微小付着異物の分析・評価技術 —半導体製造における異物評価の現状—

磯 貝 静 志^{*1}

Analysis and Evaluation Technology for Small Particles in Semiconductor Process

Seiji ISOGAI^{*1}

^{*1}Nanotechnology Products Business Group, Hitachi High-Technologies Corporation,
882, Ichige, Hitachinaka-shi, Ibaraki-ken 312-8504, Japan

(Received May 18, 2010, Accepted July 21, 2010)

For stable semiconductor device manufacturing, the management of the smaller size of particles must be required since the latest device is getting highly integrated with pattern dimension shrinkage year by year.

Most of particles attached on the wafers will be generated under the processing at the process equipment.

To maintain the high-yield of the semiconductor devices, particle number/size of all process equipment should be monitored. And it will be important to determine the root cause of the particle generation and the measure as soon as possible if particle number over the control limit is detected.

On this article, the latest techniques about particle detection on the wafers, efficient observation/review, and particle element analysis are introduced.

1. はじめに

近年の半導体デバイス微細化に伴い、半導体製造ライン内で管理すべき異物の大きさも微小になってきている。その一方で、製造プロセスの複雑化により製造工程数も増加し、ウェーハ上に異物が付着する機会は益々増加してきている。

半導体デバイスの微細化や高性能化のため、液浸露光をはじめとする新プロセスの導入や Low-k/High-k などの新材料の開発によって、半導体製造装置からの発塵は、新たな汚染を引き起こし重大な問題となっている。汚染の代表的な要因を例として挙げると、エッチング装置やスパッタ装置に代表される真空処理装置におけるプロセスチャンパ内の不要堆積物の再飛散、異常放電やスパッタリングによる発塵、CMP 工程で生じるマイクロスクラッチ、特にエッジ付近からの発塵などがあるが、あらゆる工程において異物の発生、汚染の可能性は存在している。

現在、量産化されている最先端デバイスのデザインルールは、45 nm 世代から 3x nm 世代へと移行しつつある。また、研究開発段階では、更に微細な 2x nm や 1x nm 世代のデバイスの試作が始まっている。一般的に、半導体製造工程の中で管理すべき異物の大きさは、デザインルールの 1/2 程度と言われている¹⁾。従って、現在量産ラインにおいて管理すべき異物のサイズは、20 nm 以下の極めて微小な異物である。

本解説では、現在の半導体製造、特にインラインでの微小異物の管理、測定、観察、分析の各手法に関する最近の動向について紹介する。

2. 異物の管理方法

半導体デバイス製造において異物は、デバイスの歩留りを低下させる最大の要因であり、異物の発生状況を常に監視し、迅速に対策することによって製造ラインを安定に稼働させることが重要である。

半導体製造ラインにおいて、第一の異物発生源は人であるが、最近の 300 mm ウェーハ用デバイス製造ラインでは、クリーンルームの構造の改良（全面ダウフロー）や、FOUP と呼ばれる密閉されたウェーハ収納ケースの採用、自動化による人間の排除により、装置間を搬送する間での異物付着は皆無に近い状況になってきている。

したがって、最近ではデバイス製造の各工程で使用される装置内部で発生する異物が問題になってきており、製造装置からの異物の発生を常に監視する必要がある。半導体製造過程で発生する異物のモニター方法としては、①製品ウェーハにより欠陥・異物の発生状況をモニターする方法と、②定期的にベアウェーハを製造装置内で処理し、異物の発生状況をモニターする方法とがある。①の方法は、欠陥の検査と同時に進める利点はあるものの、異物を管理するためには、欠陥と異物とを分離しなければならない大変さがある。②の方法は、異物チェック用のベアウェーハが無駄にはなるものの、異物の発生状況を容易に把握することができる。しかし、この方法は、ベアウェーハを処理する場合に生じる異物が、実デバイス処理においても同様に生じることを前提にしている。

実際の製造ラインでは、上記の両方を組合せて実施しながら異物の管理を行っているのが実情である。

ここでは、ベアウェーハを用いた異物管理（装置 QC）について述べてゆく。

定期的（例えば、1 回/日）にベアウェーハを製造装置に搬送し、デバイス製造と等価な処理を行う。この処理の前後でウェーハ上異物の測定を行い、異物がどれだけ増加した

^{*1} 日立ハイテクノロジーズ ナノテクノロジー製品事業本部
(〒312-8504 茨城県ひたちなか市毛882)

