

高性能塵埃分析装置の開発

Development of Micro Particle Analyzers

半導体デバイスの微細化に伴い、製造ラインでのクリーン化が大きな課題となってきた。そのためには、塵埃(じんあい)の発生源を早期検出し除去するのが最も効果的な方法の一つである。そこでウェーハ上に付着した塵埃の位置検出、SEM(走査電子顕微鏡)による形状観察、EPMA(X線分析装置)による元素分析が迅速に行える分析装置を開発し、製造ラインで実用化した。その結果、発塵量の多い装置、工程での発塵源の早期検出対策に効果的であることが確認された。

妻木伸夫* *Nobuo Tsumaki*
井上 滉* *Hiroshi Inoue*
松岡一彦** *Kazuhiko Matsuoka*
高垣哲也*** *Tetsuya Takagaki*

1 緒 言

半導体製造ではウェーハ上に付着した塵埃(じんあい)が不良の大きな要因となることは周知の事実である。そうした中で、半導体デバイスの微細化に伴い不良原因となる塵埃の粒径も微小化しつつあり、製造ラインでのクリーン化がますます大きな課題となってきた。そのため、半導体製造ラインでは、環境、装置、プロセス、材料のすべてでウェーハを塵埃汚染から守る努力が続けられている。すなわち、ウェーハ近傍の塵埃を除去してウェーハに塵埃が付着しないようにしたり、あるいは付着した塵埃を洗浄によって除去するなどさまざまな手段を講じて、塵埃のウェーハへの付着を極力抑える対策を実施している。しかし、現状ではウェーハに付着する塵埃を洗浄によって100%除去することは不可能である。したがって、ウェーハ近傍での塵埃の発生源を早期検出・除去することが重要となっている。塵埃の発生源を検出する有効な方法の一つとして、テストウェーハによって塵埃のサンプルを収集し、塵埃の形状観察、元素分析を行う方法がある。

前記の内容が容易に実行できる塵埃分析装置を開発した^{1)~3)}ので、本稿はその装置の構成と実用上の効果について記述する。

2 塵埃除去の手順と装置の構想

半導体製造ラインの発塵源の究明・除去は、図1に示すような手順で行われる。ここでウェーハ上の塵埃検出までは、レーザ光を用いた検査装置などを用いれば簡単に短時間で行うことができる。次に、塵埃の解析については電子顕微鏡に併設されたX線分析装置が広く用いられている。この装置の場合、電子顕微鏡で塵埃を検出してX線分析装置によって元素分析を行う。ところが、ウェーハに付着した微細な塵埃を一つ

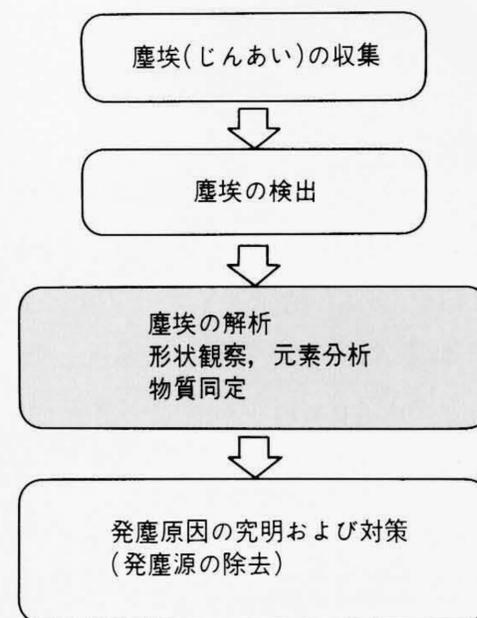


図1 塵埃除去の手順 製造ラインでの塵埃除去は、発塵工程の塵埃収集、検出および解析による原因究明とその対策実施という手順で行っている。

一つ電子顕微鏡の視野で探すには多大な時間を要し、塵埃解析を行う上で大きなネックとなっている。そこでこれを解消するために、塵埃の検出から分析までを、一貫して自動的に短時間で行うことができることを装置の基本構想として開発に着手した。

本装置では図2に示すように、ウェーハ上の塵埃の数・位置を検出すると同時に、指定した塵埃のSEM(走査電子顕微鏡)による外観形状観察、EPMA(X線分析装置)による元素分析が可能である。本装置を実用化することによって、テストウェーハ上に収集した塵埃一つ一つの物質同定を迅速に行うことができ、発塵源の早期究明と対策による半導体製造ラインの歩留まり向上が可能となる。

