

半導体用ガス供給システム

サブタイトル：より精密なプロセス制御のためのガス供給システム

1. はじめに

今や半導体の製造においては、 $0.25\mu\text{m}$ から $0.18\mu\text{m}$ へと移行しようとしており、また、メモリ主体からシステムLSIへと移り進もうとしている。また、ウエハの口径も200mmから300mmへ移り変わろうとしている。

これらは生産性の向上のため、つまりより高性能のLSIをより安く提供するという目標を達成するためである。そのため、装置や薬品等の消耗品を如何に安くするかと言う事を考えると共に、如何に歩留まりを高くするか、と言うことを考えなければならない。

各半導体の製造装置にあっては、考えられる限りのゴミの排除と、所謂ウルトラクリーンな薬品・ガス・純水等を使うことが、この歩留まりの向上に不可欠な要件と言える。ここでは、この内プロセスの最も重要な要件であるガスの供給システムについて、特に装置内のガス供給システムの、その現状と問題点及び今後の方向性の中で特にその制御系のありかたについて概説する。

2. ガス制御の今昔

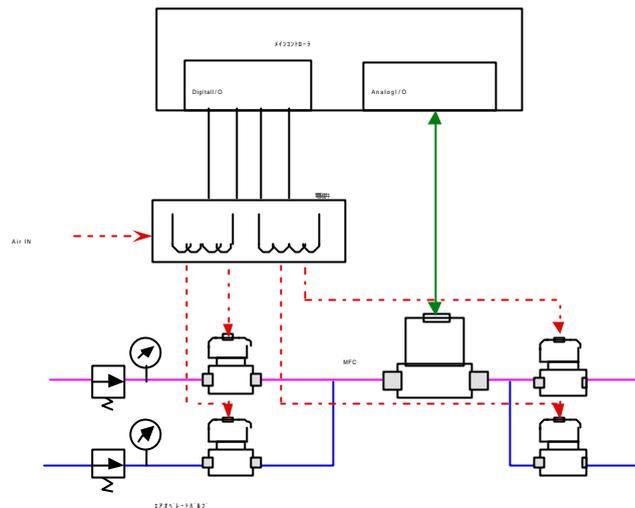
ガス供給システム。それは、製膜プロセスの安定制御が本来の目的である。つまりプロセスチャンバー内でのガスの濃度を如何に安定に制御するのか、そのための流量制御及び圧力制御をどのようにするのが問題である。

十数年前、まだデザインルールもさほど厳しくなかった頃のこと。CPUも8ビット全盛の頃で、且つメモリも今とは比べ物にならないくらい小さい頃のガス制御方式は次のようなものであった。その頃のウエハは、まだまだ小さく4インチ程度のもので、処理と言えれば殆どがバッチ処理のものばかりであった。

これら装置におけるガスの濃度管理と言っても、ウエハそのものが小さなものであったのと、デザインルールそのものが厳しくなかったために、ウエハ面内におけるガス濃度分布と、ウエハ間におけるガス濃度分布が多少悪くても問題なかったわけである。

また、そのプロセス時間は数時間を要していたため、ガスの供給が途中で多少変動しても、半導体の性能には影響を与えなかったのである。

その頃のプロセス制御装置は、タイマーとリレーの塊から、8ビットのMPUを使ってプログラミングできるものへと移行する過程であった。その中身はタイマーとドライバ(リレー)から成り立っていたといっても過言ではない。また、レシピという言葉が使われ始めたのもこの頃からである。



開始してから、何時間何分してどのバルブを開けるとか閉めるとか、それから又何時間何分して次のバルブを開けるとか閉めるとか。その繰り返しでプロセスが進められていた。

プロセス開始。ある時間たって一斉にリレーが ON/OFF。よく聞いているとリレーが一斉に「ガチャ」ではなく「ガチャガチャガチャ」。また遅延工程では遅延リレーを使ってさらに遅らせていた。

バルブ、MFCのあるガスキャビネットからプロセスチャンバーへは、長い配管で結ばれてガスが送られていた。かつその配管長さのガス種類によりマチマチであったため、ガスの反応が開始される時間が一定ではなかった。

