

# 半導体プロセス用 PI マスフローコントローラのアルゴリズム

## Algorithms of Latest Pressure Insensitive Mass Flow Controller (PIMFC) for Semiconductor

Arun Nagarajan \*

Alexei Smirnov \*

半導体産業は非常に高い精度で安定的に制御される必要があるさまざまなプロセスガスを使用している。これらのガスは、熱容量、比重、および密度が異なり、温度によっては流速の変動を引き起こす場合がある。日立金属が開発したプレッシャーインセンシティブマスフローコントローラは、流量センサの検出範囲を拡大するとともに独自のマルチガスアルゴリズムを開発することによって、上流側（一次側）圧のガスの流速が変動する製造プロセスにおいて、高精度で安定したガス質量流量を供給することができる。さらに、将来のアルゴリズムの設計では、装置上で最適な調整が可能となること、およびさらに進歩した診断技術を開発することが期待されている。

The semiconductor industry uses a variety of process gases which need to be controlled with extremely high accuracy and stability. The various process gases that are used have varying characteristics like thermal capacity, specific gravity and density. These characteristics when combined with varying temperature and hysteresis can cause fluctuations in the flow rate. PIMFC product consist of extending the range of the flow sensor, developing multi gas algorithms.

PIMFC product can provide a constant gas mass flow, despite having fluctuations in inlet pressure in the piping systems, which is currently offered in the market. In addition, the future algorithms design is looking into performing on tool tuning, and developing advanced diagnostics.

● Key Word : アルゴリズム, PIMFC, マルチガス

● Production Code : PIMFC

● R&D Stage : Mass-production

## 1. 緒言

半導体業界を筆頭に、多くの産業プロセスでは、各種のプロセスガスを高い精度で制御する必要がある。ガス流量の制御にはマスフローコントローラ（以下、MFCと表記）を使用し、MFCを搭載するガス供給流路には、通常圧力調整器（レギュレータ）を設置し、MFCの一次側の圧力を制御する。圧力調整器に誤差があると、圧力過渡現象を生じ、ガス供給流路に対する目標圧力から逸脱することがある。このような圧力偏差がMFCに流れるガス流量に変動を及ぼし、プロセスの歩留まりを悪くする。

中でも、半導体プロセスの場合、プロセス装置に複数のチャンバが搭載され、各チャンバに1個または複数のMFCが搭載される。そのため、ガス供給流路において圧力調整器がガス供給配管内の圧力を全体的には安定した値に維持していても、同一配管に接続された1個または複数のMFC

を流量制御するとその配管内の圧力が変動する。このような圧力変動が同一配管に接続された他のMFCにも影響を与えることがある。

圧力変化がMFCの流量制御の精度を低下させることが多いため、理想的には、MFCがこれらの不要な圧力過渡変動現象を吸収し、配管内の一次側圧力が変動しても流量精度を一定に保つMFCを開発し、市場に提供することが望まれている。そこで本報では、これらの課題に対応するために日立金属が開発したプレッシャーインセンシティブMFC（以下、PIMFC）について、その性能を検証した。

## 2. 主な解決すべき課題

代表的なMFCは、流量センサ（一般的には熱式流量センサ）、バイパス、および制御バルブで構成されている。PIMFCの外観写真を図1に、構造図を図2に示す。

\* Hitachi Metals America, Ltd.



