒータによって急激に加熱される。過度に高温となった過熱蒸気は、蒸気配管や蒸気ノズルなどを熱変形させるおそれがある。その一方で、ヒータの発熱温度を下げると、水から過熱蒸気が生成されるのに長い時間がかかる。

発明の要旨

[0008] 本発明は、過熱蒸気を速やかに生成でき、かつ過熱蒸気が過度に高温となることを防止することができる過熱蒸気生成方法および過熱蒸気生成装置を提供する。

[0009] 一態様では、基板を研磨するための研磨パッドの表面温度の調節に使用される過熱蒸気を生成する過熱蒸気生成方法であって、ヒータを備えた蒸気生成器により、水を加熱して蒸気を生成し、前記蒸気の温度を蒸気温度測定器により測定し、フィードバック制御部により、前記蒸気の温度の測定値と、過熱蒸気の目標温度との差である温度差を最小にするための前記ヒータの設定温度を示すヒータ温度指令値を決定することを含み、前記フィードバック制御部によるヒータ温度指令値を決定することは、第1時間区間に設定された第1ヒータ温度許容範囲内で、前記温度差を最小にするための前記ヒータ温度指令値を決定し、前記第1時間区間内での前記蒸気の温度の測定値が、前記過熱蒸気の前記目標温度よりも小さく、かつ前記温度差が第1しきい値よりも大きいときは、前記第1ヒータ温度許容範囲を所定の上昇シフト量だけ上昇させて第2ヒータ温度許容範囲を決

定し、第 2 時間区間内に設定された前記第 2 ヒータ温度許容範囲内で、前記温度差を最小にするための前記ヒータ温度指令値を決定することを含む、過熱蒸気生成方法が提供される。

5 [0010] 一態様では、前記第 1 時間区間内での前記蒸気の温度の測定値は、前記第 1 時間区間内で前記蒸気温度測定器により測定された前記蒸気の温度の平均である。

一態様では、前記フィードバック制御部によるヒータ温度指令値を決定することは、第 3 時間区間に設定された第 3 ヒータ温度許容範囲内で、前記温度差を最小にするための前記ヒータ温度指令値を決定し、前記第 3 時間区間内での前記蒸
10 気の温度の測定値が、前記過熱蒸気の前記目標温度よりも大きく、かつ前記温度差が第 2 しきい値よりも大きいときは、前記第 3 ヒータ温度許容範囲を所定の下
降シフト量だけ下降させて第 4 ヒータ温度許容範囲を決定し、第 4 時間区間内に
設定された前記第 4 ヒータ温度許容範囲内で、前記温度差を最小にするための前
記ヒータ温度指令値を決定することをさらに含む。

15 [0011]一態様では、水を加熱して蒸気を生成するヒータを備えた蒸気生成器と、
前記蒸気の温度を測定する蒸気温度測定器と、前記蒸気の温度の測定値と、過熱
蒸気の目標温度との差である温度差を最小にするための前記ヒータの設定温度を
示すヒータ温度指令値を決定するフィードバック制御部を備え、前記フィードバ
ック制御部は、第 1 時間区間に設定された第 1 ヒータ温度許容範囲内で、前記温
20 度差を最小にするための前記ヒータ温度指令値を決定し、前記第 1 時間区間内
での前記蒸気の温度の測定値が、前記過熱蒸気の前記目標温度よりも小さく、かつ
前記温度差が第 1 しきい値よりも大きいときは、前記第 1 ヒータ温度許容範囲を
所定の上昇シフト量だけ上昇させて第 2 ヒータ温度許容範囲を決定し、第 2 時間
区間内に設定された前記第 2 ヒータ温度許容範囲内で、前記温度差を最小にする
25 ための前記ヒータ温度指令値を決定するように構成されている、過熱蒸気生成装
置が提供される。

[0012] 一態様では、前記フィードバック制御部は、前記第 1 時間区間内で前記
蒸気温度測定器により測定された前記蒸気の温度の平均を算定し、前記第 1 時間
区間内での前記蒸気の温度の測定値として前記平均を使用するように構成されて

いる。

一態様では、前記フィードバック制御部は、第3時間区間に設定された第3ヒータ温度許容範囲内で、前記温度差を最小にするための前記ヒータ温度指令値を決定し、前記第3時間区間内での前記蒸気の温度の測定値が、前記過熱蒸気の前
5 記目標温度よりも大きく、かつ前記温度差が第2しきい値よりも大きいときは、前記第3ヒータ温度許容範囲を所定の下降シフト量だけ下降させて第4ヒータ温度許容範囲を決定し、第4時間区間内に設定された前記第4ヒータ温度許容範囲内で、前記温度差を最小にするための前記ヒータ温度指令値を決定するように構成されている。

