

半導体デバイスの進歩と マスフローコントローラの最新動向

Progress of Semiconductor Device and Latest Trend of Mass Flow Controller

清水 哲夫

Tetsuo SHIMIZU

はじめに

日本の半導体デバイス産業はかつての勢いがなくなってきており、各社は利益体質の再構築に努力している。しかし、世界的に見ると半導体デバイスは2000年から2012年までの12年間に生産高が約60%増加していると共に寡占化が進み、大手3社の投資額が全体の60%程度に達する勢いである。技術的にはさらなる微細化が進み、液浸ダブルパターニング露光、EUV露光、DSA技術などにより10 nmレベルへの微細化技術が研究されている。また欧州、米国を中心に450 mmウェハのコンソーシアムが結成され、大口径ウェハの実用化に向けた検討が開始されている。微細化、大口径化の流れに伴い、成膜、エッチングなどに使用する液、ガスの供給に対する要求もさらに厳しくなりつつある。本稿では半導体デバイスの微細化、大口径化に伴うマスフローコントローラ(MFC)の最新動向について紹介する。

通信仕様の経緯

1990年頃まではMFCと半導体製造装置はDC電圧によるアナログ信号により、制御信号、流量出力のやり取りが行われてきた。CVDやエッチング装置の場合、1台の装置に各々10台以上のMFCが搭載され、接続ケーブルの取り合いが煩雑になる一方、高周波などの影響によりノイズが発生し、制御が不安定になるなどの問題が発生していた。これらの背景から、ケーブルの簡素化、通信ノイズの低減などの目的でRS-485などのシリアル通信によるMFC制御のデジタル化が進行した。その後、更なる高速化、通信の安定化、通信仕様の統一などの目的で、Device-Net通信のSEMIスタンダード化が行われた結果、デジタルMFCの半導体製造装置への採用が加速した。450 mm装置では更なる高速化のため、Ether-CAT通信が検討されており、MFCをはじめ各種機器のEther-CAT化が検討されている。

MFCの多機能化、高性能化

デジタル通信への移行に伴い、MFCの内部信号処理のデジタル化が進行した。MFCの内部信号処理のデジタル化により、以下の機能が新たに追加され多機能化、高性能化が行われた。

検量線の多項式曲線近似

アナログ処理の場合、流量信号は流量センサ出力の直線部分のみを使用しており、1次式による近似が行われていた。このためガス種による感度の調整は、1次式の傾きのみを変更することにより行われてきた。一方デジタル処理の場合は、多項式曲線近似を使用しており、ガス種による感度の調整は各係数を調整することにより行われるため、より高精度な直線化が可能になった。流量精度は調整ガスに対してアナログMFCの $\pm 1\% \text{F.S.}$ から $\pm 1\% \text{S.P.}$ へ高精度化が可能になった。また、流量センサ出力の直線部分を使用するため、流量センサのダイナミックレンジを従来の2倍程度に広げることが可能になった。この結果、流量レンジがベースモデルの25~100%の範囲で任意にフルスケールが変更可能なマルチレンジ対応、ならびにガス種がコンフィギュレーションソフトを用いて変更可能なマルチガス対応が可能になった。アナログMFCの場合、ガス種、フルスケール流量は一品一様で調整されるため、全て受注仕様に合わせて生産が行われていた。MFCの使用量の増大に伴い、客先での予備品の在庫が大きくなり、問題が顕在化していた。デジタルMFCのマルチレンジ、マルチガス化により、客先での仕様変更が可能になり、デバイスメーカーおよび装置メーカーでの在庫量が大幅に削減された。

デジタル補正

MFCは温度補正のほか、各種外乱要因の影響を低減するために各種の補正が行われている。これらの補正もアナログによる直線補正からデジタルによる多項式補正が可能になり、補正誤差を最小にすることが可能になっている。

デジタルPID調整

デジタルPID調整によりPID定数の最適化、自動化による応答のバラツキの低減が可能になった。また流量域、ガス種に応じてPID定数を連続的に変化させることにより、全流量域での高速応答を実現した。

新方式による流量計測

サーマルMFC

Figure 1にサーマルMFCの構造を示す。サーマル質量流量センサ、層流バイパス、制御バルブ、制御回路から構成されている。ガスはセンサとバイパスに分流され、分流された一部流量がセンサにより流量計測されている。このため流量誤差の要因としては流量センサのほか、流量域、外部要因などによるバイパスとセンサの分流比の変化が考えられる。

