



# パルスショット式流量コントローラ

## Pulse Shot Type Flow Controller

西村 康典 Yasunori Nishimura

当社では半導体製造装置向けファインシステム機器としてプロセスガス用、薬液用の各種製品を製造、販売している。プロセスガス用の機器としてはエアオペレートバルブやマニュアルバルブ、レギュレータなどがある。また、これら機器や圧力計、流量を制御するマスフローコントローラ等をコンパクトに集積化した集積化ガス供給システムの製造、販売も行っている (Fig.1)。この中でもマスフローコントローラは、プロセスガスの流量を正確に管理する必要があり、半導体製造工程において重要な機器の一つであるが、応答性に限界がある点やガスの種類に応じ機種を変更しなければならない点、マスフローコントローラを含めたガス供給システムが複雑になる点が課題としてある。ここではこれらの課題を解決するために当社がこれまでに培ってきた流体制御技術のノウハウを生かして開発した、パルスショット式流量コントローラについて紹介する。

CKD manufactures and sells various products for process gases and for chemical liquids as ultra high purity components for use in semiconductor manufacturing equipment. Air-operated valves, manual valves, and regulators are examples of process gas components. We also manufacture and sell an integrated gas supply system (see Fig.1), which is a system of compactly integrated devices including process gas components, pressure gauges, and mass flow controllers that control flow rate. Among these devices, mass flow controllers are one of the important components in semiconductor manufacturing processes since they need to control the flow rate of process gases accurately; however, there are issues - the limits in response, the need to change the product model depending on the type of gas, and the complexity of the gas supply system when it includes a mass flow controller. We present, in this paper, the pulse shot type flow controller which we developed by utilizing the know-how we have accumulated in fluid control technology to address these issues.

### 1 開発背景

気体の流量を計測するには、差圧式や超音波式、フロー式等、様々な方式があり用途に合わせて使い分けが成されている。

半導体製造に使用される流量計としては、腐食性ガスの流量を精度良く流すことができ、小型化が可能なことから、熱式質量流量センサを用いることが多い。熱式質量流量センサの検出部には、細管に2つのヒータが直列に配置されている (Fig.2)。ヒータを加熱すると、流れの無い場合は温度分布がヒータを中心に対称となる。また、流れがある場合は、温度分布が崩れ、ヒータ上流側の温度は低下し、ヒータ下流側の温度は上昇する。この温度分布は流量によって変化し、ヒータの抵抗値の差となって現れる。これを電気信号に変換し、精度よく流量を計測している。流量コントローラ (マスフローコントローラ) として使用する場合は、このセンサの下流側に流量を比例制御するバルブが配置される。しかしながら、熱の移動量で流量を検出するため、俊敏な計測には不向きで応答性に限界があり、温度分布の崩れ度合は気体の種類により異なることから、気体毎に流量換算係数 (コンバージョンファクタ) を用い流量出力を変更する必要がある。またマスフローコントローラの前には、流量を安定供給させるためのレギュレータや圧力計、流体を確実に供給・遮断させるための遮断弁を設置する必要があり、システムが複雑になる (Fig.3)。