図1 開発品 PIMFC  
Fig. 1 R&D Product PIMFC

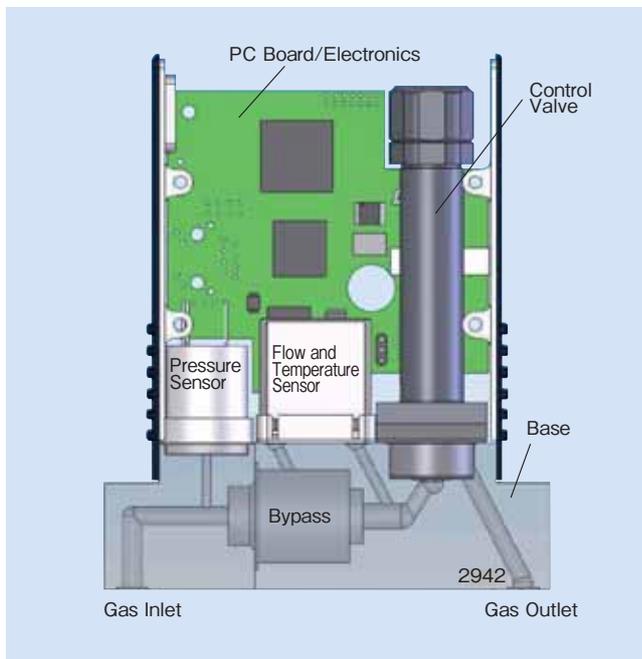


図2 PIMFC 構造図  
Fig. 2 Component drawing of PIMFC

MFC単体で「一次側の圧力変動に反応しにくい」または「一次側の圧力変動に影響を受けにくい」流量制御を可能にするためには、以下のことを考慮する必要がある。

### 2.1 コンバージョンファクター (CF)

一次側の圧力の変化はMFCにさまざまな影響を及ぼす。マルチガス (以下、MGと表記) 対応MFCの場合、例えば、重要なガス特性の一つは比熱 (Cp) である。MG対応MFCは、通常容易に入手できる不活性ガス (窒素, Arなど) で校正される。窒素ガス以外のプロセスガスを用いる場合、既知の窒素の特性、特に比熱を用いてガスの実流量が換算されることがある。窒素とプロセスガスの比熱の比は、通常コンバージョンファクタ (以下、CFと表記) と呼ばれる。特定の圧力範囲内で仕様範囲内の流量計測精度を維持するには、CFは圧力に依存することを考慮する必要がある。

### 2.2 デッドボリューム

MFC圧力変動のもうひとつの原因には、「デッドボリューム」がある。デッドボリュームとはMFC内の流量センサとバルブ間に存在する容積のことを指す。ガスの一次側圧力が変わると、このデッドボリュームの圧力が一次側圧力に近似するまで、流量センサを通してガスの流れを生じる。流量センサはこの流量を計測し、MFC制御システムが実流量として認知する。この実流量と無関係な仮想流量、すなわちBypassの入口と出口の圧力差によってセンサに発生する仮想出力は、MFCクローズドループアルゴリズムにより流量制御に影響し、実流量の大きな偏差を招くことがある。

### 2.3 バルブ/流量特性

圧力変動のもう一つの影響は、バルブ開度と流量に非線形な関係を生じさせることにある。高圧の状態で流れるガスの流量は、低圧の状態に比べるとバルブの開口度に大きく左右される。バルブの構成やセットアップの違いにより、バルブ流量特性は、非線形状態を示す。MFCのレスポンスを高速かつ安定したものとし、制御ループの確実な安定化を図るために、上記の事実を考慮に入れなければならない。

しかし、上記のことはMFCの流量性能を一定にするための圧力の影響を述べたものであり、他にもMFCに間接的な影響を及ぼす要素が多々ある。したがって、さまざまな圧力条件のもとでMFCの性能および流量精度を仕様範囲に収めることが大きな課題である。

この課題を解決するため、PIMFCは、MFC内に圧力センサを内蔵し一次側の圧力変動の影響を受けにくいMFCとして、開発、市場に提供した。

## 3. 主な開発内容と結果

MFC内蔵圧力センサは一次側の絶対圧力および圧力変動を計測し、MFC制御アルゴリズムで圧力値からバルブ開口度を制御し、圧力変動時においても要求仕様に合致したガス流量を維持する。また、ガス供給配管内の圧力値をMFCから直接得ることができ、装置ガス配管に圧力計の搭載場所を確保する必要がなくなるため、ユーザーに利点をもたらす。PIMFCのアルゴリズムには、圧力変動に影響されにくい機能の他に、MFCの精度、性能、応答性を標準MFCより著しく向上する多くの機能がある。個々のMFCは、製造プロセス時にきめ細かな自動特性評価手順を実行し、この特性評価データはアルゴリズムにより分析され、基本的なMFC特性のみならず、個々のMFCの特定性能を明らかにする。得られたデータはMFCメモリに保存され、MFC動作時に最新の制御アルゴリズムにより使用される。PIMFCの制御方法およびその特性は、複数の特許を取得しており、それはMFC制御ループに関するもので通常利用される標準PID制御 (比例、積分、微分) とは異なり、以下の3つのことを考慮している。