現在は、数時間のプロセスから数分いや数十秒のプロセスにまでなっている。

かつての8ビットの時代から、32ビットMPUへ移り変わってきており、メモリ容量も一百万倍以上になっている。つまりガス制御は十数年前の数十分の一の正確さを、求められているのである。

昔の「何時間何分にこのバルブを開く」から「何十何秒にこのバルブを開く」という単位に変わって来たが、時間管理でプロセスする方法に今も変わってはいない。従って、より精密な時間管理を各部でしなければより精密な加工は実現できないのである。

常に同じタイミングでガスの反応が始まらなければ、同じ物を常に作る事はできないのである。

3. ガス制御の問題点

装置内でガスを供給するシステムを考えたとき、大きく分けて3つの部分に分かれる。

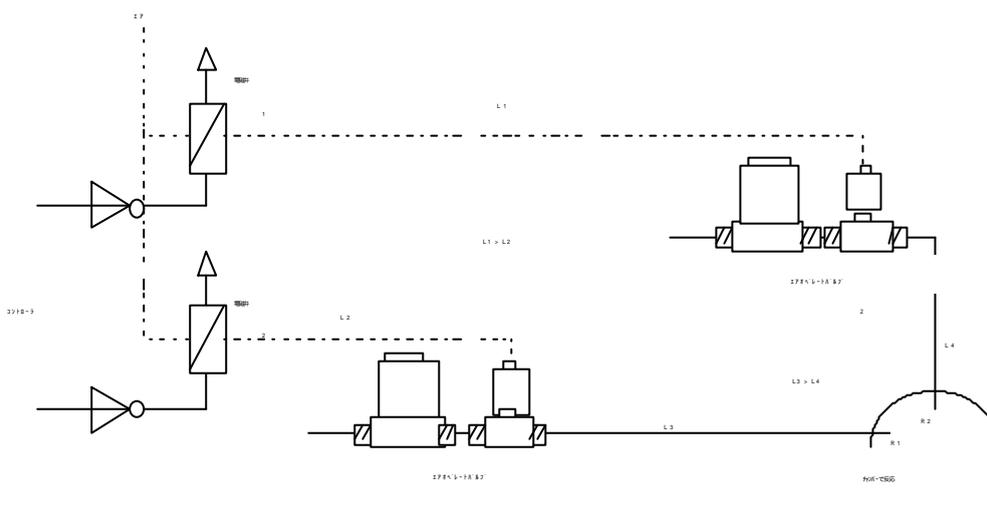
- 第一は、プロセスチャンバーの上流のガスパネル
- 第二は、ガスパネル（空圧弁 / MFCの動作）。
- 第三は、制御装置（コントローラ）である。

これら3つのブロックで、夫々同じタイミングが図れない要因と、その対応について以下検討したいと考える。

1) チャンバーの上流

第一の、ガスパネルからチャンバーまでの、ガスパネルまでのパイピングについて考える。反応するのは、チャンバーの中である。もちろん単一ガスで処理するプロセスもあるが、ここでは、複数のガスの反応という前提で話しを進める。

例えば、図のように2つのガス系があったとする。このプロセスでは、2つのガスが同時にチャンバーに入り反応が始まることとすると、どちらかのガスが遅れたり、また早く止ったりした場合、例え同一時間ガスが流れたとしても反応そのものの時間は短くなることになる。例えば30秒ほどのプロセスがあったとしよう。ガス1とガス2では、配管長や流量、圧力等の関係で1秒差があったとする。これは、ガスを止める時にも同じ時間掛かる訳なので2秒間反応が行われないことになる。30秒の中の2秒間は凡そ7%にもなってしまうことになる。

