

半導体熱処理炉におけるファジィを用いたPID温度制御の高精度化

PID Temperature Control Improvement of Semiconductor Furnace Using Fuzzy Logic

服部 昌 M. HATTORI 奥村繁一 S. OKUMURA 新見憲生 N. NIIMI

In the semiconductor field, it becomes difficult to satisfy recent demands on the temperature controll performance using a standard PID controller. Still more, to optimize a PID controller, much time is required for trial-and-error tuning. But simple and intuitive property of a PID controller is useful in production environment. We have developed a new method that improves PID controller performance, setting PID parameters for steady-state characteristic at first, and later compensating for transient characteristics. This paper describes an attempt to expand the applicable range of the PID controller using fuzzy logic, and to reduce the effort for PID parameter tuning.

Key Words: fuzzy, furnace, PID, temperature control, semiconductor

1. はじめに

半導体の高集積化・微細化は、3年で1世代のペースで進み、設計ルールやゲート酸化膜換算厚の値は1世代で約0.7倍となる。同時に、製造コスト低減のためウエハの大径化が進み、300mmウエハの時代を迎えるようになった。

300mmウエハは、従来の8インチウエハと比べ、径が1.5倍、厚みは1.2倍で、自重による内部せん断応力が2倍となり、大径化による面内温度差による内部応力増加と相まって結晶欠陥(スリップ)が生じやすくなっている。

一方、高集積化・微細化により成膜品質に厳密さが求められ、半導体熱処理装置における熱制御への要求は格段に厳しくなってきた。

半導体熱処理装置における温度制御はPID制御が主流であるが、温度制御への要求の高度化によりH制御等、現代制御理論を駆使し成果を出すものも見受けられるようになった¹⁾²⁾。しかし、現代制御理論では、現場技術者の理解を期待できず、制御パラメータを個別に調整できないという難点もあり、メーカーにもユーザーにも現場性という点でPID制御は根強く支持され、現在でも広く用いられている。

我々は、多大な工数を要していたPIDのチューニング方法を見直した上で、過渡的な応答部分にファジィ推論を用い、PID制御の利点である現場性を損なうことなく、大幅な温度制御性能の向上を行った。

2. ウエハ用熱処理技術の問題点

図1に実験に用いた縦型ポリイミドキュア炉(VF-5700B)の構造図を示す。

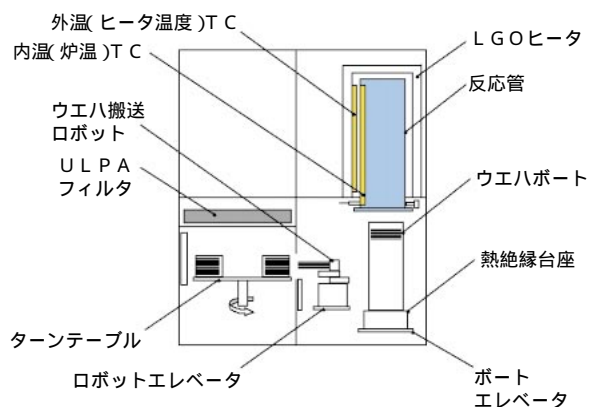


図1 縦型炉の構造

Schematic of vertical furnace

ウエハの処理はレシピと呼ばれる温度パターンに従って以下の手順で実行される。

スタンバイ：炉の温度を一定に保ちウエハのローディングを待つ。

ウエハローディング～ポトリカバリ：スタンバイ温度に保たれた炉に常温のウエハを導入する(図1のウエハポートが上昇し、ウエハが反応管の中に入る)。この時、炉の温度が急速に低下するが、この温度低下をいかに抑さえ、素早く回復させるかが問題となる。

ランピング：ウエハを炉に入れた状態で処理温度まで指定される速度で昇温する。各ゾーン間に温度差があると品質にバラツキが出る

ため温度バラツキをなくしながら昇温することが必要である。

処理温度への温度整定：ランピング動作により所定の温度に到達するとレシピは一定温度となる。しかし、炉内にウエハが存在するため大きな時定数を持ち、炉内温度をレシピの温度パターン通りに推移させることは難しく、温度のオーバーシュートが生じるか、肩の部分が丸くなり所定の温度への整定が遅くなる。