### 3.1 コンバージョンファクター (CF) に対応

各種ガス種、その圧力変動に対応するため、きめ細かな新しい制御ループを適合させ、ガス流量を安定した状態に維持する。

### 3.2 デッドボリュームに対応

図3に従来のPIMFCの過渡応答波形を示す。この図には圧力の異なるさまざまなケースの過渡応答波形（初期設定値および最終設定値は、それぞれ、0%および100%で計測）が重ねられており、その形状はさまざまな圧力でそれぞれ異なる。また異なる流量設定値間の過渡現象においても同様の値を示す。

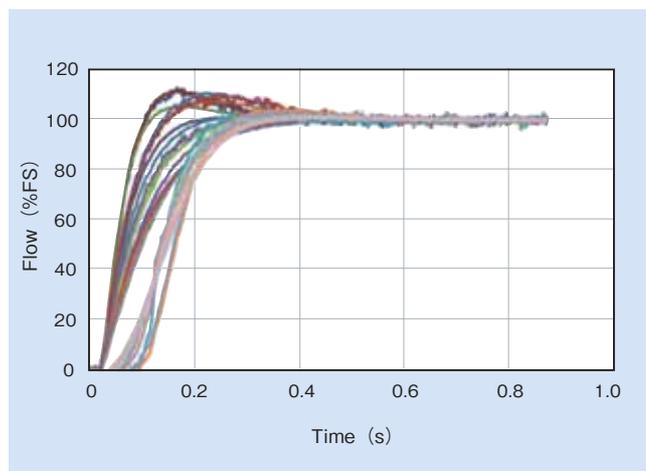


図3 従来のPIMFCの過渡応答波形の例  
Fig. 3 Transient flow curves of previous PIMFC

図4はPIMFCの場合の過渡応答波形を示す。PIMFCでは接ガス部材構造を見直し最新制御ループアルゴリズムによりレスポンスが著しく改善された<sup>1)</sup>。またさまざまな動作条件のもとでも、目標値をオーバーすることなく安定かつ高速の過渡応答性能が達成できる<sup>2), 3)</sup>。従来のPIMFCより安定しかつ予測可能な過渡曲線を得ることは、多くの半導体製造プロセスにおいて非常に重要なことである。

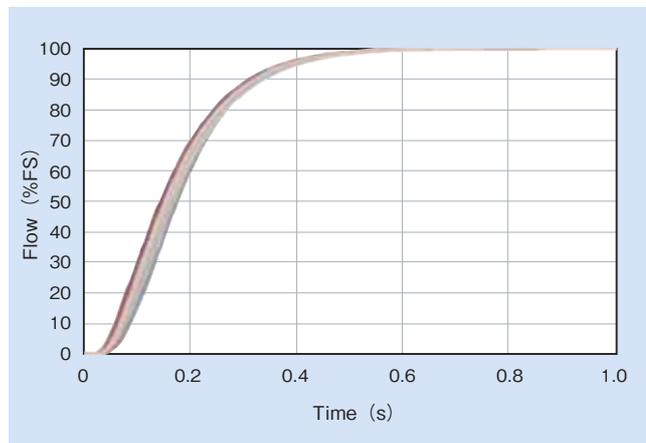


図4 PIMFCの過渡応答波形の例  
Fig. 4 Transient flow curves of PIMFC

### 3.3 バルブ/流量特性に対応

MFCに使用される圧電型および電磁型アクチュエータの両方に特有のヒステリシスが存在し、その位置はバルブ制御信号の移動方向に依存する。通常はバルブ開口度の変動に関するすべてのヒステリシス曲線に依存する。例えば、図5のグラフは、バルブ制御信号が増加し、その後減少する間に異なる圧力で得られた一連のバルブ位置特性を示す。

このようにバルブ開口度が定まらないことは、圧力変動に影響されにくい機能（以下、PI機能と表記）の流量精度を低下させる。精度に対するヒステリシスの影響を排除するため、製造時に各デバイスのヒステリシス特性を数値化し、MFCメモリ内に保存する。MFC動作時にバルブ制御信号は、ヒステリシス特性の影響を考慮した制御アルゴリズムにより調整されるため、MFCのPI機能が向上する<sup>4)</sup>。

