

Selected Article

一般論文

レティクル／マスク異物除去装置用標準サンプルの開発 — パーティクルリムーバー RP-1 —

Developing the standard sample for the reticle/mask particle remover

— Particle Remover RP-1 —

清水 智也

Tomoya SHIMIZU

半導体デバイス製造現場では、レティクルのペリクル膜およびガラス面上の異物除去処理は、エアブローまたは粘着剤などを用いて手動で行われることが多い。このとき、ペリクル膜を汚損する問題が発生する可能性がある。このような人為的なミスによるペリクル膜の汚損リスクを低下させ、レティクルを清浄な状態で長期に維持するため、ペリクル膜およびガラス面上の異物除去を自動で行う装置パーティクルリムーバーRP-1を開発した。今回、標準サンプルを考案したことによって、除去率の定量化と再現実験が可能となり装置の性能保証を実現した。さらに、標準粒子付着後の除去率経時変化についても考察を加える。

In manufacturing semiconductor devices, removing particles on a pellicle and a glass surface of a reticle has been frequently done by manual air blow or by adhesive substance. In this case, pellicles can be contaminated. To reduce the risk of causing such errors and keep reticles clean over the long term, we developed the Particle Remover RP-1 that automatically removes particles on a pellicle and a glass surface. This time, developing the standard sample allows to measure removal rate and repeat test, which assure performance of RP-1. Moreover, time dependency of the removal rate after attaching particles is reported.

はじめに

フォトリソグラフィとは、レティクルやマスクと呼ばれる原版に印刷されたパターンをウェハ表面に転写することによって、半導体デバイスの大量生産を可能にする技術である。近年は回路パターンの微細化に伴い、転写時に欠陥の原因となるレティクル表面上の異物も小さくなっている。そのため、レティクルのパターン面には直接パーティクルが付着しないように、ペリクルと呼ばれる透明な高分子膜が貼られている。このペリクル膜は、露光時に使用される光の短波長化に伴い材質の変更(セルロースからフッ素系材料)および薄膜化が進んでいる。

当社では、このレティクルのペリクル膜およびガラス面上のパーティクル除去を自動で行う装置RP-1の開発を行った。開発にあたって重要と考えたのが、定量的な性能評価手法の確立である。今回、標準サンプルを考案したことによって除去率の定量化と再現実験が可能となったのでその詳細を示す。さらに、異物付着後の除去率経時変化についても考察を加えた。

開発の背景と製品コンセプト

レティクルのペリクル膜およびガラス面上に異物が付着した場合の問題について述べる。ペリクル膜およびガラ

ス面上に異物が付着した状態で、微細パターンを転写しても、ウェハ表面にて微細な異物の像は、デフォーカスされるため欠陥を形成しない。しかし、一定以上の大きさの異物が付着した場合には露光量にムラを生じ、微細パターンに欠陥を形成してしまう。この時、欠陥の原因となる異物の大きさは、露光機やパターンのデザインによって異なる。これまで、デバイスメーカー等において、ペリクル上に基準以上の個数または、基準以上の大きさの異物が検出された場合、オペレーターがケースからレティクルを取り出し、直接ペリクル表面をエアブローにより異物を除去するのが一般的であった。しかし、この処理には以下のような問題が挙げられる。

- ① オペレーターの実ミスによるペリクルの汚損
- ② レティクルに触れる際、静電気発生によるパターンの破壊
- ③ レティクルをケースから出し入れすることによる異物付着リスクの増加

以上の理由により自動で効率的に、ペリクル上およびガラス面上の異物を除去する装置への期待が高まっている。これらのニーズに対応するため、RP-1はペリクル膜およびガラス面上の異物除去を、レティクルケースの開閉からステージへの搬送、異物除去、ケースへの返却までのプロセスを自動化した。異物除去機構は、レティクルのペリクル膜およびガラス面上の異物を、クリーンドライエアーによって効率的に除去できることを特徴としている。RP-1の異物除去性能の仕様は、ペリクル膜上では直径20 μm標準粒子で90%以上、ガラス面上では直径5 μmの標準粒子で90%以上を仕様とした。また、RP-1の除去対象は、レティクル表面にて成長した異物ではなく、降下異物とした。

装置の概要

RP-1は異物除去機構、各種のレティクルケース開閉機構、レティクル搬送機構を有する。異物除去は0.3×10 mmスリットから吹き出すエアにより、異物を対象表面から離脱させバキュームによって吸い込むことによって行う。異物除去プローブおよびその可動部とレティクル上の異物除去経路を図1に示す。図1の矢印に示す経路でプローブを動かすことによってペリクル膜およびガラス面全面の異物を効率的に除去する。