降温：処理終了後は炉温を取り出し温度まで徐々に降下させ、ウエハの取り出しを行う。

以上のプロセス中、熱制御上の課題となるのは主にであり、これらのプロセスを如何に速やかに精度良く温度整定をするかによりスループットとウエハの成膜、熱処理品質が左右される。

これらの性能諸元以外の問題としてPIDパラメータのチューニングがある。従来、パラメータは上記の～の制御フェーズ毎に設定を行うのが常であり、装置の立ち上げ調整、ヒータ特性の経時変化などによる再調整には多大な工数を要した。したがって、今回の開発課題には性能上の問題以外にも、チューニング工数の削減が大きな課題であった。

3. 制御系の構成

3.1 基本構成

制御系の構成を図2に示す。

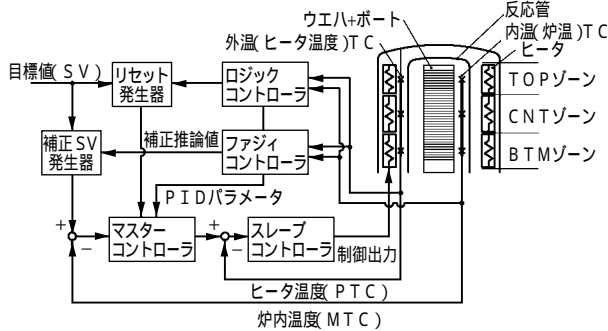


図2 制御系の構成

Diagram of temperature control system

制御系の基本はPID制御器のカスケード接続であり、各部は以下の機能を果たしている。

マスターコントローラはスレーブコントローラ目標値(SV)を生成し、これを受けてスレーブコントローラがヒータ制御を行う。ファジィコントローラは制御状態によりマスターコントローラの制御パラメータを変更し過渡的な制御特性を改善する。また、SVの

補正値を発生する。

ロジックコントローラは、PID制御器のリセット、ファジィ推論の有効・無効信号など制御の流れ、モードのコントロールを行う。リセット発生部は、ロジックコントローラの信号を受けマスターコントローラ出力値をゼロあるいは指定値にセットする。

SV補正部はランピングから定値運転への移行時のオーバーシュート抑制を目的にファジィ推論を用いて新たなSVを発生する。

なお、実験に用いたVF-5700BはTOP・CNT・BTMの3つのヒートゾーンで構成され、それぞれのゾーンが独立に制御される。したがって図2は実際には3組の制御系により構成されている。

3.2 PIDパラメータのチューニング

パラメータのチューニングは従来、制御フェーズ毎に内温(炉温度)と外温(ヒータ温度)の連動を見ながらチューニングするという複雑な操作が要求された。

我々は、ヒータにフルパワーを印加し、昇温特性からパラメータを推定することにより、トライアンドエラーによるこれら複雑なチューニング作業を無くし、パラメータを1本化することを試みた。

図3は内外温の昇温特性であり、低温側では、

$$\text{外温}; \theta_{\text{外温}}(s) = \frac{K_{\text{外温}}}{s(1 + T_{HS})} U(s)$$

$$\text{内温}; \theta_{\text{内温}}(s) = \frac{K_{\text{内温}}}{s(1 + T_{HS})(1 + T_{RS})} U(s)$$

