

半導体製造装置におけるガス供給、および液体供給システムの進化：モジュール設計と機器構成オプションの拡大による装置生産性の向上

EO:装置の最適化

Gary Xing、Paul Werbaneth、Randy Treur、Phil Barros

Ichor Systems

フリーモント、カリフォルニア州

gxing@ichorsystems.com

半導体製造装置の業界では、プラズマエッチング、化学気相成長、物理気相成長、エピタキシー、およびドライ剥離などの「ドライ」製造プロセスにおいて、従来型のガスパネルが集積型ガス供給システムに置き換えられた。集積型ガス供給システムは、その多くの利点によって、従来型のシステム設計に代わるものとして採用された。これらの利点として、小型化/占有面積の省スペース化、容易にカスタマイズ可能な構成、メンテナンスの容易さ、そして装置生産性の向上が挙げられる。大手ドライプロセス装置メーカーへのガスパネルの供給業者として、当社は、顧客主導による集積型ガス供給システムへの移行を認識して対応してきた。当社は、同様の集積化による利点が、薬液供給用途、たとえば、ウェット洗浄および表面除去にも適用すると考え、従来型の薬液供給システムの集積型システムへの転換を進めている。本稿では、業界における従来型から集積型ガス供給システムへの転換、その過程で得た知識、そしてこれらのベストプラクティスを、ウェット洗浄、電気化学堆積（ECD）、および化学機械研磨（CMP）を含む主要なウェット系装置の用途で使用される集積型薬液供給システムへの応用に関する詳細について紹介する。また、集積型システム構造の開発における3つの重点分野、保守性、封止機構、および汚染管理についても議論する。

反応物質を供給するプロセスガスパネルの内側を、長期的な視点で見ると、これらのガス供給システムの構造が、「従来型」継手構造と呼ばれるものから、図1に示すように、ダウンマウントまたはサーフェスマウント、あるいは一般にモジュールと呼ばれるものへと進化していることに気づく。

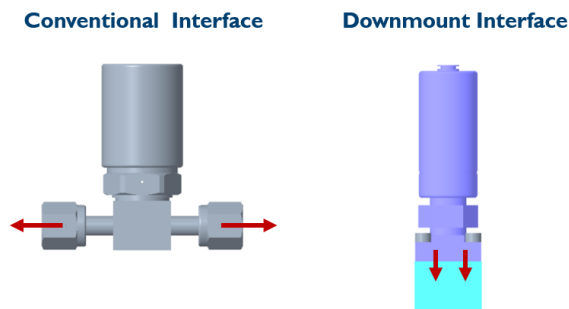


図1. 従来型およびダウンマウント型ガス供給機器の接続方法
側面図

I. ガス集積型構造の紹介

半導体デバイス製造業界は、定期的に大規模および小規模な変革を経験してきた。大規模な移行としては、たとえば、サブ波長リソグラフィ採用の成功、化学機械研磨（CMP）に基づく多層金属配線プロセス、および Self-aligned double patterning（SADP：自己整合ダブルパターニング）または Self-aligned quadruple patterning（SAQP：自己整合クアドルプルパターニング）を用いて量産された 3D FinFET トランジスタが挙げられる。小規模ではあるが、重要な移行も数々あり、自動材料ハンドリングシステム（AMHS）の採用は、これらのうちの1つとみなすことができ、自動欠陥レビューおよび分類検査ステーションの本格展開も同様である。プラズマエッチング、化学気相成長、物理気相成長、エピタキシー、およびドライ剥離システムを含めた各種のドライプロセスツールに

図 2 は、ダウンマウントコンポーネントと集積型システムとそれらの付帯部品を使用した設置を示している。

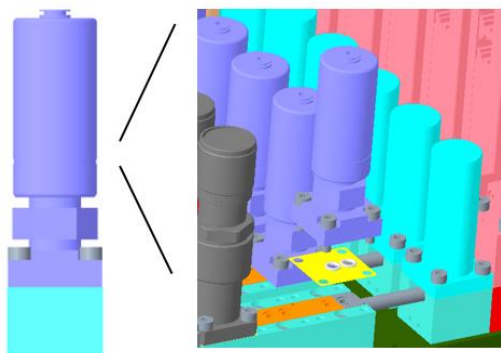


図 2. ダウンマウント型 / 集積コンポーネントの設置の分解図

K1S テクノロジーなどの集積型ガス供給システムの利点としては、占有面積の省スペース化（図 3）、コンポーネント接続の標準化、チューブ継手と溶接部の大幅な削減、そして集積コンポーネントの現場での交換が容易といった点が挙げられる。従来型から集積型構造への移行による一般的なガスパネルの容積削減率は約 35～40%である。