- 10 [0013] ヒータにより水を加熱して過熱蒸気を生成する過程では、フィードバック制御部は、蒸気の温度の測定値を、過熱蒸気の目標温度に近づけるために、ヒータの温度を上昇させるヒータ温度指令値を決定する。第1時間区間では、ヒータ温度指令値は、第1ヒータ温度許容範囲内に制限される。したがって、蒸気の温度の測定値と、過熱蒸気の目標温度との差が大きすぎるときであっても、フィ
15 ードバック制御部は、第1ヒータ温度許容範囲の上限値を超えないヒータ温度指令値を生成する。このような動作は、ヒータの過度な発熱を抑制し、ヒータから与えられた熱エネルギーが潜熱から顕熱に移行したときに、ヒータが過熱蒸気を過度に加熱してしまうことを防止できる。

- [0014] また、第1時間区間内での蒸気の温度の測定値が、過熱蒸気の目標温度
20 よりも小さく、かつ温度差が第1しきい値よりも大きいときは、フィードバック制御部は、第1ヒータ温度許容範囲を所定の上昇シフト量だけ上昇させて第2ヒータ温度許容範囲を決定する。第2時間区間では、第1ヒータ温度許容範囲よりも高い第2ヒータ温度許容範囲内のヒータ温度指令値が決定される。フィードバック制御部は、第1時間区間で生成されたヒータ温度指令値よりも高いヒータ温
25 度指令値を生成することができる。したがって、蒸気生成器は、蒸気の温度を、過熱蒸気の目標温度に速やかに近づけることができる。結果として、蒸気生成器は過熱蒸気を速やかに生成することができる。

図面の簡単な説明

[0015] 図 1 は、研磨装置の一実施形態を示す模式図である。

図 2 は、蒸気生成器の一実施形態を示す断面図である。

図 3 は、水から飽和蒸気を経て過熱蒸気を生成する過程におけるフィードバック制御部の動作の一実施形態を説明するためのグラフである。

図 4 は、研磨装置の他の実施形態を示す模式図である。

実施形態の説明

[0016] 以下、本発明の実施形態について図面を参照して説明する。

10 図 1 は、研磨装置の一実施形態を示す模式図である。研磨装置は、研磨パッド 3 を支持する研磨テーブル 2 と、基板の一例であるウェーハ W を研磨パッド 3 に押し付ける研磨ヘッド 1 と、研磨テーブル 2 を回転させるテーブル回転モータ 6 と、研磨液（例えば、砥粒を含むスラリー）を研磨パッド 3 上に供給するための研磨液供給ノズル 4 を備えている。研磨パッド 3 の表面（上面）は、ウェーハ W
15 を研磨する研磨面 3 a を構成する。基板の具体例としては、半導体デバイスの製造に使用されるウェーハ、配線基板、角基板などが挙げられる。

[0017] ウェーハ W の研磨は次のようにして行われる。研磨されるウェーハ W は、研磨ヘッド 1 によって回転され、その一方で、研磨パッド 3 は、研磨テーブル 2 とともにテーブル回転モータ 6 によって回転される。この状態で、研磨液が研
20 磨液供給ノズル 4 から研磨パッド 3 の研磨面 3 a に供給され、さらにウェーハ W の表面は、研磨ヘッド 1 によって研磨パッド 3 の研磨面 3 a に対して押し付けられる。ウェーハ W の表面は、研磨液の化学的作用と、研磨液に含まれる砥粒および／または研磨パッド 3 の機械的作用により平坦化される。

[0018] 研磨装置は、研磨パッド 3 の研磨面 3 a の温度（すなわち、研磨パッド
25 3 の表面温度）を調節するパッド温度調節システム 10 をさらに備えている。パッド温度調節システム 10 は、研磨パッド 3 の研磨面 3 a を加熱するパッド加熱器 24 と、研磨パッド 3 の研磨面 3 a を冷却するパッド冷却器 25 を備えている。パッド加熱器 24 およびパッド冷却器 25 は、研磨テーブル 2 および研磨パッド 3 の上方に位置しており、研磨パッド 3 の研磨面 3 a に対向して配置されている。