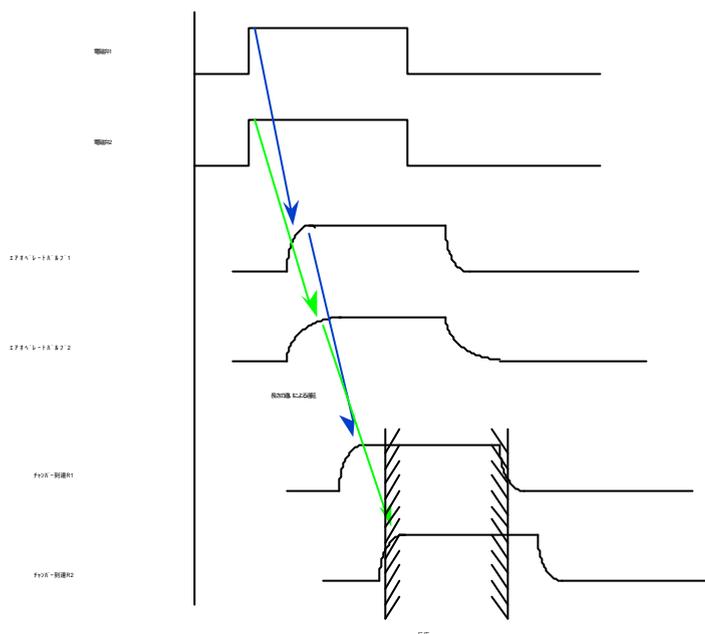


もちろん、2秒差があっても常に再現されれば、プロセス間での差は出ないことになる。しかし、プロセスガスを配管中に留め置く場合もあれば、窒素等の不性ガスでパージすることもある。通常は、窒素パージ等しておくことの方が一般的である。パージガスの置換は常圧置換と真空置換がある。

常圧置換の場合は、開いたバルブから徐々にガスが流れ始め、最初は窒素がチャンバー中に流れ、中程には窒素とプロセスガスの混合ガスが流れ、暫くしてプロセスガスそのものがチャンバーへと流れていくということになる。配管中及びチャンバー内のガス濃度が徐々に変化していくと共に、他のガスとの反応にも時間差が発生する。これでは安定したプロセスが出来る保証はない。又真空置換の場合は数回の真空引きと成分ガス導入を繰り返す。

返すことになり、プロセス開始までの時間がかかることになる。

これらを解決するのは、ガスパネルをチャンバー直近に持ってくることである。極論を言ってしまうと、チャンバーにガスパネルを抱かせることだと考える。そうすれば配管長は限りなく短くなり、ガス間の配管長の差も小さくなる訳である。



只、これを実現するためには、ガスパネルをチャンバーに載せられるくらい小さいものにしなければならない。今その試みとしてサーフェスマウントなるものが主流になりつつあるようだが、理想状態にまでは至っていないのが現状である。

2) ガスパネル内部

次に、ガスパネルでの問題点は何であろうか。

ここでも同様な時間差が存在する。時間差は、空圧弁とMFCで生じる。MFCでは、夫々大きさや流量等の違いによる応答速度や、同じ型式の製品でも設定流量やバルブのヒステリシスの違いによる、動作のバラツキが存在する。

又、空圧弁では、バルブを押し開ける空気圧と内部のバネ、及び実際に流れるガスの圧力等のバランスでバルブが開閉するわけだが、このバランスに個体差がある。バネの弾性力と言っても全く同じと言うものはない。内部の就働抵抗も違う。つまり、あるバルブは、300KPaの空気圧を加えたときに開いたものが、他のバルブでは、350KPaの空気圧を加えたときに開くと言った違いが出てくる訳である。

また、閉じるときはどうかと言うと、本来開けたときと同じ圧力に下げた時に閉じてくれれば良いのだが、実際は違う。300KPaの空気圧を加えたときに開いたバルブは、300KPa

の空気圧に下げた時にバルブが閉じるのが望ましいのだが、300KPa より下の例えば 270KPa とか言う圧力まで下がらないと閉じてはくれない。これをヒステリシスと言うが、空圧弁に加える空気圧の下がり方（抜け方・抜け時間）によっては、バルブを閉じたつもりが実はまだ数秒間開いていたということにもなりかねない。

バルブを切り替えてガスを切り替える場合、タイミングによっては配管中でガスが混じり合うことにもなってしまふ。

今後は制御する側でもバルブの持つ特性を把握し、夫々のバラツキを極力小さくするよう個別のタイミングで出力を ON/OFF するような制御が必要になってくる。

MFCでは、構造の違いにより、ソレノイドタイプ、ピエゾタイプ、サーマルタイプ等があり、夫々レスポンス時間が異なっている。

制御する側から言うと、いつも悩まされるのがこのMFCである。空圧弁での動作時間差は、数ミリ秒から数十ミリ秒程度だが、MFCの場合は、数百ミリ秒から数秒にもなる。バルブは開けたのにガスが流れてこない。