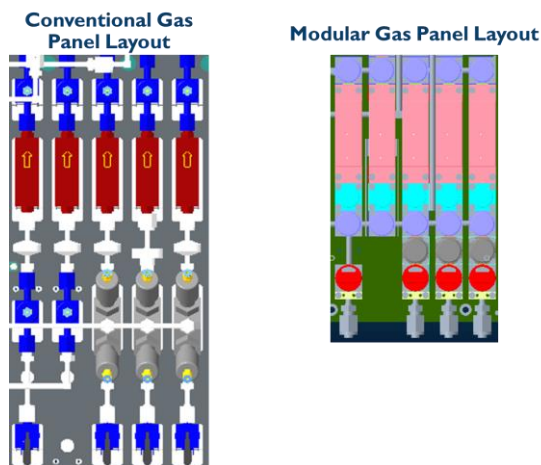
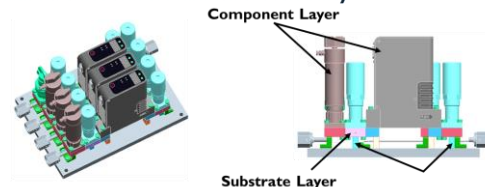


図 3. 従来型と集積型ガス供給パネルレイアウトの上面図

業界での集積型ガス供給システム構造の採用は、2000 年代初頭に始まり、ドライ処理装置メーカー、コンポーネント供給業者の団結による強力な後押しと、SEMI との協業により、半導体コミュニティ内の作業部会が制定した標準により大きく推進された。[1] [2] [3]

ここに示すのは（図 3 図 4）、業界標準の特定の集積型ガスシステム構造である。よく知られた K1S 集積型構造は、ガスパネルの設計技術者に最大の柔軟性を提供し、TMS 集積型アーキテクチャは、費用対効果の最大化を追求している。

K1S Modular Architecture: Maximum Flexibility



TMS Modular Architecture: Maximizing Cost Effectiveness

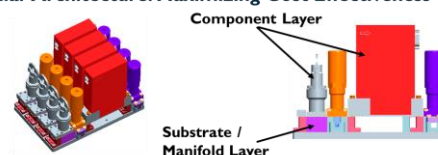


図 4. K1S および TMS 集積型ガス供給構造

II. 液体供給用途への集積型ガス処理コンセプトの採用

液体供給および供給システムは、様々な工業用途、特に半導体デバイス製造で使用されている。液体ベースのプロセスとしては、ウェット洗浄、ウェハ研磨と平坦化、ドライ、およびウェット成膜（電気化学成長、または無電解）などがある。半導体製造プロセスでの薬液供給では、一般に、要求に応じて気泡のない状態で、基板の使用可能な部分に均一な厚みを維持しつつ、コストと環境上の懸念から化学廃棄物を最小限に抑えることが必要とされている。

供給システムは、供給源から各種の機器、たとえば流量制御計、圧力変換器、流量測定センサー、圧力レギュレータ、バルブなどを備えた、ウェハ上への供給プロセスに薬液を供給するために使用されている。これらの用途の多くでは、薬液供給システムのサイズがコストに大きく影響する場合がある。半導体製造では、ファブの建設費用が高額になる、超高清浄環境内に薬液供給システムが収容されるのが一般的である。さらに、半導体製造に使用される液体の多くは有毒か、高反応性、あるいは両方の特性があり、そのような液体の供給システムは、しばしば専用の格納容器および換気装置を必要とする。このようなシステムにとって、液体供給システムの小型化は利点となる。

半導体製造プロセスの湿式化学側では、プロセス世代が進むにつれ、採用されるウェット処理工程の数は増加してきており、使用される薬液の種類も多くなっている（図 5）。

10nm のプロセスノードでは、約 800 もの洗浄処理工程を使用すると推測されている。ウェハのウェット洗浄技術は時と共に進化している：「かつて、ウェハ洗浄と表面処理は科学というよりは芸術に近いものと考えられていた」ウェハ洗浄用のウェットベンチは、150mm 以下のウェハの、45nm あるいはそれ以前のプロセスノードでのバッチ処理に使用されていた。また、業界では、バッチ式のスプレー型ウェハウェット洗浄を、後続のプロセスノード用に使用している。45nm プロセスノード以降において、200mm と 300mm ウェハ用の枚葉式ウェット洗浄が幅広く採用された。また、最先端のプロセスノードでの 300mm ウェハのウェット洗浄用途に、最大 24 基の処理モジュールを搭載した高生産性の積層チャンバ設計が引き続き開発されている。[4] [5]