パッド加熱器 2 4 およびパッド冷却器 2 5 は、研磨パッド 3 の研磨面 3 a とは非接触である。

[0019] パッド加熱器 2 4 には、加熱流体としての過熱蒸気が供給される。過熱蒸気は、水から生成された飽和蒸気をさらに加熱することで生成される。パッド冷却器 2 5 には冷却流体が供給される。冷却流体の例としては、常温のガス（例えば、窒素、アルゴンなどの不活性ガス、または空気）である。しかしながら、冷却流体はこの例に限定されない。冷却流体は、常温よりも低い温度まで冷却されたガスでもよいし、研磨パッド 3 の研磨面 3 a の目標温度よりも低い温度のガスでもよい。

10 [0020] パッド温度調節システム 1 0 は、パッド加熱器 2 4 に過熱蒸気を供給する過熱蒸気生成装置 3 0 をさらに備えている。過熱蒸気生成装置 3 0 の一実施形態は、水を加熱して蒸気を生成するヒータ 3 2 を備えた蒸気生成器 3 3 と、蒸気生成器 3 3 により生成された蒸気の温度を測定する蒸気温度測定器 3 5 と、蒸気の温度の測定値と、過熱蒸気の目標温度との差である温度差を最小にするための
15 ヒータ 3 2 の設定温度を示すヒータ温度指令値を決定するフィードバック制御部 3 7 を備えている。蒸気生成器 3 3 は、水供給ライン 3 9 に接続されており、水供給ライン 3 9 を通じて水が蒸気生成器 3 3 に供給される。本実施形態では、ヒータ 3 2 として電気ヒータが使用されている。蒸気温度測定器 3 5 の具体的構成は特に限定されず、接触式温度測定器または非接触式温度測定器が使用される。

20 [0021] 過熱蒸気生成装置 3 0 は、ヒータ 3 2 に電力線 4 1 により接続された電圧コントローラ 4 0 と、ヒータ 3 2 の温度を測定するヒータ温度測定器 4 3 と、ヒータ 3 2 の温度の測定値およびヒータ温度指令値に基づいてヒータ 3 2 の発熱温度を制御するヒータ制御部 4 4 を備えている。ヒータ温度測定器 4 3 は、ヒータ制御部 4 4 に電氣的に接続されおり、ヒータ 3 2 の温度の測定値はヒータ温度
25 測定器 4 3 からヒータ制御部 4 4 に送信される。ヒータ制御部 4 4 の一実施形態は、ヒータ 3 2 の温度の測定値と、ヒータ温度指令値に示されるヒータ 3 2 の設定温度との差を最小とするための P I D 動作を実行する P I D 制御部である。ヒータ温度測定器 4 3 の具体的構成は特に限定されず、接触式温度測定器または非接触式温度測定器が使用される。

[0022] ヒータ制御部 44 は、プログラムが格納された記憶装置 44a 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 44b を備えている。ヒータ制御部 44 は、少なくとも 1 台のコンピュータ（例えばプログラマブルロジックコントローラ）から構成される。記憶装置 44a は、ランダムアクセスメモリ（RAM）などの主記憶装置と、ハードディスクドライブ（HDD）、ソリッドステートドライブ（SSD）などの補助記憶装置を備えている。演算装置 44b 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、ヒータ制御部 44 の具体的構成はこれらの例に限定されない。

10 [0023] ヒータ制御部 44 は、フィードバック制御部 37 から送信されたヒータ温度指令値に示されるヒータ 32 の設定温度を実現するための電圧指令値を生成し、電圧指令値を電圧コントローラ 40 に送る。より具体的には、ヒータ制御部 44 は、ヒータ温度測定器 43 によって測定されたヒータ 32 の温度と、ヒータ 32 の上記設定温度との差を最小にするための電圧指令値を生成し、電圧コントローラ 40 に電圧指令値を送信する。電圧コントローラ 40 は、電圧指令値に示される電圧をヒータ 32 に印加し、これによりヒータ 32 は、ヒータ温度指令値に示されるヒータ 32 の設定温度で発熱することができる。

[0024] 図 2 は、蒸気生成器 33 の一実施形態を示す断面図である。蒸気生成器 33 は、ヒータハウジング 50 と、ヒータハウジング 50 内に配置された断熱材 51 と、断熱材 51 に囲まれたヒータ 32 と、ヒータ 32 に囲まれた加熱室 53 と、加熱室 53 に連通する入口ポート 55 および出口ポート 56 を備えている。入口ポート 55 は水供給ライン 39 に接続されている。断熱材 51 の全体は、ヒータハウジング 50 によって覆われている。ヒータ 32 は、加熱室 53 の壁面と接触している。

