加熱/冷却一体形プレートを用いたフォトレジストプロセス におけるウェハの任意熱履歴制御*

板 東 賢 一^{*1}, 箕 西 幹 夫^{*2}, 横 田 眞 一^{*3}

Arbitrary Thermal History Control of Wafer in Photo Resist Processing Using Integrated Heating and Cooling Plate

Kenichi BANDO^{H*}, Mikio MINONISHI and Shinichi YOKOTA

^{H*} Innovation Center 2, Research Division KOMATSU Ltd.,
1200 Manda, Hiratsuka-shi, Kanagawa, 254-8567 Japan

For photo resist processing in semiconductor manufacturing, the precise temperature control of wafer has been demanded to realize a more fine device in recent years. However, it is difficult to achieve the precise temperature control by a current wafer heating and cooling system, because the system cannot control the temperature of transient state including wafer movement from the nature of the system. An integrated heating and cooling plate was developed to overcome above problem. On the other hand, it is difficult to achieve the precise temperature control of the plate because of its mutual intervention and unstable non-steady heat conduction. For that reason, we propose the control system based on thermal model with finite element in this paper, which is the state feedback control with scheduled gain to the process progress. Moreover, we propose the in-process estimation of wafer temperature based on system identification. Experimental results illustrate the effectiveness of the proposed method and the arbitrary thermal history control of wafer.

Key Words: Process Control, Modeling, Observer, Integrated Heating and Cooling Plate, Photo Resist Processing, In-Process Estimation

1. 結 言

現在、半導体製造におけるフォトレジストプロセス(レジスト塗布、現像等)では、半導体デバイスの微細化(線幅 100[nm])に対応するため、厳しい温度管理が要求されている^①。特に、露光パターン寸法は、ウェハの露光後の加熱処理温度(Post Exposure Bake ; PEB 温度)に強く依存する。例えば、あるレジストのラインパターン寸法は、PEB 温度に対して、約 4[nm/°C]もの寸法変動を生じる。これより、パターン寸法精度の向上には、ウェハ面内温度を厳密に制御する必要がある。また、ウェハ毎のパターン寸法の再現性には、ウェハ毎の温度差を極力低減させることが必要である^②。

現在のフォトレジストプロセスにおけるウェハの加熱/冷却システムは、個別のチャンバー内にある加熱プレート、冷却プレート(それぞれ一定温度に制御)およびウェハ搬送用ロボットから構成されている。熱

処理されるウェハは、搬送用ロボットにより加熱プレート上に載せられ、加熱用チャンバー内にて所定温度(高温)で所定時間加熱される。その後、搬送用ロボットにより加熱用チャンバーから取り出されたウェハは、冷却プレート上に載せられ、冷却用チャンバー内にて所定温度(常温近傍)に冷却される^{③④}。

このシステムの問題点として、常温のウェハを加熱プレートに載せたときと加熱された高温のウェハを冷却プレートに載せたときに生じる大きなウェハ面内温度分布、加熱プレートから冷却プレートへのウェハ搬送時に、ウェハに与える熱履歴を厳密に管理できないこと等がある。また、搬送時に生じるチャンバー内のコンタミネーションも問題となる。さらに、多品種少量生産のプロセスにおいては、加熱プレートの設定温度変更に必要な時間を短縮して、生産性を向上させることが望まれている^⑤。

加熱/冷却一体形プレートは、上記のような問題点を解決するために提案された新しい構造をもつ半導体製造用プレートである^⑥。本プレートによって、ウェハは、一つのチャンバー内で搬送されることなく加熱/冷却処理が完了し、厳密な温度管理が可能になる。

本報では、この加熱/冷却一体形プレートを用いた

* 原稿受付 2004 年 4 月 16 日。

^{*1} 正員, (株)小松製作所研究本部(☎ 254-8567 平塚市万田 1200)。

^{*2} (株)小松製作所研究本部。

^{*3} 正員, 東京工業大学精密工学研究所(☎ 226-8503 横浜市緑区 長津田町 4259)。

E-mail: kenichi_bandou@komatsu.co.jp

フォトレジストプロセスにおけるウェハの高精度な温度制御手法の確立をおこなう。しかし、本プレートは、その構造から、大きな相互干渉を有する多入出力系であり、また、熱的に不安定な分布定数系である。このため、ウェハの高精度な温度制御を実現することが困難である。そこで、本報では、対象の伝熱特性の相違により最小限に要素分割された物理モデル(以後、有限要素伝熱モデルと呼ぶ)を用いて非定常な伝熱を推定し、そのフィードバックとゲインスケジュールによって高精度な温度制御を実現する制御手法を提案する。

また、本報では、実プロセスにおいてインプロセス計測が困難なウェハ温度を、計測可能なプレート温度を用いて推定するソフトウェアセンシング技術(以後、ウェハ温度推定器)を提案する。ウェハ温度推定器は、システム同定理論を応用することによって実現される。本提案手法によって、ウェハ温度の高精度な推定および制御が実現される。上記提案手法の有効性が、実験によって示される。