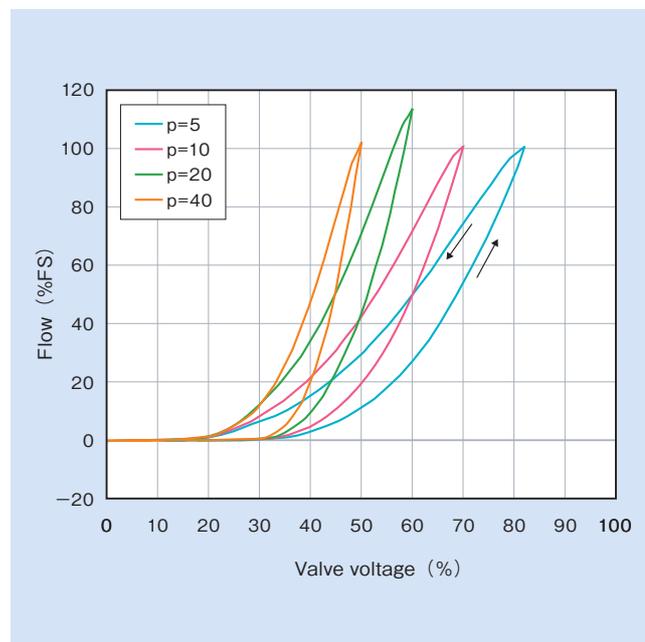


図5 PIMFCのヒステリシス曲線の例  
Fig. 5 Hysteresis characterization of PIMFC

## 4. 総合評価結果 (性能確認)

### 4.1 PI性能評価結果

MFC単体レベルの性能確認後、プロセス装置内の代表条件を模擬した実験配管で下記の結果を得た。プロセス装置内の代表的条件を模擬した実験配管系を図6に示す。

標準MFCおよびPIMFCの流量設定条件を100%セットポイント (SP) とし、MFCの上流側圧力の信号をモニタリングした。ガスを流して10秒後、大流量MFCをONにすると、配管内の圧力が下がる。その圧力の読み値を図7に示す。PIMFCの流量の読みは、圧力変動を適正に管理し安定しているが、標準MFCの流量の読み値は、流量精度の範囲から逸脱している。

20秒後大流量MFCをOFFにすると、配管内の圧力が上昇する。同様にPIMFCの流量の読みは、圧力変動を適正

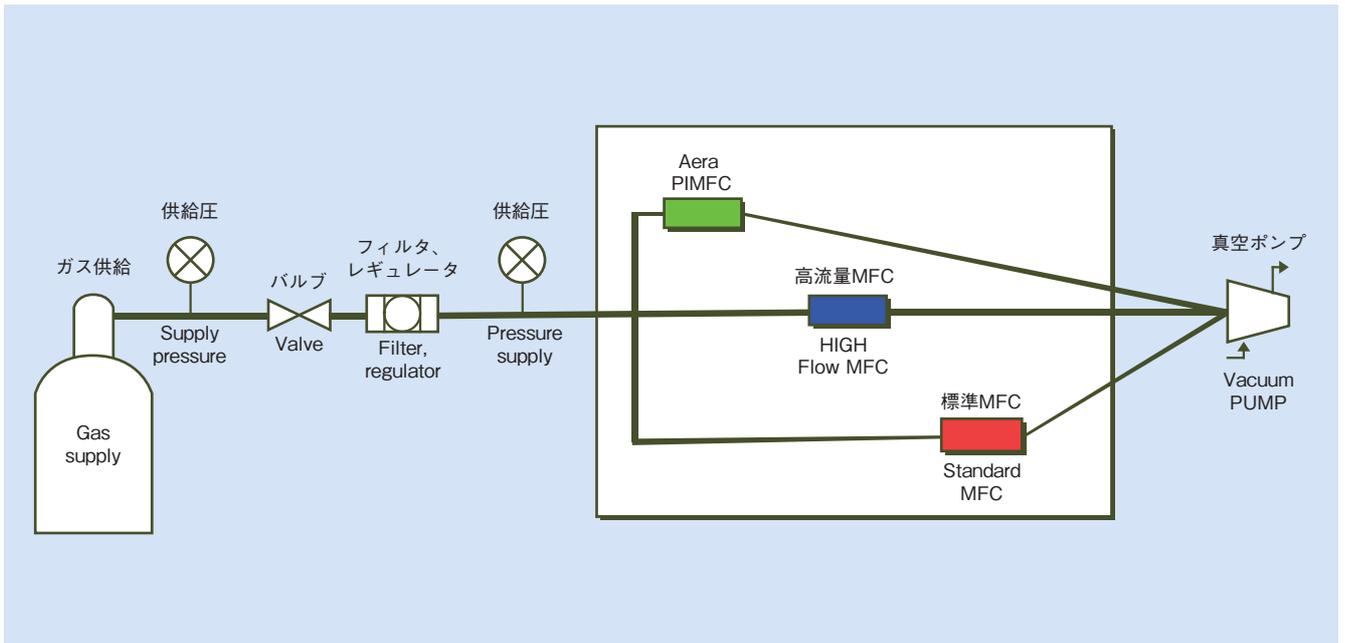


図6 プロセス装置内の代表的条件を模擬した配管系  
Fig. 6 Piping system of test setup to simulate process tool conditions

