

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4658818号  
(P4658818)

(45) 発行日 平成23年3月23日(2011.3.23)

(24) 登録日 平成23年1月7日(2011.1.7)

(51) Int. Cl. F I  
**GO 1 K 3/10 (2006.01)** GO 1 K 3/10  
 HO 1 L 21/205 (2006.01) HO 1 L 21/205  
 HO 1 L 21/3065 (2006.01) HO 1 L 21/302 1 O 1 G

請求項の数 6 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2006-10898 (P2006-10898)	(73) 特許権者	000006666 株式会社山武
(22) 出願日	平成18年1月19日(2006.1.19)		東京都千代田区丸の内2丁目7番3号
(65) 公開番号	特開2007-192661 (P2007-192661A)	(74) 代理人	100064621 弁理士 山川 政樹
(43) 公開日	平成19年8月2日(2007.8.2)	(74) 代理人	100098394 弁理士 山川 茂樹
審査請求日	平成20年3月18日(2008.3.18)	(72) 発明者	大野 忠久 東京都千代田区丸の内2丁目7番3号 株式会社 山武内
		(72) 発明者	本橋 勇人 東京都千代田区丸の内2丁目7番3号 株式会社 山武内
		審査官	榮永 雅夫

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 温度推定方法および装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

推定対象との間に熱抵抗を有する温度測定可能点の温度に基づいて、前記推定対象の温度を推定する温度推定方法であって、

前記温度測定可能点の温度を測定する測定ステップと、

前記温度測定可能点の温度から求められる前記温度測定可能点の温度変化量と、前記温度測定可能点と前記推定対象とに関する熱伝達モデルに基づいて前記温度測定可能点の温度変化量を推定した値である温度測定可能点の温度変化量仮推定値と、前記熱伝達モデルに基づいて前記推定対象の温度変化量を推定した値である推定対象の温度変化量仮推定値とから、前記推定対象の温度変化量の真値を推定する温度変化量推定ステップと、

この温度変化量推定ステップで推定された温度変化量の真値から前記推定対象の温度の真値を推定する温度推定ステップとを有することを特徴とする温度推定方法。

【請求項 2】

請求項 1 記載の温度推定方法において、

前記温度変化量推定ステップは、前記温度測定可能点の温度変化量の実測値と前記温度測定可能点の温度変化量仮推定値との差が、前記推定対象の温度変化量仮推定値と前記推定対象の温度変化量の真値との差と一定の関係にあることを利用して、前記推定対象の温度変化量の真値を推定することを特徴とする温度推定方法。

【請求項 3】

請求項 1 又は 2 記載の温度推定方法において、

さらに、前記推定対象の温度の真値と前記熱伝達モデルとから、前記温度測定可能点と前記推定対象との間の熱抵抗の変化分を推定する熱抵抗値変化係数推定ステップを有することを特徴とする温度推定方法。

【請求項 4】

推定対象との間に熱抵抗を有する温度測定可能点の温度に基づいて、前記推定対象の温度を推定する温度推定装置であって、

前記温度測定可能点と前記推定対象とに関する熱伝達モデルのパラメータを記憶する記憶部と、

前記温度測定可能点の温度を測定する温度測定部と、

前記温度測定可能点の温度から求められる前記温度測定可能点の温度変化量と、前記熱伝達モデルに基づいて前記温度測定可能点の温度変化量を推定した値である温度測定可能点の温度変化量仮推定値と、前記熱伝達モデルに基づいて前記推定対象の温度変化量を推定した値である推定対象の温度変化量仮推定値とから、前記推定対象の温度変化量の真値を推定する温度変化量推定部と、

この温度変化量推定部で推定された温度変化量の真値から前記推定対象の温度の真値を推定する温度推定部とを有することを特徴とする温度推定装置。

【請求項 5】

請求項 4 記載の温度推定装置において、

前記温度変化量推定部は、前記温度測定可能点の温度変化量の実測値と前記温度測定可能点の温度変化量仮推定値との差が、前記推定対象の温度変化量仮推定値と前記推定対象の温度変化量の真値との差と一定の関係にあることを利用して、前記推定対象の温度変化量の真値を推定することを特徴とする温度推定装置。

【請求項 6】

請求項 4 又は 5 記載の温度推定装置において、

さらに、前記推定対象の温度の真値と前記熱伝達モデルとから、前記温度測定可能点と前記推定対象との間の熱抵抗の変化分を推定する熱抵抗値変化係数推定部を有することを特徴とする温度推定装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、例えば半導体製造装置等の加熱冷却処理装置に係り、特に推定対象との間に熱抵抗を有するヒータ等の温度測定可能点の温度に基づいて、推定対象の温度を推定する温度推定方法および装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

半導体製造装置のように実際に加熱冷却処理する被加熱冷却物（半導体製造装置の場合はウエハ）の温度を運転中は測定できない場合、あらかじめ装置の試験運転や調整時に被加熱冷却物に温度センサを取り付け、加熱冷却処理部と被加熱冷却物に関するモデルを作成し、本運転時は、モデルに基づいて被加熱冷却物の温度を推定しながら処理を行うことが良く行われている。ただし、この手法ではモデルと実際の被加熱冷却物との間にずれが生じると、温度推定誤差が発生するという問題がある。