2. 加熱・冷却一体形プレート

図1に現在の加熱/冷却システムと加熱/冷却一体形プレートを用いたシステムの比較を示す。加熱/冷却一体形プレートを用いることによって、システムの小型化を図ることができる。

2.1 プレート構造 図2に200[mm]ウェハ用の加熱/冷却一体形プレートの構造を示す(ただし、図2は図1と異なり、冷却液の出入口が一箇所に集中している)。このプレートは、厚さ5[mm]のプレート形熱交換器と厚さ25[μ m]の薄膜ヒータから構成されている。ウェハは、薄膜ヒータによって加熱され、プレート形熱交換器に冷却液を流すことによって冷却される。プレート形熱交換器は、内部に冷却液の流れる流路とピンフィンをもつ。薄膜ヒータは、加熱時のウェハ面内温度分布を高精度に制御するため、図2のように3ゾーンに分割されている。3つのゾーンは、ウェハ直径よりも若干大きい直径の中央ゾーン(ゾーン2)、プレート外周を覆うリング状の外周ゾーン(ゾーン1)、冷却液の出入口を覆う突出ゾーン(ゾーン3)に分割されている。このゾーン分割の形状は、有限要素法による伝熱解析によって、加熱過渡状態におけるウェハ面内温度分布の $\text{Range}[\pm^\circ\text{C}] = ((\text{最大温度}) - (\text{最小温度})) / 2$ が最小になるように設計された。そして、各ゾーンは、プレート内部にある3つの白金測温抵抗体により計測された温度を用いて個別に制御される。ただし、3つの白金測温抵抗体は、後述するウェハ温度推定器によりゾーン2上に載せられたウェハ温度を高精度に推定

(a) Conventional Heating and Cooling System

(b) System using Integrated Heating and Cooling Plate

Fig.1 Comparison of System

Fig.2 Plate Structure

するために、すべてゾーン2の領域内にある。

2.2 実験装置 図3に加熱/冷却一体形プレートの実験装置の概略を示す。冷却液用の温度調節器(冷却液を循環させるためのポンプ等を含む)は、加熱時にプレート内部で高温になった液体を冷却し、プレートに供給される冷却液の温度を一定(ウェハの冷却目標温度よりも1.5~3.0[$^\circ\text{C}$]低い温度)に保つ。冷却液は、絶縁性を有し、沸点が200[$^\circ\text{C}$]のフッ素系不活性液体(ガルデン HT200; ソルベイソレックス社製)を用いる。ステッピングモータは、熱処理前後のウェハを搬送用ロボットに受け渡しする際、昇降ピンを駆動して、ウェハを上下動させるために用いられる。

ウェハ冷却プロセスにおいて、3つの白金測温抵抗体により計測された温度のいずれかが、ウェハの冷却目標温度よりも0.7[$^\circ\text{C}$]低い温度に到達したとき、オンオフ弁2を閉から開にすることによって冷却液流量が6[l/min]から3[l/min]に減らされる。冷却定常状態では、冷却目標温度より低くなったプレート温度を薄膜ヒ-

Fig.3 Experimental Apparatus

タで加熱することによって目標温度に制御する。その際の薄膜ヒータへの供給電力は、冷却液流量を6[l/min]から3[l/min]にすることで低減できる。

3. 制御系設計

図2の加熱/冷却一体形プレートは、薄膜ヒータのゾーン分割と白金測温抵抗体の位置関係から、大きな相互干渉を有する多入出力系である。また、冷却液の出入口の配管およびプレート内部の冷却液の温度は、プロセス中に定常状態になることはなく、不安定な非定常伝熱が常に存在する。このような制御対象に対して、その伝熱特性の違いにより最小限に要素分割された有限要素伝熱モデルを用いて制御系を設計し、精密なウェハ温度制御の実現を図る。測定された温度のみを用いて制御した場合、ゾーン1およびゾーン3の薄膜ヒータからウェハまでの伝熱の遅れのため、精密なウェハ温度制御が困難である。

3.1 有限要素伝熱モデル 加熱/冷却一体形プレート(ウェハ含む)を図4のように9つの要素に分割して伝熱モデルを作成する。ただし、これは、加熱時の伝熱モデル(プレートへの冷却液供給を止めた状態)