か、異物の分布に特徴はないかなどを確認する。各製造装置には、発生異物数の許容値が設定されており、異物増加数が常に許容値内であることが必要である。たとえ、許容値内であっても徐々に異物数が増加していることは、異物多発の前兆であることが多く、増加異物数の推移も重要な監視項目である。

異物数を測定した後は、それらの異物が発生している原因を突き止め、対策を打たなければならない。このため、異物検査データにもとづく異物の観察や分析が行われる。

以下、異物の検査、観察、分析の各項目について紹介していく。

3. 異物の検査

ウェーハ全面の異物を測定する方法としては、光散乱を応用した装置が主流になっている。Fig. 1 に光散乱方式の異物検査装置の一例を示す²⁾。

光散乱法とは、レーザ光をウェーハ上方より照射し、異物からの散乱光を受光レンズで集光し、光電変換素子で電気信号に変換して異物を検出するものである。ウェーハは、回転ステージ上に設置され、高速に回転しながら半径方向に移動する。これにより、ウェーハ全面を高速にレーザビームで走査する。異物の位置は、ステージの回転位置と半径方向の走査位置からウェーハ内のXY座標に変換される。Fig. 2 に光散乱方式における異物サイズの考え方を示す。異物の大きさは、散乱光の強度をもとに標準粒子(PSL: Polystyrene Latex)を使用した検量線から算出される。

最近の異物検査装置では、ベアシリコンウェーハ上の標準粒子感度で30 nm程度の検出が可能であり、更に20 nmを検出可能な感度向上が進められている。

レーザ光が異物に衝突したときの散乱は、レイリー散乱で説明される領域である。このときの散乱光の強度は、次式で表される³⁾。

$$I \propto I_0 * d^6 / \lambda^4$$

散乱光強度 (I) は異物粒径 (d) の6乗に比例し、波長 (λ)

の4乗に反比例する。従って、一般的に検出感度を向上させるためには、ウェーハに入射するレーザのエネルギー(パワー)を大きくすることと、波長を短くすることが有効である。ちなみに、検出感度を30 nm から20 nmに向上させようとした場合、レーザのエネルギーを10倍以上にする必要があり、レーザパワーだけの感度向上は実現困難である。

このため、レーザを斜め方向と垂直方向の2方向から入射する方法や、複数の検出器によってより多くの散乱光を収集する方法など、種々の改良がなされている。

異物の大きさは、レーザ散乱光強度から求めるため、異物の形状や表面状態(凹凸の状態)によって、実際の異物の大きさと異なることが知られている。このため、異物の実サイズを求めるために、SEMやAFMによる観察が行われている。

また、検出された異物は、その後の観察装置や分析装置によって異物発生源の特定を行い、製造装置やプロセスの対策や改善を図る。このため、ウェーハ上にマッピングされた異物の座標位置精度向上が必要である。

4. ウェーハ上異物の観察

前述のように、製造装置の異物モニターにおけるベアウ

Fig. 2 Size of a particle by scattering light of laser.

Fig. 1 Particle inspection tool using scattering light of laser.

エーハや成膜後のウェーハなどのウェーハ表面検査は、レーザの散乱光を検出する暗視野 (DF) タイプが主流であり、高感度 ($\sim 30 \text{ nm}$) ではあるが検出座標のばらつきが大きく、数十 μm $\sim 200 \mu\text{m}$ が一般的である。

ウェーハ表面検査で検出された異物は、その発生源の特定を行うために観察や分析が行われる。管理すべき異物の大きさが微小であるため観察には、SEM (走査電子顕微鏡) が用いられ、特にウェーハを割らずにそのままの状態 SEM 観察が可能な半導体向けのレビュー SEM を使用することが主流になってきている。

大きさが 30 nm 程度の異物を SEM レビューする場合、SEM 像で異物を検出するためには、視野 $10 \mu\text{m}$ 程度での撮像が必要である。一方、検査装置の異物座標精度 ($\sim 200 \mu\text{m}$) を考慮すると、座標ばらつきの範囲を探索する必要があり、非常に効率の悪い作業となる。