このような問題を解決するために、数値解析手法を用いてモデル同定をリアルタイムに行う技術（例えば、特許文献 1 参照）を半導体製造装置に適用することが考えられる。特許文献 1 に開示された技術を半導体製造装置に適用すれば、温度を知りたい場所（以下、推定対象と呼ぶ）の温度を直接測定できず、さらに本運転時に温度センサを取り付ける温度測定可能点と推定対象との間の熱抵抗も不明な場合に、熱抵抗値を係数とするモデルから算出される温度測定可能点の温度推定値と温度測定可能点の温度実測値とが一致するまで、温度測定可能点と推定対象との間の熱抵抗値を逐次最小 2 乗法や勾配法、最尤推定法により計算して求め、計算した熱抵抗値を使って推定対象の温度を推定することができる（以下、従来技術 1 と呼ぶ）。このような従来技術 1 によれば、同定時のモデルと実際の

10

20

30

40

50

推定対象との間にずれが存在する場合であっても、推定対象の温度を精度よく推定することができる。

【0003】

また、別の推定手法を用いた技術として、地中に埋設された管路内電力ケーブルの導体温度を推定する技術が特許文献2に開示されている(以下、従来技術2と呼ぶ)。この従来技術2では、導体温度を求める目標管路内部の温度、土壤温度及び全ての管路の通電電流値を測定し、土壤熱抵抗値を基に周囲の管路からの熱影響を求めると共に各管路の通電電流値から導体の熱流値を求めることにより目標管路近傍の土壤温度変化を求め、土壤が深さ毎に本来持っている基底温度と土壤温度変化とから計算上の土壤温度を求め、この土壤温度と目標管路内の導体の熱流値とから導体温度を含む解析モデルに従って管路内の温度を算出し、管路内温度の計算値と管路内温度の実測値とを比較して、比較結果が一致する場合は解析モデルで使用した導体温度を正しい推定結果として確定し、比較結果が一致しない場合は土壤熱抵抗、基底温度及び計算に使用する熱定数を見直した後に再計算するようにしている。

10

【0004】

【特許文献1】特許第3331758号公報

【特許文献2】特開2000-88666号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、数値解析手法を用いた熱抵抗値の同定をしながら温度推定を行う従来技術1は、熱抵抗値の推定初期値が不正確な場合、正確な温度推定を始めるまでに時間がかかり、かつ係数の値が求まるまで係数誤差により推定温度が不正確になるという問題点があった。また、従来技術1は、熱抵抗が加熱冷却処理時に変化する場合、正確な温度推定を始めるまでに時間がかかるという問題点があった。また、一般に逐次最小2乗法などの推定収束速度の速い手法では、計算量が多くなるという問題点があった。

20

【0006】

同様に、従来技術2においても、土壤の熱抵抗値などの熱定数の推定初期値が不正確な場合、熱定数の見直しに時間がかかり、正確な温度推定を始めるまでに時間がかかるという問題点があった。従来技術2は、管路内電力ケーブルの導体温度や土壤の熱抵抗値を算出する例であり、温度推定の精度や推定収束速度もそれほど高レベルのものは必要ないが、温度の推定精度によって被加熱冷却物の品質が大きく変わってしまうような加熱冷却処理での温度推定では、その精度および推定収束速度の向上は非常に重要な意味を持つ。すなわち、被加熱冷却物の温度が正しく推定できない場合には、適切な加熱冷却処理が行われないことになる。

30

【0007】

本発明は、上記課題を解決するためになされたもので、推定対象の温度が直接測定できず、熱抵抗が加熱冷却処理時に変化する場合であっても、推定対象の温度を精度良く速やかに、かつ軽い演算処理で推定することができる温度推定方法および装置を提供することを目的とする。

40

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明は、推定対象との間に熱抵抗を有する温度測定可能点の温度に基づいて、前記推定対象の温度を推定する温度推定方法であって、前記温度測定可能点の温度を測定する測定ステップと、前記温度測定可能点の温度から求められる前記温度測定可能点の温度変化量と、前記温度測定可能点と前記推定対象とに関する熱伝達モデルに基づいて前記温度測定可能点の温度変化量を推定した値である温度測定可能点の温度変化量仮推定値と、前記熱伝達モデルに基づいて前記推定対象の温度変化量を推定した値である推定対象の温度変化量仮推定値とから、前記推定対象の温度変化量の真値を推定する温度変化量推定ステップと、この温度変化量推定ステップで推定された温度変化量の真値から前記推定対象の温

50

度の真値を推定する温度推定ステップとを有するものである。

また、本発明の温度推定方法の1構成例において、前記温度変化量推定ステップは、前記温度測定可能点の温度変化量の実測値と前記温度測定可能点の温度変化量仮推定値との差が、前記推定対象の温度変化量仮推定値と前記推定対象の温度変化量の真値との差と一定の関係にあることを利用して、前記推定対象の温度変化量の真値を推定するようにしたものである。

また、本発明の温度推定方法の1構成例は、さらに、前記推定対象の温度の真値と前記熱伝達モデルとから、前記温度測定可能点と前記推定対象との間の熱抵抗の変化分を推定する熱抵抗値変化係数推定ステップを有するものである。