Fig.4 Thermal Model with Finite Element

である。冷却時は、冷却液およびチャンバー内温度が目標温度近傍であるため、ゾーン1およびゾーン3の温度制御によって、ウェハ周りの放熱を厳密に制御する必要がない。よって、ここでは、加熱時の伝熱モデルのみを考える。要素の分割は、薄膜ヒータの分割に加えて、ゾーン2を白金測温抵抗体の位置(ゾーン1, ゾーン3との相互干渉が存在する位置)に応じて3つに分割する(E_{p2} , E_{p1} , E_{p3})。さらに、ゾーン3をウェハ近傍の要素と配管が接続される要素の2つに分割する(E_{p3a} , E_{p3b})。ここで分割した要素内に生じる温度分布における温度差は、有限要素法による伝熱解析では、配管が接続される要素 E_{p3b} 内の表面において最大8.2[°C]であった。一方、他の要素内の表面で生じる温度差は小さいため、要素内の温度は均一と考える。特に、ウェハの要素(E_{w2} , E_{w1} , E_{w3})内では、最大温度差0.1[°C]であった。3つの白金測温抵抗体により計測されたプレート温度から、後述するウェハ温度推定器およびオブザーバを用いて各要素の温度を推定するため、分割する要素数は、できる限り少ないほうが望ましい。よって、ここでは、要素 E_{p3b} とプレート内部の液体をさらに要素分割しないことにする(ただし、プレートの熱伝導率等の物性値は、固体部分と液体部分の体積比で表すことにする)。要素分割で考慮していない冷却液の出入口の配管およびプレート内部の液体への非定常伝熱(要素内の温度差によって生じる)は、後述する外乱推定オブザーバにより外乱として考慮される。

図4によって表された有限要素伝熱モデルの状態方程式は、つぎのようである。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} \quad (2)$$

$$\mathbf{x} = [w_2 \ w_1 \ w_3 \ p_2 \ p_1 \ p_3 \ p_{1a} \ p_{3a} \ p_{3b}]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{u} = [q_{22} \ q_{21} \ q_{23}]^T \quad (4)$$

A=

$$\begin{bmatrix}
 a_{11} & \frac{\lambda_w S_{w21}}{C_{w2} S_{w21}} & \frac{\lambda_w S_{w21}}{C_{w2} S_{w21}} & \frac{\alpha_w S_{w2}}{C_{w2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\lambda_w S_{w21}}{C_{w2} S_{w21}} & a_{22} & \frac{\lambda_w S_{w13}}{C_{w1} S_{w13}} & 0 & \frac{\alpha_w S_{w1}}{C_{w1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\lambda_w S_{w21}}{C_{w2} S_{w21}} & \frac{\lambda_w S_{w13}}{C_{w1} S_{w13}} & a_{33} & 0 & 0 & \frac{\alpha_w S_{w1}}{C_{w1}} & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\alpha_w S_{w2}}{C_{w2}} & 0 & 0 & a_{44} & \frac{\lambda_p S_{p21}}{C_{p2} S_{p21}} & \frac{\lambda_p S_{p23}}{C_{p2} S_{p23}} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{\alpha_w S_{w1}}{C_{w1}} & 0 & \frac{\lambda_p S_{p21}}{C_{p1} S_{p21}} & a_{55} & \frac{\lambda_p S_{p13}}{C_{p1} S_{p13}} & \frac{\lambda_p S_{p1a}}{C_{p1} S_{p1a}} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{\alpha_w S_{w1}}{C_{w1}} & \frac{\lambda_p S_{p23}}{C_{p1} S_{p23}} & \frac{\lambda_p S_{p13}}{C_{p1} S_{p13}} & a_{66} & 0 & \frac{\lambda_p S_{p3a}}{C_{p1} S_{p3a}} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\lambda_p S_{p1a}}{C_{p1} S_{p1a}} & 0 & a_{77} & \frac{\lambda_p S_{p3a}}{C_{p1} S_{p3a}} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{88} & \frac{\lambda_p S_{p3a}}{C_{p1} S_{p3a}} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{99}
 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$B = \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 \\
 \sigma_{z2,p2}/C_{p2} & 0 & 0 \\
 \sigma_{z2,p1}/C_{p1} & 0 & 0 \\
 \sigma_{z2,p3}/C_{p3} & 0 & 0 \\
 0 & 1/C_{p1a} & 0 \\
 \sigma_{z2,p3a}/C_{p3a} & 0 & \sigma_{z3,p3a}/C_{p3a} \\
 0 & 0 & \sigma_{z3,p3b}/C_{p3b}
 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned}
 a_{11} &= -\frac{\alpha_w S_{w2}}{C_{w2}} + (\lambda_w/x_{21}) S_{w21} + (\lambda_w/x_{23}) S_{w23} + \alpha_w S_{w2} \\
 a_{22} &= -\frac{\alpha_w S_{w1}}{C_{w1}} + (\lambda_w/x_{21}) S_{w21} + (\lambda_w/x_{13}) S_{w13} + \alpha_w S_{w1} \\
 a_{33} &= -\frac{\alpha_w S_{w3}}{C_{w3}} + (\lambda_w/x_{23}) S_{w23} + (\lambda_w/x_{13}) S_{w13} + \alpha_w S_{w3} \\
 a_{44} &= -\frac{\alpha_w S_{w2}}{C_{w2}} + (\lambda_p/x_{21}) S_{p21} + (\lambda_p/x_{23}) S_{p23} + \alpha_w S_{p2} \\
 a_{55} &= -\frac{\alpha_w S_{w1}}{C_{w1}} + (\lambda_p/x_{21}) S_{p21} + (\lambda_p/x_{13}) S_{p13} + (\lambda_p/x_{1a}) S_{p1a} + \alpha_w S_{p1} \\
 a_{66} &= -\frac{\alpha_w S_{w3}}{C_{w3}} + (\lambda_p/x_{23}) S_{p23} + (\lambda_p/x_{13}) S_{p13} + (\lambda_p/x_{3a}) S_{p3a} + \alpha_w S_{p3} \\
 a_{77} &= -\frac{(\lambda_p/x_{1a}) S_{p1a} + (\lambda_p/x_{13a}) S_{p13a} + \alpha_N S_{p1a}}{C_{p1a}} \\
 a_{88} &= -\frac{(\lambda_p/x_{3a}) S_{p3a} + (\lambda_p/x_{13a}) S_{p13a} + (\lambda_p/x_{3ab}) S_{p3ab} + \alpha_N S_{p3a}}{C_{p3a}} \\
 a_{99} &= -\frac{(\lambda_p/x_{3ab}) S_{p3ab} + \alpha_N S_{p3b}}{C_{p3b}}
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$A \in R^{9 \times 9}, B \in R^{9 \times 3}, C \in R^{9 \times 9}$$