というモデルで近似を行った。

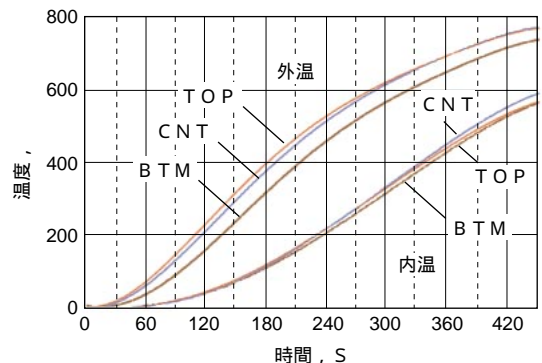


図3 炉の昇温特性

Temperature rise properties of furnace

高温側では一度飽和動作に入る気配を見せるが、途中からほぼ直線状に温度上昇を続け、内温と外温の温度差に開きが無くなってくる。

このモデルを用い、シミュレーションによりパ

ラメータを決定することも考えられるが、我々は現場性を考慮し、シミュレーション結果と実機実験をZiegler-Nichols法に相当する図式チューニング法に結びつけ、パラメータ設定手法の標準化を行った。このことにより、パラメータのチューニングは、フルパワーを印加し昇温特性を得ることと後に述べるオーバーシュート補正の2つの作業のみとなった。

こうして求めたパラメータを用いたPIDによる制御結果を図4に示す。

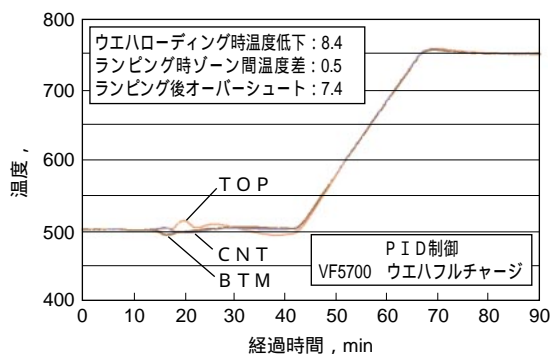


図4 PIDによる制御結果

Result of temperature control with PID controller

この制御結果では、ウエハローディング時の温度低下は比較的押さえられているが、TOPのオーバーシュート後のアンダーカットが大きく、CNT・BTMもリカバリ時に約4%のオーバーシュートが生じている。また、ランピング後のオーバーシュートも大きい。しかし、その他の部分に問題はなく、これら過渡応答を改善すれば十分な制御性能が得られることが判る。

3.3 ボートリカバリ特性の改善

図5は160 スタンバイでのボートローディング時の様子を示す。測定はローディング信号ONと同時にヒータの電源をOFFにして行った。

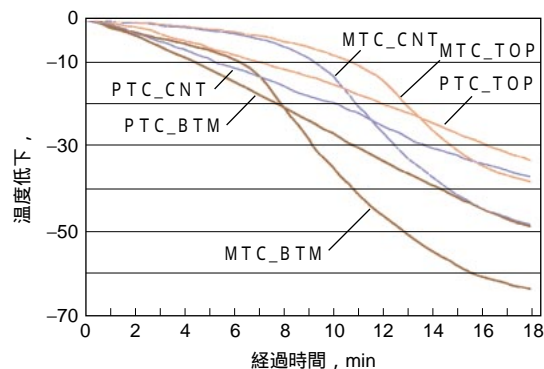


図5 ボートローディング時の温度変化

Temperature change during wafer boat loading into furnace

このグラフからは、炉の扉が開くとすぐに外気の流れ込みによる温度低下が始まり、ウエハの先端が各ゾーンに達した時から急激な温度低下が始まる事が判る。

この温度低下は、ウエハのローディング温度や実装状態によって大きく変動するが、これら熱負荷の変動は炉温の変化速度に現れる。PIDの微分動作によって、温度の変化速度に比例した制御出力が得られるが、急激に温度が落ち込む部分では比例的な制御出力では追いつかない。また、この部分を過ぎれば、制御出力の速やかな減少が必要である。したがって、制御偏差と温度変化速度を元に微分時間 T_d を(1)式のように、ファジィ推論値 G_d を用いてコントロールを行った。

$$T_d = T_{d0} + (1 + G_d) T_d \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 T_{d0} はチューニングによる微分時間、 G_d はファジィ推論値(- 1 G_d 1)、 T_d は微分時間の変動幅である。

