

半導体製造用自動圧力調整器

(株) エー・シー・イー 石川 亨一
奈良崎 克巳

はじめに

半導体の製造プロセスとは、ウエーハ表面の物理・化学反応を如何に再現性良く制御するかと言う技術の集約である。表面反応を安定制御するためには、プロセスチャンバー内の圧力、温度、濃度、流速等の物理ファクター以外にチャンバーへ供給する材料の制御性及び清浄度がキーパラメータとして挙げられる。制御性とは単位時間当りの材料供給量であり、時間軸でミリ秒単位の供給量の揺らぎが問題とされるプロセスも存在する。清浄度は材料に含まれる不純物量であり、原料純度以外、材料供給ラインから混入する脱ガスやパーティクルも対象となる。これらのパラメータは、供給ラインを構成する配管、継手、バルブや MFC 等の流体制御機器に依存しており、特に流体制御機器の性能や機能がパラメータの技術要素を支配している。一般に半導体製造用のガス制御系は、圧力調整器（レギュレーター）、圧力トランスミッタ、シャットオフバルブ、MFC、フィルターから構成されており、昨今では設置面積の減少とメンテナンス性を考慮し、各構成部品を一方向から着脱できる表面実装方式が制御系形態として注目されている。但し、形態は変化しても構成部品の内部構造や機能は変化しておらず、使用されている個々の構成部品の能力がガス制御系全体の性能・機能を支配していることとなる。性能を向上するためには個々の部品の能力向上が必須であるが、現在の延長線上では原理的・機能的に限界があり、特にレギュレーターにおいては、その傾向が顕著である。

本稿では、既存の機械式レギュレータと駆動方式が異なる空気圧駆動自動圧力調整器について紹介する。レギュレーターの原理・機能を新たに創造することにより、従来にないパフォーマンスの向上とガス制御系におけるコスト削減が実現されている。

1. 機械式レギュレーター

機械式レギュレーターの概念を図 1 に示す。レギュレーター 2 次側の圧力 (P2) 調整はダイアフラム及び弁体での受圧力と対向するダイアフラムへのスプリング力の均衡により実行されている。均衡状態を式 1 で表す。

$$F = (P1 - P2) \times A + P2 \times S + f \quad \dots (式 1)$$

f は、弁体保持のスプリング力とダイアフラムの圧縮応力の和を示している。

機械式レギュレーターでは、スプリング力 : F を押ネジにより調整することで圧力バランスを取っており、F は押ネジを動かさない限り固定値となる。1 次側(P1)と 2 次側(P2)の圧力差が変化した場合、P2 は原理的に変化することになる。この変化量を抑えるために弁体受圧面積(A)をダイアフラム面積に比べできるだけ小さくしている。ガス流量との関係では、均衡状態からガス流量が増えた場合、リフト増による f の増加により P2 の減少が生じる。

機械式レギュレーターは、ダイヤフラムへの推力が固定されている点に技術的律速状態を生む原因がある。レギュレーターの小型化が進む中、ダイヤフラム面積も同様に小さくせざるおえず、前述の問題点は更に顕著化してくる。また、蒸気圧の低いガス流体を制御する場合、弁部での断熱膨張による再液化が発生し、制御圧の低下及び再蒸発による圧力変動を生じる。低圧条件下で供給圧と制御圧の差が少ないためレギュレーターのバルブ開度が圧力に依存せず、設定した推力条件で固定されてしまうことが原因である。

更に機械式レギュレーターで推力を設定した場合、当然ながら受圧力が推力を上回らない限り、流体を止めることはできない。レギュレーター単体の逆止作用は受圧力が推力を上回ることが絶対条件となるため1次側圧力が制御圧以下になった場合、2次側から1次側へのガス流入は避けられない。

以上の問題は、レギュレーターのメカニズムに起因している。問題解決にはレギュレーターに任意推力で動作させるアクチュエータ機能を持たし、同時にフェイルセーフ機能を確保することが必要であり、その1つの答えとして空気圧駆動自動レギュレーターがある。

