

Feature Article 特集論文

層流素子抵抗体の圧力測定を利用した 高精度高速応答マスフローモジュールの開発 —CRITERION D200シリーズ—

安田 忠弘

半導体プロセスの微細化に伴う高精度化の要求、低価格化に伴うワイドレンジ化に 대응べく、新たな方式を採用した圧力式マスフローコントロールモジュールを開発した。

層流素子抵抗体の圧力損失が低圧・小流量時に大きくなる特性を利用して圧力から質量流量への変換時に流量誤差を変化させている。小流量測定時に圧力センサ出力を高く維持することができ、低流量域の流量精度向上とワイドレンジ化を実現した。素子の複雑な特性をデータ化し数値計算することで最小制御流量0.3%までの制御を実現し、これまでの2%に対して6倍以上のワイドレンジを実現している。圧力センサの高速応答性により供給圧の変動にも強く、次世代プロセスに要求されるすべての性能を有したマスフローモジュールとなる。内部容積を基準とし圧力と流量の関係を利用した診断機構も有している。

はじめに

現在、300 mmウエハが主流となっている半導体製造装置において装置コストの削減が課題となっている。プロセスガスの供給を行うガスパネルに対しても集積化、低コスト化、高機能化が求められている。簡単な部品構成でより正確で高機能な流体制御が必要である。本稿では、それらのニーズに対応すべく開発した次世代マスフローモジュール『CRITERION』（クライテリオン）について紹介する。

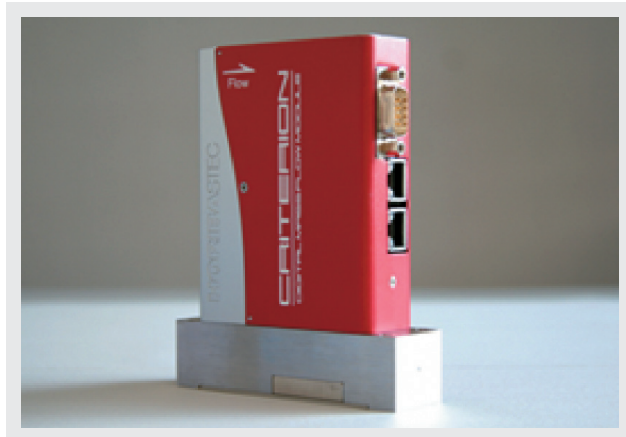


図1 外観

D200の概要

図1は、CRITERIONの外観を示す。本モジュールは従来のマスフローコントローラ（以下MFC）と同じSEMIスタンダードの1.125インチ用サイズに対応しており、要求により集積型ガスパネル、従来型VCRツギテ接続に対応している。また本体上面には温度、圧力、流量等の様々な情報を表示出来るディスプレイを備えておりDeviceNet通信、RS-485通信といったデジタル通信だけでなく従来製品と同様にアナログ通信にも対応している。

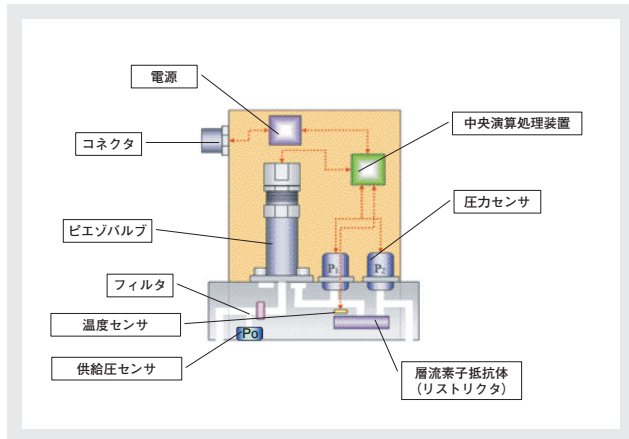


図2 次世代モジュール構造図

構造

図2はCRITERIONの構造を示す。ガスの入口側より外部パーティクル保護用フィルタ、ライン圧力センサ、コントロールバルブ、2つの絶対圧力センサとその間に層流素子抵抗体(以下リストリクタ)および電気回路で構成されている。流量のセンシングはリストリクタの前後にある圧力センサの差圧を計測し流量に変換する方式を採用している。コントロールバルブにはピエゾアクチュエータを採用し、接ガス部をオールステンレスとし、デッドボリュームを極めて小さくしている。また、電気回路は高精度32bitCPUを搭載したデジタル回路であり、高分解能だけでなく、多彩な機能も装備している。