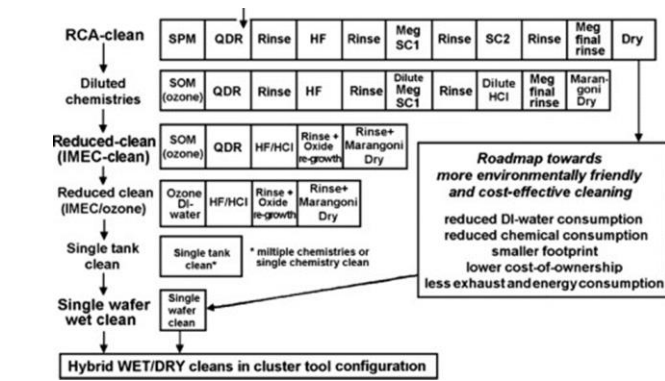


図 5. 費用対効果の高いウェット洗浄は、ウェハ当たりの薬液消費量削減と装置占有面積の小型化に依存している

RCA 洗浄	SPM	QDR	リンス	HF	リンス	メガソニック SC1	リンス	SC2	リンス	メガソニック最終リンス	乾燥
希釈済み薬液	SOM (オゾン)	QDR	リンス	HF	リンス	希釈メガソニック SC1	リンス	希釈 HCl	メガソニック最終リンス	マランゴニ乾燥	
工程削減型洗浄 (IMEC クリーニング)	SOM (オゾン)	QDR	HF/HCl	リンス+酸化膜再成長	リンス+マランゴニ乾燥						
工程削減型洗浄 (IMEC/オゾン)	オゾン脱イオン水	HF/HCl	リンス+酸化膜再成長	リンス+マランゴニ乾燥							
単槽式洗浄	単槽式洗浄*										
収束式ウェット洗浄	収束式洗浄										

環境により優しく費用対効果の高い洗浄に向けたロードマップ

脱イオン水消費量の削減
薬液消費量の削減
占有面積の狭小化
所有コストの削減
廃棄物とエネルギー消費の削減

クラスターツール構成でのハイブリッド型ウェット/ドライ洗浄

ファブと装置の設備投資競争は、プロセス装置、WIP 保管場所、および生産モニタリングツールの間で高まりつつある。チラーや化学物質保管キャビネットなどの一部の設備では、主に圧縮不可能な液体の特性により、規模縮小での飛躍的な発展がほとんどなされていない。これはウェット処理システムのあらゆる面に共通する問題であり、製造ツールの生産高が占有面積で制限される場合、市場からのニーズを満たすウェハ製造には、多大な資本コストを伴うエリアの拡充が必要となる。

当社では、空間の最適化、最先端の性能、コンポーネント設計の最適化、後付け改造の保守性の強化、ならびに最新の業界標準への適合を組み合わせた、集積型のコンポーネント密度の高い液体供給システムの開発のために、業界における集積型ガス供給システムの活用成功例を提案する。

図 6 は、IMS (Integrated Manifold System の略) と呼ぶ集積型薬液供給システムを採用し、施設拡充への高額な資本投資を改善することで、ウェハ製造ファブがプロセス設備や薬液格納への拡大し続ける空間への要求に対応できることを示している。

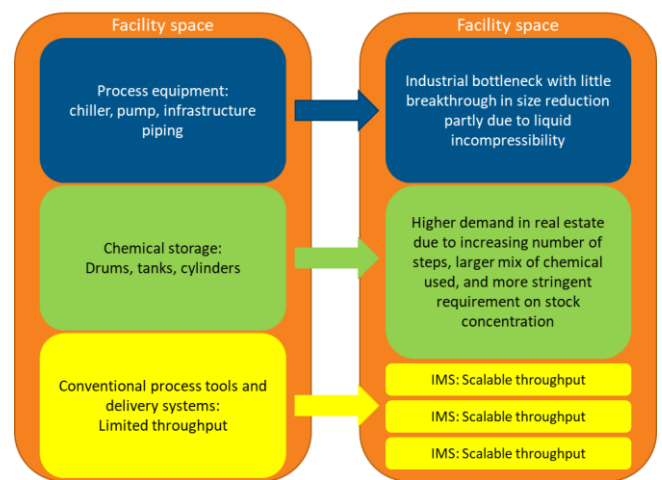


図 6. 半導体ファブでの現行および将来の空間への需要と計画

施設の空間	施設の空間
プロセス設備： チラー、ポンプ、インフラストラクチャ配管	規模削減の打開策が少ないという産業上のボトルネックの一端は、圧縮不可能という液体の特性にある
薬液格納容器： ドラム、タンク、シリンダー	工程数の増加、使用する多種多様な薬液、および保管密度に関するより厳しい要件により、不動産への需要が高まっている
従来型のプロセスツールと供給システム： 限定的なスループット	IMS：スケーラブルなスループット
	IMS：スケーラブルなスループット
	IMS：スケーラブルなスループット