2. 自動レギュレーター：AP-200 シリーズ（写真1）

AP-200 はアクチュエータの駆動に空気(ガス)圧を用い本質安全防爆への対応を可能にしている。写真1では、レギュレーター本体と空気圧制御部が一体化されているが防爆対応の場合には、レギュレーター本体と空気圧制御部は切り離して使用する。ダイヤフラムへの推力は、駆動空気圧が大気圧状態でゼロとなり、弁部はシャットオフ状態になる。

（1）構成

AP-200 の構成を図2に示す。ドーム式レギュレーター本体、空気圧制御部及び表示・設定部(CD-100)から構成された AP-200 は、ライン中の圧力センサの出力を取り込み、任意に設定された圧力値と一致するようドーム内の空気圧を調整し、弁開度をフィードバック制御している。

（2）レギュレーター本体の内部構造

ドーム式レギュレーター本体の内部構造を図3に示す。弁体のセンタリングや保持のための補助スプリングを流路から排除し、弁シート材料及び形状を適正化することでパーティクルフリーを実現している。任意にシャットオフを実行できるバルブとしての機能を満足するためダイヤフラム材質及び構造を最適化し、繰り返し開閉への耐久性を向上させている。その他、メタルシールの採用や接ガス面の鏡面仕上げ等、UCグレードの対応品となっている。

（3）空気圧制御方法

空気圧制御部は、吸気弁(常時閉タイプ)と排気弁(常時開タイプ)の2ヶの電磁弁と制御空気圧監視用の圧力センサ及びCPUを内蔵したデジタル処理回路から構成されている。ライン中の圧力センサの出力値は、CPU部で設定圧力値と比較され、その差に応じて2ヶの電磁弁の開閉時間を調整することでドームへの空気圧をフィードバック制御する。

弁の制御方式は基本的には PWM (Pulse Width Modulation) 制御であり、目標までの差に応じて弁の開閉時間を調整する。圧力センサと設定の出力差に対し予め多段階の領域が設定されており、制御では、出力差が属する領域によりアルゴリズムを変え開閉時間の調整を行っている。

(4) 機能

AP-200 には、空気圧駆動、デジタル処理の特徴を活かしたユニークな機能が搭載されている。特に機械式レギュレーターの置き換えを考慮し、設置現場で直接任意圧力を設定できる様、表示・設定部(CD-100)が空気圧制御部の上部に保持されている。CD-100 は脱着が容易であり、現場での表示方向のアジャストや切り離しての遠隔操作パネルとして使用が可能である。AP-200 の代表的機能を以下に示す。

* コントロール / クローズ (C / C) 機能

外部からの DC24V 印加で制御状態、0V または接続オープンでシャットオフ(強制閉)が実行できる機能でシャットオフバルブとしての兼用と緊急遮断用として使用する。

* アラーム機能

圧力がアラーム設定の許容範囲外時や電源電圧異常、本体異常、接続異常時にアラーム出力として NPN トランジスタをオフにする。アラーム発生後に出力するまでの時間設定も可能である。(CD-100 上でもアラーム内容表記及び LED が点灯する。)

* 応答アジャスト機能

PWM 周期を N 倍で変更する機能でガス制御系の容量及び流量に応じて制御スピードをアジャストする。

* ドーム圧制御機能

空気圧制御部に内蔵した圧力センサによりドーム圧を一定圧力に制御する機能でメンテナンス時のレギュレーター本体の状態判断や一般のドーム式レギュレーターとして使用できる。

(5) 性能

* 流量特性

AP-200 への供給圧と所定制御圧における流量特性を図 4 に示す。参考に同形状の機械式レギュレーターの流量特性も図 5 に掲載する。機械式レギュレータは、瞬時圧力低下を起こし、その後、連続的に圧力低下する流量曲線を描く。AP-200 では、フィードバック制御を行っている関係上、弁がフルオープン状態になるまで圧力低下を生じない。同一制御圧条件で AP-200 は、機械式レギュレーターに比べ約 4 倍の最大流量を得ることができ、パージガスラインや複数ラインの圧力制御に効果的である。