25 [0025] 水は、入口ポート 55 を通じて加熱室 53 内に流入する。加熱室 53 内の水は、ヒータ 32 に接している加熱室 53 の壁面の熱により加熱されて、飽和蒸気となる。さらに、飽和蒸気はヒータ 32 に接している加熱室 53 の壁面の熱により加熱されて、過熱蒸気となる。過熱蒸気は、出口ポート 56 を通じて加熱室 53 から流出する。ヒータ 32 の温度を測定するヒータ温度測定器 43 は、ヒ

ータ 3 2 に接触している。

[0026] 図 1 に戻り、パッド温度調節システム 1 0 は、蒸気生成器 3 3 の出口ポート 5 6 （図 2 参照）からパッド加熱器 2 4 まで延びる過熱蒸気供給ライン 6 1 と、過熱蒸気供給ライン 6 1 を流れる過熱蒸気の流量を制御する加熱流量制御弁 6 2 と、冷却流体をパッド冷却器 2 5 に供給する冷却流体供給ライン 6 4 と、冷却流体供給ライン 6 4 を流れる冷却流体の流量を制御する冷却流量制御弁 6 5 と、加熱流量制御弁 6 2 および冷却流量制御弁 6 5 の動作を制御するバルブ制御部 6 7 をさらに備えている。加熱流量制御弁 6 2 および冷却流量制御弁 6 5 は、電動弁、電磁弁、エアオペレート弁などのアクチュエータ駆動弁である。

10 [0027] 加熱流量制御弁 6 2 および冷却流量制御弁 6 5 は、バルブ制御部 6 7 に電氣的に接続されており、加熱流量制御弁 6 2 および冷却流量制御弁 6 5 の動作（すなわち過熱蒸気供給ライン 6 1 を流れる過熱蒸気の流量および冷却流体供給ライン 6 4 を流れる冷却流体の流量）は、バルブ制御部 6 7 によって制御される。バルブ制御部 6 7 は、プログラムが格納された記憶装置と、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を備えたコンピュータ（例えば、プログラマブルロジックコントローラ）から構成されている。

[0028] 過熱蒸気は、パッド加熱器 2 4 の噴射口 2 4 a から研磨パッド 3 の研磨面 3 a に放出され、これにより研磨パッド 3 の研磨面 3 a の温度は上昇する。冷却流体は、パッド冷却器 2 5 の噴射口（図示せず）から研磨パッド 3 の研磨面 3 a に放出され、これにより研磨パッド 3 の研磨面 3 a の温度は低下する。バルブ制御部 6 7 は、加熱流量制御弁 6 2 および冷却流量制御弁 6 5 を操作することで、パッド加熱器 2 4 およびパッド冷却器 2 5 から研磨パッド 3 の研磨面 3 a に供給される過熱蒸気および冷却流体の流量を調節し、これにより研磨パッド 3 の研磨面 3 a の温度を制御することができる。

25 [0029] 図示しないが、一実施形態では、パッド温度調節システム 1 0 は、パッド冷却器 2 5 に隣接された吸引ノズルをさらに備えてもよい。吸引ノズルは、研磨パッド 3 の研磨面 3 a に対向する吸引口を有する。吸引ノズルは、真空ポンプなどの真空源に連結される。吸引ノズルから吸引される空気の量を増減させると、研磨面 3 a 上の研磨液から奪われる気化熱の量に変化し、結果として、研磨面 3

a の温度を調整することができる。

[0030] 次に、フィードバック制御部 37 の動作について詳細に説明する。フィードバック制御部 37 は、プログラムが格納された記憶装置 37 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演算装置 37 b を備えている。フィードバック制御部 37 は、少なくとも 1 台のコンピュータ（例えばプログラマブルロジックコントローラ）から構成される。記憶装置 37 a は、ランダムアクセスメモリ（RAM）などの主記憶装置と、ハードディスクドライブ（HDD）、ソリッドステートドライブ（SSD）などの補助記憶装置を備えている。演算装置 37 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、フィードバック制御部 37 の具体的構成はこれらの例に限定されない。

[0031] フィードバック制御部 37 の一実施形態は、PID 動作に従ったフィードバック制御を実行する PID 制御部である。フィードバック制御部 37 は、蒸気温度測定器 35 によって測定された蒸気の温度と、過熱蒸気の目標温度との差を最小とするためのヒータ 32 の設定温度を示すヒータ温度指令値を決定（生成）するように構成されている。蒸気温度測定器 35 は、過熱蒸気供給ライン 61 に取り付けられており、過熱蒸気供給ライン 61 を流れる蒸気の温度を測定する。蒸気温度測定器 35 は、フィードバック制御部 37 に電氣的に接続されており、蒸気の温度の測定値は、蒸気温度測定器 35 からフィードバック制御部 37 に送信される。