これらを解決するため、レビュー SEM に DFOM (Dark Field Optical Microscope 暗視野光学顕微鏡) を搭載し、検査装置からの座標位置において広い視野 ($200 \mu\text{m}$ 角程度) で異物からの散乱光を検出することにより、異物の位置を高精度に検出し、その位置情報をもとに自動で欠陥の SEM 像を取得する方法が採用されている (Fig. 3)。DFOM の光源としては、白色光やレーザが用いられているが、検出感度面からは異物検査装置と同様にレーザ光を用いることが有効である。

ここで、レビュー SEM による微小異物の自動観察の流れを Fig. 4 に従って簡単に紹介する。

ウェーハは、真空チャンバ内のステージ上に設置され、ウェーハ外周上の 3 点とノッチ部の位置を光学顕微鏡像及び SEM 像で検出し、ウェーハ全体の位置ずれ量 (XY 方向と回転ずれ量) を求める。検査装置で検出された座標に対して位置ずれ量の補正を加え、先ず DFOM 位置にステージを移動し、レーザ光を照射する。異物でのレーザ散乱光をカメラ

で撮像し、散乱光の輝点が視野 ($200 \mu\text{m}$ 程度) の中心からどれ位ずれているかを認識する (Fig. 4(a))。このずれ量は、検査装置における座標位置精度によるものである。次に、DFOM で検出したずれ量を加味してステージを SEM 撮像位置に移動する。そして、SEM の視野 $10 \mu\text{m}$ 程度の低倍率で SEM 像を取得し、画像処理を用いて SEM 像内にある異物を検出し、その位置を求める (Fig. 4(b))。最後に、異物位置に電子ビームを移動し、SEM の視野 $1 \mu\text{m}$ 以下の高倍率で SEM 像を取得する (Fig. 4(c))。これら、DFOM での検出から高倍率での SEM 像取得を異物の数分繰り返すことで、全ての異物の SEM 像を自動的に取得することができる。

この方法により、従来 SEM レビュー効率が非常に悪かったベアウェーハやパターンなしウェーハ上の微小異物の判別を格段に容易にすることができる。

更なるデバイスの微細化に伴う管理異物の微小化に対応するためには、検査装置の座標ばらつきの低減と共に、レビュー SEM における暗視野での検出感度向上が必要である。

5. 異物の分析と解析

製造装置からの発塵などウェーハ上に付着した異物の発生原因を突き止めるために、その異物の組成を明らかにすることが重要であり、SEM による異物観察後の組成分析は必須である。

組成分析を行う方法としては、X 線元素分析が最も一般的である。Fig. 5 に Cu を例にとった X 線発生原理を示す。物質に電子があたり、入射電子が非弾性散乱する過程で物質を構成する原子の軌道電子を弾き飛ばし励起状態になると、他の電子軌道から電子が補われ定常状態になる。この電子が遷移する際に生ずる過剰なエネルギーが X 線 (特性 X 線) として放出される。励起状態における二つの軌道エネルギーの差は元素特有の値をもつため、放出される X 線のエネルギーも元素特有のものとなる。

Fig. 3 Dark field optical microscope on review SEM.

Fig. 4 Review sequence of particle with review SEM.

Fig. 5 Excitation of characteristic X-ray by electron.

従って、異物に電子線を照射した際に放出されるX線のエネルギーを調べることで、異物を構成している元素を知ることができる。

このように、真空中で細く絞られた電子線を固体試料表面に照射し、表面の組織と μm オーダの微小部元素分析を行う

方法は、電子プローブマイクロアナライザ (Electron Probe Micro Analyzer : EPMA) と呼ばれ、固体試料表面からおおよそ $1\mu\text{m}$ 程度の深さに及ぶ領域でのBe-Uの全元素分析 (定性分析) や、最小 50nm ~ $100\mu\text{m}$ の平均的組成分析 (定量分析) が可能である。

Fig. 6 SEM image and EDS spectrum for particle.

Fig. 7 Difference of region where X rays are generated according to acceleration voltage of electron.