本稿で紹介するパルスショット式流量コントローラは、これらの課題を解決するために新たな方式を検討、開発したものである。



Fig.1 集積化ガス供給システム

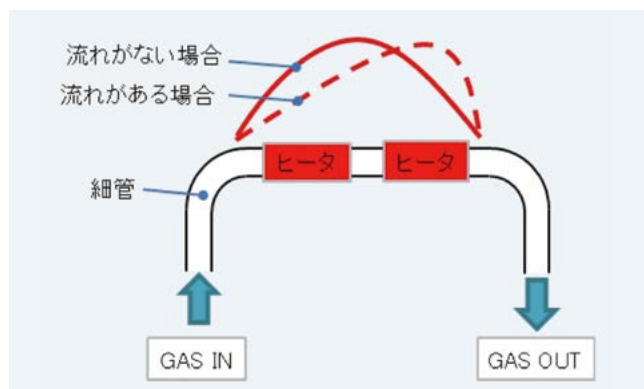


Fig.2 流量センサ検出部の構造

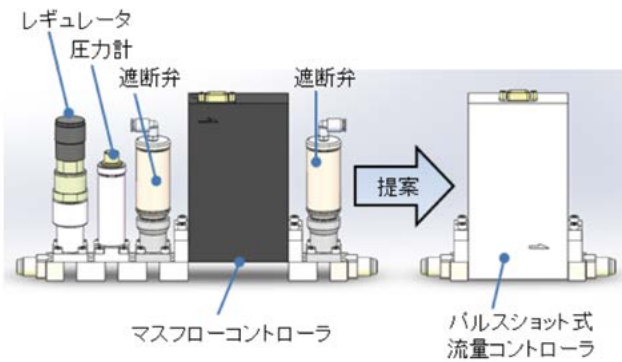


Fig. 3 ガス供給システム

## 2 開発コンセプト

半導体製造装置向け流量コントローラに求められる性能は、耐腐食性、小型のほか、流量精度、繰り返し性、クリーン性能など多岐にわたる。

パルスショット式流量コントローラは、これら要求事項に加え、次にあげるコンセプトのもと開発を行った。

- ・高応答性

半導体プロセスのスループット向上。

- ・ガス種の依存度が小さい

複数のガス種を1機種で対応、装置の保守交換部材在庫の大幅な削減。

- ・ガス供給システムの簡素化

システムの簡素化で省スペースに貢献。

## 3 構成と動作原理

本パルスショット式流量コントローラは、気体の状態方程式“ $PV=nRT$ ”<sup>1)</sup>を用い構築した。

構成はFig.4ブロック図に示すように、ガスを充填するための容積V0、その上流側にはガスを供給するための給気弁、下流側にはガスを放出するための排気弁が、容積V0には、充填されたガスの圧力と温度が計測できるよう、圧力計と温度計が設置されている。また制御基板にて、流量設定信号に応じた給気弁、排気弁の駆動制御、および圧力計、温度計の信号取り込み、演算、流量出力を行う。