3.4 オーバーシュート抑制

制御器への温度目標値は上位から与えられるため、ランピングのレートや最終値という情報を制御器自身は持っていない。そのため、最終目標値を元にしたオーバーシュート抑制手法が使えず、レシピから与えられた目標値を補正して制御器へ渡す、一種の目標値フィルタをマスタコントローラに前置する手段をとった。

その動作説明を図6に示す。

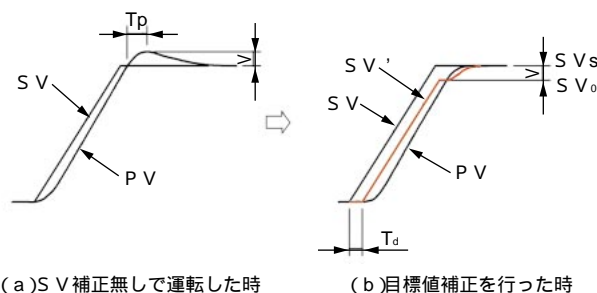


図6 SV補正の動作原理
SV compensation method

以下、PID制御時のオーバーシュートをV、現在温度をPV、PVが目標値を越えてからオーバーシュートピークまでの時間を T_p 、レシピの与える目標値をSV、補正SV発生器の出力を SV' 、SVが一定になった時の値(=ランピングの最終値)を SV_s 、 $SV_0 = SV_s - V$ とする。

V 、 T_p はPIDによる制御結果(図4)より求め、遅延時間 T_d と共にコントローラへ与えておく。

ただし、 T_d は昇温速度をR / minとすれば、

T_d V/R とする必要がある。

レシピがランピングへ入ると補正SV発生器はSVを設定された時間 T_d だけ遅延するが、

$$SV = SV_s \text{ かつ } SV_s - SV' = V$$

となると遅延を終了し、 $SV' = SV_0$ とする。

その後は、補正目標値 SV' をファジィ推論を用いて次式に従ってコントロールする。

$$V = (1 + G_{SV})V_0$$

$$SV' = SV_0 + (V) \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 $V_0 = V / T_p$ 、 G_{SV} はファジィ推論値 ($-1 < G_{SV} < 1$)である。

ファジィルールはPV SV_0 では $SV' = SV_0$ を保持し($G_{SV} = -1$)、PV SV_s で SV' が SV_s に滑らかに近づくように設定する。すなわち、オーバーシュートを前提に、ひとまずVだけ低い温度に目標値を設定し、ピークの出現するところで本来の目標値に戻すという考え方である。ファジィ推論を用いることにより、V、 T_p の設定に精密さが不要となり、V、 T_p は求めた運転条件以外でも設定変更は不要である。なお、補正は $SV' - SV_s$ で終了する。

3.5 ファジィコントローラ

ファジィ演算はウエハローディング信号、あるいは、SV補正開始信号により有効となり、現在温度、偏差 $e = SV -$ 、温度変化 d/dt を元に、それぞれに設定したファジィルールとメンバシップ関数からファジィ推論値Gを求め、(1)、(2)式の演算結果をマスターコントローラあるいは補正SV発生器に渡す。

ファジィ推論値はある程度以上あれば分解能を上げて制御性の差異が生じないため³⁾、後件部はシングルトンとし、簡易推論法を用いた。

4. 制御性能

図7に本制御器による制御結果を示す。

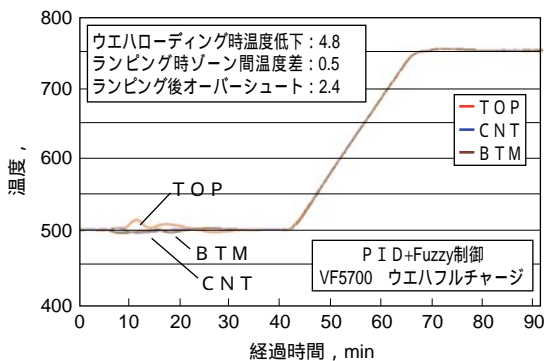


図7 開発した制御系による制御結果

Control result using developed temperature controller

ウエハローディング時にTOPゾーンの温度が上昇しているが、これはTOPゾーンの制御量が0であるにもかかわらず、BTM、CNTの熱影響を受けているためであり、この熱系では、BTM・CNTの温度低下をこれ以上押さえるとTOPの温度上昇が大きくなり、全体としての整定時間が長くなる。これは今後、熱系全体の問題として見直しを図るべき課題である。