X線元素分析装置としては、波長分散型のWDS (Wavelength Dispersion X-ray Spectrometer) とエネルギー分散型のEDS (Energy Dispersion X-ray Spectrometer) との2種類がある。WDSはエネルギー分解能が高いことが最大の利点であるが、検出時間が長いことがデメリットである。一方、EDSは一つの検出器でB～Uの全元素を同時に測定できるので、SEMの簡易分析用に装着されることが多い。EDSのX線エネルギー分解能は、Mn-K α で130 eV程度であり、多元素系の分析には不利である。また、微量元素の検出限界は0.1%程度である。これらの点はWDSに劣るが、同時に短時間で全元素の計測が可能で点や検出器の立体角を大きく取ることも可能なので、二次電子像観察とはほぼ同じ条件でX線分光可能なこと、さらに、WDSとは異なり、試料位置の幾何学的制約が緩いことなど、有利な点が多い。

このため、前章で紹介したウェーハ上の異物観察を行うレビューSEMにはEDSが搭載されている。Fig. 6に異物のSEM像とX線元素分析スペクトルを示す。最近では多数の異物をレビューするため、この分析も自動で行う要望が強くなり、自動欠陥レビュー (ADR: Automatic Defect Review) で異物・欠陥の位置を精度良く認識した後、自動的に高加速の電子線を照射しX線元素分析を行う機能が実装されている。

更に、30 nm以下の微小異物を分析するニーズの高まりに伴い、EDSとWDSの2つの検出器を搭載し、それぞれの利点を有効に組み合わせて分析を行うレビューSEMも登場

している。

X線元素分析は、特性X線のエネルギーよりも大きなエネルギーの電子を照射する必要があるが、5 kV～15 kVで加速した電子線を用いるのが一般的である。電子のエネルギーが大きくなると、電子の物質への進入深さも深くなってゆく。

Fig. 7に15 kV、5 kVの加速電圧で電子を照射した場合における電子の進入深さのモンテカルロ・シミュレーション結果を示す。進入深さは物質によって異なるが、たとえばSiウェーハの場合、5 kVの電子の進入深さは500 nm程度、15 kVで2 μ m以上になる。これは、微小な異物の分析を行う場合、異物からの信号がバックグラウンドの信号に埋もれてしまう可能性があり、異物の組成分析が困難となる。

これを回避する方法として、オージェ電子分光法が着目されている⁴⁾。

ある一定の加速電圧で電子線を固体表面に入射した場合、固体表面から二次電子と後方散乱電子が発生する。オージェピークは、二次電子と後方散乱電子成分のバックグラウンドに現れる元素固有の小さなピークであり、固体表面から発生する電子のエネルギー分光を行うことで検出することができる。オージェ電子分光法の特筆すべきことは、その空間分解能の高さである。

オージェ電子の脱出深さは、サンプルの構成元素によらず50～100 eVの電子では約1.2 nm、2.5 keVの電子では約6 nm程度であるため、非常に狭い領域で発生した電子のみを検出することができる⁴⁾。しかし、 10^{-8} Pa以下の超高真空

を必要とするなど、レビュー SEM に搭載するための課題も多い。

更に、詳細に異物の組成分析を必要とする場合には、FIB 装置などでウェーハから異物周辺部分を切り出し、TEM や STEM で分析する方法も行われている。

6. おわりに

半導体デバイスは、今後も微細化が進むと見られている。更に、これまでのデバイス構造とは異なる、3D デバイス構造が導入されることが予想される。このようななかで、半導体製造装置をはじめとする各装置には異物フリーが求められ、装置自体での異物低減対策は勿論であるが、更に微小な

異物の検出、分析に対する要求も益々高まることが予想される。

〔文 献〕

- 1) ITRS 2006 Update Table1 13a Defect detection Technology Requirements, 2006.
- 2) H. Ohta, Y. Ichiyasu, M. Hachiya and T. Kurenuma: Hitachi Hyoron, **88** No. 3 (2006) 65.
- 3) M. Born and E. Wolf: in *Kougaku no genri* (Principles of Optics), ed. T. Kusakawa and E. Yokota, (Tokai Univ. Press, Kanagawa, 1975), p. 932 [in Japanese].
- 4) *LSI Testing handbook*, (Ohmsha, Tokyo, 2009), 1st ed. Vol. 4, Chap. 3, p. 507.