【0009】

また、本発明の温度推定装置は、前記温度測定可能点と前記推定対象とに関する熱伝達モデルのパラメータを記憶する記憶部と、前記温度測定可能点の温度を測定する温度測定部と、前記温度測定可能点の温度から求められる前記温度測定可能点の温度変化量と、前記熱伝達モデルに基づいて前記温度測定可能点の温度変化量を推定した値である温度測定可能点の温度変化量仮推定値と、前記熱伝達モデルに基づいて前記推定対象の温度変化量を推定した値である推定対象の温度変化量仮推定値とから、前記推定対象の温度変化量の真値を推定する温度変化量推定部と、この温度変化量推定部で推定された温度変化量の真値から前記推定対象の温度の真値を推定する温度推定部とを有するものである。

また、本発明の温度推定装置の1構成例は、さらに、前記推定対象の温度の真値と前記熱伝達モデルとから、前記温度測定可能点と前記推定対象との間の熱抵抗の変化分を推定する熱抵抗値変化係数推定部を有するものである。

【発明の効果】

【0010】

本発明によれば、温度測定可能点の温度を測定する測定ステップと、温度測定可能点の温度から求められる温度測定可能点の温度変化量と、温度測定可能点と推定対象とに関する熱伝達モデルに基づいて温度測定可能点の温度変化量を推定した値である温度測定可能点の温度変化量仮推定値と、熱伝達モデルに基づいて推定対象の温度変化量を推定した値である推定対象の温度変化量仮推定値とから、推定対象の温度変化量の真値を推定する温度変化量推定ステップと、この温度変化量推定ステップで推定された温度変化量の真値から推定対象の温度の真値を推定する温度推定ステップとを実行することにより、推定対象の温度が直接測定できず、かつ推定対象と温度測定可能点との間の熱抵抗が推定対象毎にばらついたり、加熱冷却処理中に熱抵抗が熱伝達モデルの同定時の値から変化したりする場合であっても、推定対象の温度を精度良く速やかに推定することができる。また、本発明では、熱抵抗が温度推定中に変化し続けていても、熱抵抗の変化の影響を受けないため、推定対象の温度を速やかに精度良く推定することができる。また、本発明では、数値解析的な処理や統計的な処理を必要としないので、計算量を非常に少なくすることができ、比較的処理能力の乏しい加熱冷却処理装置の温度制御プロセッサにおいてもリアルタイム処理に十分耐えられる程度の軽い演算で温度推定処理を行うことができる。

【0011】

また、本発明では、推定対象の温度の真値と熱伝達モデルとから、温度測定可能点と推定対象との間の熱抵抗の変化分を推定する熱抵抗値変化係数推定ステップを実行することにより、推定対象と温度測定可能点との間の熱抵抗値の変化を速やかに精度良く算出することができる。また、本発明では、非常に少ない計算量で熱抵抗推定処理を行うことができる。また、本発明では、それまでに求めた熱抵抗値を固定値として利用して、温度測定可能点の温度変化が測定誤差程度に近いレベルまで小さくなった後も推定対象の温度を精度良く求めることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0012】

以下、本発明の実施の形態について図面を参照して説明する。図1は本発明の実施の形態に係る加熱冷却処理装置の構成を示すブロック図である。図1において、2はワーク1

10

20

30

40

50

を載せる熱板、3は熱板2に取り付けられたヒータ、4はヒータ3に取り付けられた温度センサ、5はコントローラ、6は環境温度センサである。コントローラ5は、温度推定装置50と、制御装置51とを有する。コントローラ5は、CPU、記憶装置及びインタフェースを備えたコンピュータとこれらのハードウェア資源を制御するプログラムによって実現することができる。CPUは、記憶装置に格納されたプログラムに従って以下のような処理を実行する。

【0013】

以下、温度推定装置50による温度推定の原理を説明する。ヒータ3の温度を $T_h$ 、推定したいワーク1の温度を $T_w$ 、周囲の環境温度を $T_e$ 、コントローラ5の制御装置51からヒータ3に出力されるコントローラ出力値を $MV$ 、サンプリング時間を $t_s$ とし、ヒータ温度 $T_h$ とワーク温度 $T_w$ について、温度測定可能点(ヒータ3)と推定対象(ワーク1)とに関する熱伝達モデルから式を立ててそれを離散化して整理すると、次のようになる。

$$T_w(n+1) = T_w(n) + t_s \cdot (a \cdot (T_h(n) - T_w(n)) - b \cdot (T_w(n) - T_e(n))) \quad \dots (1)$$

$$T_h(n+1) = T_h(n) + t_s \cdot (c \cdot MV(n) - d \cdot (T_h(n) - T_w(n))) \quad \dots (2)$$

【0014】

式(1)、式(2)において、 $T_w(n)$ は時刻 $n$ におけるワーク温度、 $T_w(n+1)$ は時刻 $n$ からサンプリング時間 $t_s$ 後の時刻 $n+1$ におけるワーク温度、 $T_h(n)$ は時刻 $n$ におけるヒータ温度、 $T_h(n+1)$ は時刻 $n+1$ におけるヒータ温度である。また、係数 $a, b, c, d$ は、熱伝達モデルのパラメータである。この係数 $a, b, c, d$ は、装置のメンテナンス中に、ヒータ温度 $T_h$ 、ワーク温度 $T_w$ および環境温度 $T_e$ を時系列的に計測して、最小2乗法などを用いることにより同定した値である。なお、ヒータ温度 $T_h$ と環境温度 $T_e$ はメンテナンス時および本運転時のいずれにおいても測定可能であるが、ワーク温度 $T_w$ はメンテナンス時のみ測定可能で、本運転中は測定不可とする。ただし、ワーク初期温度は測定可能または他の箇所の温度で近似可能とする。