広く業界で利用可能なコンポーネントを使用した集積型ウェット薬液供給システム構造は現在、大容量 CMP およびウェット洗浄用途に採用されている。また、表面実装型薬液供給システムは、その他の半導体用途でも使用されている：ウェハトラック、めっき、成膜、フォトレジストなど。集積型薬液供給システムは、数十年にわたって半導体エッチングと成膜プロセスへのガス管理向け運用において、現場での実績をもつ表面実装型ガス供給構造のコンセプトと参考デザインに端を発している。しかし、実績のある集積型ガス供給構造に基づいている一方で、薬液供給システムは、液体処理用途、特に封止と界面特性、薬液混合技術と、超高純度液体材料を視野に入れ、その特有の課題を解決するために最適化する必要がある。図 7 は、ガスから液体/薬液供給用途への集積型構成要素の適用を例示している。図 8 と図 9 は、IMS シールとサブストレートの拡大図である。



図 7. ガス (K1S) と液体 (IMS) 分配システム用の集積型サブストレート



図 8. IMS シールとサブストレートのスナップショット

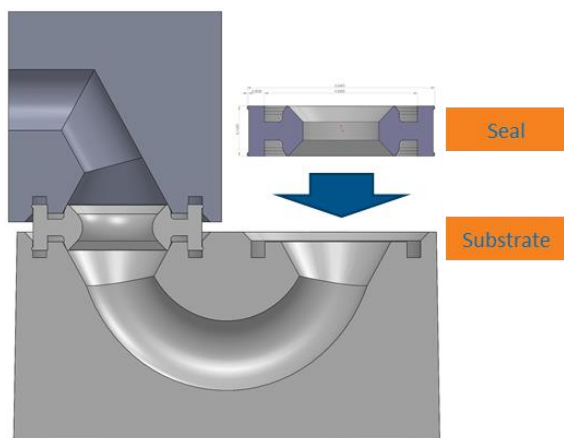


図 9. IMS 封止/接合と流路構造

図 10. は、従来型から集積型薬液供給システムに移行することで実現される小型化を図示している。

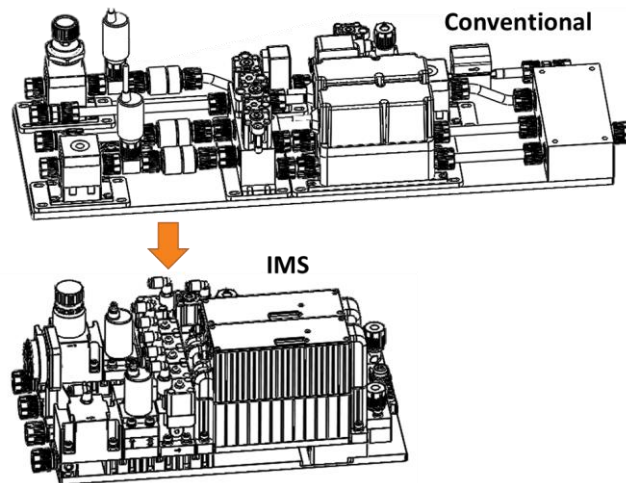


図 10. 従来型から集積型薬液供給システムへの移行

図 11. は、集積型薬液供給システムの側面図。液体の流れを示す左下の断面図を見ると、制限の少ない流路であることがわかる。この独特の薬液供給モジュールには、3 つの組成混合モジュールが含まれ、3 つの流体が液体流量コントローラを通じて混合モジュールへと運ばれ、最適に混合された流体をウェット処理システムの下流側の次のモジュールに注入する。この独特の設計は、通常 CMP の後工程での洗浄用途で利用される。