* 圧力制御性

2 次側ライン圧が大気圧条件から所定圧力に制御するまで応答時間は、ライン容積、流量に依存するが約 0.5 ~ 1 秒程度である。供給圧、2 次圧の瞬時変動に対する制御性に関しても 実用上、問題ないレベルである。

*ウルトラクリーン（UC）特性

パーティクル発生量は、1000 回の開閉に対し $0.1 \mu\text{m}$ サイズレベルで 1 個以下の検出結果であった。API-MS 測定によるドライダウン特性を図 5 に示す。約 2 時間でバックグラウンドレベルに到達している。

（ 6 ）仕様

AP-200 の標準仕様を表 1 に示す。デジタル通信として RS-485 を採用している。外部からの所望圧力設定は、 $0 \sim 5\text{VDC}$ 、 $4 \sim 20\text{mA}$ のアナログ入力及び RS-485 によるデジタル入力が可能である。調整圧力範囲での制御可能な流量範囲は $0.05 \sim 150 \text{ L / min}$ （窒素ガス換算）で 3000 倍のレンジアビリティを持っている。

AP-200 のバリエーションとして表面実装タイプ、レギュレータ本体と空気圧制御部の分離タイプ、ライン圧力センサ組み込みタイプを揃えている。また、毎分 2000L のガス流量を確保できる大流量タイプや標準以外の圧力レンジに対応した自動レギュレーターも製品化されている。

（ 7 ）フィールドアプリケーション

AP-200 の特徴を活かしたフィールドでの適用例を下記に記す。

WF6 や BCl3 などの低蒸気圧ガス（自動調圧、高 Cv 値を利用）

HCl 等の腐食性ガス（スプリングレス UC 対応によるライフタイム向上）

液タンク（液チャージ時の圧力調整、タンク交換時のパージガス自動調整）

レギュレーターボックス（防爆対応、アラーム機能）

3 . 流量コントローラへの適用

AP-200 は、外部センサからの信号を取り込みフィードバック制御することから圧力制御以外に流量コントローラとしての使用が可能である。空気圧アクチュエータの利点として弁開度（弁ストローク）がサブミリオーダーで確保でき、 30kgf 程度の推力が容易に得られる点である。このためソレノイドアクチュエータ等、他のアクチュエータに比べ小型化が可能となる。特に前述の表面実装方式のガス制御系において 限られたスペースで大流量を制御したい場合、高 Cv 値が得られる本アクチュエート方式が有効である。

（ 1 ）マスフローメータ（MFM）からのフィードバック

フルスケール流量 100 L / min の MFM を用い、AP-200 でフィードバック制御をした際の応答性を図 6 に示す。試験条件は、供給圧力 0.3MPa 、制御系 2 次側は大気圧で窒素ガスを流している。応答時間は 98% 応答で 1.5 秒前後であった。

（ 2 ）他の流量計からのフィードバック

自動レギュレーターによる流量コントロールとして カルマン渦及び音速ノズル方式を用いた流量計を用いフィードバック制御した実績がある。カルマン渦方式は流路内に置かれた流線型でない物体から放出される渦の周波数が流量と比例関係になる原理を用いている。大流量計測に有効でフルスケール 2000 L / min のコントロールを実現している。音速

ノズル方式は、ノズルスロート部での流速が音速域である場合、流量はノズル上流側の圧力と比例関係になる原理を用いている。ノズル径を選択することで 毎分 数mL から数100Lの流量制御を可能にしている。両者とも全流測定（スルーフロー）方式であり、流路内のガス溜まりの排除及び流量計としての小型・低コスト化が可能である。