【0015】

また、本運転時においては、温度測定可能点であるヒータ3と推定対象であるワーク1との間の熱抵抗値は、ワーク毎にばらつき、不明であるとする。熱伝達モデルの同定時に求めた熱抵抗値に対して本運転中に変化した熱抵抗の変化分(正確には、熱抵抗の逆数の変化分)を熱抵抗値変化係数 $m_r$ とし、熱抵抗値変化係数 $m_r$ を考慮した本運転時での熱伝達モデルによる式を離散化して整理した結果は、次のようになる。

$$T_w(n+1) = T_w(n) + t_s \cdot (m_r \cdot a \cdot (T_h(n) - T_w(n)) - b \cdot (T_w(n) - T_e(n))) \quad \dots (3)$$

$$T_h(n+1) = T_h(n) + t_s \cdot (c \cdot MV(n) - m_r \cdot d \cdot (T_h(n) - T_w(n))) \quad \dots (4)$$

【0016】

式(1)、式(2)は同定時の熱伝達モデルに基づいてワーク温度 $T_w$ 、ヒータ温度 $T_h$ を推定する式であるが、前述のとおり式(3)、式(4)はさらに熱抵抗値変化係数 $m_r$ を考慮してワーク温度 $T_w$ 、ヒータ温度 $T_h$ を推定する式であり、式(3)、式(4)で求めるワーク温度 $T_w(n+1)$ 、ヒータ温度 $T_h(n+1)$ は真値に相当する。

【0017】

時刻 $n$ までのヒータ温度 $T_h$ 、ワーク温度 $T_w$ および環境温度 $T_e$ が既知あるいは適切に推定されているとき、時刻 $n$ から時刻 $n+1$ までの2サンプリング間のワーク温度変化量は、同定時の熱伝達モデルに基づく推定によると、式(1)より次式のようなになる。

$$T_w(n+1) - T_w(n) = t_s \cdot (a \cdot (T_h(n) - T_w(n)) - b \cdot (T_w(n) - T_e(n))) \quad \dots (5)$$

式(5)に示す値をワーク温度変化量の仮推定値と呼ぶ。

【0018】

10

20

30

40

50

また、本運転時のワーク毎の熱抵抗値変化係数  $m_r$  を考慮すると、ワーク温度変化量は式(3)より次式ようになる。

$$T_w(n+1) - T_w(n) = t_s \cdot (m_r \cdot a \cdot (T_h(n) - T_w(n)) - b \cdot (T_w(n) - T_e(n))) \quad \dots (6)$$

式(6)に示す値をワーク温度変化量の真値と呼ぶ。

【0019】

2 サンプリング間のワーク温度変化量の仮推定値と真値との差は、式(5)の右辺と式(6)の右辺の差となり、次式ようになる。

$$t_s \cdot (1 - m_r) \cdot a \cdot (T_h(n) - T_w(n)) \quad \dots (7)$$

【0020】

同様に、時刻  $n$  までのヒータ温度  $T_h$ 、ワーク温度  $T_w$  および環境温度  $T_e$  が既知あるいは適切に推定されているとき、時刻  $n$  から時刻  $n+1$  までの2 サンプリング間のヒータ温度変化量は、同定時の熱伝達モデルに基づく推定によると、式(2)より次式ようになる。

$$T_h(n+1) - T_h(n) = t_s \cdot (c \cdot MV(n) - d \cdot (T_h(n) - T_w(n))) \quad \dots (8)$$

式(8)に示す値をヒータ温度変化量の仮推定値と呼ぶ。

【0021】

また、本運転時のワーク毎の熱抵抗値変化係数  $m_r$  を考慮すると、ヒータ温度変化量は式(4)より次式ようになる。

$$T_h(n+1) - T_h(n) = t_s \cdot (c \cdot MV(n) - m_r \cdot d \cdot (T_h(n) - T_w(n))) \quad \dots (9)$$

式(9)に示す値をヒータ温度変化量の真値と呼ぶ。

【0022】

2 サンプリング間のヒータ温度変化量の仮推定値と真値との差は、式(8)の右辺と式(9)の右辺の差となり、次式ようになる。

$$t_s \cdot (1 - m_r) \cdot d \cdot (T_h(n) - T_w(n)) \quad \dots (10)$$

【0023】

ここで、式(7)、式(10)を良く見ると、次式が成立することが分かる。

(ワーク温度変化量の仮推定値 - ワーク温度変化量の真値)

$$/ (ヒータ温度変化量の真値 - ヒータ温度変化量の仮推定値) = a / d$$

$$\dots (11)$$

つまり、2 サンプリング間のヒータ温度変化量の真値を実際の測定値から求め、2 サンプリング間のヒータ温度変化量の真値と仮推定値との差を計算して、計算した値に  $a/d$  を乗じることで、2 サンプリング間のワーク温度変化量の仮推定値と真値との差を求めることができる。

【0024】

同定時の熱伝達モデルに基づく2 サンプリング間のワーク温度変化量の仮推定値は計算可能である。2 サンプリング間のヒータ温度変化量の真値を  $T_h$ 、2 サンプリング間のヒータ温度変化量の仮推定値をハット  $\hat{T}_{h,model}$  (以下、同様に文字上に付した「 $\hat{\quad}$ 」をハットと呼ぶ)、2 サンプリング間のワーク温度変化量の仮推定値をハット  $\hat{T}_{w,model}$  とすると、2 サンプリング間のワーク温度変化量の真値の推定値ハット  $\hat{T}_w$  は、次式のように求まる。