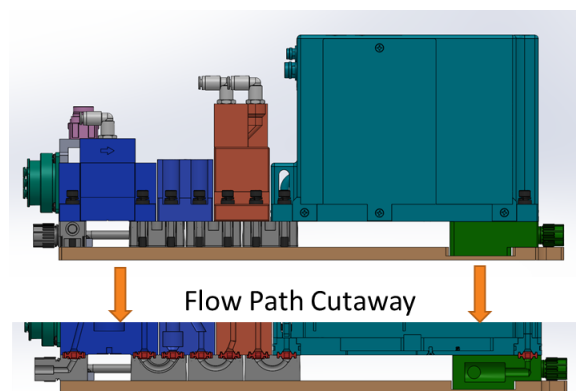


図 11. 制限の少ない流路を備えた集積型薬液供給システム (IMS)

図 11 に示す、システムを構築するのに使用された集積型液体供給システムのコンポーネント向けの商業的エコシステムは、健全であり、常に新たな供給業者が参加している。表 1 は、集積コンポーネントの異なるカテゴリ向けの、様々な商用部品供給業者の例である。各カテゴリでは、米国内のサプライヤと日本国内市場の供給業者の両方から複数の製品が利用可能であり、集積型液体供給システムの認知度が最近高まっていることを示している。

コンポーネントの種類	商用部品供給業者
継手	日本ビラー工業
液体用流量コントローラ	Entegris、Malema、Surpass
圧力制御器	Advance、SMC、Surpass
空圧バルブ	Advance、SMC、Entegris、Parker
混合マニホールド	Entegris、Parker

表 1. モジュラー型薬液供給システムのコンポーネントと供給業者

現在までに、量産用途向けの現場に 2,000 台を超える集積型薬液供給システムが出荷されている。

III. 保守性の強化、封止機構、および汚染管理

従来型の構造では、薬液供給システムに取付する前に、ナット、スリーブと（複数の）フェルールなどの継手が既に組付けられている必要がある。複雑かつ高度にカスタマイズされた形状でのチューブの曲げ加工には、専門知識と技能、さらに職人並みの手作業が必要で、同様の作業がツールの組み立てと整備にも必要となる。これらの要件を満たすことができない場合、製造ライン上に多量の廃棄処分製品をもたらす結果となる。また同プロセスでは、追加コンポーネントを取り付けるハードウェア（たとえば、ブラケット）とコスト高な事前設置用工具（たとえば、継手レンチのセットや挿入ツール）も必要となる。さらに、広い範囲の角度とアプローチからの組み立て工具のアクセス性のために、パネルの間隔をより多く確保する必要がある。

ダウンマウント型インターフェース設計と集積型構造では、必要なのは同一寸法のトルクドライバのみで、サービスツールセットの数を削減することができる。これにより、整備の利便性が向上し、単一方向からの工具のアクセスのみでコンポーネントの設置/取り外しが可能になる。さらに、コンポーネントの占有面積と接続ポートの配列を標準化することにより、手作業でのチューブの曲げ加工が不要となる。従って、組み立て/設置/整備時間を短縮し材料廃棄を削減することで、ツールの生産性と費用対効果が大きく向上する。

	従来型	IMS テクノロジー
チューブ曲げ加工	30 分	0 分
間隔の推定	30 分	0 分
付属品の挿入（スリーブ、フェルールなど）	10 分	< 1 分
位置決め工具（セット）	1～5 分	< 1 分
取り外し/設置	> 30 分	15 分

表 2. 1 つのコンポーネントを交換するのに要する整備時間

表 2 は、IMS 設計の採用により、コンポーネントの整備時間を最大 84%削減できることを推定している。コンポーネント数が増え、整備が必要なシステムやツールが増えるほど、時間の節約と生産性の向上が見込める。