従来方式と課題

従来のMFCはサーマル方式と呼ばれる2つの巻線を持つ細管内の熱分布の変化量から質量流量を計測する方式が用いられている。バイパスにより分流された質量流量を計測し、ガス毎の変換係数(コンバージョンファクター*1; 以下C.F.値)を用いて代替ガス(N₂)による調整が可能で、現在でも広く採用されている方式の1つである。ただし

- ・センサ単体の応答速度が遅い(5~10秒)
 - ・巻線(計測)部が発熱している
- と言ったデメリットがあり
- ・PID制御による高速化
 - ・巻線部の低温度化

といった対策が講じられMFCは進歩してきた。ただし、

- ・供給圧変化時に過剰制御してしまう
- ・巻線部を低温度化するとノイズが大きくなる

等の課題は残っており、現在は圧力センサを用いて適正な補正を行うことで、より安定した流量コントロールが可能となっている。また、流量センサの高速化が望まれるが、計測原理が"熱"である為、応答遅れが生じてしまう。巻線部を小さくするか、別の計測方法を考える必要がある。

質量流量計測精度／応答速度の向上

そこで圧力から質量流量を計算する差圧式MFCを開発した。圧力センサは応答速度が速く2 msec程度の応答速度で計測が可能で、MFCで必要とする±1%精度に対して1桁以上高精度に圧力を測定することができる。圧力

式MFCとして他に音速ノズル式*2があるが、圧力が流量に比例する特性を利用しているのに対してCRITERIONではMFCの制御を完全にデジタル化することで、層流素子を真空中で使用した場合に得られる非直線特性を利用した流量制御が可能となった。基準流量測定装置にてP1: リストリクタの上流圧力 P2: リストリクタの下流圧力と質量流量の関係を測定しデータ化している。(図3)。それらの膨大なデータから作成した制御データを元にCRITERION内部のリストリクタの前後の圧力から質量流量を計算し制御を行っている。

*1: コンバージョンファクター: 代替ガスによる流量調整の際に用いる仕様ガスへの変換係数。

*2: 音速ノズル式: ノズルの臨界点(ノズル内のガス流速が音速になりそれ以上速度が上がらなくなる状態)を利用して流量を測定する方式。流量はノズルの上流圧力に比例する。

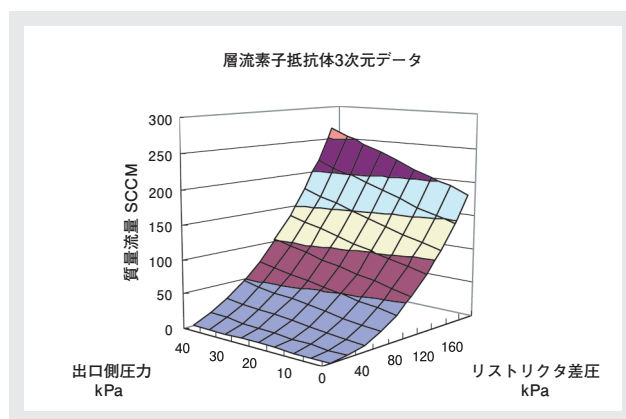


図3 層流素子流量特性

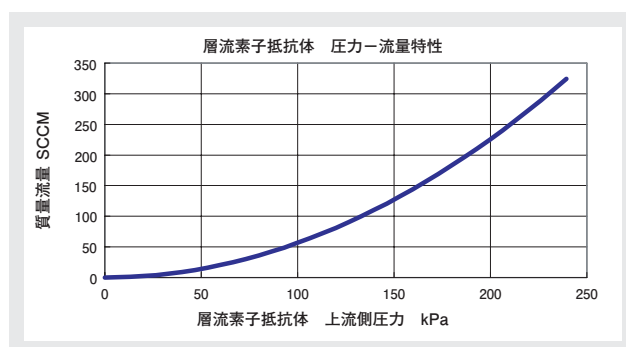


図4 層流素子非直線特性

非直線の圧力-流量特性(図4)は同じ流量増減量に対して低流量域の差圧が高流量域よりも大きくとれる特性となる。この事から低流量域の高分解能化が可能となり、流量精度としてはフルスケール(F.S.)精度より更に高精度なリーディングスケール精度保証が可能となる。通常のリニア特性に対してより広い範囲で流量測定が可能とな