w_2, w_1, w_3 ; ウェハ要素の温度[K]

$p_2, p_1, p_3, p_{1a}, p_{3a}, p_{3b}$; プレート要素の温度[K]

q_{z2}, q_{z1}, q_{z3} ; 薄膜ヒータ(ゾーン2, 1, 3)への供給電力[W]

C_i ; 要素 E_i の熱容量[J/K]

α_w ; プレート/ウェハ間の等価熱伝達率[W/m²K]

α_N ; 外気への熱伝達率[W/m²K]

λ_w ; ウェハの熱伝導率[W/mK]

λ_p ; プレートの熱伝導率[W/mK]

x_{ij} ; 要素 E_i/E_j 間の熱伝導距離[m]

(注記; たとえば, x_{w2w1} は x_{21} と簡略して表す)

S_i ; 要素 E_i の外気への熱伝達面積[m²]

S_{ij} ; 要素 E_i/E_j 間の熱伝達面積[m²]

Table 1 System Parameters

$C_{w2}=23.08$	$x_{13}=0.137$	$S_{w13}=3.625 \times 10^{-5}$
$C_{w1}=15.12$	$x_{11a}=0.020$	$S_{p21}=1.984 \times 10^{-3}$
$C_{w3}=2.833$	$x_{33a}=0.020$	$S_{p23}=3.718 \times 10^{-4}$
$C_{p2}=196.6$	$x_{13a}=0.171$	$S_{p13}=2.800 \times 10^{-4}$
$C_{p1}=146.7$	$x_{3ab}=0.026$	$S_{p11a}=2.725 \times 10^{-3}$
$C_{p3}=27.49$	$S_{w2}=0.018$	$S_{p33a}=5.105 \times 10^{-4}$
$C_{p1a}=77.01$	$S_{w1}=0.012$	$S_{p13a}=1.200 \times 10^{-4}$
$C_{p3a}=14.43$	$S_{w3}=2.169 \times 10^{-3}$	$S_{p3ab}=5.700 \times 10^{-4}$
$C_{p3b}=57.86$	$S_{p2}=0.018$	$\sigma_{z2,p2}=0.527$
$\alpha_w=281.8$	$S_{p1}=0.015$	$\sigma_{z2,p1}=0.393$
$\alpha_N=5.0$	$S_{p3}=2.772 \times 10^{-3}$	$\sigma_{z2,p3}=0.074$
$\lambda_w=168.0$	$S_{p1a}=0.014$	$\sigma_{z2,p3a}=0.006$
$\lambda_p=154.8$	$S_{p3a}=2.593 \times 10^{-3}$	$\sigma_{z3,p3a}=0.408$
$x_{21}=0.050$	$S_{p3b}=0.010$	$\sigma_{z3,p3b}=0.592$
$x_{23}=0.050$	$S_{w21}=2.877 \times 10^{-4}$	
	$S_{w23}=5.390 \times 10^{-5}$	

(注記; たとえば, S_{w2w1} は S_{w21} と簡略して表す)

$\sigma_{z2,i}, \sigma_{z3,i}$; 要素 i を覆う薄膜ヒータ(ゾーン2, 3)

の割合 ($\sigma_{z2,p2} + \sigma_{z2,p1} + \sigma_{z2,p3} + \sigma_{z2,p3a} = 1$,

$\sigma_{z3,p3a} + \sigma_{z3,p3b} = 1$)

ここで, $u \in R^3, x \in R^9, y \in R^9$ は, それぞれ入力, 状態, 出力である. 上記システムパラメータすべての値を表1に示す.