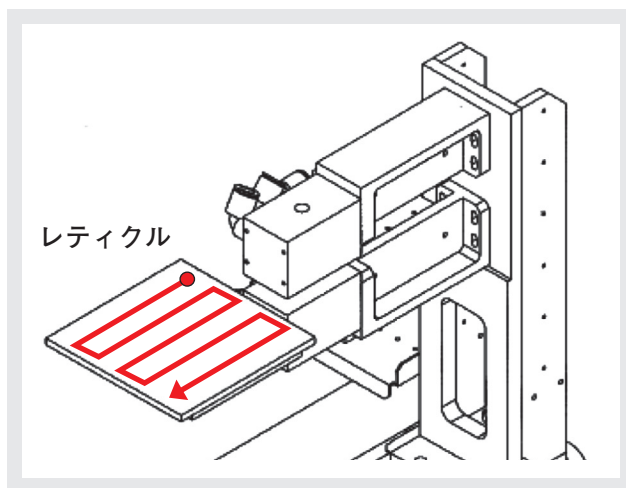


図1 RP-1の異物除去機構部

異物除去性能評価方法

評価方法の検討

RP-1の異物除去性能を評価するには、異物の付着状態がわかったサンプルを必要とする。しかし、実際にクリーンルーム内で発生する異物は、大きさ、形状とも様々でなく、粘着性のあるものや潮解性のあるものも含まれる。このため状態の再現が困難であり、適切な指標にならない。そこで大きさが均一に作製されたホウ珪酸ガラス粒子(標準粒子)が、RP-1の性能評価に適切ではないかと考え評価を行った。

標準粒子の受ける空気抵抗

標準粒子と不整形異物との動力学の性質を比較する。標準粒子は真球に近い球形粒子である。同じ体積をもつ球形粒子の終末重力沈降速度を v_s 、回転楕円体粒子の終末重力沈降速度 v_{el} とし、その比 η_1 を式(1)に示す。

$$\eta_1 = v_{el} / v_s = \beta^{-1/3} \kappa^{-1} \dots\dots\dots (1)$$

$1/\beta$ は回転楕円体のアスペクト比である。 $\beta = 1$ で真球、 $\beta > 1$ の領域で扁平球、 $\beta < 1$ の領域では扁平長球となる。 κ (不整形粒子の動力学の補正因子)を式(2)に示す。

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\kappa_c} + \frac{2}{\kappa_a} \right) \dots\dots\dots (2)$$

κ_c は回転軸方向成分、 κ_a は回転半径方向成分で、それぞれ次式で与えられる。

扁長球($\beta < 1$)について、

$$\kappa_c = \frac{\frac{4}{3}(1-\beta^2)}{\frac{(2-\beta^2)\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \ln\left(\frac{1+\sqrt{1-\beta^2}}{\beta}\right) - \beta} \dots\dots\dots (3)$$

$$\kappa_a = \frac{\frac{8}{3}(1-\beta^2)}{\frac{(2-3\beta^2)\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \ln\left(\frac{1+\sqrt{1-\beta^2}}{\beta}\right) + \beta} \dots\dots\dots (4)$$

扁平球($\beta > 1$)について、

$$\kappa_c = \frac{\frac{4}{3}(\beta^2-1)}{\frac{\beta(\beta^2-2)}{\sqrt{\beta^2-1}} \arctan\sqrt{\beta^2-1} + \beta} \dots\dots\dots (5)$$

$$\kappa_a = \frac{\frac{8}{3}(\beta^2-1)}{\frac{\beta(3\beta^2-2)}{\sqrt{\beta^2-1}} \arctan\sqrt{\beta^2-1} - \beta} \dots\dots\dots (6)$$

式(1)より、 η_1 と β の関係を図2に示す。^[1]

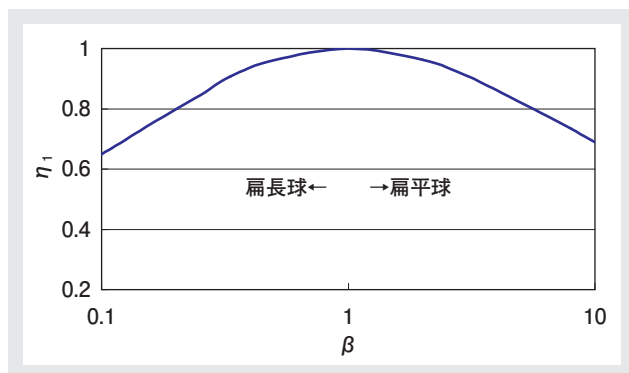


図2 同じ体積を持つ球形粒子に対する回転楕円体の重力沈降速度の比

図2より、同じ体積を持つ回転楕円体では真球より重力沈降速度の比は小さくなっている。これは回転楕円体が、真球より空気力学的径が大きいためである。一般の異物は、回転楕円体より複雑な形状であり真球と同体積の場合で比較すると、より大きな投影面積を持つため空気抵抗を受けやすい。よって、標準粒子は一般の異物より除去されにくいと考えられる。ただし、ここでは粘着性異物や潮解性のある異物は考慮していない。本章の式および図2は参考文献^[1]より引用した。