ガスを流す際は、容積への充填・放出を繰り返すことで行い、流量のコントロールは放出時の容積内圧力を監視して、排気弁の開閉時間で調整する。

ここで一連の操作をFig.5に、またこの時の容積V0の圧力状況をFig.6に示す。流量算出方法は以下の要領で行った。

a) 給気弁を開き容積V0にガスを充填する。

b) 充填完了後、給気弁を閉じ容積V0内の圧力P1、温度T1を計測、これを20℃、1atmでの体積V1に換算する。

$$P1 \cdot V0 / T1 = Patm \cdot V1 / T20 = \text{一定} \dots \dots (1)$$

$$V1 = P1 / Patm \cdot V0 \cdot T20 / T1 \dots \dots \dots (2)$$

c) 排気弁を開き容積V0内に充填されたガスを放出する。

d) 容積V0内が所望の圧力になったら、排気弁を閉じ容積V0内の圧力P2、温度T2を計測、これを20℃、1atmでの体積V2に換算する。

$$P2 \cdot V0 / T2 = Patm \cdot V2 / T20 = \text{一定} \dots \dots (3)$$

$$V2 = P2 / Patm \cdot V0 \cdot T20 / T2 \dots \dots \dots (4)$$

となる。流量はこの一連の動作 a) ~ d) を繰り返し行い式(5)で算出される。

1回の放出で体積V1-V2が下流側に流れる。このサイクルを単位時間あたりN回/min繰り返すと、20℃、1atmでの流量Q20は、

$$Q20 = N \cdot (V1 - V2)$$

$$= N \cdot V0 \cdot T20 / Patm \cdot (P1 / T1 - P2 / T2) \dots (5)$$

で求められる。

この動作原理を用いることで、Fig.3に示したガス供給システムを簡素化、レギュレータや圧力計、遮断弁の排除が可能となる。

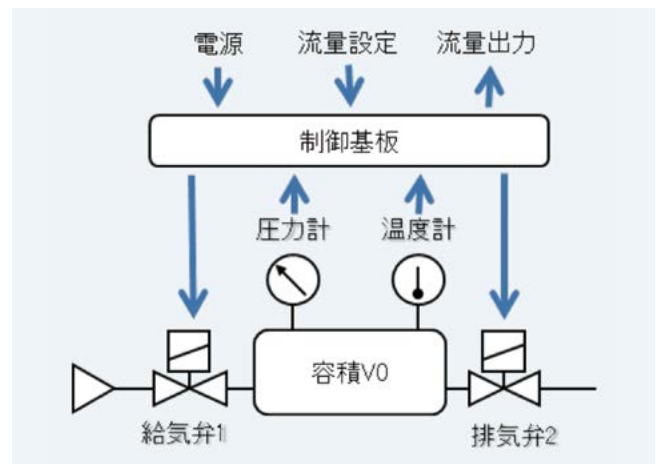


Fig. 4 ブロック図

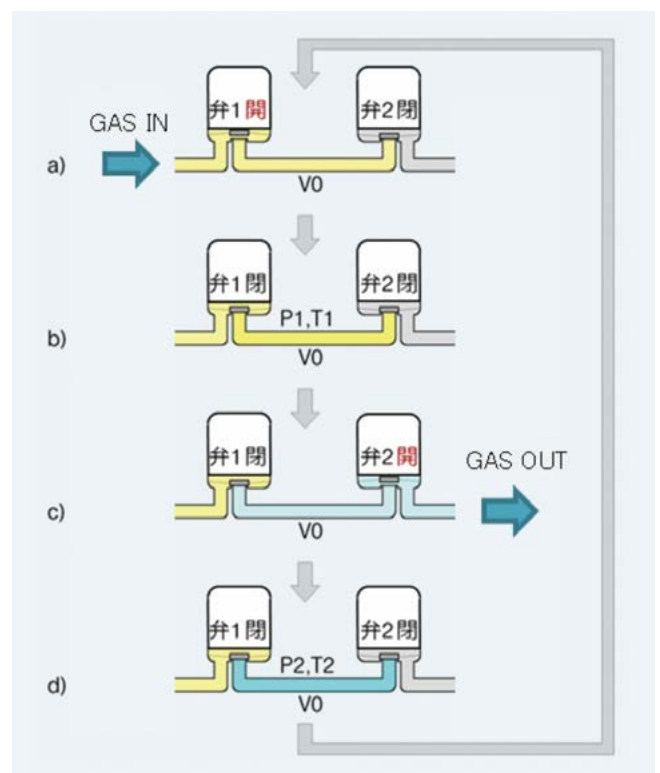


Fig. 5 一連の操作

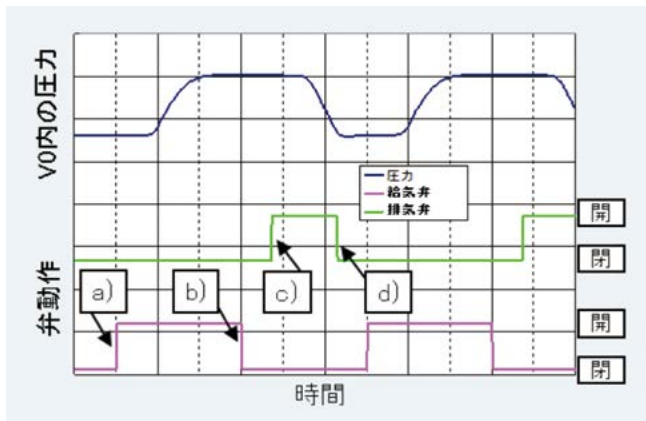


Fig. 6 給・排気弁動作と容積VOの圧力状況

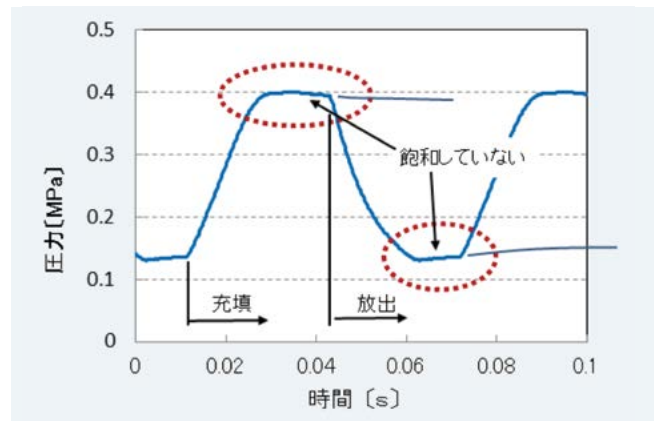


Fig. 7 容積内の圧力挙動

## 4 開発ポイント

### 4-1 給気弁・排気弁に求めること

流量をコントロールする際、給気弁・排気弁を交互に開閉を行い下流側にガスを流すため流量は脈動してしまう。この脈動を小さくするためには弁を高速で高頻度に動作させなければならない。高速・高頻度に動作させることで下流側の配管等により脈動を緩和することができる。またガスを容積に充填・放出する際、確実に供給・遮断でき、腐食性ガスも流せるプロセスガス用バルブが必要となる。これらを満たすバルブとし、接ガス部は高耐食性材料を採用、インダクタンスが小さく、駆動部の摺動がないディスクプランジャ方式の電磁弁を開発した。