* 日立製作所機械研究所 ** 日立製作所高崎工場 *** 日立製作所武蔵工場

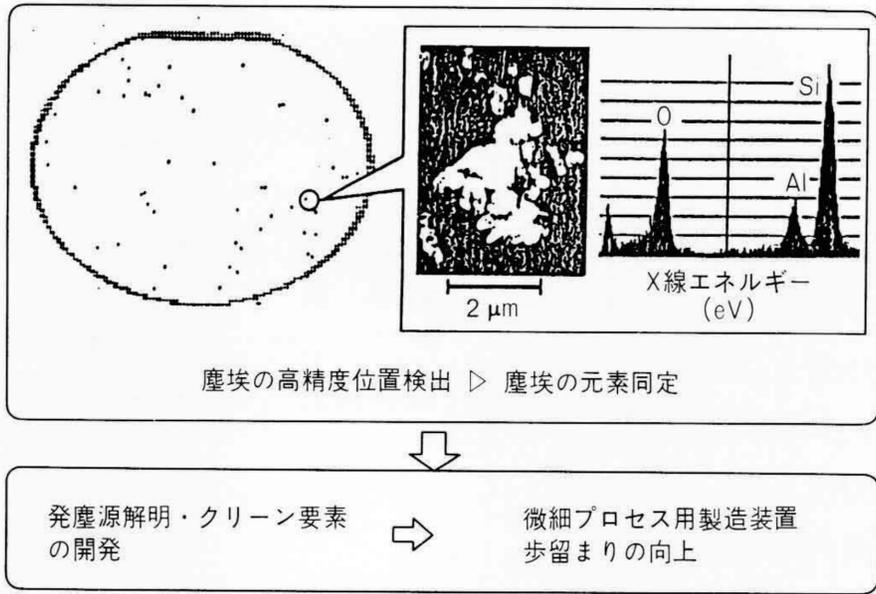


図2 塵埃分析装置の機能 本装置は、ウェーハ上の塵埃の位置検出と同時にSEM(走査電子顕微鏡)による形状観察、EPMA(X線分析装置)による元素分析が可能である。

3 塵埃分析装置の構成

本装置の構成を図3に示す。本装置はミラーウェーハ上の塵埃を検出するレーザ塵埃検出部とSEM、EPMAから成る塵埃同定部、これらをつなぐ精密XYテーブル、真空チャンバから構成される。本装置の仕様を表1に示す。塵埃検出部ではミラーウェーハ上の0.3 μm以上の塵埃をレーザ散乱を利用して検出する。このとき各塵埃の位置座標が、XYテーブルの位置とレーザスポットの位置から算出され、コントローラのメモリ内に記憶される。そしてCRT上に表示された塵埃マップ上でオペレータが観察・分析したい塵埃を指定すると、XYテ

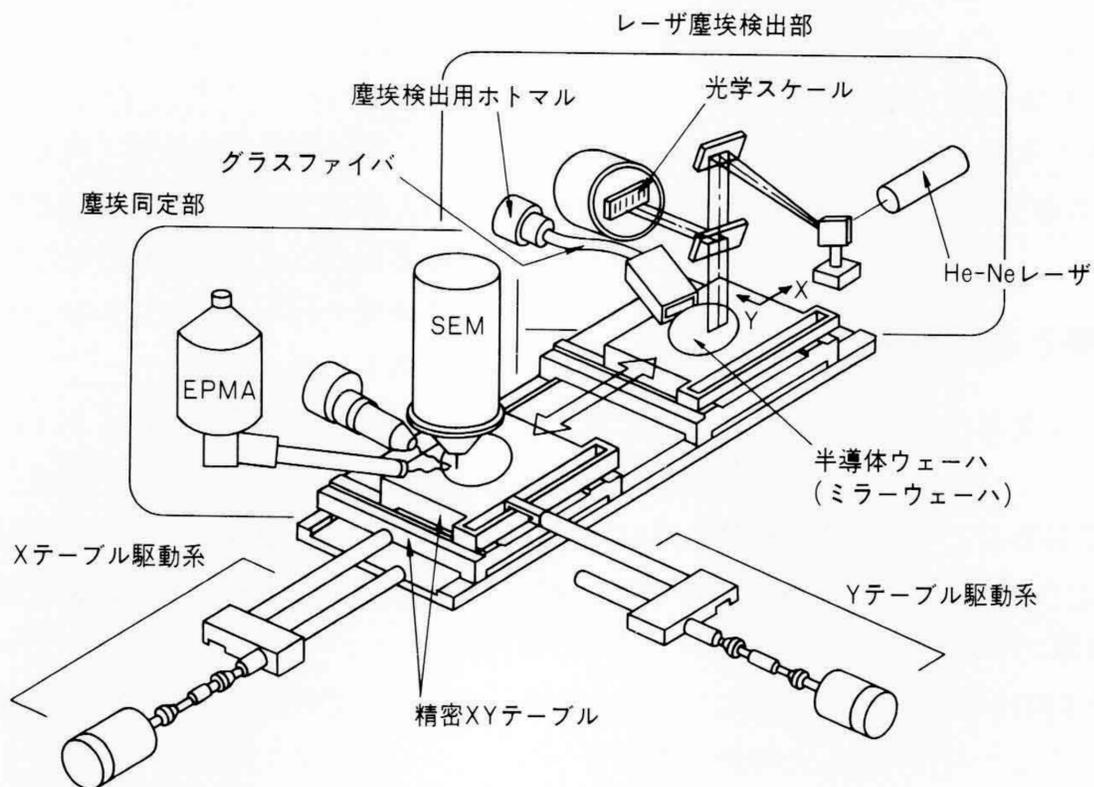
表1 塵埃分析装置の仕様 塵埃検出感度は0.3 μm以上、分析能力はB以上で、有機物の分析も可能である。真空度10⁻⁴PaはEPMA分析に必要な圧力から設定した。

項目	目標仕様
検出能力	0.3 μm
ウェーハサイズ	最大6インチ(ミラーウェーハ)
検査時間	60分程度 (マクロスキャン時間*22分/6インチ)
分析能力	B(ボロン)元素以上
真空度	10 ⁻⁴ Pa { 10 ⁻⁶ Torr }
精密XYテーブル 方式 位置決め精度 ストローク	滑りテーブル, DCサーボモータ駆動 ± 5 μm X: 300 mm, Y: 150 mm

注: *(レーザ光によるウェーハ全面走査に要する時間)

ーブルはただちに各塵埃の位置座標に従ってSEMの視野内に移動する。このときのSEMの倍率は3,000倍以上であり、0.3 μmの塵埃は1 mm以上に拡大される。いったんSEM視野内に塵埃がとらえられれば、これをさらに高倍率で観察でき、さらにEPMAによる元素分析が可能である。表1に示すように、本装置に備えられたEPMAではボロン以上の元素分析が可能である。したがって、炭素、酸素などの軽元素で構成される皮膚、繊維などから発塵した有機物の同定も可能である。