しかし、図4と比べて、ポトリカバリ時、TOPのオーバーシュート後のアンダーカットが大幅に低減され、BTM・CNTのオーバーシュートも無くなりファジィ制御による効果が見られる。

PIDによるカスケード制御を縦型炉に用いた性能は各種公表されたものがある。表1は、その代表的例と今回の開発した制御系による性能とを比較したものである。

表1 PIDによる限界性能¹⁾と開発制御システムの比較

Temperature control between PID and developed system

項目	PID	開発品
昇温後のオーバーシュート,	3.0 - 5.0	2.4
昇温時温度差整定時間, 分	5 - 20	2 - 5
昇温時ゾーン間温度差,	3.0 - 5.0	< 0.5
定常時温度ふらつき,	< ±0.3	
初期調整日数, 日	3 - 10	1 - 1.5
ポトリイン時温度低下,	20 [*]	5

*従来実績(公表データ無し)

従来のPID制御で、ここに示される性能まで追い込むためには、熟練オペレータが1週間以上を掛けて調整することも稀ではなかったが、開発したコントローラでは、1度の調整(約6時間)のみで図7および表1右欄の性能を得ることができた。この性能はH制御による制御結果²⁾と同等の結果である。

なお、調整時間の大半は一度上げた温度が下がるのを待つ時間である。

500 750 以外に160 350, 350 500, および、この3つの温度条件で、ウエハハーフチャージ、ガス流量50SLMにおいても、PIDパラメータの再調整無しで同等の制御性能を確認している。

5. おわりに

PID制御において過渡応答を求められる部分にファジィ推論を用いてPIDの適用限界を高め、縦型炉の温度制御性能を大幅に向上させた。

また、ウエハ熱処理炉における大きな問題であったPIDパラメータのチューニング工数も大幅削減を実現した。

本手法では、まず定常特性を確保した上で、過渡応答の補償をするため、一つは良くなったが別のところが悪くなってしまったというチューニング時の相反性がない。ファジィルールの精密化、スケーリングファクタの最適化により制御精度はさらに向上が期待できる。

制御系開発における現代制御か古典制御かの問題は、制御対象の動特性がよほど複雑なものでない限り、ユーザーがパラメータ調整をする必要の有無に帰着することが多い。要は、お客様の望むプロセスでいかにスループットを上げ、予期せぬダウンが起こっても、ダウンタイムをいかにゼロに近づけるかが課題である。

その意味で現場での即応性を考え、可能な限りの単純化・直感化を図った。

普段はPIDで動き、過渡的な部分をファジィで助けるという考え方は意外と少ないが、近似的にシステムモデルが求められていれば、安定性や応答性の議論が定量的にできるという、従来のPI型ファジィ制御に無い良さを併せ持っている。PIDだけでは要求仕様が満たせないが、PIDの簡便さ、現場性は捨てられないという要求に対するひとつの解答になったのではないかと考えている。

参考文献

- 1) Mark Yelverton, Kevin Stoddard "Improving Diffusion Furnace Capability Using Model-Based Temperature Control in a Production Environment" Sixth International Symposium on Semiconductor Manufacturing (ISSM) Oct./1997.
- 2) Miko Tucker, Kostas Tsakalis, Kevin Stoddard "Improving Vertical Furnace Performance Using Model-Based Temperature Control" AEC/APC Symposium Oct/1998.
- 3) 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社。

筆 者



服部 昌*
M. HATTORI



奥村繁一*
S. OKUMURA

新見憲生**
N. NIIMI

* 総合技術研究所 機械システム研究部

** 光洋サーモシステム(株) 半導体液晶装置部