【0025】

【数1】

$$\Delta \hat{T}_w = \Delta \hat{T}_{w,model} - \left( \frac{a}{d} \right) \cdot (\Delta T_h - \Delta \hat{T}_{h,model}) \quad \dots (12)$$

【0026】

式(12)の関係をを用い、時刻  $n$  から時刻  $n+1$  までの2 サンプリング間のワーク温度

10

20

30

40

50

変化量の真値の推定値をハット  $T_w(n)$  とすると、時刻  $n+1$  におけるワーク温度の推定値ハット  $T_w(n+1)$  は、時刻  $n$  におけるワーク温度の推定値ハット  $T_w(n)$  から次式のように計算することができる。

【0027】

【数2】

$$\hat{T}_w(n+1) = \Delta \hat{T}_w(n) + \hat{T}_w(n) \quad \dots (13)$$

【0028】

さらに、式(6)において、時刻  $n$  におけるワーク温度  $T_w(n)$  の代わりにワーク温度の推定値ハット  $T_w(n)$  を用い、ワーク温度変化量  $T_w(n+1) - T_w(n)$  の代わりにワーク温度変化量の推定値ハット  $T_w(n)$  を用いると、時刻  $n$  における熱抵抗値変化係数  $m_r$  の推定値ハット  $m_r(n)$  は次式で求めることができる。

【0029】

【数3】

$$\hat{m}_r(n) = \frac{1}{(a \cdot (T_h(n) - \hat{T}_w(n)))} \cdot \left( \frac{\Delta \hat{T}_w(n)}{t_s} + b \cdot (\hat{T}_w(n) - T_e(n)) \right) \quad \dots (14)$$

【0030】

図2は温度推定装置50の構成例を示すブロック図である。温度推定装置50は、予め同定された熱伝達モデルのパラメータと測定データと計算データとを記憶する記憶部500と、温度測定部501と、ワーク温度変化量推定部502と、ワーク温度推定部503と、熱抵抗値変化係数推定部504とを有する。

【0031】

図3は温度推定装置50の動作を示すフローチャートである。この図3を用いて温度推定装置50の動作を説明する。

まず、温度測定部501は、本運転前の初期状態において、温度センサ4によって測定されたヒータ温度  $T_h$  と、環境温度センサ6によって測定された環境温度  $T_e$  と、初期状態のみ使用可能な温度センサによって測定されたワーク温度  $T_w$  を取得する。記憶部500は、温度測定部501が取得したヒータ温度  $T_h$  と環境温度  $T_e$  とワーク温度  $T_w$  を記憶する(図3ステップS1)。

【0032】

続いて、本運転が開始されると、温度測定部501は、現時刻  $n+1$  におけるヒータ温度  $T_h(n+1)$  と環境温度  $T_e(n+1)$  を取得する。記憶部500は、温度測定部501が取得したヒータ温度  $T_h(n+1)$  と環境温度  $T_e(n+1)$  を記憶する(ステップS2)。

【0033】

次に、ワーク温度変化量推定部502は、記憶部500に記憶された値を参照して、現時刻  $n+1$  のヒータ温度  $T_h(n+1)$  と1サンプリング前の時刻  $n$  のヒータ温度  $T_h(n)$  との差、すなわち2サンプリング間のヒータ温度変化量の真値  $T_h$  を計算し、2サンプリング間のヒータ温度変化量の仮推定値ハット  $T_{h,model}$  を式(8)により計算し、2サンプリング間のワーク温度変化量の仮推定値ハット  $T_{w,model}$  を式(5)により計算して、これらの計算した値から式(12)により時刻  $n$  から時刻  $n+1$  までの2サンプリング間のワーク温度変化量の推定値ハット  $T_w(n)$  を計算する(ステップS3)。記憶部500は、このワーク温度変化量の推定値ハット  $T_w(n)$  を記憶する。

【0034】

このとき、現時刻  $n+1$  がワーク投入後の最初のサンプリング時刻の場合には、式(5

10

20

30

40

50

)、式(8)におけるヒータ温度 $T_h(n)$ は初期状態で測定された温度、ワーク温度 $T_w(n)$ は初期状態で測定された温度または他の箇所の温度で近似された温度となる。また、式(8)におけるコントローラ出力値 $MV(n)$ は時刻 $n$ において制御装置51が算出した値であるが、現時刻 $n+1$ がワーク投入後の最初のサンプリング時刻の場合には、初期状態で出力された値となる。

【0035】

続いて、ワーク温度推定部503は、記憶部500に記憶されたワーク温度変化量の推定値ハット $T_w(n)$ とワーク温度の推定値ハット $T_w(n)$ とから式(13)により、現時刻 $n+1$ におけるワーク温度の推定値ハット $T_w(n+1)$ を計算する(ステップS4)。記憶部500は、このワーク温度の推定値ハット $T_w(n+1)$ を記憶する。なお、現時刻 $n+1$ がワーク投入後の最初のサンプリング時刻の場合、ワーク温度の推定値ハット $T_w(n)$ としては初期状態で測定または他の箇所の温度で近似されたワーク温度 $T_w$ が使用される。