XYテーブルの精度は、3,000倍の倍率での塵埃の位置検出精度によって決定する。図4に示すように、SEMの視野は3,000倍で約30 μm×40 μm程度であり、したがってレーザの位置検出精度も含めて±15 μm以内にする必要がある。レーザによる塵埃の位置検出精度は約±10 μm程度であり、したがってXY



注: 略語説明 SEM(走査電子顕微鏡), EPMA(X線分析装置)

図3 塵埃分析装置の構成 分析装置は、塵埃を検出するレーザ塵埃検出部と塵埃の形状観察、元素分析を行う塵埃同定部、これらをつなぐXYテーブル、真空チャンバから構成される。

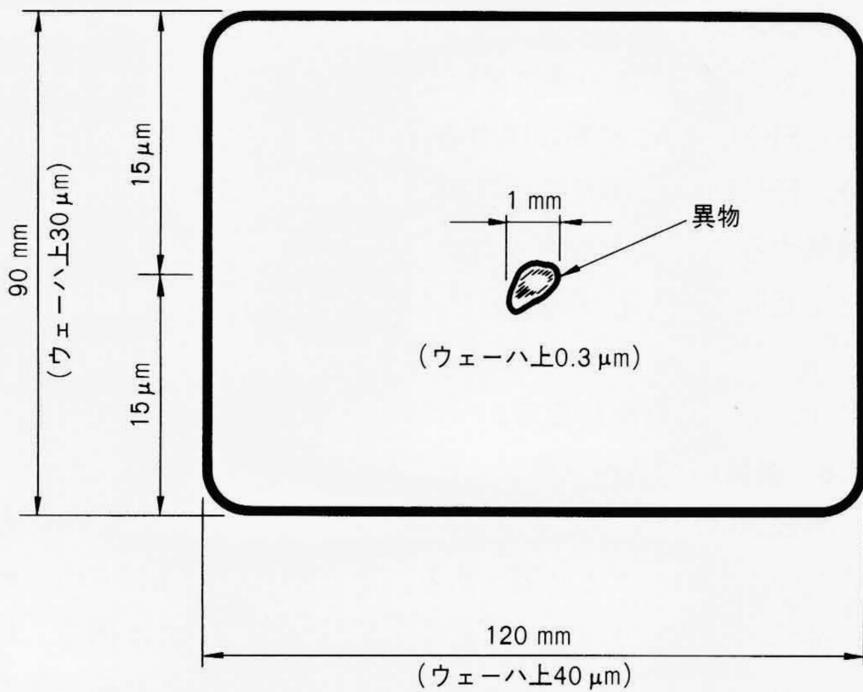


図4 SEM視野(3,000倍) SEMの視野は30 μm×40 μm程度で、位置検出精度、XYテーブル精度を合わせて±15 μm以内にする必要がある。

テーブルは±5 μm以上の位置精度が必要となる。

真空チャンバの真空度はEPMAの軽元素分析に必要とされる 10^{-4} Paとした。装置全体の外観を図5に示す。

3.1 塵埃検出部

本装置の光学系を図6に示す。光源はHe-Neレーザーで、ビームエキスパンダ、ガルバ(スキャナ)、スキャンレンズを介し、真空チャンバ壁に設置したビューポートを通して、チャンバ内に設置したミラーウェーハ上に集光される。レーザースポットがウェーハに付着した塵埃の上を走査すると光が散乱され、散乱光は図に示した光ファイバを通してホトマルまで導かれ検出される。光学系はチャンバ上の大気中に設置されている。レーザースポットの大きさは塵埃の位置検出精度を決