3.2 内部モデル原理に基づくサーボ系の構成

まず, ステップ目標値や外乱に対して定常偏差が残らないようにするため, 有限要素伝熱モデル(1),(2)式を用いてウェハ温度 $y_w = [w_2 \ w_1 \ w_3]^T \in R^3$ に対するサーボ系を内部モデル原理に基づき構成する. このとき, 内部モデルへの入力を $r = [r_2 \ r_1 \ r_3]^T \in R^3$, 積分器のゲイン[W/K]を $k = [k_2 \ k_1 \ k_3]^T \in R^3$ とすると, サーボ系はつぎのように表される⁹⁾.

$$\dot{x}_r = A_r x_r + B_r r \quad (8)$$

$$y_w = C_r x_r \quad (9)$$

$$x_r = [x^T \ u_2 \ u_1 \ u_3]^T \quad (10)$$

$$A_r = \begin{bmatrix} A & B \\ 0_{3 \times 9} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad B_r = \begin{bmatrix} 0_{9 \times 1} & 0_{9 \times 1} & 0_{9 \times 1} \\ k_2 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$C_r = [I_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 9}]$$

なお, 状態 $x_r \in R^{12}$ の中には測定可能な状態変数が含まれるが, 観測ノイズに強い制御系を構成するため, ここでは, x_r のすべての状態変数を後述する外乱推定オブザーバ(同次元オブザーバ)により推定する(一般に, 同次元オブザーバの方が, 最小次元オブザーバよりノイズに強い¹⁰⁾).

3.3 フィードバック制御系の設計 後述するオブザーバにより推定された各要素の温度の微分値および要素間の温度差とその微分値をフィードバックして,

ウェハ面内温度を速やかに目標温度に調整させるフィードバック制御系を考える。薄膜ヒータへ供給可能な電力を最大限利用して、ウェハ面内温度をオーバーシュートなく速やかに目標温度に調整させるためには、フィードバックゲインの固定された制御系では不十分である。例えば、目標温度までの到達時間を短くするようなフィードバックゲインを適用した場合、ウェハ温度は、オーバーシュートを生じてしまう。一方、全くオーバーシュートの生じないフィードバックゲインを適用した場合、目標温度までの到達時間が長くなってしまふ。そこで、本報では、ウェハ温度の状態に応じて、適切なフィードバックゲインを切り換えるゲインスケジュールド制御系を提案する。ウェハ温度の状態は、図5(b)の加熱/冷却一体形プレートを用いた場合のウェハ温度軌跡とプレート温度軌跡において、プレート温度がウェハ加熱目標温度に到達するまでの加熱過渡状態、ウェハ温度が加熱目標温度 -0.2°C に到達するまでの過渡状態から定常状態への加熱遷移状態、加熱定常状態、プレート温度が冷却液流量を 6[l/min] から 3[l/min] に切り換える温度に到達するまでの冷却過渡状態、ウェハ温度が冷却目標温度 $+0.1^{\circ}\text{C}$ に到達するまでの過渡状態から定常状態への冷却遷移状態、および冷却定常状態に分けられる。

提案するゲインスケジュールド制御系の制御入力(内部モデルへの制御入力)は、次式のように表される。

$$r = K_p(w)\{v - y_w\} - K_v(w)\dot{x} - K_e e - K_{ev}\dot{e} \quad (12)$$

ここで、要素間の温度差 $e \in \mathbf{R}^4$ をつぎのように定義する。

$$e := [w_1 - w_2 \quad w_3 - w_2 \quad p_1 - p_2 \quad p_3 - p_2]^T \quad (13)$$

$K_p(\cdot) \in \mathbf{R}^{3 \times 9}$ は、ウェハ温度の状態 w によりスケジュールされたフィードバック係数行列、 $K_p(\cdot) \in \mathbf{R}^1$ は、比例ゲインである。 $K_e \in \mathbf{R}^{3 \times 4}$ 、 $K_{ev} \in \mathbf{R}^{3 \times 4}$ は、固定されたフィードバック係数行列である。 $v \in \mathbf{R}^3$ は、ステップ状に与えられる3つのウェハ要素(E_{w2} , E_{w3} , E_{w3})の目標温度(通常は同一)である。

しかし、3つのウェハ要素(E_{w2} , E_{w3} , E_{w3})の温度分布を考慮しつつ、干渉を有する多入出力系のフィードバックゲインを極配置により決定することは困難である(1入出力系の場合、フィードバックゲインを K として、閉ループ系 $(A - BK)$ の極の配置により安定性や速応性を決定できる。多入出力系の場合、 K は唯一に決定できない。また、干渉を有する場合、まず非干渉化が必要である)⁹⁾。そこで、本報では、ウェハ面内温度が目標温度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以内に速やかに収束するように、

(a) Block Diagram

(b) State of Wafer Temperature; w

Fig.5 Proposed Gain Scheduled Control system by State of Wafer Temperature

各状態でのフィードバックゲインをシミュレーションおよび実験によって試行錯誤決定した(4章に示す)。今後は、相互干渉に対する非干渉化も含めて、これらフィードバックゲインの設計手法の確立が望まれる。