ノーマリーオープンのMFCでは、バルブを開ける前に一旦MFC内の弁を閉じなければオーバーシュートを発生してしまう。その防止策としては、バルブを開ける信号を使ってハード的にバルブに遅延をかけ、その間にMFCを閉じるようなやり方をするが、そのために要する時間は、長いMFCの場合では数秒も掛かってしまう。

もちろんノーマリークローズのMFCでも、状況によってはフルオープンしていることもあるので、同様の処理を行うこともある。

MFCの流量センサは、熱を利用した方式である。流れるガスの全ての量がこのセンサ部を通るわけではない。一部分のガス量を測定して、あとは分流比から全体のガス量を算出するやり方をしている。何か異物が付着し分流比が変われば、当然センサの読み値は同じでも実流量は変わってしまう。変わればプロセスの結果も変わることになる。

これまで、数十ミリ秒から数百ミリ秒程度の違いでの問題点と、今後の方向について記述してきたが、この心臓部である流量制御部分が如何にクリティカルであるがわかりただけだと思う。

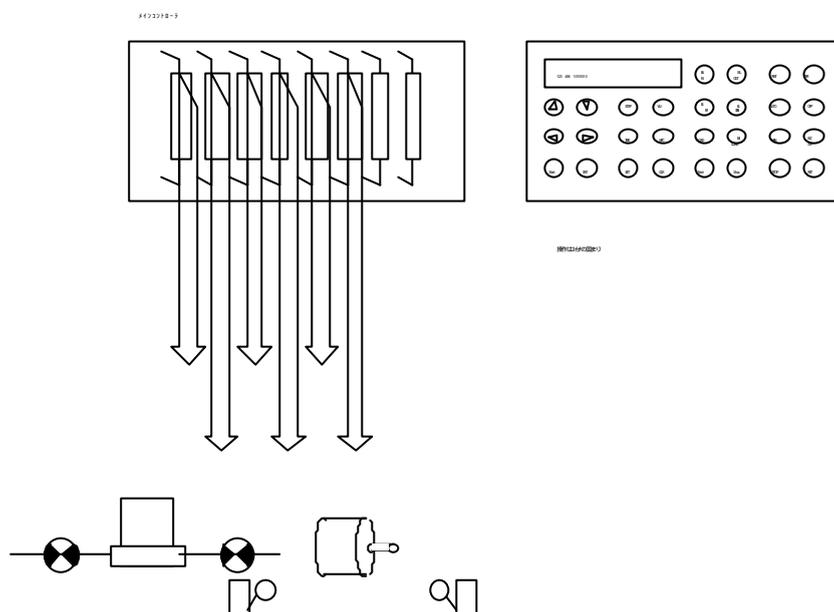
今後は、バルブ及びこの流量制御装置を一体のものとして、開閉タイミングの制御を制御装置側で行うことと、分流型の流量制御方式ではなく全量型の方式を用いた流量制御機器のコンビネーションが、必要になってくると思われる。

3) 制御装置（コントローラ）

最近では、高性能のMPUを使って高級言語を駆使し、非常に難しい事をコントローラは行なっている。バルブやMFC等ガスを制御する数も増え、また自動機等を制御したり、HOSTと通信（SECS等）したり、数多くの処理をこなしている。また、使いやすくするためにと

ユーザーインターフェース（例えば CRT 画面とタッチスクリーンを使って会話形式で操作したり）に重きが置かれるようになり、かえって複雑且つコントローラにとっては非常に重い仕事になってきている。

さらに、LAN 等によって制御装置を分散化し、肥大化するコントローラを少しでも小さくするような構成を取るところも出てきている。高速の LAN を使うことで装置全体が高速で動作できる機能を持つ反面、その通信にかかわるソフトウェアの比重が大きく、かえって軽くしたはずの各制御装置の、プロセスにかかわる時間管理がおろそかなる弊害も生じる可能性もある。一極集中型のコントローラでは、制御部から、数十本のケーブルの束が出て行き、装置の中を配線が蛸足のように這いずり回ってしまうことになるため、当然何とかしたいと思うのも仕方ない事であろう。