4．おわりに

紹介した自動レギュレーターは、流量特性、制御性等の性能面以外に安全面、コスト面で以下の点がメリットとして挙げられよう。

フェイルセーフ機構であり、シャットオフが可能である。

本質安全防爆の対応が可能である。

自動運転による人為ミスの回避。（メンテナンス時、立ち上げ時）

複数ラインの同時制御によるレギュレータ数の削減。

レギュレーター2次側のシャットオフバルブ削減。

コントローラやアラーム回路など電装系の削減。

半導体製造装置におけるガス制御系は、一般にガスボックスと称し分離別置きされている。ガスボックスからチャンバーまでの距離は数メートルにおよび、ウエーハへのガス到達の遅れやパージ効率の悪化を招いている。更にベーキングに対応する際には、ヒータ施工等の費用増加が生じてしまう。現在、ガス制御系を如何にチャンバー直近に保持するかが課題となっており、この実現には、ガス制御系の小型・軽量化が必須事項である。300mmウエーハの時代を向かえ、必要とするプロセス材料量が増えて行く中、小型化を進行するには、1つに部品点数の削減であり、ガス流量の制御方式の刷新である。自動圧力調整器で用いた技術やコンセプトが、ガス制御系の小型化を実現する上での有効手段として成り得ることに期待する。