3.4 外乱推定オブザーバ さらに、モデル化誤差、プレート内部等への不安定な非定常伝熱、チャンバー温度の変化等の外乱に対して、ロバスト性を高めるために、ここでは、(8),(9)式のサーボ系(内部モデルと制御対象を含む)に対して外乱推定オブザーバを構成する。これによって、上記モデル化誤差等は、すべて内部モデルへの入力信号 r に重畳した外乱とみなされる。外乱推定オブザーバは、一定値外乱を仮定(一般に、プロセス制御系では、外乱の動特性を把握することが容易でないため)して次式のように構成できる。その可観測性は、 A_o , C_o からなる可観測行列の階数が15であることによって確認できる。

$$\dot{\hat{x}}_o = A_o \hat{x}_o + B_o r + G\{y_w - \hat{y}_w\} \quad (14)$$

$$\hat{y}_w = C_o \hat{x}_o \quad (15)$$

$$\hat{x}_o = [\hat{x}_r^T \quad \hat{d}_2 \quad \hat{d}_1 \quad \hat{d}_3]^T \quad (16)$$

$$A_o = \begin{bmatrix} A_r & B_r \\ 0_{3 \times 12} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}, B_o = \begin{bmatrix} B_r \\ 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$C_o = [C_r \quad 0_{3 \times 3}]$$

$$G = \begin{bmatrix} g_{1_1} & g_{1_2} & g_{1_3} \\ g_{2_1} & g_{2_2} & g_{2_3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{15_1} & g_{15_2} & g_{15_3} \end{bmatrix} \quad (18)$$

ここで、 $\hat{x}_o \in R^{15}$ は、入力に重畳した外乱 $\hat{d} = [\hat{d}_2 \ \hat{d}_1 \ \hat{d}_3]^T \in R^3$ を含む状態の推定値、 $\hat{y}_w \in R^3$ は出力(ウェハ温度)のオブザーバによる推定値である。オブザーバゲイン $G \in R^{15 \times 3}$ は、極配置法により求める。オブザーバの極は、観測ノイズに対する感度を考慮して、つぎのように配置した。

$$\begin{bmatrix} -5.1 & -4.4 & -2.9 & -0.68 & -0.53 & -0.11 & -0.13 \\ -0.13 & -0.26 & -0.90 & -0.90 & -0.90 & -4.0 & -3.9 & -3.8 \end{bmatrix} \quad (19)$$

推定された外乱をフィードバックすることにより、(12)式の制御入力 r は、新たに次式のように書き換えられる(ただし、(20)式は、オブザーバにより推定された状態を用いて記述する)。

$$r = K_p(w)\{v - y_w\} - K_v(w)\hat{x} - K_e\hat{e} - K_{ev}\hat{e} - \hat{d} \quad (20)$$

以上をまとめてブロック線図で表すと図 5(a)のようになる。図中の $y_p \in R^3$ は、プレート内部にある 3 つの白金測温抵抗体により計測された温度、 $\Delta \in R^{9 \times 4}$ は、推定された各要素の温度 $\hat{x} \in R^9$ から要素間の温度差 $\hat{e}$ を得るための係数行列である。ただし、図 5(a)には、後述するウェハ温度推定器が含まれている。また、図 5(a)の積分器には、制御対象への入力 u (供給電力)の飽和によるwindアップを抑制するため、上下限值が設けられている。

4. 実験

提案する制御手法の効果を確認するために、ウェハ全面に 20 個の白金測温抵抗体に取り付けられた 200[mm]測温ウェハ(SensArray Wafer; センサー社製)を用いて実験をおこなった結果を示す。

また、ここでは、システム同定理論を応用することによって、インプロセスのウェハ温度を計測可能なプレート温度から推定するウェハ温度推定器を提案し、その有効性を確認した結果を示す。

4.1 ウェハ温度の制御性能 まず、提案手法によるウェハ温度の制御性能を把握するため、測温ウェハ上の 3 個の白金測温抵抗体(図 4 のウェハ要素に対応する 3 個)を用いて温度制御した実験結果を図 6 に示す。このとき、シミュレーションおよび実験によって決定したフィードバック係数行列および比例ゲインは、つぎのようである。

(a) Temperature loci of Wafer and Plate

(b) Settling of Wafer Temperature

Fig.6 Experimental Results (Control Performance of Proposed Method)

$$K_p(w) = \begin{cases} [0_{3,9}] & \text{if } w = \text{Heating Transient State} \\ \begin{bmatrix} 4.9 & 0 & 0 & 19 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.9 & 0 & 0 & 31 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4.9 & 0 & 0 & 63 & 0 & 4 & 0.5 \end{bmatrix} & \text{if } w = \text{Heating Migration State} \\ \begin{bmatrix} 45.1 & 0 & 0 & 19 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 85.2 & 0 & 0 & 24 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 84.9 & 0 & 0 & 63 & 0 & 8 & 2 \end{bmatrix} & \text{if } w = \text{Heating Steady State} \\ [0_{3,9}] & \text{if } w = \text{Cooling Transient State} \\ \begin{bmatrix} 4.9 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2 & 2 \end{bmatrix} & \text{if } w = \text{Cooling Migration State} \\ \begin{bmatrix} 24.7 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.7 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4.7 & 0 & 0 & 2 & 0 & 4 & 4 \end{bmatrix} & \text{if } w = \text{Cooling Steady State} \end{cases} \quad (21)$$

$$K_p(w) = \begin{cases} 1.0 & \text{if } w = \text{Heating State} \\ 2.5 & \text{if } w = \text{Cooling State} \end{cases} \quad (22)$$

$$K_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 8 \end{bmatrix}, \quad K_{ev} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 8 \end{bmatrix} \quad (23)$$