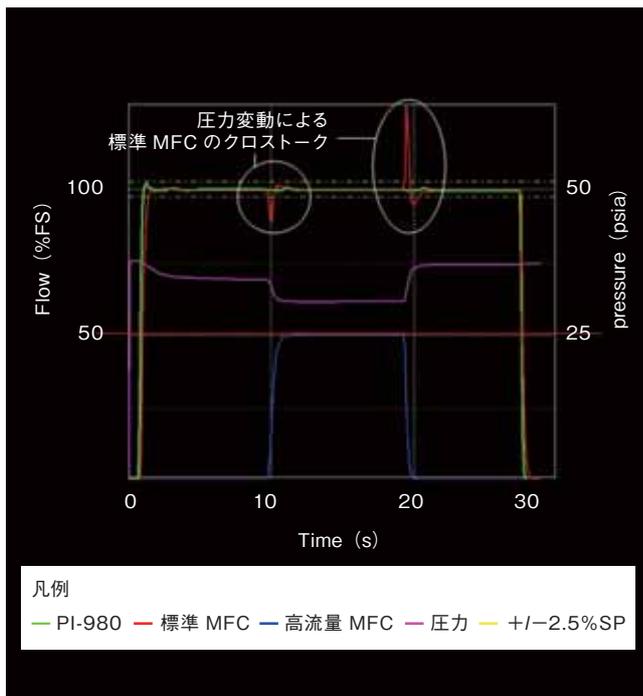


図7 合流している大流量 MFC の ON/OFF を行った場合の標準 MFC に対する PIMFC 波形の安定性結果の例  
Fig. 7 Flow of pressure insensitivity of PIMFC is stable with high flow MFC against standard MFC

に管理し安定しているが、標準MFCの流量の読み値は、流量精度の範囲から、さらに大きく逸脱している。

図8は図6の配管系で、一次側の圧力が不安定に変動した場合の標準MFCおよびPIMFCの各応答波形である。この図ではPIMFCの安定性において、流量精度範囲内に収まっていることがわかる。

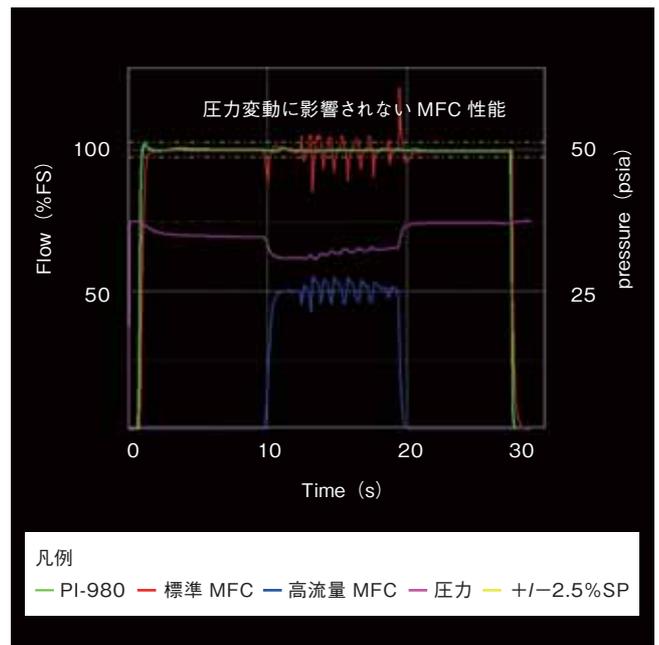


図8 不安定な一次側圧力の場合の PIMFC 波形の安定性の例  
Fig. 8 Flow of pressure insensitivity of PIMFC is stable with inlet pressure fluctuations against standard MFC

#### 4.2 MG 適合アルゴリズム

PIMFCは常に改善され、MG対応MFCの応答性は、MFC製造時に校正ガスを用いて、オーバーシュートを生じない最適な過渡応答波形となるよう調整される<sup>5)</sup>。異種のがスを流すと熱式流量センサの特性が変わり、過渡曲線が変わる。この方法により、MFC調整パラメータにわずかな変更を加えMFCの応答性もMGに適合する。装置動作時にプロセスを中断することなく、変更が自動的に実行さ