[0032] 蒸気温度測定器 35 は、過熱蒸気のユースポイントである研磨パッド 3 に近い位置に配置されている。一実施形態では、蒸気温度測定器 35 は、パッド加熱器 24 のすぐ上流に配置されている。例えば、蒸気温度測定器 35 は、パッド加熱器 24 の上流であって、かつ加熱流量制御弁 62 の下流に配置される。他の実施形態では、蒸気温度測定器 35 は、パッド加熱器 24 内に配置されてもよい。例えば、蒸気温度測定器 35 は、パッド加熱器 24 の噴射口 24 a の近傍に配置されてもよい。このように、蒸気温度測定器 35 は、過熱蒸気のユースポイントである研磨パッド 3 に近い位置に配置されているので、蒸気温度測定器 35 は研磨パッド 3 に放出される直前の過熱蒸気の温度を測定することができる。

[0033] フィードバック制御部 37 は、蒸気生成器 33 によって生成された蒸気の温度を所定の時間間隔で監視し、各時間区間での蒸気の温度の測定値と、過熱蒸気の目標温度との差を最小にするための P I D 動作を実行する。蒸気生成器 33 によって生成された蒸気が飽和蒸気である場合は、飽和蒸気の温度と過熱蒸気

5 の目標温度との差は大きい。したがって、フィードバック制御部 37 は、ヒータ 32 の設定温度（発熱温度）を示すヒータ温度指令値を増加させる。その結果、蒸気生成器 33 によって生成された蒸気は、やがて過熱蒸気となる。その後、フィードバック制御部 37 は、過熱蒸気の現在の温度と、過熱蒸気の目標温度との差を最小とするためのヒータ 32 の設定温度を示すヒータ温度指令値を決定する。

10 [0034] 図 3 は、水から飽和蒸気を経て過熱蒸気を生成する過程におけるフィードバック制御部 37 の動作の一実施形態を説明するためのグラフである。フィードバック制御部 37 は、時間区間 T 1, T 2, T 3, T 4, T 5 のそれぞれにおいて、蒸気生成器 33 によって生成された蒸気の温度の平均を算出する。より具体的には、フィードバック制御部 37 は、各時間区間において蒸気温度測定器 3

15 5 によって測定された蒸気の複数の温度の平均を算定する。したがって、時間区間 T 1, T 2, T 3, T 4, T 5 にそれぞれ対応する蒸気温度の平均が算定される。

[0035] 一実施形態では、時間区間 T 1, T 2, T 3, T 4, T 5 は、同じ長さ（時間幅）を持つ。図 3 に示す時間区間 T 1, T 2, T 3, T 4, T 5 は一例で

20 あり、時間区間 T 5 の後にも同じ長さの連続する複数の時間区間が続いてもよい。一実施形態では、時間区間 T 1, T 2, T 3, T 4, T 5 のそれぞれの長さは、5 秒～300 秒の範囲内である。例えば、時間区間 T 1, T 2, T 3, T 4, T 5 のそれぞれの長さは、300 秒である。時間区間 T 1, T 2, T 3, T 4, T 5 のそれぞれをある程度長くすることで、制御対象であるヒータ 32 と、蒸気の

25 温度の測定点との間の距離が長い場合であっても、各時間区間での蒸気の温度の測定値の平均に基づいて、ヒータ 32 の動作を制御することができる。一例では、ヒータ 32 と蒸気温度測定器 35 との距離は、50 mm～500 mm の範囲内である。

[0036] フィードバック制御部 37 は、各時間区間において算定された平均を、

その時間区間内での蒸気の温度の測定値として使用してフィードバック制御を実行する。例えば、時間区間 T 1 において算定された蒸気の温度の平均は、時間区間 T 1 における蒸気の温度の測定値として使用され、時間区間 T 2 において算定された蒸気の温度の平均は、時間区間 T 2 における蒸気の温度の測定値として使用される。他の時間区間 T 3 ～ T 5 においても同様である。

[0037] 各時間区間において算定された平均は、各時間区間において取得された蒸気の温度のすべての測定値の算術平均であってもよいし、あるいは各時間区間において連続的に取得された蒸気の温度の測定値の移動平均のうち、最後に算定された移動平均であってもよい。