ただし、内部モデルの積分器のゲインは $k=[46.2 \ 12.3 \ 5.7]^T$ とする。制御演算のサンプリング周期は、25[ms]とした。

図 6 は、常温のウェハを 150[°C]に加熱した後、搬

送することなく同一チャンバー内で 23[°C]に冷却した場合の実験結果である。このとき、薄膜ヒータへの最大供給電力は、3.3[kW]に制限されている。また、冷却開始時において、ウェハは、昇降ピンを駆動することによって、プレート表面から 1.5[mm]持ち上げられる。その後、ウェハ温度が所定温度(図 6 の場合、120[°C])以下になると、元の状態(ウェハがプレートに載せられた状態)に戻される。これは、プレートへの冷却液供給が開始された直後に生じるウェハ面内温度分布を低減するためにおこなわれる。

図 6 から、加熱時には、大きな相互干渉、不安定な非定常伝熱、および伝熱の遅れが存在するにもかかわらず、提案手法によって、ウェハの高速加熱と同時にオーバーシュートのない良好な制御性能が得られていることがわかる。薄膜ヒータには負の入力がないため ($u \geq 0$)、ウェハ温度を速やかに目標温度に整定させることは非常に困難であるが、提案されたゲインスケジュールド制御によって実現できている。図中の $\text{Range}[\pm^\circ\text{C}]$ は、 $((\text{最大温度}) - (\text{最小温度})) / 2$ のように定義されたウェハ面内温度分布を表す値である。ただし、図 6 の Range は、测温ウェハ上の 3 点のみの値である。

4.2 ウェハ温度推定器 実プロセスにおいて、ウェハ温度の高精度なインプロセス計測は、実現されていない⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。赤外線放射温度計は、赤外線がウェハを透過するため用いることができない。また、光ファイバーを用いた温度センサでは、計測精度が十分でなく、また、高価なため用いることが困難である。

そこで、本報では、図 7 のように、計測可能なプレート温度を用いて、ウェハ温度を高精度に推定するウェハ温度推定器を提案する⁽¹¹⁾。ウェハ温度推定器は、計測されたプレート温度およびゾーン 2 の薄膜ヒータへの供給電力(ただし、実測値ではなく、計算値)を入力、推定されるウェハ温度を出力とする状態空間モデルで記述される(図 4 のウェハ要素に対応して、3 つのウェハ温度推定器がある)。薄膜ヒータへの電力をモデルに考慮するのは、薄膜ヒータからウェハへの伝熱に対して、プレート内部にある白金测温抵抗体により計測された温度が時間遅れを有し、これを補償する必要があるためである。

状態空間モデルは、4.1 節と同様の测温ウェハを用いた実験結果からシステム同定により求める。具体的には、3 つのウェハ要素それぞれに対して、测温ウェハを用いて計測された温度とウェハ温度推定器(状態空間モデル)の出力をフィッティングすることによって、モデルの次数および各係数行列を決定する。ただし、各係数行列は、プレート/ウェハ間の伝熱特性の

Fig.7 Estimation of Wafer Temperature

Fig.8 Experimental Result Using Wafer Temperature Estimation Mechanism

Fig.9 Experimental Result by Conventional Cooling Plate

変化を考慮して、加熱状態、冷却時のウェハが昇降ピンにより持ち上げられている状態、その後の液冷状態、および液冷と薄膜ヒータによる温度制御状態で異なる。さらに、各係数行列は、加熱目標温度および加熱速度で異なる。これは、加熱目標温度および加熱速度に対する非線形性(加熱温度に対するウェハ上面の自然対流の影響等)を考慮して、より正確なウェハ温度の推定を実現するためである。そして、プロセス中にそれぞれの状態に対応した状態空間モデルを選択し、ウェハ温度を推定する。

以上をまとめてウェハ温度推定器を可変構造の状態空間モデルとして表すと、次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_{est} &= \mathbf{A}_{est}(\text{State}, T_{\text{target}}, \text{Ramp}) \mathbf{x}_{est} + \mathbf{B}_{est}(\text{State}, T_{\text{target}}, \text{Ramp}) \mathbf{u}_{est} \quad (24) \\ y_{est} &= \mathbf{C}_{est}(\text{State}, T_{\text{target}}, \text{Ramp}) \mathbf{x}_{est} \end{aligned}$$

ここで、 $\mathbf{u}_{est} \in \mathbf{R}^2$ は、計測されたプレート温度と計算された電力からなる入力、 $y_{est} \in \mathbf{R}^1$ は、ウェハ温度推定器の出力である。紙面の枚数の都合上、ここでは詳細なすべての $\mathbf{A}_{est}(\cdot)$, $\mathbf{B}_{est}(\cdot)$, $\mathbf{C}_{est}(\cdot)$ の値を示さないが、その次