Feature Article 特集論文 層流素子抵抗体の圧力測定を利用した高精度高速応答マスフローモジュールの開発

る。このワイドレンジ化によりこれまで精度向上のために2台必要とされていたMFCを1台に削減することができ、装置に搭載されるMFCとそれに関連するライン校正部品の削減が可能となる。

実ガス精度保証に向けたアプローチ

サーマル式MFCにおけるC.F.値はD200のリストリクタにおいて粘性の比(Ratio)にあたる(図5)。Ratioはリストリクタの1次圧, 2次圧, 温度に関係して変化するため, それらのガスデータを準備する必要がある。RatioはC.F.値よりも1に近く, ガス毎の違いも小さい。SF₆のC.F.値が0.2~0.3であるのに対して, Ratioは0.9~1.5であり, 変換値が1に近いことは調整時の流量域と仕様ガスの流量域変換時の誤差を低く抑えることができる。また, リストリクタの構造を見直しロット生産を可能としたことで, 一度に多数の層流素子を生産し品質の安定化を図る。バラツキを小さくする事で実ガス精度保証1%が可能となる。

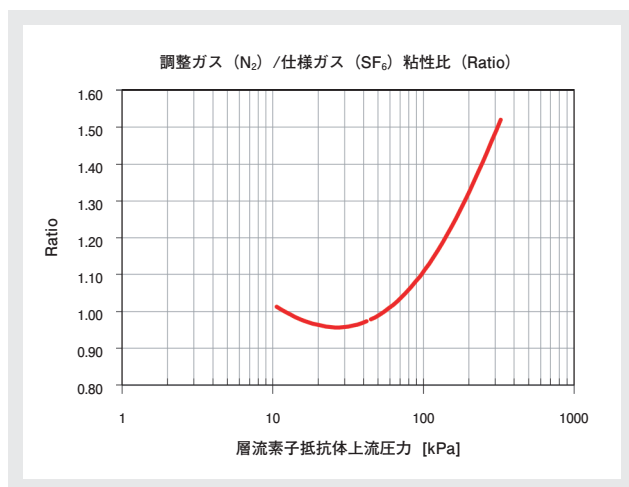


図5 SF₆ Ratioデータ(N₂/SF₆)

プレッシャーインセンシティブ*³(PI)性能

リストリクタの前後の圧力から質量流量を計算しているために, D200の流量出力は実際のガスの流量をリアルタイムに示している。サーマル式の流量センサのような時間遅れがない。サーマル式のMFCは制御バルブの上流側に流量測定部があるが, CRITERIONは下流部に流量測定部があるためにチャンバへのガスコントロールに対してより適したPID制御が可能となる。通常のPID制御を高速で行なう事がPI-MFCとして機能する事となる。

自己診断機能(G-LIFE*⁴)の追加

自己診断機能としてチャンバを使用した流量検定の際に用いられる

$$PV=nRT$$

P: 圧力 V: 容積 n: mol R: 気体定数 T: 温度

を用いて制御バルブがクローズした後のP1の変化量と質量の流出量からMFC内部容積Vを計算する。内部容積は長期的に変化しないと仮定し容積の変化量を流量精度の変化量として診断を行なう。高速な質量流量計測が可能となったことで質量流量を一定に制御する必要がなくなり, 流量制御状態から流量出力がゼロになるわずかな時間に診断を行う事ができるようになった。一般的に用いられるROR*⁵, ROF*⁶に対してセンサレンジに対する圧力の変化量が大きく, センサのノイズの影響を受けにくい。短時間測定でも高い再現性を持つことができる。(図6)

従来方式では再現性確保のために長時間必要であった流量検定が, 短時間の計測で高い再現性を実現できるようになった。それぞれのMFC内部で完結できる事からプロセスガスでプロセス中に自己診断を行なう事も可能である。