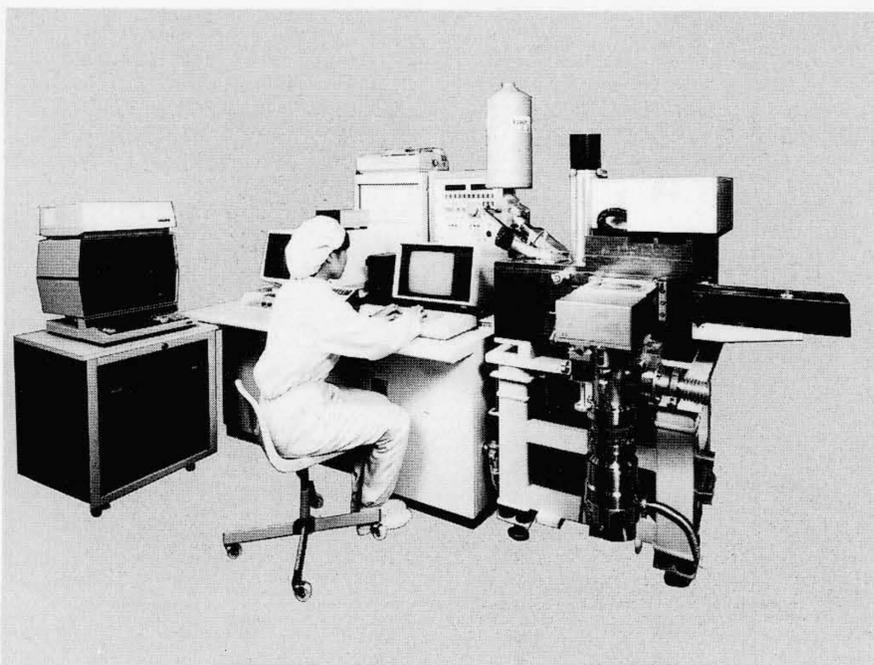


図5 装置の外観 右端の部分がレーザー塵埃検出部、塵埃同定部、中央部がシステムコントローラ、SEM CRT、左端がEPMA CRTである。

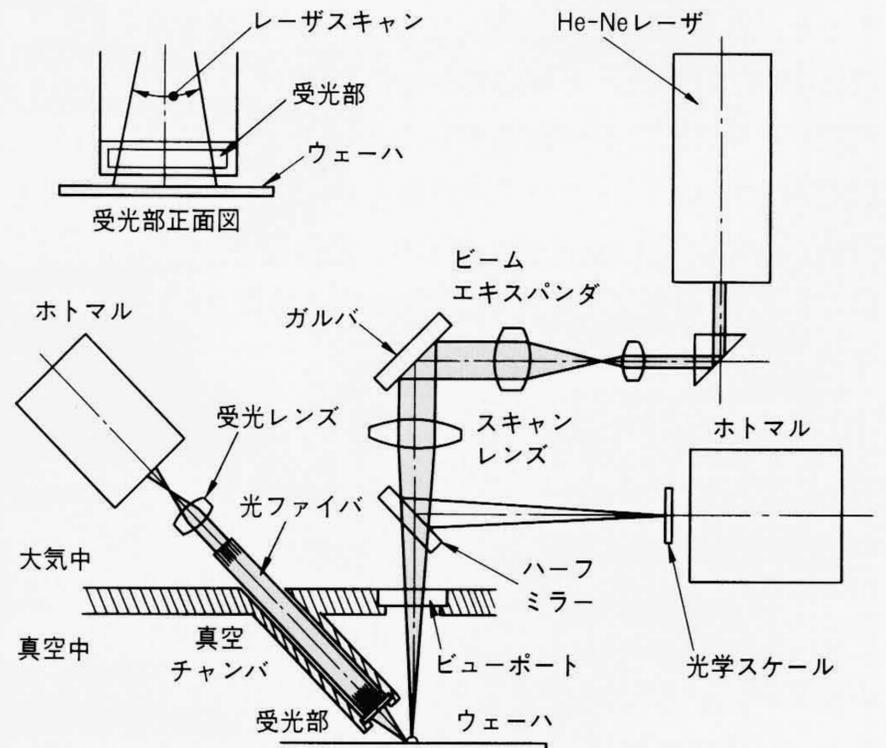


図6 塵埃分析装置の光学系 He-Neレーザーは、ビームエキスパンダ、ガルバ、スキャンレンズを介してウェーハ上に集光し、塵埃からの散乱光が光ファイバによってホトマルに導かれ検出される。

定する基本的な要素である。すなわち、スポット径を小さくすれば位置検出精度は上がるが、ウェーハ全面を走査するのに時間がかかりすぎることになる。本装置は両者を考慮してスポット径を約10 μmとした。レーザーの走査有効幅は40 mmで、6インチウェーハ全面を検査するには約22分、5インチウェーハでは12分を要する。

実際の塵埃の検出は、マクロスキャンとミクロスキャンの2段階に分けて行われる。図7に示すように、まずマクロスキャンとして、レーザースポット走査幅40 mmを用いてウェーハ全面を走査する。その結果として、ウェーハ上を1 mm角の画素に分割し、その画素内で検出した最大の大きさの塵埃がCRT上に表示される。次にミクロスキャンとして、オペレータがCRT上に表示された塵埃のうち観察、分析したいものを指定