[0038] 図 3 に示す例では、時間区間 T 1 は、水が沸騰して蒸気に変化する時間帯である。このときのヒータ 3 2 の熱エネルギーは、潜熱である。図 3 から分かるように、時間区間 T 1 内での蒸気（または水）の温度は、過熱蒸気の目標温度から大きく離れている。このような場合、P I D 制御部であるフィードバック制御部 3 7 は、ヒータ 3 2 の温度を大きく上昇させるように動作する。しかしながら、潜熱から顕熱に移行した直後に、過熱蒸気は高温のヒータ 3 2 によって急激に加熱される。過度に高温となった過熱蒸気は、過熱蒸気供給ライン 6 1 やパッド加熱器 2 4 などを熱変形させるおそれがある。

[0039] そこで、本実施形態では、時間区間 T 1 , T 2 , T 3 , T 4 , T 5 において、ヒータ温度許容範囲 R 1 , R 2 , R 3 , R 4 , R 5 がそれぞれ予め設定されている。ヒータ温度許容範囲 R 1 , R 2 , R 3 , R 4 , R 5 は、対応する時間区間 T 1 , T 2 , T 3 , T 4 , T 5 でのヒータ温度指令値の上限値および下限値を定めるものである。したがって、各時間区間内では、対応するヒータ温度許容範囲内でヒータ温度指令値（すなわちヒータ 3 2 の発熱温度）が変動しうるが、ヒータ温度指令値はそのヒータ温度許容範囲の上限値および下限値を越えることはできない。一実施形態では、ヒータ温度許容範囲 R 1 , R 2 , R 3 , R 4 , R 5 のうちの少なくとも 1 つの上限値および下限値は、0 であってもよい。

[0040] 本実施形態によれば、各時間区間内での蒸気の温度の測定値と、過熱蒸気の目標温度との差が大きすぎるときであっても、フィードバック制御部 3 7 は、各ヒータ温度許容範囲の上限値を超えないヒータ温度指令値を生成する。このよ

うな動作は、ヒータ 3 2 の過度な発熱を抑制し、ヒータ 3 2 の熱エネルギーが潜熱から顕熱に移行したときに、ヒータ 3 2 が過熱蒸気を過度に加熱してしまうことを防止できる。

5 [0041] フィードバック制御部 3 7 は、各時間区間内での蒸気の温度の測定値（平均）が、過熱蒸気の目標温度よりも小さく、かつ蒸気（または水）の温度の測定値と過熱蒸気の目標温度との差（以下、単に温度差ということがある）が第 1 しきい値よりも大きいとき、その時間区間において設定されたヒータ温度許容範囲を所定の上昇シフト量だけ上昇させて、新たなヒータ温度許容範囲を決定するように構成されている。そして、フィードバック制御部 3 7 は、次の時間区間 10 では、新たに決定されたヒータ温度許容範囲内で、上記温度差を最小にするためのヒータ温度指令値を決定するように構成されている。

[0042] より具体的には、フィードバック制御部 37 は、時間区間 T 1 に設定されたヒータ温度許容範囲 R 1 内で、蒸気（または水）の温度の測定値と過熱蒸気の目標温度との差である温度差を最小にするためのヒータ温度指令値を決定する。 15 時間区間 T 1 内での蒸気（または水）の温度の測定値が、過熱蒸気の目標温度よりも小さく、かつ前記温度差が第 1 しきい値よりも大きいときは、ヒータ温度許容範囲 R 1 を所定の上昇シフト量だけ上昇させてヒータ温度許容範囲 R 2 を決定し、ヒータ温度許容範囲 R 2 を次の時間区間 T 2 内で使用される新たなヒータ温度許容範囲に設定する。そして、フィードバック制御部 3 7 は、時間区間 T 2 に 20 設定されたヒータ温度許容範囲 R 2 内で、蒸気の温度の測定値と過熱蒸気の目標温度との差である温度差を最小にするためのヒータ温度指令値を決定する。後続の時間区間 T 3 ～ T 5 においても同様の制御動作が行われる。

[0043] 時間区間 T 2 では、ヒータ温度許容範囲 R 1 よりも高いヒータ温度許容範囲 R 2 内のヒータ温度指令値が決定される。フィードバック制御部 3 7 は、時間区間 T 1 で生成されたヒータ温度指令値よりも高いヒータ温度指令値を生成することができる。したがって、蒸気生成器 3 3 は、蒸気の温度を、過熱蒸気の目標温度に速やかに近づけることができる。結果として、蒸気生成器 3 3 は過熱蒸気を速やかに生成することができる。 25