れる。図9は、校正ガスを用いたデフォルトのMFC調整を行い、複数のガスを供給しPIMFCのMG適応なしの場合とありの場合のPIMFCの応答波形を示している。

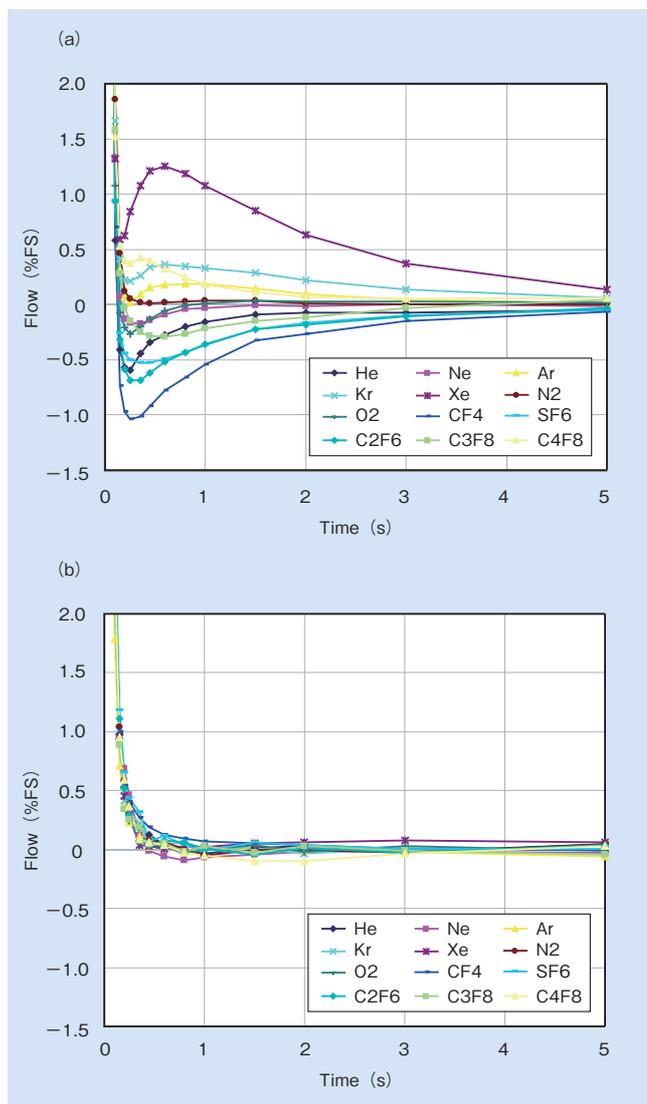


図9 複数のガスを供給した場合のMFCの応答波形 (a) PIMFCのMG適応なし(N<sub>2</sub>校正後) (b) PIMFCのMG適応あり(複数ガス調整後)

Fig. 9 MFC response for different gases (a) PIMFC without MG (with calibration gas N<sub>2</sub>) (b) PIMFC with MG (after gas-specific modification)

### 4.3 オンツール校正アルゴリズム

最先端のアルゴリズムを使用し、装置動作時のプロセス実行中に以下の自動特性評価が行われ、MFCの性能調整が提供される。

- ①流量立ち上げ時の応答性および過渡特性
- ②ゼロでない流量設定値のPI特性
- ③遮断時の過渡曲線
- ④アイドル状態のPI機能

この調整により、PIMFCのPI機能を改善し、MG対応をし、高速応答および再現性のある過渡性能を持ったPIMFCを提供する。ALD (Atomic Layer Deposition:原子層蒸着) プロセスに重要な機能である。