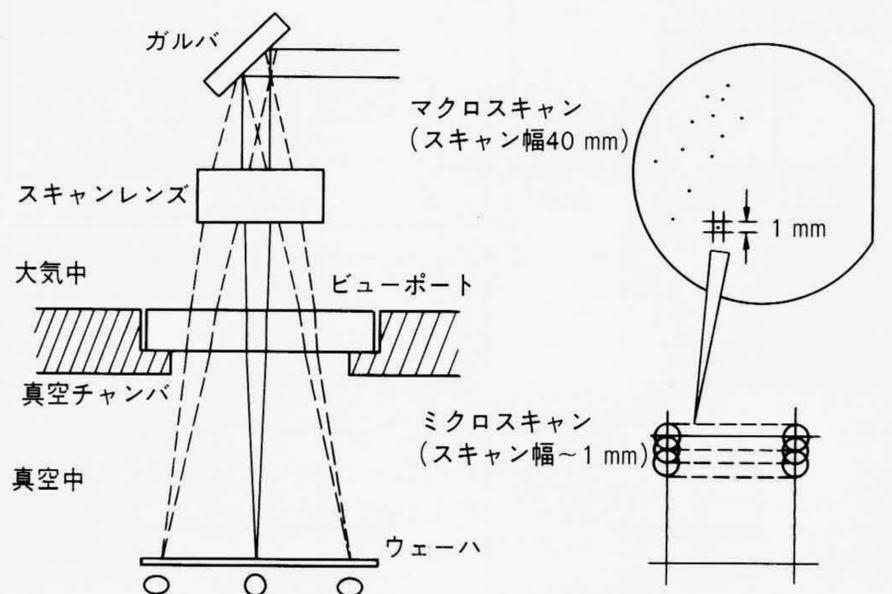


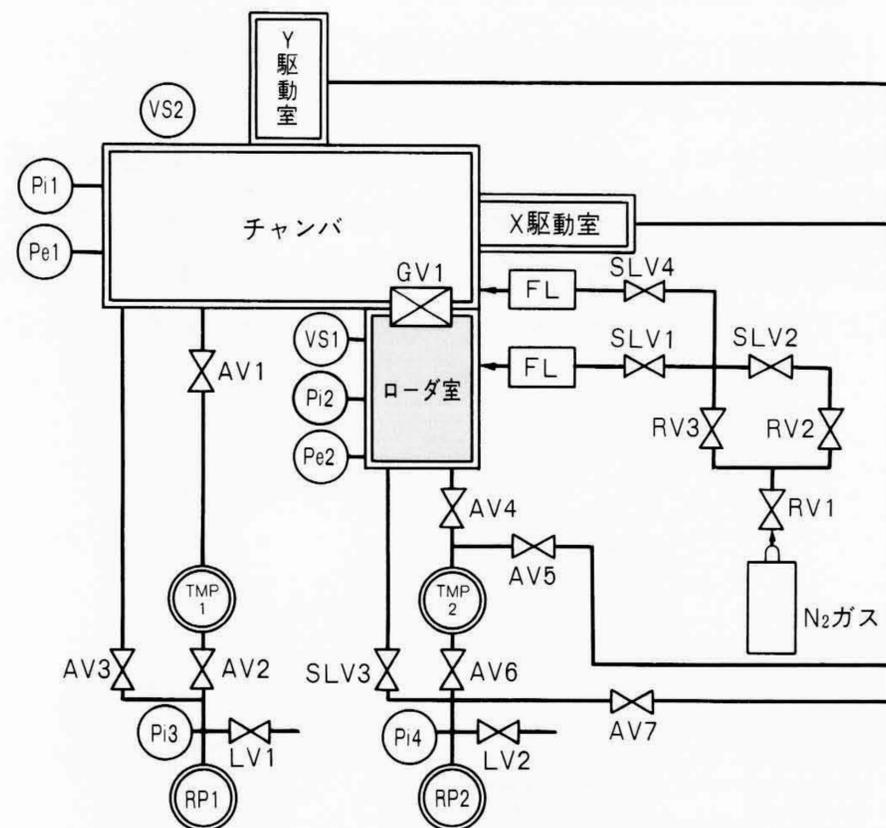
図7 塵埃の位置検出方法 位置検出はマクロスキャン、ミクロスキャンの2段階で行い、検出精度の向上を図っている。

すると、XYテーブルが移動して指定された塵埃の位置を高精度に検出するため、その塵埃が検出された画素の内部だけを再度レーザースポットで走査する。このときは40 mmの有効走査幅の中でスポットのひずみが最も小さく、走査速度が最も安定した中央部1 mmを用いており、高精度で塵埃の位置が検出できる。ミクロスキャンに要する検出時間は塵埃1個当たり3秒以下である。

3.2 真空チャンバと排気系

真空チャンバと排気系を図8に示す。メインチャンバは、SEMに対するチャンバ外部からの磁場の影響を防ぐため透磁率の高い純鉄材を用い、銅ろう付けによって組み立てられている。チャンバの内外面は、さび止めと放出ガス低減のためめっきが施されている。また、分析効率を上げるためメインチャンバはいったん真空排気されれば、通常の実験作業で大気開放の必要のないようにローダ室を設置した構造となっている。すなわち、テストウェーハをローダ室にセットすると、まずローダ室の予備排気が行われ、メインチャンバと圧力が平衡してからメインチャンバとローダ室の間にあるゲートバルブを開いて、テストウェーハをメインチャンバ内にロードする方式となっている。

真空ポンプはクリーンで、しかも高速排気を行うため、メ



注：略語説明

- AV (Air vent Valve), LV (Leak Valve), GV (Gate Valve)
- RV (Pressure Reducing Valve), SLV (Slow Leak Valve)
- TMP (Turbo Molecular Pump), RP (Rotary Pump), FL (Filter)
- VS (Vacuum Switch), Pi (Pirani gauge), Pe (Penning gauge)

図8 真空チャンバと排気系 メインチャンバには、ゲートバルブを介してローダ室を設置し、いったん装置が立ち上がれば大気開放の必要がない構造となっている。

インチャンバ、ローダ室にそれぞれターボ分子ポンプを設置してある。本装置の排気系により、メインチャンバを大気圧からSEM使用に必要な圧力(0.13 Pa)まで排気するのに約6分、EPMAでの軽元素分析に必要な圧力(2.7×10^{-4} Pa)まで排気するのに約80分を要する。ただし、前述したようにいったん装置が立ち上がれば、メインチャンバ内は大気開放しないで真空保持されているため、通常約20分程度でEPMAでの軽元素分析が可能になる。

3.3 装置のクリーン度

本装置は、塵埃分析装置としての性質上装置本体からの発塵を極力小さくする必要がある。そこで、真空排気でのスロー排気、スローリーク、また各摺(しゅう)動部には構造、材料の面から発塵対策が講じられている。以下にその例を説明する。

XYテーブルの動きとテーブル上にセットしたミラーウェーハ上の塵埃数変化を図9に示す。この実験では、レーザー塵埃検出部での塵埃検出を4回行い、各検出の間にXYテーブルを塵埃同定部(SEM)と塵埃検出部の間(約150 mm)で10往復させた。この間メインチャンバの真空度は0.13 Pa以下に保たれている。その結果として同図に示すように、0.3~2.5 μmの塵埃数は18個変化しているが、定常的な変化は見られず、XYテーブルの動きによるウェーハへの塵埃付着はないと考えることができる。

ゲートバルブの開閉に伴う塵埃数の変化を図10に示す。この実験ではウェーハをローダ室にセットしてゲートバルブを100回開閉させ、ウェーハに付着した塵埃数の変化を調べた。同図に示すように塵埃数が明らかに増加している。ゲートバルブ開閉1回当たりに換算すれば、塵埃増加数は1個以下と非常に少ないが、前述したように塵埃分析を行うという本装