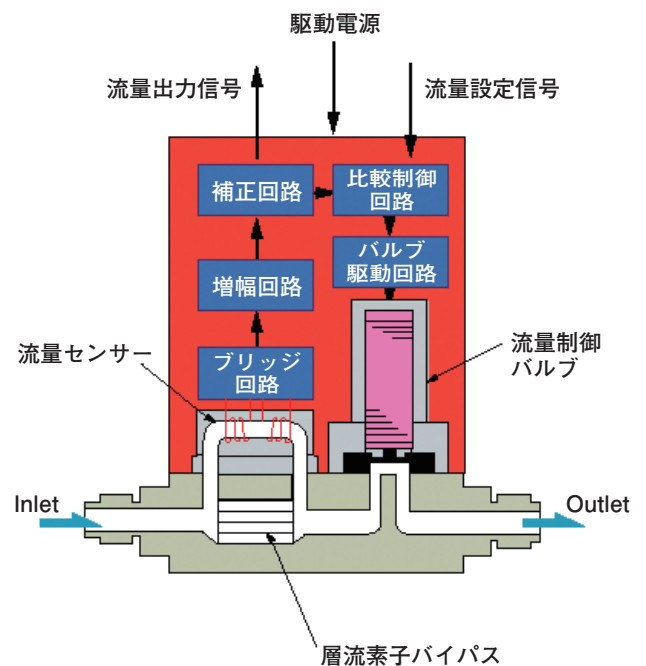


Figure 1 サーマルMFCの構造

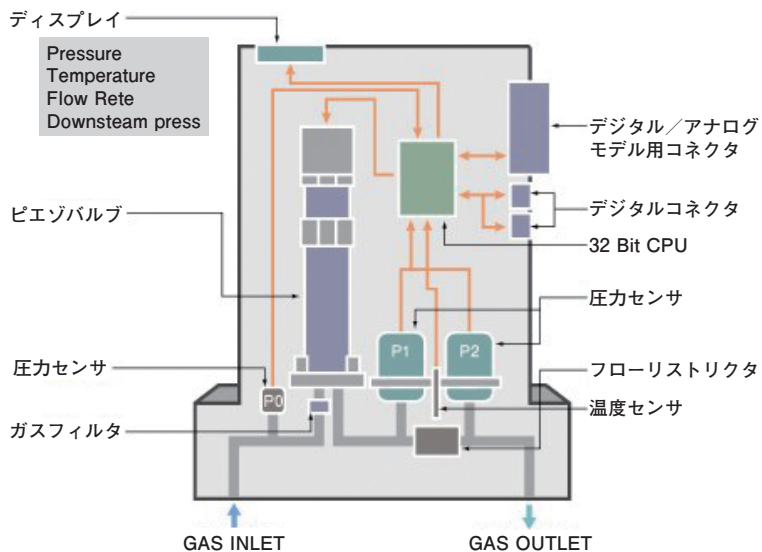


Figure 2 差圧式MFCの構造

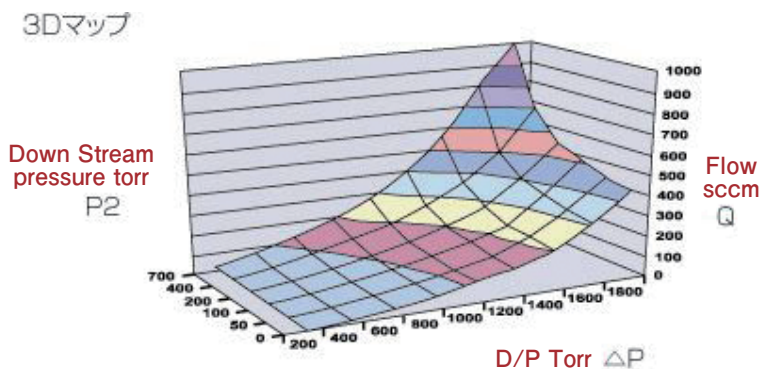


Figure 3 質量流量と1次側圧力, 2次側圧力との関係

圧力式MFC

Figure 2に差圧式MFCの構造を示す。差圧を作り出すリストリクタ, 前後の絶対圧力センサ, 制御バルブ, 制御回路から構成されている。ガスは全量がリストリクタに流れ, 差圧の発生に寄与する。リストリクタは同一形状の微細な層流素子である流量パスの集合体であり, 各流量パスの流れは完全な層流状態のため, 流量パスの数を変更することによりフルスケール流量の変更が可能である。また各流量パスの特性を一致させるようパスの設計が行われているため, プロセスガスに対する特性も最低限の流量パスで特性評価を行うことにより, パス数を変更した場合にも同一の特性を得ることができる。そのためプロセスガスに対しても±1%R.S.の流量精度保証が可能になった。