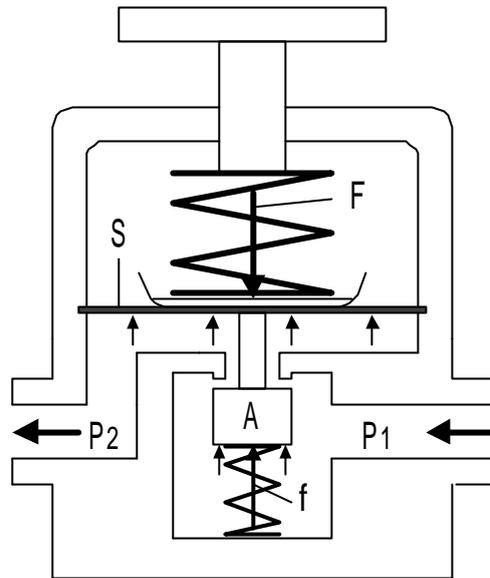


図1 機械式レギュレーター概念図



写真1 自動レギュレーター：AP-200

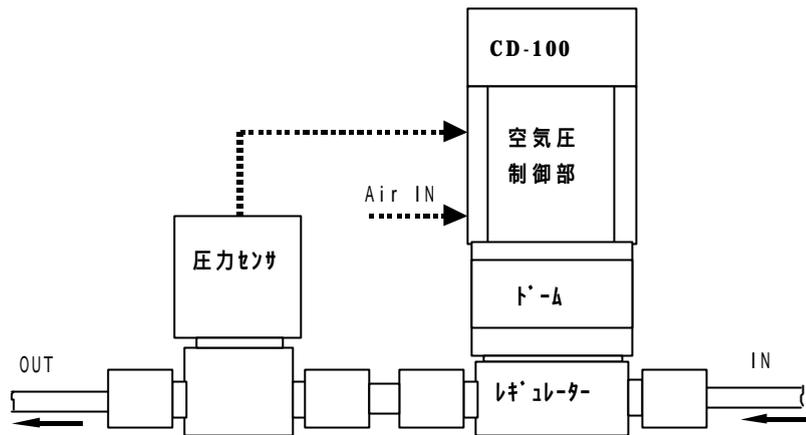


図2 AP-200の構成

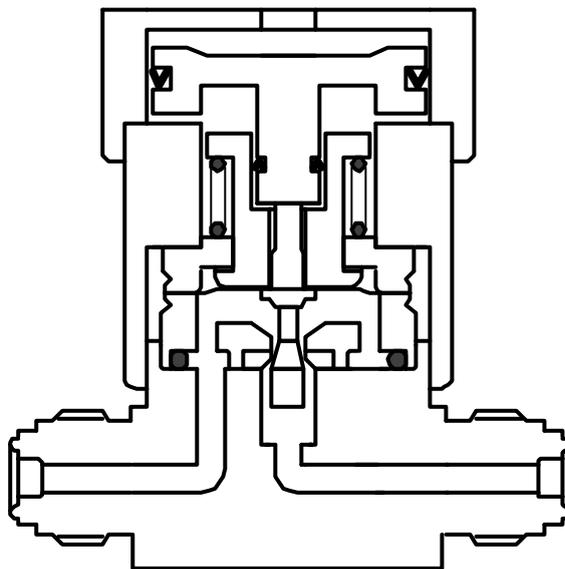


図3 レギュレーター本体内部構造

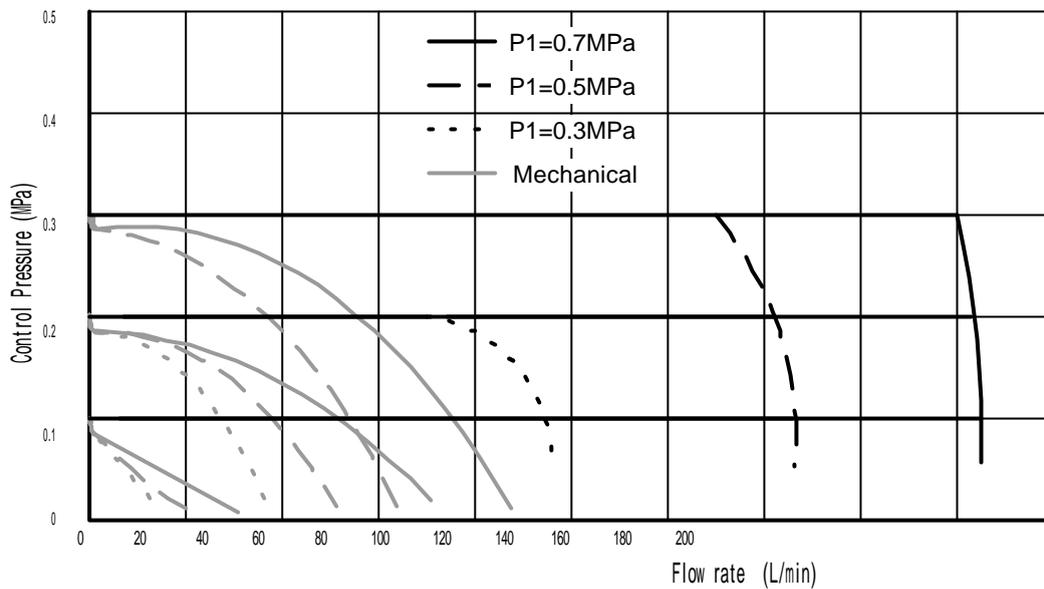


図4 流量特性

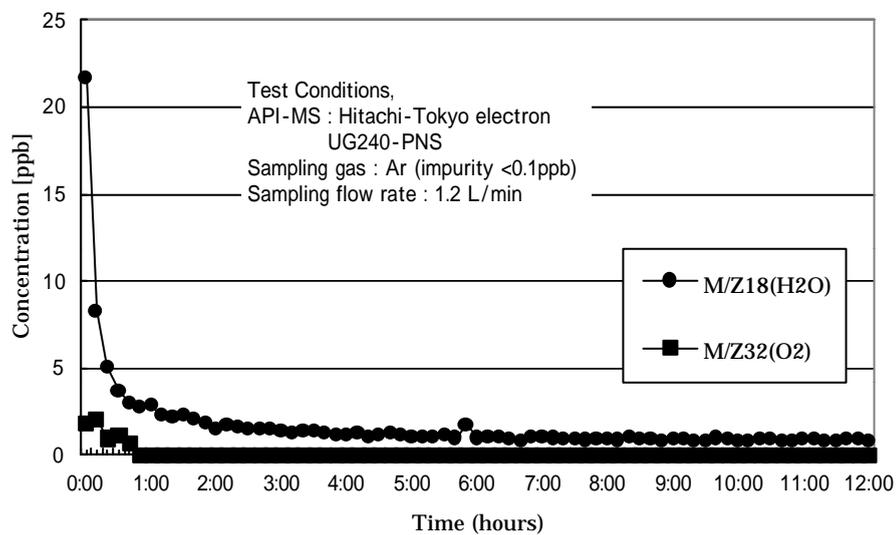


図5 ドライダウン特性

表 1 AP-200 仕様

入口圧力	0.99 MPa 以下
調整圧力 (設定圧力)	5 ~ 600 kPa (入口圧 - 50 kPa)
耐圧	1.5 MPa
制御可能な最大流量	150 L/min (N2 換算)
制御可能な最小流量	50 mL/min (N2 換算)
電源電圧	DC24V ± 10%
消費電流	200mA 以下
圧力設定	<ul style="list-style-type: none"> ・ 表示・設定ユニットでの直接入力 ・ 外部入力
外部入力 ・ C/C 信号 ・ 圧力設定	<ul style="list-style-type: none"> ・ C/C 入力 : 24V DC の ON, OFF ON 時 : Control OFF 時 : Close ・ 設定 : 0 ~ 5V, 4 ~ 20mA, RS-485