分散制御化する事で、長いケーブルが何本も這いずりまわっていると言うような事は無くなるともに各制御機器を各々独立に制御することができるため、メインCPUへの負荷の低減できる等のメリットがある。

一方、ガス制御における同一タイミングの重要性の観点からこの分散制御を考えたとき、この分散化が最適な方法なのか検討する必要がある。

マンマシンインターフェースを余り考えず、且つ早さを要求するのであれば、もちろん一台のコントローラで何でもこなす集中型の方が良い。この方法だと、所謂コントローラ自身は大きくなり、中に入っている基板も何枚も入ることになる。CPUボード・メモリボード・デジタルI/Oボード・アナログI/Oボード・モータの制御ボード・・・等。データはバスを通してやり取りが行われるので、いたって速く1マイクロ秒程度でボード間のデータ交換が行われる。この位の速さの通信速度だと、バルブの数が多くても

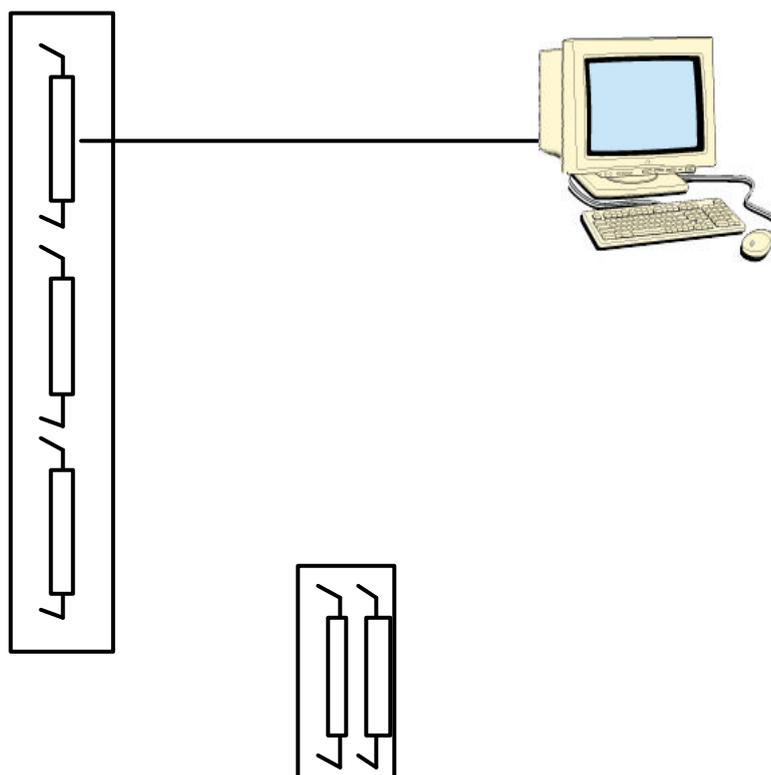
殆ど時間差なく制御できてしまう。

しかし、装置全体の制御をするわけであるから、装置のいたる所からケーブルの塊が集まって来る。また、装置の動作確認をしようとしても、全ての部品が揃わなければ確認できないなど、実際の装置の組立・調整には難点がある。

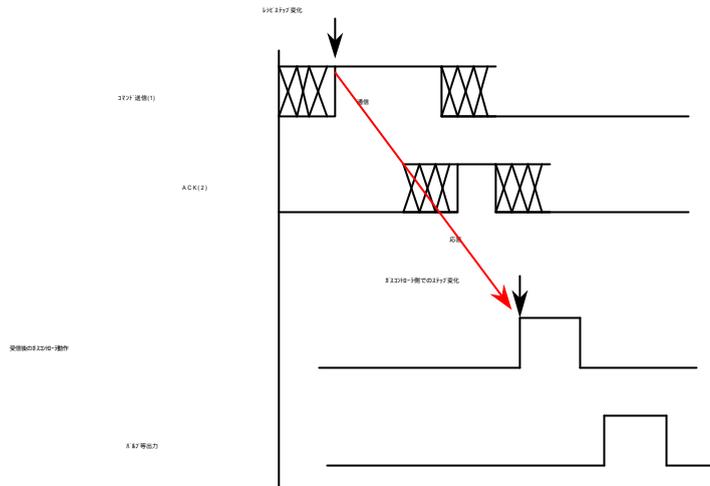
コントローラを分ける分散型の制御システムだ。これは決して最近になって考えられたものではないが、LANと言われるネットワークシステムが身近になったこともあって、より現実的なものとなっている。