[0044] 時間区間 T 1 内での蒸気（または水）の温度の測定値が、過熱蒸気の目

標温度よりも小さいが、前記温度差が第 1 しきい値よりも小さいときは、フィードバック制御部 37 は、ヒータ温度許容範囲 R 1 の上限値および下限値をそのまま用いて、次の時間区間 T 2 で使用されるヒータ温度許容範囲 R 2 を決定する。したがって、ヒータ温度許容範囲 R 2 の上限値および下限値は、ヒータ温度許容範囲 R 1 の上限値および下限値と同じである。

[0045] フィードバック制御部 37 は、各時間区間内での蒸気の温度の測定値（平均）が、過熱蒸気の目標温度よりも大きく、かつ蒸気の温度の測定値と過熱蒸気の目標温度との差である温度差が第 2 しきい値よりも大きいとき、その時間区間において設定されたヒータ温度許容範囲を所定の下降シフト量だけ下降させて、新たなヒータ温度許容範囲を決定するように構成されている。そして、フィードバック制御部 37 は、次の時間区間では、新たに決定されたヒータ温度許容範囲内で、上記温度差を最小にするためのヒータ温度指令値を決定するように構成されている。

[0046] より具体的には、フィードバック制御部 37 は、時間区間 T 4 に設定されたヒータ温度許容範囲 R 4 内で、蒸気（過熱蒸気）の温度の測定値と過熱蒸気の目標温度との差である温度差を最小にするためのヒータ温度指令値を決定する。時間区間 T 4 内での蒸気の温度の測定値（平均）が、過熱蒸気の目標温度よりも大きく、かつ前記温度差が第 2 しきい値よりも大きいときは、ヒータ温度許容範囲 R 4 を所定の下降シフト量だけ下降させてヒータ温度許容範囲 R 5 を決定し、ヒータ温度許容範囲 R 5 を次の時間区間 T 5 内で使用されるヒータ温度許容範囲に設定する。そして、フィードバック制御部 37 は、時間区間 T 5 に設定されたヒータ温度許容範囲 R 5 内で、蒸気（過熱蒸気）の温度の測定値と過熱蒸気の目標温度との差である温度差を最小にするためのヒータ温度指令値を決定する。

[0047] 時間区間 T 5 では、ヒータ温度許容範囲 R 4 よりも低いヒータ温度許容範囲 R 5 内のヒータ温度指令値が決定される。フィードバック制御部 37 は、時間区間 T 4 で生成されたヒータ温度指令値よりも低いヒータ温度指令値を生成することができる。したがって、蒸気生成器 33 は、蒸気（過熱蒸気）の温度を、過熱蒸気の目標温度に速やかに近づけることができる。

[0048] 第 2 しきい値は、第 1 しきい値と同じであってもよく、あるいは異なっ

てもよい。上昇シフト量と下降シフト量は、蒸気（過熱蒸気）の温度の測定値と過熱蒸気の目標温度との差である温度差に応じて可変であってもよい。

[0049] 時間区間 T 4 内での蒸気の温度の測定値が、過熱蒸気の目標温度よりも大きい、前記温度差が第 2 しきい値よりも小さいときは、フィードバック制御部 3 7 は、ヒータ温度許容範囲 R 4 の上限値および下限値をそのまま用いて、次の時間区間 T 5 で使用されるヒータ温度許容範囲 R 5 を決定する。したがって、ヒータ温度許容範囲 R 5 の上限値および下限値は、ヒータ温度許容範囲 R 4 の上限値および下限値と同じである。

[0050] 図 4 は、過熱蒸気生成装置 3 0 の他の実施形態を示す図である。特に説明しない本実施形態の構成および動作は、図 1 乃至図 3 を参照して説明した構成および動作と同じであるので、その重複する説明を省略する。図 4 に示すように、過熱蒸気生成装置 3 0 は、図 1 に示すヒータ制御部 4 4 を備えていない。代わりに、フィードバック制御部 3 7 は、図 1 に示すヒータ制御部 4 4 の機能も兼ねている。

[0051] ヒータ温度測定器 4 3 は、フィードバック制御部 3 7 に電氣的に接続されており、ヒータ 3 2 の温度の測定値は、ヒータ温度測定器 4 3 からフィードバック制御部 3 7 に送信される。フィードバック制御部 3 7 は、ヒータ温度指令値に示されるヒータ 3 2 の設定温度を実現するための電圧指令値を生成し、電圧指令値を電圧コントローラ 4 0 に送る。より具体的には、フィードバック制御部 3 7 は、ヒータ温度測定器 4 3 によって測定されたヒータ 3 2 の温度と、ヒータ 3 2 の上記設定温度との差を最小にするための電圧指令値を生成し、電圧コントローラ 4 0 に電圧指令値を送信する。電圧コントローラ 4 0 は、電圧指令値に示される電圧をヒータ 3 2 に印加し、これによりヒータ 3 2 は、ヒータ温度指令値に示されるヒータ 3 2 の設定温度で発熱することができる。