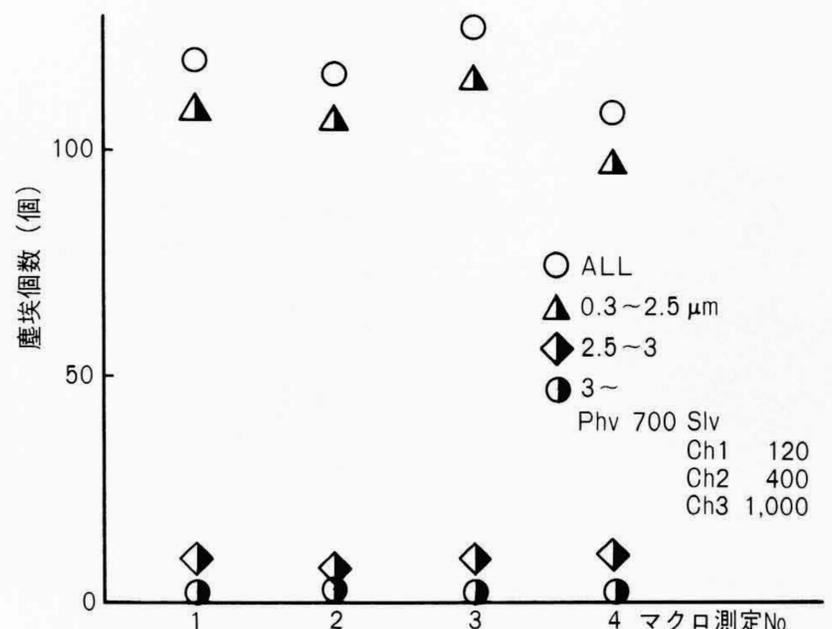


図9 XYテーブル移動による塵埃数の変化 各測定間でXYテーブルを10往復させているが、定常的な塵埃個数の変化は見られない。

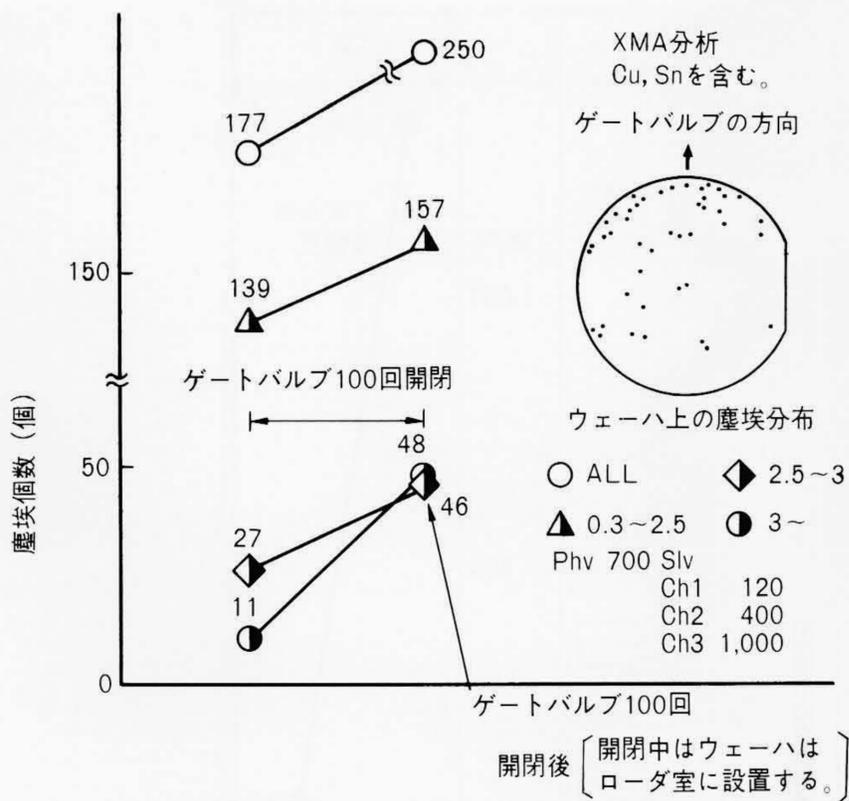


図10 ゲートバルブ開閉による塵埃数変化 ゲートバルブを100回開閉した結果、塵埃数が約70個増加した。また、塵埃はゲートバルブ側に付着している。

置の性質上、装置本体からの発塵は極力少なくする必要がある。そこで本装置の機能を用いて、増加した塵埃の分析を行った。元素分析の結果、塵埃は銅とスズを含んでいることがわかった。また、同図中に示したウェーハ上の塵埃分布から塵埃が付着している位置はゲートバルブの方向に偏っていることが判明した。これらのデータをもとに、ゲートバルブを中心に発塵原因を調査した結果、その構造の中に発塵源となる部分が発見された。そこで、まずゲートバルブの開閉を遅くする対策をとった。この結果、塵埃数をほぼ半減することができた。さらに、構造変更を含む対策を行うことによって、最終的にはウェーハに付着する塵埃をなくすことができた。

4 塵埃分析装置の実用化と効果

本装置を用いた半導体製造ラインでのクリーン化のステップを図11に示す。まず、塵埃の発生が多く問題となっている工程・装置が判明している場合、ミラーウェーハをそこで通過させて塵埃の捕集を行う。捕集した塵埃サンプルを本装置を用いて解析する。その結果として塵埃のウェーハ上の位置、形状、構成元素が判明する。それらのうち特に構成元素について、あらかじめ本装置で分析しておいた候補データと比較することによって、塵埃がなんであるかを推定する。また、工程・装置でウェーハが通過する周辺状況(環境、構成部品など)について調査し、その結果と分析結果から塵埃の発塵源がどこであるかを絞り込む。こうして、発塵源が明らかになったところで発塵を抑えるべき有効な対策を検討・実施し、さらに対策効果を確認するため、再度前記した同じ手順で解析