### 4-2 断熱圧縮、断熱膨張の影響対策

精度よく流量を流すためには、容積内の圧力を正確に計測する必要がある。しかしながら、充填・放出により容積内は加圧・減圧を繰り返されるため、ガスは断熱圧縮・断熱膨張が起こる。このため容積内の圧力はFig.7に示すように過渡的に変化しており、飽和した状態での圧力は計測できない。実際、流量を計算する際は、飽和状態での圧力が必要となる。そこで容積内の圧力変化の傾きと、飽和状態での平衡圧力に一定の関係があることから、この関係を定数としてあらかじめ求めておき飽和圧力を推定することにした(Fig.8)。また飽和後の圧力は、ガスの種類により異なるが、この方式でガス種の依存の影響も緩和させることを試みた。

### 4-3 理想気体の状態

気体の状態方程式“ $PV=nRT$ ”は、扱う気体が理想状態からかけ離れるほど、計算誤差が大きくなる。実在する気体の分子の大きさや分子間力が影響するためである。このため扱うプロセスガスは、沸点が低く、比較的低压な理想気体に近い状態であることに留意する必要がある。

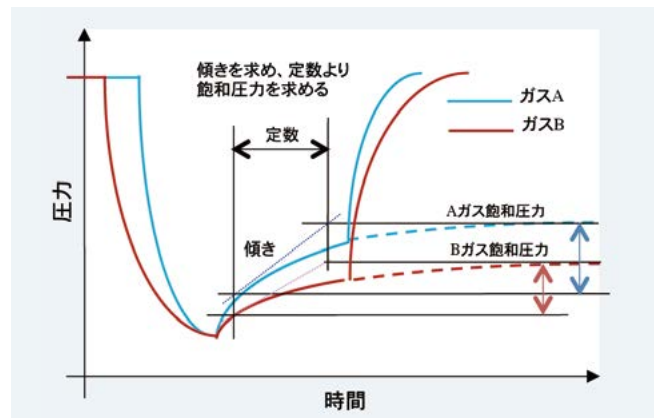


Fig. 8 飽和圧力の推定方法

## 5 評価結果

Fig.9はパルスショット式流量コントローラの内部構造である。本品を用い評価を行った。代表特性を以下に示す。応答性の結果Fig.10では、流量設定信号を与えてからの流量の立ち上りが、マスフローコントローラと比較し早いことが確認できる。またFig.11は窒素での流量制御結果、Fig.12はガス種依存の確認としてアルゴンでの流量制御を行ったものである。流量制御結果より、流量精度はガス種依存を含め $\pm 5\%$  F.S.以下での制御が可能であることが確認できた。