10

【0036】

次に、熱抵抗値変化係数推定部504は、記憶部500に記憶されたワーク温度変化量の推定値ハット $T_w(n)$ とワーク温度の推定値ハット $T_w(n)$ とヒータ温度 $T_h(n)$ と環境温度 $T_e(n)$ とから式(14)により、時刻 $n$ における熱抵抗値変化係数 $m_r$ の推定値ハット $m_r(n)$ を計算する(ステップS5)。記憶部500は、この熱抵抗値変化係数 $m_r$ の推定値ハット $m_r(n)$ を記憶する。なお、現時刻 $n+1$ がワーク投入後の最初のサンプリング時刻の場合には、環境温度 $T_e(n)$ は初期状態で測定された値となる

20

【0037】

以下、同様に加熱冷却処理装置の動作が停止するまで(ステップS6においてYES)、ステップS2~S5の処理がサンプリング時間毎に繰り返される。現時刻 $n+1$ がワーク投入後の最初のサンプリング時刻でない場合には、ヒータ温度 $T_h(n)$ と環境温度 $T_e(n)$ とは1サンプリング前に取得された値となり、式(5)、式(8)のワーク温度 $T_w(n)$ としてはワーク温度の推定値ハット $T_w(n)$ が使用される。

【0038】

このような温度推定装置50の動作と並行して、コントローラ5の制御装置51は、温度推定装置50が計算した時刻 $n$ におけるワーク温度の推定値を取得し、このワーク温度の推定値が目標温度と一致するようにコントローラ出力値 $MV$ を算出し、このコントローラ出力値 $MV$ を時刻 $n+1$ においてヒータ3に出力する。

30

【0039】

以上のように、本実施の形態では、本運転中にワーク1とヒータ3との間の熱抵抗値がモデル同定時の値から変化したとしても、その変化量を知ることなく即時にワーク温度を推定することができる。また、本実施の形態では、算出したワーク温度を利用して即時に熱抵抗値の変化量を推定することができる。さらに、本実施の形態では、熱抵抗値の変化量を知らなくても速やかに温度推定できることから、温度推定中に連続して熱抵抗値が変化するような場合にも即時に温度推定が可能であり、それを利用して連続して変化している熱抵抗値も算出可能である。この場合、熱抵抗値の変化は、予期しない変化でもかまわない。また、本実施の形態では、温度の推定演算に数値解析や統計的な演算を使用していないため、計算負荷が軽く、非力なプロセッサでも実装可能である。

40

【0040】

図4~図9に本実施の形態の効果を示す。図4、図6、図8は本実施の形態によるワーク温度の推定結果とワーク温度の実測値の1例を示す図であり、図5、図7、図9は本実施の形態による熱抵抗値変化係数の推定結果と熱抵抗値変化係数の実測値の1例を示す図である。図4、図5の例では、ワーク1とヒータ3との間の熱抵抗値が本運転時にモデル同定時の値から変化して一定の値になった場合を想定しているが、ワーク温度の推定値ハット $T_w$ とワーク温度の実測値 $T_w$ はよく一致しており、同様に熱抵抗値変化係数の推定値ハット $m_r$ と熱抵抗値変化係数の実測値 $m_r$ もよく一致しており、ワーク温度、熱抵抗値共

50

に精度良く推定できていることが分かる。また、図6、図7の例では、ワーク1とヒータ3との間の熱抵抗値が温度推定中に変化し続ける場合を想定しているが、ワーク温度、熱抵抗値共に精度良く推定できていることが分かる。さらに、図8、図9の例では、ワーク1とヒータ3との間の熱抵抗値が温度推定中に不規則的に変化し続ける場合を想定しているが、ワーク温度、熱抵抗値共に精度良く推定できていることが分かる。

【0041】

本実施の形態では、ヒータ温度変化量の実測値と熱伝達モデルに基づくヒータ温度変化量の仮推定値との差が、熱伝達モデルに基づくワーク温度変化量の仮推定値とワーク温度変化量の真値との差と  $a/d$  で表される一定の関係となっている。この比  $a/d$  は、元の熱伝達モデルでの微分方程式に戻して考えると、ヒータ温度で代表される温度測定可能点とワーク温度で代表される推定対象の熱容量比となっている。

10

【0042】

また、本実施の形態では、ワークが推定対象で、ヒータを温度測定可能点としているが、逆にワーク温度が測定可能で、ヒータ温度が測定不可能な場合でも式(11)の関係はまったく同じなので、ヒータ温度変化量の真値の推定値ハット  $T_h$  は、 $T_w$  をワーク温度変化量の実測値として、次式のように算出することができる。

【0043】

【数4】

$$\Delta \hat{T}_h = \Delta \hat{T}_{h,model} - \left( \frac{d}{a} \right) \cdot \left( \Delta T_w - \Delta \hat{T}_{w,model} \right) \quad \dots (15)$$

20

【0044】

誘導加熱装置などは、ワーク側で熱が発生するので、ワークを加熱源とみなすことができ、かつワーク温度を測定不可能な場合が多い。このような場合には、ワーク温度を  $T_h$ 、装置測定可能点の温度を  $T_w$  とおき、式(15)を用いてワーク温度を推定する方法が適切である。