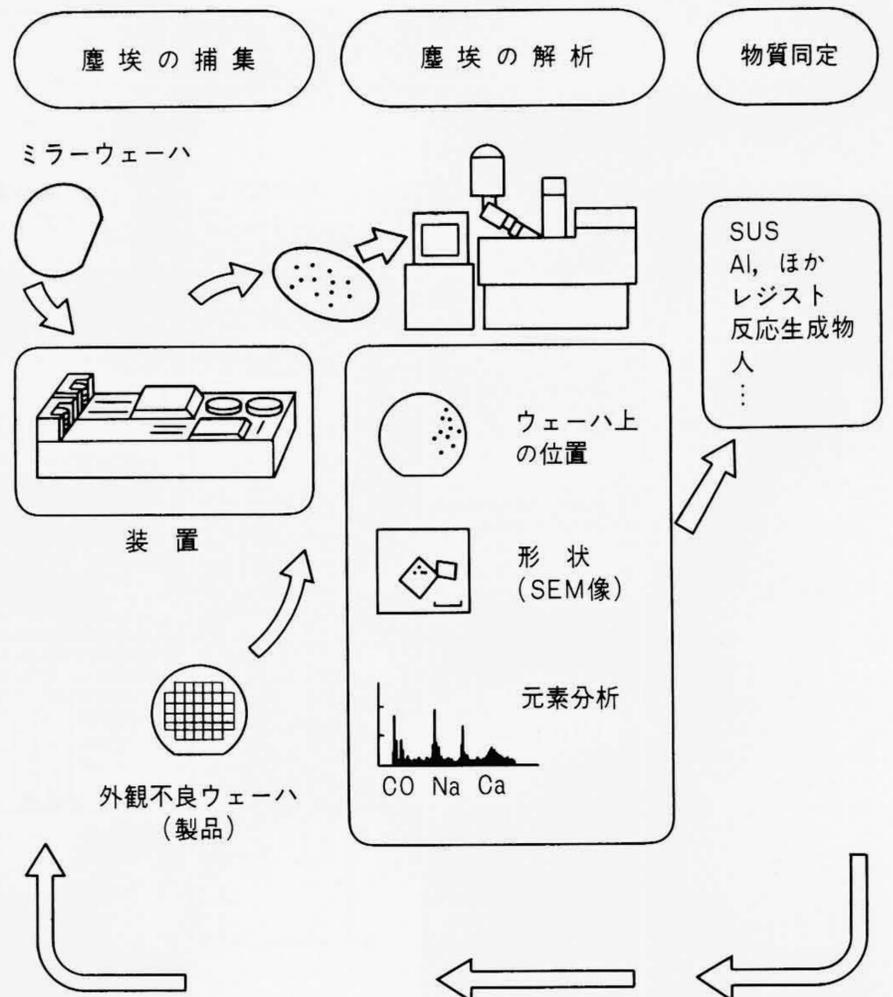


図11 クリーン化のステップ 問題工程の塵埃をミラーウェーハに捕集し、分析装置による元素分析、形状観察などを行って塵埃の物質同定を行う。

を行う。また、製品の外観不良ウェーハについても、金属顕微鏡あるいはパターン付きウェーハ異物検査装置によってウェーハ上の塵埃の位置を検出しておくことにより、ミラーウェーハの場合と同様な解析を行うことができる。以下に、半導体製造ラインで本装置を実用化し効果を発揮した例を示す。

半導体製造工程中のシャワー洗浄装置の塵埃解析に本装置を適用した例を図12に示す。同図に示すように、対策前には洗浄したウェーハ上に1,300個以上の塵埃が付着していた。分析の結果、塵埃の成分は塩素、マグネシウム、炭素を主に含んでおり、これは塩化ビニルの成分であることがわかった。塩化ビニルはシャワーノズルそのものの材料であり、これが発塵源であることがわかった。そこでシャワーノズルの構造、内面の仕上げを再検討するとともに、材質変更を行うことによって同図に示すように塵埃数を約 $\frac{1}{25}$ に低減することができた。

成膜10工程の低発塵化に本装置を適用した結果を図13に示す。CVD (Chemical Vapor Deposition), スパッタなどのプロセス発塵がデバイスの不良の大きな要因となっていることは周知の事実であり、その低減を図ることが歩留まり向上のための大きな課題となっている。本装置を用いて各工程での解析・対策を進めることにより、同図に示すようにこれら10工程での塵埃数を約 $\frac{1}{4}$ に低減することができた。