確かにこの分散型のシステムだと、ガス系はガス系だけでテストができ、メカはメカだけでテストができる。ソフト・電気・メカ・ガスの担当者が全員揃わなくても動作させることができるのは、非常にメリットがある。

また、各コントローラは、各モジュールの中(ガスならガスキャビネットの中)にあるため、そのコントローラ間を接続するケーブルはLANケーブル1本のみで済むし、各コントローラから出るケーブルも際短長で済むことになる。



分散制御における問題は、通信速度である。1Mbps 以上の速度をもつ回線では、暫く問題にならないと思うが、それを下回る速度のものではやはり時間差が発生する。



その時間差が発生する要因をまとめてみると、

- * 細かに通信手順が決められているため、少ないデータでも時間が掛かる
- * 共通の回線を使用するために、回線使用中を待たなければ使用できない
- * トークンLANの場合トークン（回線使用权）を持たないコントローラは回線使用できない

などで、要は、物理的に速いLANであっても、それを使用するソフトウェアの制約で、必ずしも希望する速度が得られないこと、また回線の解除待ち等が頻繁に行われる環境では、レシピのステップが変わっても、末端のコントローラにデータが転送されない時間が存在すること等、今までに述べてきた時間差の問題点が、速度の遅い通信回線を使用する分散型制御システムで存在することである。

今後この分散型の制御システムが主流となってくるであろうが、ガス間の時間差をできるだけ小さくするために、LANの通信速度をできるだけ速く、且つ軽いソフトウェアにすることが、この分散型システムに求められる条件である。繰り返すが、最低1Mbpsの通信速度は最低必要条件である。

4. 今後の方向性

チャンバー・ガスパネル間の時間差を、極小にするための一手段としてガスパネルの集積化がある。SEMIでは現在1.5”角のサブストレートが標準案としていたが、最近では1.125”角のサブストレートが提案されるようになってきた。勿論集積化は、肥大化しているガスパネルを小型化するのが本来の目的であるが、ガスパネルの小型化を行うことで、よりチャンバーの直近に配置することが出来れば、配管長の違いによる時間差を極小にすることが出来る。さらに言えばチャンバーにガスパネルが取り付けやすい（亀の子のように）ことが出来れば、配管長・流量・配管サイズ等による影響は無視することが出来ると思われる。

そのためには、この集積化というものをもっと進化させ、バルブや流量制御装置の小型化及び制御方法の考え方そのものを再検討する必要があるであろう。例えば、

- * 従来の熱式の流量制御方式をノズル流量制御方式にすることで小型化、部品の統合化を実現。
- * 部品やサブストレートのサイズを決めるのではなく、プロセスチャンバーから要求されるサイズをもとに決める。
- * 平面的にももの考えるのではなく、立体的に考えるべきである。

また、ガスパネルに使っているバルブや流量制御装置という部品の改良に加えて、それらを動作させる制御装置の制御方法も考えなければならない。例えば、

- * 分散型にしたときのLAN通信速度の高速化
- * 個々のバルブ開閉時間の測定
- * バルブの開閉時間のレシピへのフィードバック（個々のバルブ開閉時間に応じた信号出力）
- * 高速応答の流量制御装置
- * 1 ガスライン単位のユニット化と各々のガスラインの同期等が考えられる。

5．終わりに

今まで、ガスの供給系は個々の部品、ガスパネル等の、ハードウエアばかりが取り出たされてきた。今後益々微細化が進むにつれて、ハードウエアばかりではなくソフトウェアでの対応を考えていかなければならない。より高速なMPUを手に入れられる現在、パソコンとは違う制御装置として、より緻密な時間制御とフィードバック制御を取り入れていく必要があると考える。

そして、常に同じタイミングでプロセスが行なえる環境が、本来の目的である歩留まりの向上と、安くて安定したLSIを市場に提供する事を可能にすると確信するものである。