図10はPIMFCにおいて自動特性評価を行った場合と行っていない場合の比較波形を示す。

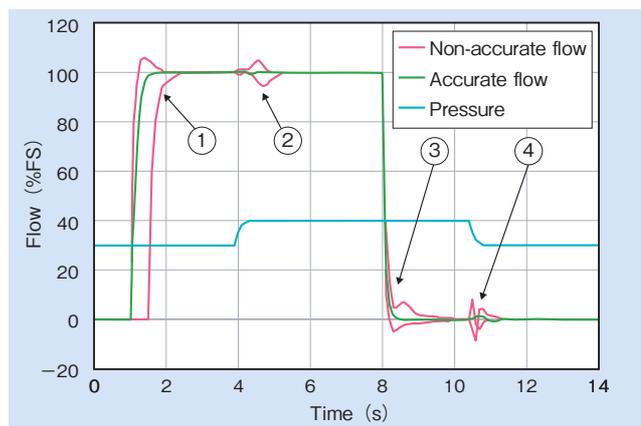


図10 自動特性評価によるMFC性能向上

Fig. 10 On-tool characterization improves MFC performance

### 4.4 ワイドレンジMFC

MFCの動作範囲を拡大する目的は、校正ガスの大流量域の精度向上だけでなく、MG対応MFCの性能を広範囲な流量域において適正化することである。この方法は、熱式流量センサのブリッジ回路から得た図11に示すような特性を利用し、異なるガス種に最新アルゴリズムを使って得たセンサ出力は、少なくとも標準より4倍拡大した流量域に

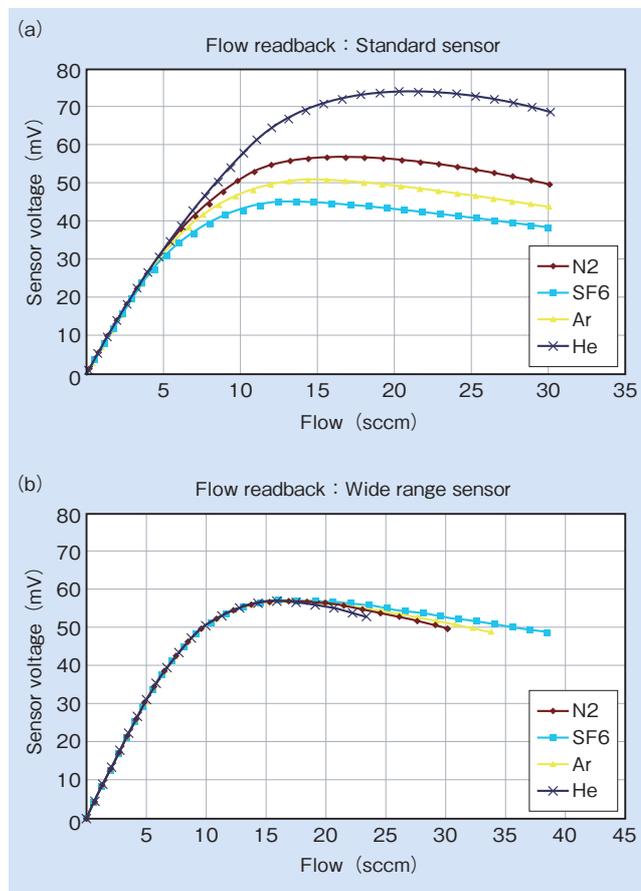


図11 流量センサ特性 (a) 標準MFCの場合 (b) PIMFCで動作範囲を拡大した場合

Fig. 11 Flow readback (a) standard sensor (b) wide range sensor

においても同じ特性が得られている。図11はPIMFCおよび標準MFCでの異なるガスを流した場合の流量センサ特性を示している。

## 5. 結 言

半導体業界を主体に各種プロセスガスを高い精度で制御するMFCにおいて、同一配管系で流量・圧力の異なる構成の場合、圧力変動を伴っても流量精度を一定にする精度の高いMFCを提供することができた。

さらに、流量立ち上げ時立ち下げ時等の変化時の応答性を向上させ、プロセス実行中に自動特性評価が行われMG対応MFCの性能を最適化し、流量範囲を大きくするようバルブ構造や熱式流量センサの改善を行った。

今後さらに次世代MFCに続く研究開発を進めていく。

## 引用文献

- 1) US Patent 7603186—Adaptive response time closed loop control algorithm
- 2) US Patent 7640078—Multi-mode control algorithm
- 3) US Patent Application Publication 2011/0054702—Multi-Mode Control Loop with Improved Performance for Mass Flow Controller
- 4) US Patent Application Publication 2011/0180951—Mass Flow Controller Hysteresis Compensation System and Method
- 5) US Patent Application Publication 2011/0015791—Thermal Mass Flow Sensor with Improved Response Across Fluid Types



**Arun Nagarajan**  
Hitachi Metals America, Ltd.  
開発グループ



**Alexei Smirnov**  
Hitachi Metals America, Ltd.  
開発グループ