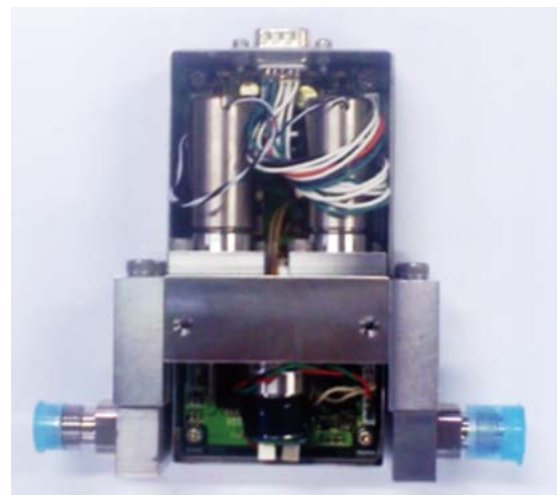


Fig. 9 内部構造

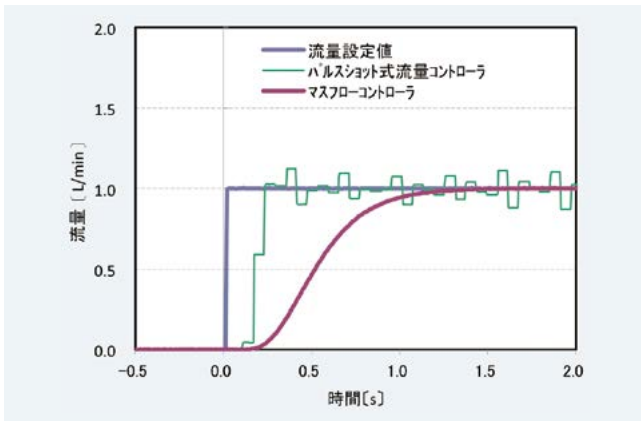


Fig. 10 応答時間比較

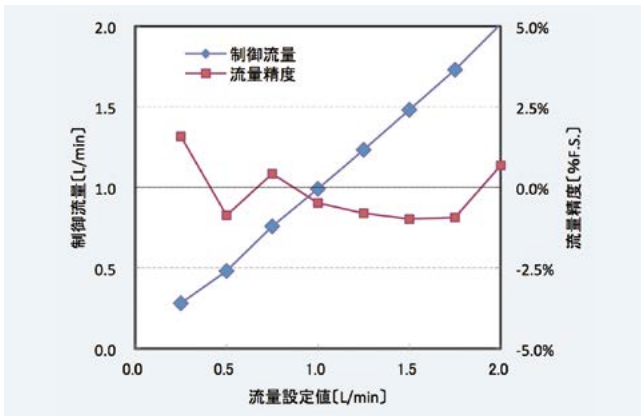


Fig. 11 流量制御結果 (GAS : N2)

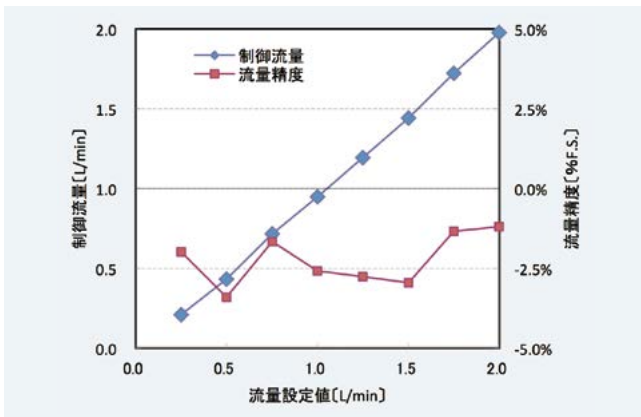


Fig. 12 流量制御結果 (GAS : Ar)

## 6 今後の課題

本製品で掲げたコンセプトに基づき開発を行い、上記の結果を得た。

更なる流量精度の向上を目指すためには、理想気体ではなく実在気体として扱う必要が出てくる。先に述べたように気体は、低温、高圧になるにつれ理想気体からかけ離れた状態になり、これが流量精度を悪化させる。

実在気体として扱う場合は、圧縮因子 $Z^{1)}$ を用い、“ $PV=ZRT$ ”と表すことができるが、無次元数でありガス種固有の特性となる。

結果、ガス種に依存することになるが、製品自体にキャリブレーション機能を設け、ガス種による温度や圧

力等の影響を自己補正できるアルゴリズムを構築することで対応していきたい。

## 7 今後の展望

半導体製造プロセスは日々進化し続けている。そこに使われる機器もまたこの進化に対応すべく、より難易度の高い要求に応じていかなければならない。

ここでは、バルブの高速・高頻度パルス駆動と流体がもつ特性を活かし、新たな流量コントロールの方式を紹介した。このパルスショット方式は流量コントローラにとどまらず、流体制御にかかわる様々な技術への応用が期待できる。

これからも当社の強みを生かした製品の開発を行い、豊かな社会づくりに貢献していきたい。

## 執筆者プロフィール



西村 康典 Yasunori Nishimura  
コンポーネント本部  
ファインシステム統括BU 事業企画部  
Business Planning Department, Ultra High Purity Products  
Administration Business Unit, Components Business Division

## 出典

- 1) P.W.ATKINS, アトキンス物理化学上、東京化学同人、3-39 (1997)