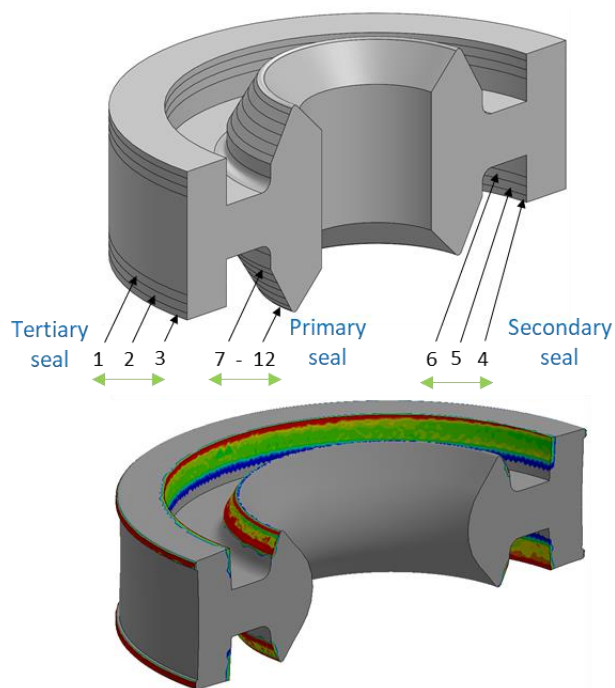


図 12. 位置座標と接触圧等高線プロットを用いた IMS 封止表面の有限要素解析の例

封止するために軸方向の荷重を利用する従来の継手設計とは対照的に、Ichor が所有する独自の IMS テクノロジーは、垂直方向に、中央に分配された荷重を、IMS キャビティを有する基板上に設置された 3 つの封止表面の設計に使用している。Ichor は、体積の量的有限要素解析（FEA、図 12 に示す）と実験的研究を行い、一次、二次、および三次封止表面にわたる接触圧プロファイルを最適化した。このテクノロジーの進歩は、高い動作温度と圧力下での封止性能を保証するだけでなく、保守性の容易さ、耐久性、デッドボリウムの排除および流量スループットの最大化など、様々な特性を向上させる封止機構を実現している。現場に出荷された 2,000 台のシステムには、基板上に結合した 100,000 個を超える設置済みのシール箇所が存在し、現在に至るまで集積コンポーネントのシール部の不具合は報告されていない。

IEEE のデバイスとシステムの国際ロードマップ (IRDS) によれば、「プロセス環境の汚染には主要な 3 つの発生源が存在する。1 つ目は、供給時のプロセス材料内の不純物である。2 つ目は、供給システムあるいはプロセスそのものである。3 つ目は、異物または、反応性イオンエッチング (RIE) や FOUT の汚染などのプロセスによる熱誘導分解物の反応である。これらの汚染源は、納入されたガスや薬液から基板表面まで経路全体を通じて発見される」[6]

しかしながら、液体中のパーティクルを直接測定するには、液体の性質上、パーティクル測定システムの解像度と、直接パーティクルを撮像および計数する能力を超えた非常に小さいパーティクルを把握し、管理する必要がある。従って、IRDS で提案されているように、パーティクルへのプロアクティブなアプローチを採用する必要がある。そのため、ガス供

給側で行われてきたことに倣い、ウェット処理用途の標準に関して業界が協働していく必要がある(図 13)。 [7]

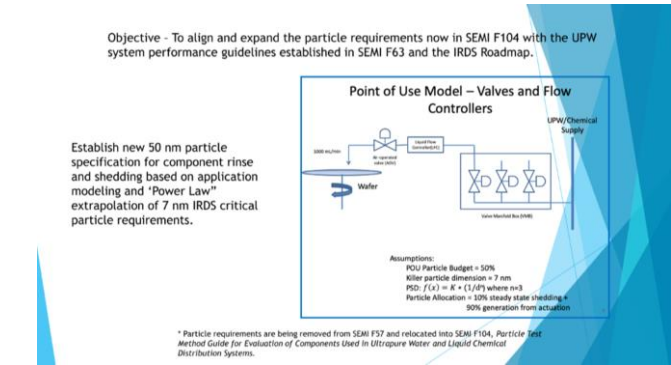


図 13. ウェット処理用のパーティクルと純度に関し、IRDS と同調する

目的 - SEMI F63 で発行された UPW システム要件ガイドラインと IRDS ロードマップに現在の SEMI F104 でのパーティクル要件を適合させ、拡張すること。	
アプリケーションモデリングと 7nm IRDS クリティカルパーティクル要件の「べき乗則」の推定に基づき、コンポーネントのリンズと搬水性に対する 50nm パーティクルの新規仕様を確立する。	ポイントオブユースモデルバルブと流量コントローラ 仮定： POU パーティクル最大数 = 50% キラーパーティクル寸法 = 7 nm PSD: $f(x) = K \cdot (1/d)^n$ ここで $n=3$ パーティクル割当て = 10%は定常状態で搬水+ 90%は機器の作動で生成
* パーティクル要件は、SEMI F57 から削除されており、SEMI F104 -超純水および薬液供給システムに使用されるコンポーネント評価のためのパーティクル試験方法ガイドラインに移動している	