数は、それぞれの状態に対して異なる(状態 x_{set} の次数に関しても同様)。

提案されたウェハ温度推定器を用いて、ウェハ温度を制御した実験結果を図 8 に示す。ただし、図 8 は、测温ウェハ上の 17 個の白金测温抵抗体を用いて、ウェハ面内温度分布を計測した結果である(図 6 は、3 点のみ)。図 8 から、提案されたウェハ温度推定器によって、インプロセスのウェハ温度が正確に推定され、良好なウェハ面内温度分布の制御が可能であることがわかる。

一方、従来の冷却プレートを用いた場合の実験結果の一例を図 9 に示す。図 8, 9 を比較することによって、加熱/冷却一体形プレートを用いた場合、冷却過渡状態に生じるウェハ面内の温度差が、従来の 1/4 に低減されていることがわかる。ここでは詳細を述べないが、加熱過渡状態においても同様の性能改善が見られる。

今後は、目標温度近傍でのウェハ面内温度分布の収束性改善(プレート構造および製作に起因)とチャンバ一温度の変動や平面度の違うウェハ等に対するウェハ温度推定器の適応性、ロバスト性の向上が必要である。

4.3 ウェハ温度推定器を用いた任意熱履歴制御

つぎに、加熱/冷却一体形プレートを用いることによって実現可能となるウェハ毎の任意熱履歴制御の実験結果を図 10, 11 に示す。図 10, 11 は、それぞれウェハ毎に加熱目標温度および加熱速度を変更した場合の実験結果である。ここで、ウェハの加熱速度は、加熱過渡状態における 3 つのゾーンの薄膜ヒータへの最大供給電力を制限することによって変化させた。図 10, 11 から、加熱目標温度および加熱速度を変化させた場合でも、提案されたウェハ温度推定器によって、インプロセスのウェハ温度が正確に推定され、良好なウェハ面内温度分布の制御が可能であることがわかる。これより、提案手法によって、ウェハ上の種類や性質の異なるレジストに対して、任意の熱履歴を容易に与えることができる。

5. 結 言

大きな相互干渉を有する多入出力系の半導体製造用加熱/冷却一体形プレートに対して、その伝熱特性の違いにより最小限に要素分割された有限要素伝熱モデルを用いたゲインスケジュールド制御系を提案し、その有効性を実験により確認した。また、インプロセス計測が困難なウェハ温度を、計測可能なプレート温度を用いて推定するウェハ温度推定器を提案し、その有効性を実験により確認した。そして、提案手法によ

Fig.10 Experimental Result of Thermal History Control (Change of Heating Target Temperature)

Fig.11 Experimental Result of Thermal History Control (Change of Ramp Rate)

て、従来の加熱/冷却システムでは、実現が困難であった精密なウェハの任意熱履歴制御が可能になった。今後の課題は、相互干渉に対する非干渉化も含めた制御系設計手法の確立とウェハ温度推定器の適応性、ロバスト性の向上である。

文 献

- (1) 木浦成俊, 2003 半導体工場・装置・材料, (2003), 188-194, 電子ジャーナル.
- (2) 木浦成俊, 2002 半導体テクノロジー大全, (2002), 193-206, 電子ジャーナル.
- (3) 板東賢一・福原聡・横田眞一, むだ時間を有するプロセスに対する離散時間スライディングモード制御と半導体製造用クリーニングプレートへの適用, 日本機械学会論文集 C 編, 69-682(2003), 1587-1594.
- (4) 板東賢一・福原聡・横田眞一, モデル規範形スライディングモード制御を応用したマスター・スレーブ制御 (マルチゾーン形クリーニングプレートの温度軌跡追従制御), 日本機械学会論文集 C 編, 70-696(2004), 2329-2336.
- (5) 篠原興二, '02 最新半導体プロセス技術, (2001), 78-81, プレスジャーナル.
- (6) Khalid El-Awady, Charles D. Schaper, and Thomas Kailath, Integrated Bake/Chill for Photoresist Processing, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 12-2 (1999), 264-246.
- (7) 白石昌武, 入門現代制御理論, (1987), 148-155, 啓学出版.
- (8) 岩井善太・井上昭・川路茂保, オプザバ, (1988), 119-123, コロナ社.
- (9) 中廣行・佐竹司・大槻久仁夫, シリコンウェハの温度計測用ラマン分光システムの性能改善, 第 64 回応用物理学学会学術講演会予稿集, (2003-9), 2a-ZH-8.
- (10) 佐々木隆史・池田純一・菊田和重・菱沼孝夫・近久武美, サファイアロードによる積層型過熱炉内ウェハ温度計測, 第 38 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2001-5), C214.
- (11) 板東賢一, 基板温度推定装置及び方法並びにそれを用いた基板温度制御装置, 公開特許公報特開 2000-235944, (2000-8).