Figure 3に質量流量と1次側圧力, 2次側圧力との関係を示す。圧縮流体であるガスの場合, 質量流量は差圧と2次圧力に関係するため, 圧力から質量流量を計算する場合, 温度補正を含めた複雑な演算が必要になる。

また圧力センサも各種補正が行われている。このような複雑な演算処理を高速で処理することにより, 制御バルブへのフィードバック制御が可能になる。差圧式MFCは高精度小型圧力センサ, 高精度リストリクタと共に, 高速演算処理を可能にする高性能のCPUにより始めて可能になった。

質量流量のトレーサビリティ体系

Figure 4に現在の日本における5 m³/h以下の気体小流量質量流量のトレーサビリティ体系を示す。1次標準の国家計量標準として高分解能天秤を用いた衡量法が採用されている。測定用容器に気体を流し込みその質量を直接高分解能天秤で測定する。2次標準はISO型トロイダルスロートベンチュリノズルの音速ノズルが採用され, 1次標準器で値付けされている。ワーキングスタンダードとしても音速ノズルが採用され, JCSS認定業者により2次標準を用いてワーキングスタンダードの値付けがされている。MFCメーカーはこのようなワーキングスタンダードを使用して各MFCの値付けを行っている。上記の日本の流量標準は欧州, 米国の流量標準との比較評価も実施されており, 大きな誤差のないことが確認されている。但し, 上記の体系が確保されているのは, 窒素, アルゴンなどの不活性ガスに限定されており, プロセスガスに対する値付けはMFCメーカーが不活性ガス用の流量標準を用いて, 独自に実施されている。

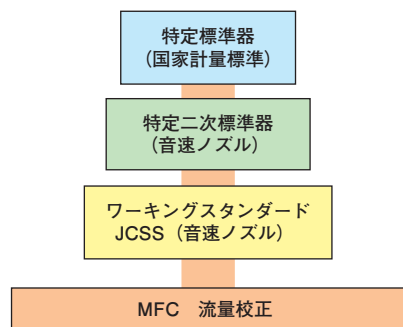


Figure 4 日本における5 m³/h以下の気体小流量質量流量のトレーサビリティ体系

プロセスガスの標準化

前述の通り、不活性ガスに対しては流量管理体系が構築されており、国家計量標準へのトレーサビリティの確保が可能である。しかし腐食性、毒性、反応性などを有する活性ガスに対しては、体系が整備されておらず、流量のメーカー間差があるのが現状である。そのため、装置上でMFCメーカーを変更するためには、その度毎に他の流量基準器または装置チャンバーを用いて流量の微調整が実施されていた。また場合によっては、調整範囲が許容範囲を超えることがあり、MFCメーカーでの特殊調整が行われることがあった。このような状況に対して、装置メーカー、デバイスメーカーからMFCメーカーに対してプロセスガスの標準化の整備を求める要求が強くなりつつなっている。これらの要求に対して2013年 SEMI スタンダード委員会で標準化の取組みが開始された。

おわりに

最近の半導体デバイスはMore Mooreで定義されているように、単なる微細化による高集積化だけでなく3次元実装、新材料などによる更なる高集積化が行われている。またMore Than Mooreで定義されているようにデジタル回路以外の受動素子、センサ、アクチュエータなどの集積化が行われ、機能面を含めた高集積化の取組みが行われている。これらに加え、先に述べた微細化、大口径化の取組みが活発に行われている。今後スマートフォン、タブレットPCなどの更なる進化、4Kテレビなどの高機能製品の普及のため、半導体デバイスの更なる高集積化、高機能化の取組みが行われており、MFCに対する要求もますます厳しくなることが考えられる。今後ともMFCの高性能化、高機能化、高信頼性によりこれらの要求にこたえていきたい。



清水 哲夫

Tetsuo SHIMIZU

株式会社 堀場エステック

開発本部

開発本部長