半導体製造業界での長い経験から、当社は、デバイスの歩留まりへのパーティクル汚染の影響をよく理解している。さらに、当社は、業界がダイの歩留まりに影響するリスク低減を実現するために、リアクティブなアプローチからプロアクティブなアプローチへと移行する流れにも追従している。業界は、増え続ける洗浄工程の一覧からウェハ表面のパーティクルを除去する素晴らしい物理的および化学的プロセスの革新を進めてきたが、操作と複雑さが増したことにより、パターン破壊、材料取り扱いのリスクが高まり、設備投資および運用コストが増加している。従って、装置と設備を構築するレベルからのパーティクル発生を制御し最小化することがベストプラクティスとなる。

従来のリアクティブなアプローチでは、欠陥の原因を探し、多くの場合そこで終了していた。しかし、半導体デバイス製造とウェハ製造に使用される機器を良く理解するものとして、当社は、液体供給コンポーネント供給業者と共に、原点に帰り、CT Associates がコンポーネント供給業者業界と協力して開発した SEMI F104 の最新の最も厳格な標準を使用して、

バルブや配管などを、その歩留まりへの貢献を考慮して検討することができる。

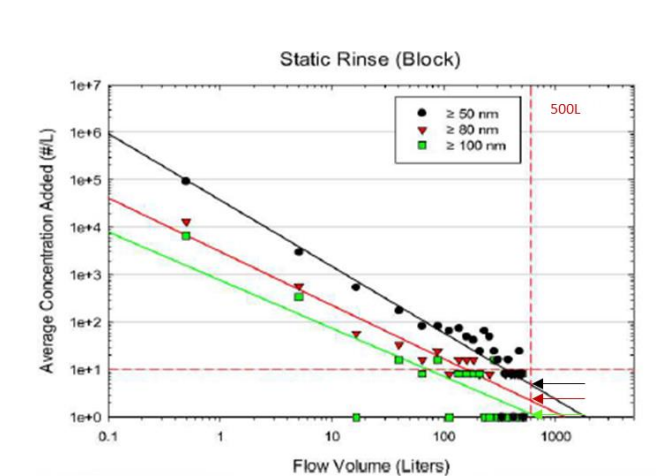


図 14. 50nm から 100nm における IMS 構成要素のパーティクル寄与データの例

当社は、主要な IMS 構成要素、封止材と基板における、様々なパーティクルサイズに関するパーティクル寄与データを常に収集している。図 14 と表 3 は、最新の SEMI F104 の手法に従って行われたパーティクル性能とデータ処理の例をまとめたもので、その結果は標準要件を凌いでいる。 [8]

SEMI F104 に記載の方法論で測定したパーティクル		
パーティクルサイズ	IMS パーティクル密度	合格基準
100nm	1.4ea/mL	<100ea/mL (2012)
80nm	2.7ea/mL	
50nm	6.2ea/mL	<10ea/mL (現在)

表 3. IMS テクノロジーのパーティクル性能の要約

IRDS ロードマップの目標クリティカルパーティクルサイズがますます小さくなり、厳格になるに従い、IMS テクノロジーは、継続的改善計画の一環として構成要素上だけでなく、全ての液体コンポーネント上のパーティクル性能をさらに向上するための研究開発に注力している。次世代半導体製造プロセス向けのパーティクル性能要件と期待は、これら非常に小さいパーティクルを正確に測定するための最新の産業用計測システムの能力を超えている。べき乗則推定[9]などのモデリング手法は、この苦境を乗り越えるための 1 つのアプローチであり、当社は、プロセス機器メーカー、サブシステム供給業者と協働しているデバイスメーカーと SEMI が、ウェット処理操作でのパーティクル測定とパーティクル制御用の新技術と新標準を確立することを期待している。

IV. 結論

半導体製造装置業界では、プラズマエッチング、化学気相成長、物理気相成長、エピタキシー、およびドライ剥離などの「ドライ」製造プロセスにおいて、従来型のガスパネルが集積型ガス供給システムに置き換えられた。集積型ガス供給システムは、その多くの利点によって、従来型のシステム設計に代わるものとして採用された。これらの利点として、小型化/占有面積の省スペース化、容易にカスタマイズ可能な構成、メンテナンスの容易さ、そして装置生産性の向上が挙げられる。当社は、集積化の同じ利点が、薬液供給用途、たとえば、ウェット洗浄および表面除去にも適用すると考え、ウェット洗浄、電気化学堆積(ECD)、および化学機械研磨(CMP)を含めた主要なウェット系装置の用途で使用されているウェット処理システムにおいて、従来型の薬液供給システムの集積型システムへの転換を推進するために、OEM、顧客および液体供給システムコンポーネントの供給業者と協力している。