[0052] 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. 基板を研磨するための研磨パッドの表面温度の調節に使用される過熱蒸気を生成する過熱蒸気生成方法であって、

5 ヒータを備えた蒸気生成器により、水を加熱して蒸気を生成し、
前記蒸気の温度を蒸気温度測定器により測定し、

フィードバック制御部により、前記蒸気の温度の測定値と、過熱蒸気の目標温度との差である温度差を最小にするための前記ヒータの設定温度を示すヒータ温度指令値を決定することを含み、

10 前記フィードバック制御部によるヒータ温度指令値を決定することは、

第1時間区間に設定された第1ヒータ温度許容範囲内で、前記温度差を最小にするための前記ヒータ温度指令値を決定し、

前記第1時間区間内での前記蒸気の温度の測定値が、前記過熱蒸気の前記目標温度よりも小さく、かつ前記温度差が第1しきい値よりも大きいときは、前記

15 第1ヒータ温度許容範囲を所定の上昇シフト量だけ上昇させて第2ヒータ温度許容範囲を決定し、

第2時間区間内に設定された前記第2ヒータ温度許容範囲内で、前記温度差を最小にするための前記ヒータ温度指令値を決定することを含む、過熱蒸気生成方法。

20 2. 前記第1時間区間内での前記蒸気の温度の測定値は、前記第1時間区間内で前記蒸気温度測定器により測定された前記蒸気の温度の平均である、請求項1に記載の過熱蒸気生成方法。

25 3. 前記フィードバック制御部によるヒータ温度指令値を決定することは、

第3時間区間に設定された第3ヒータ温度許容範囲内で、前記温度差を最小にするための前記ヒータ温度指令値を決定し、

前記第3時間区間内での前記蒸気の温度の測定値が、前記過熱蒸気の前記目標温度よりも大きく、かつ前記温度差が第2しきい値よりも大きいときは、前記

第3ヒータ温度許容範囲を所定の下降シフト量だけ下降させて第4ヒータ温度許容範囲を決定し、

第4時間区間内に設定された前記第4ヒータ温度許容範囲内で、前記温度差を最小にするための前記ヒータ温度指令値を決定することをさらに含む、請求項5 1に記載の過熱蒸気生成方法。

4. 水を加熱して蒸気を生成するヒータを備えた蒸気生成器と、

前記蒸気の温度を測定する蒸気温度測定器と、

10 前記蒸気の温度の測定値と、過熱蒸気の目標温度との差である温度差を最小にするための前記ヒータの設定温度を示すヒータ温度指令値を決定するフィードバック制御部を備え、

前記フィードバック制御部は、

第1時間区間に設定された第1ヒータ温度許容範囲内で、前記温度差を最小にするための前記ヒータ温度指令値を決定し、

15 前記第1時間区間内での前記蒸気の温度の測定値が、前記過熱蒸気の前記目標温度よりも小さく、かつ前記温度差が第1しきい値よりも大きいときは、前記第1ヒータ温度許容範囲を所定の上昇シフト量だけ上昇させて第2ヒータ温度許容範囲を決定し、

20 第2時間区間内に設定された前記第2ヒータ温度許容範囲内で、前記温度差を最小にするための前記ヒータ温度指令値を決定するように構成されている、過熱蒸気生成装置。

5. 前記フィードバック制御部は、前記第1時間区間内で前記蒸気温度測定器により測定された前記蒸気の温度の平均を算定し、前記第1時間区間内での前記
25 蒸気の温度の測定値として前記平均を使用するように構成されている、請求項4に記載の過熱蒸気生成装置。

6. 前記フィードバック制御部は、

第3時間区間に設定された第3ヒータ温度許容範囲内で、前記温度差を最小

にするための前記ヒータ温度指令値を決定し、

前記第 3 時間区間内での前記蒸気の温度の測定値が、前記過熱蒸気の前記目標温度よりも大きく、かつ前記温度差が第 2 しきい値よりも大きいときは、前記第 3 ヒータ温度許容範囲を所定の下降シフト量だけ下降させて第 4 ヒータ温度許
5 容範囲を決定し、

第 4 時間区間内に設定された前記第 4 ヒータ温度許容範囲内で、前記温度差を最小にするための前記ヒータ温度指令値を決定するように構成されている、請求項 4 に記載の過熱蒸気生成装置。