*³: プレッシャーインセンシティブ: 供給圧力の変動に対して流量制御に影響を受けない様に制御する事。

*⁴: G-LIFE: Gas Law check of Integrated Flow restrictor Equationの頭文字。

*⁵: ROR: Rate of Riseの頭文字 ビルドアップ式流量測定。基準容積内の圧力上昇率を測定し質量流量を計測する手法。

*⁶: ROF: Rate of Fallの頭文字 RORに対して圧力の降下量で質量流量を計測する手法。

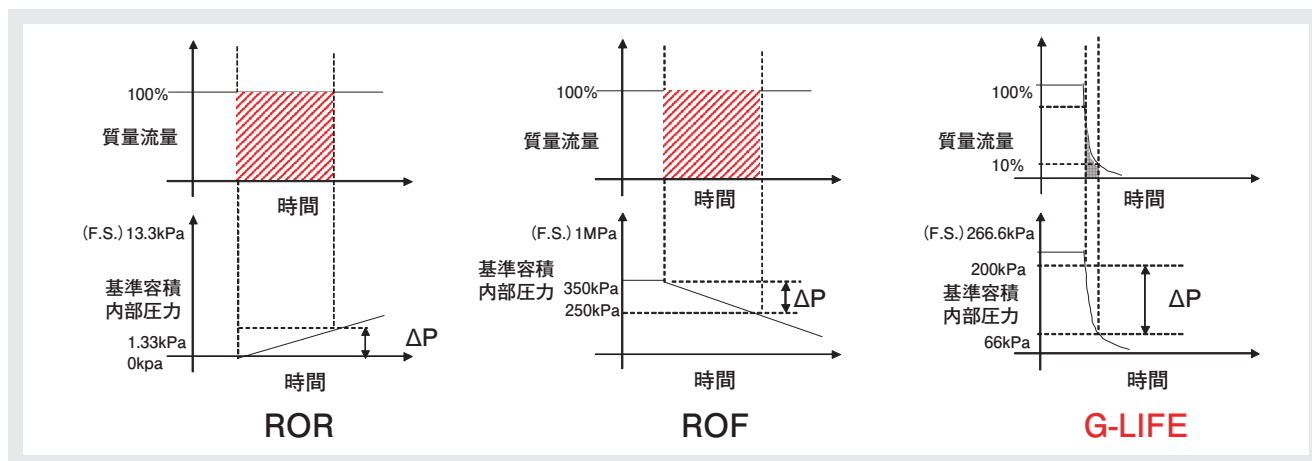


図6 従来のROR, ROFとの違い

おわりに

MFCは反応性の高いガスにも使用されており、自身の経時変化を診断する事は重要である。流量精度がプロセスに影響するために定期的な精度の確認が必要とされる。しかし、精度異常が原因となるプロセス不良を未然に防ぐ事は困難である。G-LIFEは初期状態からの変化を数秒で診断する。わずかな空き時間で診断可能で、頻繁に診断を行なう事でメンテナンス時期の予測や突発的な不具合に対処できると考えている。

また、配管あるいはチャンバ内の状態を把握する為の最も基本的な情報は圧力、温度である。これまでのMFCはそれらの情報なしで流量を制御していた。しかし、サーマル式流量センサの利点はそこに在るといえる。リストラクタの特性を圧力と温度によって情報化した事で、

- ・測定対象を加熱しない非加熱流量測定
- ・高精度絶対圧センサを用いた真空中での流量測定
(臨界点無く低蒸気圧ガスをワイドレンジ制御するのに適している)

が可能となった。ノンリニア特性を生かした高精度ワイドレンジ性能だけでなく、上記の特徴に注目し、近年の太陽電池透明電極(TCO)材料向けとして、非加熱、低圧力、高温環境に対応した新たなモデルをリリースする。熱分解しやすいTCO材料や腐食性の高い材料に対して加熱部がない事は大きなメリットになる。

今後は、圧力式もしくは圧力センサを利用したMFCが主流になると考えている。特に圧力式MFCは最先端技術に貢献できるMFCであると考えている。また、CRITERIONでは、ユーザがこれまでMFCを使用するために必要とし

た知識や経験といったものが不要な。流量精度が供給圧に依存することも取り付け方向に依存することもない。CRITERIONの流量設定と出力が一致しているかどうか確認するだけである。さらに、流量を計算するため得られた情報を利用して、マスフローモジュールとして機能させることが可能である。CRITERIONを利用し新たなアプリケーションを提供することで、これまで以上の価値を提案できると考えている。



安田 忠弘

Tadahiro Yasuda

株式会社堀場エステック
開発本部 気体製品 2 チーム
ジョブリーダー