現行の液体供給システムの重要な特性と限界は以下の通りである：コンポーネントの接続を収容するために広い占有面積が必要；膨大な継手インターフェースの種類、パーツ数と複雑さの増大、起こり得るリーク箇所の増加；固有のチューブ類と溶接箇所のアセンブリは容易に変更できない；保守性が最適化されておらず、広範な整備工具を必要とする；コンポーネントは製造業者間で互換性がなく、コンポーネントの供給業者を変更する場合、大きな設計変更が必要となる

一方で、集積型薬液供給システム技術の長所は以下の通りである：標準化、集積化された構造は設計サイクルの急な進路変更、設計の柔軟性と設計修正を可能にし、時間とコストの影響を低減する；継手/チューブ類の接続数の大幅な削減と標準化された設置と組み立て方法による組み立て時間の短縮；集積化設計は、占有面積を 40%(平均)削減する；標準化された集積化と整備用手工具の必要数の削減による保守の容易さ

業界は、半導体処理装置(IDM とファウンドリ)のエンドユーザー、装置製造業者(OEM)、およびサブシステムとコンポーネント供給業者間の協業から大きく恩恵を受けている。さらに、当社は標準化活動から大きく恩恵を受けている。標準化は SEMI が果たす 1 つの最も重要な役割であり、5000 名を超える経験豊富なボランティアの支援により、1000 を超える業界が承認した標準が策定されている。

業界での集積型ガス供給システム構造の採用は、ドライ処理装置メーカー、コンポーネント供給業者の団結による強力な後押しと、SEMI が共同して半導体コミュニティ内の作業部会が制定した標準により大きく推進されたように、当社は、集積型液体供給システムは、同じ道を辿ることにより恩恵を受けると考えている。

参考文献

- [1] “SEMI F86 - Specification for Dimension of Two Port Components (Except MFC/MFM) for 1.125 Inch Type Four Fastener Configuration Surface Mount Gas Distribution Systems,” originally published March 2004, retrieved from <https://store-us.semi.org/products/f08600-semi-f86-specification-for-dimension-of-two-port-components-except-mfc-mfm-for-1-125-inch-type-four-fastener-configuration-surface-mount-gas-distribution-systems> on 03 Nov. 2021.
- [2] “SEMI F82 - Specification for Dimension of Mass Flow Controller/Mass Flow Meter for 1.125 Inch Type Surface Mount Gas Distribution Systems,” originally published March 2004, retrieved from <https://store-us.semi.org/products/f08200-semi-f82-specification-for-dimension-of-mass-flow-controller-mass-flow-meter-for-1-125-inch-type-surface-mount-gas-distribution-systems> on 03 Nov. 2021.
- [3] “SEMI F87 - Specification for Dimension of Three Port Components (Except MFC/MFM) for 1.125 Inch Type Four Fastener Configuration Surface Mount Gas Distribution Systems,” originally published March 2004, retrieved from <https://store-us.semi.org/products/f08700-semi-f87-specification-for-dimension-of-three-port-components-except-mfc-mfm-for-1-125-inch-type-four-fastener-configuration-surface-mount-gas-distribution-systems> on 03 Nov. 2021.
- [4] S.-A. Henry and J. Straus, “The Art and Science of Wet Wafer Cleaning Technology,” ACM Research, retrieved from <https://www.acmrcsh.com/2021/05/the-art-and-science-of-wet-wafer-cleaning-technology/> on 03 Nov. 2021.
- [5] W. Kern and K. Reinhardt, “Overview and Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology,” from *Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology (Third Edition)*, retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-51084-4.00001-0> on 27 Jan. 2022
- [6] *The International Roadmap for Devices and Systems 2020: Yield Enhancement*, retrieved from <https://irds.ieee.org/editions/2020> on 01 Feb. 2022.
- [7] S. Libman, et al., “UPW IRDS and SEMI: Reinforced Process of Enabling Advanced Existing and Future Semiconductor Technologies,” from *UPW 2019 Proceedings*, retrieved from <https://ultrapuremicroevents.com/2019-agenda/> on 01 Feb. 2022.
- [8] G. Van Schooneveld, “Test Method for Evaluation of Particle Contribution of Components Used in Ultrapure Water and Liquid Chemical Distribution Systems” on 12 Dec, 2019.
- [9] G. Van Schooneveld, “Potential SEMI F104 Particle Specifications based on 2018 IRDS Roadmap Requirements, Power Law Modeling and TF Test Results” on 09 Jan, 2019.