標準サンプル作製方法

RP-1用標準サンプルの評価には当社製異物検査装置PR-PD3(以下PD3)を用いる。PD3は、レーザー散乱方式により直径0.5 μm以上の異物検出感度を有する。また検出した異物のマッピング、顕微鏡観察機能を備えており、異物の検出および観察が可能である。以下に適量の標準粒子をレティクル表面に均一に分散させる方法について述べる。

一般的に異物検査装置の標準サンプルは、清浄なレティクル上に粒子を含んだミストを降下、一様に分布したものを蒸発乾固させることによって作製する。PDシリーズの標準サンプルの場合は、一定濃度の粒子を含んだ液滴をレティクル表面の一部に滴下し、蒸発乾固させることによって作製する。しかし、上記の方法では、水垢が標準粒子とレティクル表面との間に入り、強い力で付着する可能性があるため、RP-1の評価には適さない。

そこで、乾燥状態の標準粒子をレティクル表面に均一に分散することで標準サンプルの作製を試みた。使用するのはDukeScientific社製ホウ珪酸ガラス粒子、粒径5~40 μmのものである。異なる粒径の中でも均一に分布させることが困難な20 μm、40 μm標準粒子の標準サンプル作製について述べる。

20 μmおよび40 μm標準粒子をレティクルのガラス面上に、800 mmの高さから自然に分散降下させた結果を図3に示す。以上の作業はクリーンルーム内で気流を遮断した清浄空間において行った。

図3において、赤線で囲まれた範囲がレティクル表面の検査エリア(120×100 mm)、ローマ字記号が、散乱光検出箇所である。図3(a)に示すように20 μm標準粒子はレティクル全体に均一分散している。一方、40 μm標準粒子は図3(b)のようにレティクル上端に極端に密集している。これは、粒子の沈降速度が大きすぎたため十分に分散する前にレティクル表面に到達したためと考えられる。大気中における終末重力沈降速度を式(8)に示す。

$$v_s = \frac{2(\rho_p - \rho)}{9\mu} a^2 g \dots\dots\dots (8)$$

$\rho_p = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ (ホウ珪酸ガラスの密度)、 $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ (空気20℃の密度)、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ (重力加速度)、 $\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa/s}$ (空気20℃の粘度)である。式(8)より20 μm