そのほか、ドライエッチャ、イオン打込装置、ホトリソグ

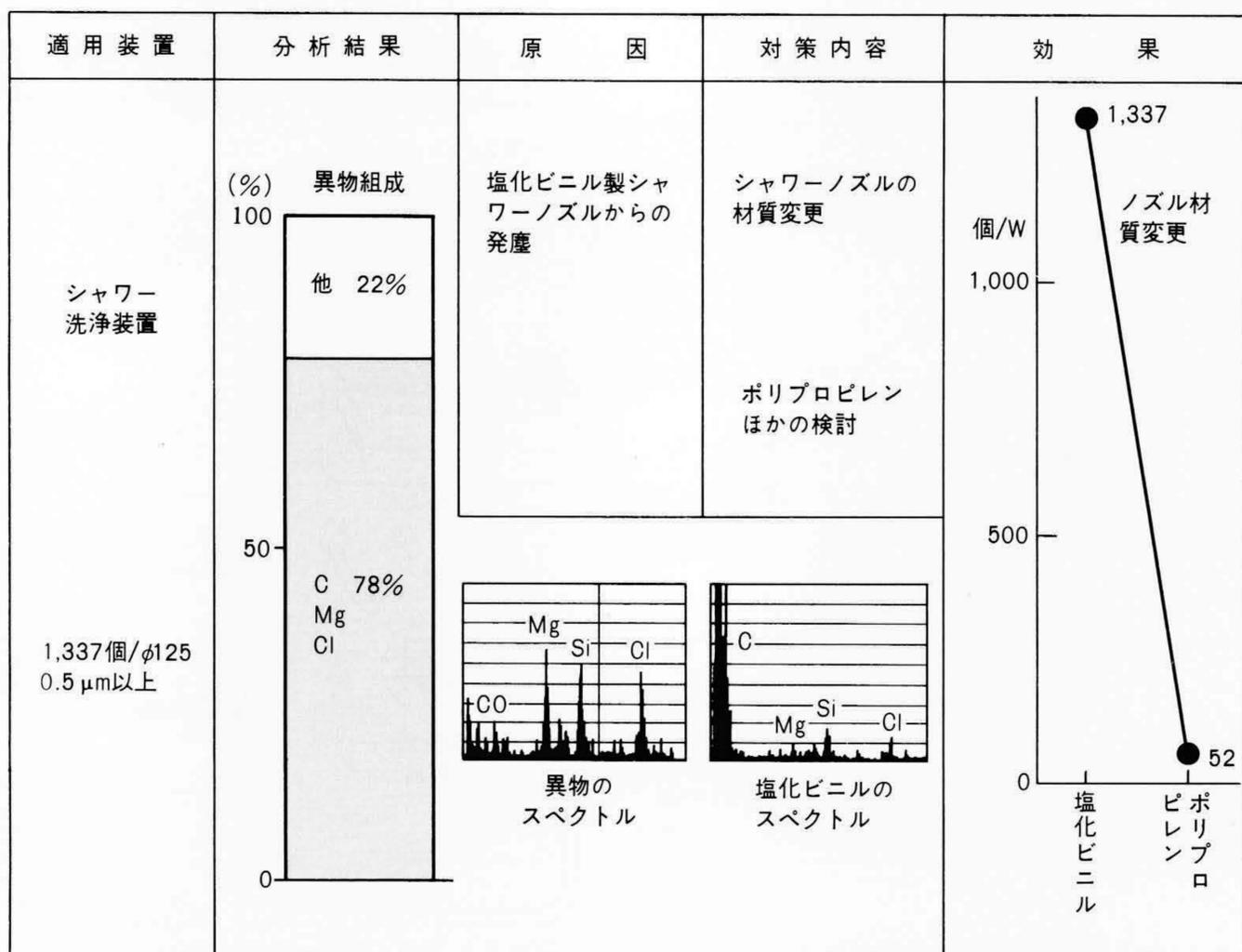


図12 洗淨装置発塵源究明での適用例 塵埃分析の結果、塩化ビニルの成分であることがわかり、材質変更などの対策を行い塵埃数を約 $\frac{1}{25}$ に低減できた。

ラフィー装置などの発塵源解明に効果を上げている。

5 結 言

半導体デバイスの微細化に伴い、ウェーハに付着する塵埃の低減が製造ラインでの大きな課題となっている。それに対

処するため、ウェーハ上の塵埃の数、位置を検出すると同時に、SEMによる外観形状観察、EPMAによる元素分析が可能で発塵源の究明が迅速に行える分析装置を開発した。また、本装置を半導体製造ラインで実用化することによって、塵埃低減のための有効なツールであることを確認した。

今後とも半導体製造ラインでは、塵埃との戦いがさらに激しくなると思われるが、これに打ち勝つためには解析技術も含めた総合的クリーンエンジニアリング技術の確立が重要となる。

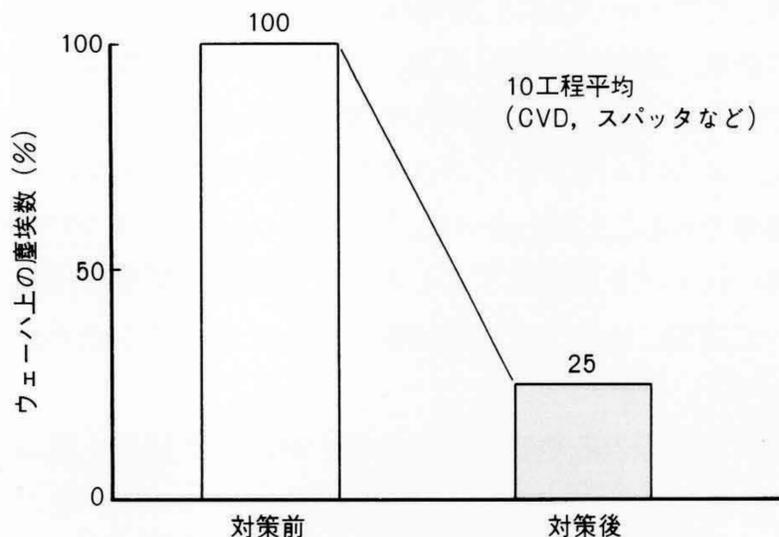


図13 成膜工程塵埃低減での適用効果 成膜工程10工程の対策前の平均塵埃数を100とすると、分析装置を用いた塵埃解析、対策後は25と約 $\frac{1}{4}$ に低減された。

参考文献

- 1) 井上, 外: ウェーハ付着微細塵埃元素分析装置の開発, 応用物理学会講演予稿集, 28a-Y-3, 34(1986)
- 2) 妻木, 外: 塵埃の検出と分析, 精密工学会シンポジウム論文集 (昭62-11)
- 3) N. Tsumaki, et al.: Micro Particle Analyzer, Semicon West Technical Proceedings, 91(May, 1987)