【0045】

また、本実施の形態では、温度測定要素は、ヒータ温度、ワーク温度、環境温度のみであるが、本運転中モデルのモデル同定時からの変化がヒータとワークとの間の熱抵抗値だけである場合は、ヒータ・ワーク間以外のモデル要素の数を増やしても式(5)、式(6)や、式(8)、式(9)で消えてしまう項が増えるだけで、結果として式(11)が導出できるので同じやり方が適用できる。前述のようにワーク温度が測定可能で、ヒータ温度が測定不可能な場合、誘導加熱装置などのようにワークを加熱源とみなすことができ、かつワーク温度を測定不可能な場合、あるいはコントローラ出力とヒータとの間に別のモデル要素が入る場合でもヒータ・ワーク間以外のモデル要素の数を増やしても同じように式(11)が導出できる。

30

【0046】

また、本実施の形態では、ヒータ温度は、コントローラ出力値の影響を直接受けるようにモデル化されているが、下記の式(16)、式(17)のように、コントローラ出力とヒータとの間に別のモデル要素を入れてもよい。式(16)、式(17)では、モデル要素  $p$  の温度を  $T_p$  としている。

40

$$T_h(n+1) - T_h(n) = t_s \cdot \left( c \cdot \left( \frac{T_p(n)}{a} - T_h(n) \right) - d \cdot \left( T_h(n) - T_w(n) \right) \right) \quad \dots (16)$$

$$T_h(n+1) - T_h(n) = t_s \cdot \left( c \cdot \left( \frac{T_p(n)}{a} - T_h(n) \right) - m_r \cdot d \cdot \left( T_h(n) - T_w(n) \right) \right) \quad \dots (17)$$

【0047】

式(8)、式(9)の代わりに、式(16)の右辺と式(17)の右辺の差を求めると、ヒータ温度とワーク温度以外の要素は消えて、結局式(10)が算出され、やはり結果として式(11)が導出できる。

50

## 【0048】

また、本実施の形態では、熱抵抗値変化係数 $m_r$ の推定値ハット $m_r(n)$ の計算に際して、式(6)を変形した式(14)を用いているので、ワーク温度の推定値ハット $T_w(n)$ とワーク温度変化量の推定値ハット $T_w(n)$ を使用しているが、熱抵抗値変化係数 $m_r$ の推定値ハット $m_r(n)$ は、ワーク温度の推定値ハット $T_w(n)$ と式(9)を変形させた下記の式(18)によっても求めることができる。

## 【0049】

## 【数5】

$$\hat{m}_r(n) = \frac{1}{\left(d \cdot (T_h(n) - \hat{T}_w(n))\right)} \cdot \left(c \cdot MV(n) - \frac{\Delta T_h(n)}{t_s}\right) \quad \dots (18)$$

## 【0050】

同様に、コントローラの出力とヒータとの間に別のモデル要素が入る場合には、熱抵抗値変化係数 $m_r$ の推定値ハット $m_r(n)$ は、式(17)を変形させた下記の式(19)によっても求めることができる。

## 【0051】

## 【数6】

$$\hat{m}_r(n) = \frac{1}{\left(d \cdot (T_h(n) - \hat{T}_w(n))\right)} \cdot \left(c \cdot (T_p(n) - T_h(n)) - \frac{\Delta T_h(n)}{t_s}\right) \quad \dots (19)$$

## 【0052】

同様に、誘導加熱装置などのようにワークを加熱源とみなすことができ、かつワーク温度を測定不可能な場合には、熱抵抗値変化係数 $m_r$ の推定値ハット $m_r(n)$ は、式(14)または式(18)の $T_h$ をハット $T_w$ 、ハット $T_w$ を $T_h$ で置き換えた式により求めることができる。

## 【0053】

また、本実施の形態では、環境温度センサ6を用いて環境温度を測定しているが、環境温度が一定としてみなせる場合は、環境温度を測定せずに固定値を用いて計算しても計算方法には影響を与えない。

また、本実施の形態では、温度測定値の測定誤差を考慮していないが、温度変化トレンドや熱抵抗値変化速度に比べて十分に速いフィルタを用いて測定誤差をキャンセルした結果を温度測定値として考えれば、議論の一般性を失わない。

また、本実施の形態では、主として加熱処理について記載しているが、冷却処理にも本発明を適用可能である。

## 【産業上の利用可能性】

## 【0054】

本発明は、半導体製造装置等の加熱冷却処理装置に適用することができる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0055】