外部出力 ・ アラーム ・ 圧力値	<ul style="list-style-type: none"> ・ アラーム接点 A 接 * 設定圧力との差異 (最小設定値 : ± 1 kPa) * 本体異常 (電源電圧, ノイズ) ・ RS-485 ・ 0 ~ 5V (CD-100 より)
供給 Air 圧	0.4 ~ 0.6 MPa
プロセスガス取合	1/4" フェイシブル
供給 Air 取合	M5 ヌス
外部リーク	1×10^{-11} Pa·m ³ /sec(He)以下
シートリーク	1×10^{-8} Pa·m ³ /sec(He)以下
接ガス材料	SUS-316L, Ni-Co 合金, ハステロイ, フッ素樹脂
接ガス面の表面粗度	R _{MAX} 0.8 μm 以下
応答性	Close から Cont.へ 1 秒程度 * 遅延設定可能 (2sec 程度迄)
精度、ヒステシス、繰り返し再現性	圧力センサの仕様による
表示分解能	1 digit
表示 (CD-100)	3 桁(最大 999) 赤色 LED
サイズ	面間 60mm、高さ 130mm (制御部一体型) ・ 空気圧制御部 + CD-100 : 36 × 36 × 68mm
使用温度	0 ~ 50 : 結露なきこと

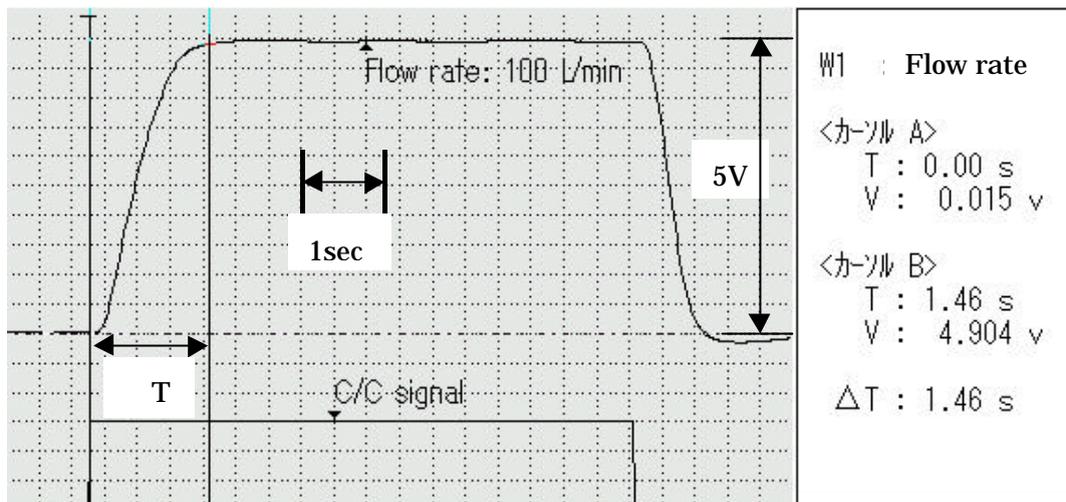


図 6 応答性 (AP-200 を流量コントローラとして使用)