【図1】本発明の実施の形態に係る加熱冷却処理装置の構成を示すブロック図である。

【図2】図1の加熱冷却処理装置におけるコントローラの温度推定装置の構成例を示すブロック図である。

【図3】図2の温度推定装置の動作を示すフローチャートである。

【図4】図2の温度推定装置によるワーク温度の推定結果とワーク温度の実測値の1例を

10

20

30

40

50

示す図である。

【図5】図2の温度推定装置による熱抵抗値変化係数の推定結果と熱抵抗値変化係数の実測値の1例を示す図である。

【図6】図2の温度推定装置によるワーク温度の推定結果とワーク温度の実測値の他の例を示す図である。

【図7】図2の温度推定装置による熱抵抗値変化係数の推定結果と熱抵抗値変化係数の実測値の他の例を示す図である。

【図8】図2の温度推定装置によるワーク温度の推定結果とワーク温度の実測値の他の例を示す図である。

【図9】図2の温度推定装置による熱抵抗値変化係数の推定結果と熱抵抗値変化係数の実測値の他の例を示す図である。

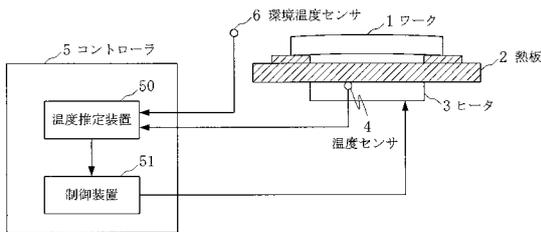
10

【符号の説明】

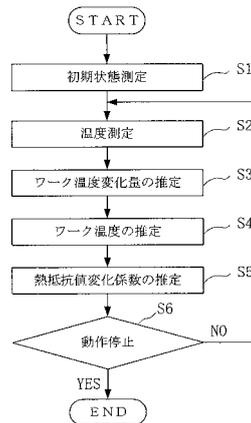
【0056】

1...ワーク、2...熱板、3...ヒータ、4...温度センサ、5...コントローラ、6...環境温度センサ、50...温度推定装置、51...制御装置、500...記憶部、501...温度測定部、502...ワーク温度変化量推定部、503...ワーク温度推定部、504...熱抵抗値変化係数推定部。

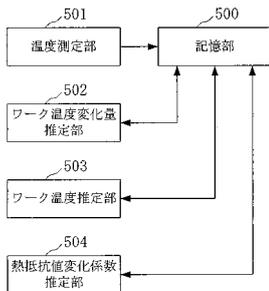
【図1】



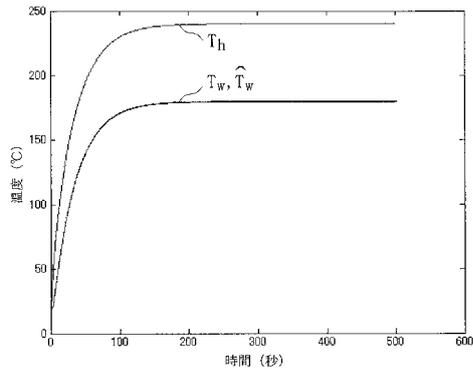
【図3】



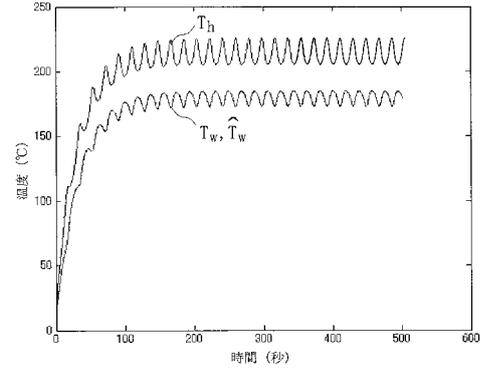
【図2】



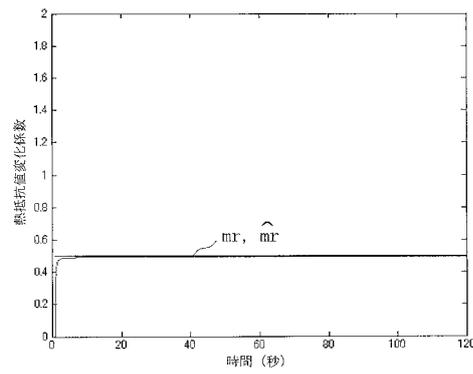
【 図 4 】



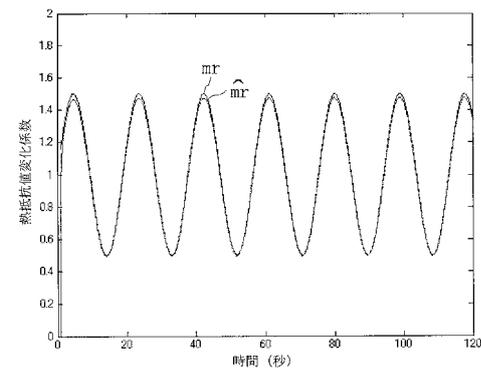
【 図 6 】



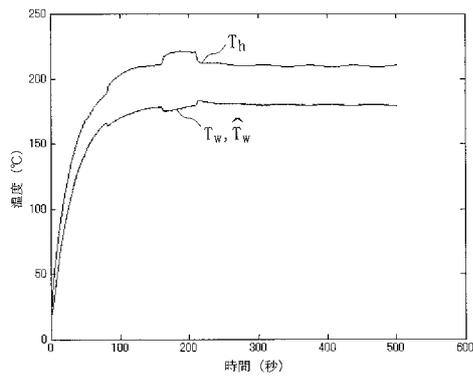
【 図 5 】



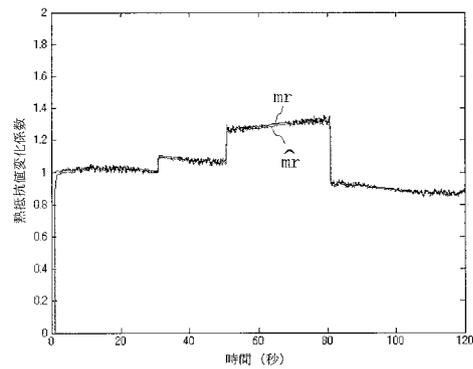
【 図 7 】



【 図 8 】



【 図 9 】



---

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平7 - 283158 (JP, A)  
特開2002 - 110552 (JP, A)  
国際公開第2005 / 010970 (WO, A1)  
特開2005 - 159317 (JP, A)  
特開2003 - 4543 (JP, A)  
特許第3331758 (JP, B2)  
特開2000 - 88666 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01K 3 / 10  
H01L 21 / 205  
H01L 21 / 3065