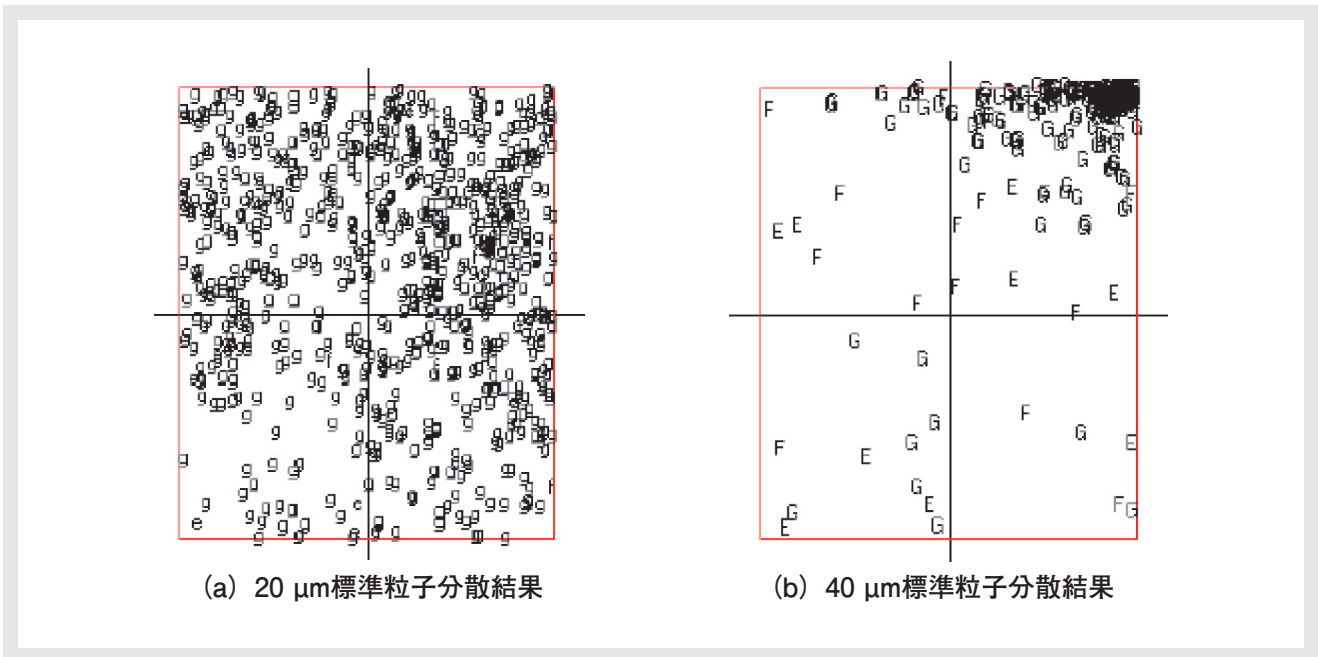


図3 レティクル上に標準粒子を分散配置した結果マッピングイメージ
 グリッド入りテスト用レティクル使用 ブロー流量：バキューム流量=6：10(L/min)

標準粒子の重力沈降速度は0.03 m/sであるのに対し40 μm標準粒子では、0.12 m/sと4倍大きく、20 μm標準粒子と同程度の均一に分散させるためには4倍以上の高さから落下させる必要がある。クリーンルーム内で3 m以上の高さから、レティクル上に標準粒子を落下させるのは困難である。そこで40 μm標準粒子落下時に適切な乱流を発生させた結果、20 μm標準粒子と同様に均一な分散が得られた。

次に、レティクル上に分散した標準粒子が多粒子であるか単粒子であるか、その存在割合を調べた結果を表1に示す。粒子が多粒子である場合、単粒子と比較し空気抵抗が大きくなるため、同一の基準で評価できない。単粒子または多粒子であるかの判断は、標準粒子付着後のレティクルをPD3で検出し、1個ずつ顕微鏡観察によって確認している。

表1より、10 μm以上の標準粒子は80%、5 μmでは70%以上が単粒子であった。5 μm標準粒子は、分散以前に粒子同士の重心の間隔は、約5 μmと小さく静電気力などが影響し、多粒子の割合が増えたと考えられる。

表1 各粒径による標準粒子*の単粒子率

粒径(μm)	5	10	20	40
単粒子(個)	684	827	798	900
多粒子+単粒子(個)	989	990	980	900
単粒子率(%)	70.1	85.5	81.4	100.0

*DukeScientific社カタログナンバー=9005, 9010, 9020, 9040

単粒子率の違いによる除去率の誤差は以下のように推定できる。標準粒子をレティクル上に分散させたとき、単粒子350個、多粒子150個(単粒子率70%)であったとし、除去処理後10個の単粒子標準粒子が残ったと仮定する。単粒子の除去率は97.1% (=340/350×100)、多粒子を含めた除去率は98.0% (=490/500×100)となり、単粒子率のみの場合と比較して0.9%の誤差が生じる。除去率を求める際、常に、単粒子か多粒子かを確認することは困難であるため、標準粒子は全て単粒子として扱う。よって除去率は、以上の誤差を含んでいるものとする。除去前の標準粒子数が少ないと誤差が大きくなるため、誤差を十分小さくするために、除去前の標準粒子数500個以上を基準とした。

標準粒子除去性能の評価と考察

各ブロー条件による除去率の変化

本章ではベリクル膜上の異物を想定した評価結果を示す。

清浄なレティクルを準備し、PD3にて異物付着の有無を確認する。すでに付着異物がある場合は標準粒子と区別できる様に記録しておく。使用するレティクルは、標準粒子を特定しやすくするためグリッド入りレティクルを用いる。先に述べた方法により、標準粒子を付着させPD3で測定する。検出された標準粒子の数と除去処理後の測定

に検出された数を比較することにより除去率を算出する。**図4**にブローの流量を変更したときの標準粒子除去率の変化を示す。**図4**より、流量を上げることによって除去率が向上していることがわかる。ただし、流量を上げすぎるとペリクルを損傷する可能性がある。そこで各種のペリクル(i線, g線, KrF, ArF用など)で破損のおそれがある流量を別途調べた結果、6 L/minでは破損しないことを確認している。RP-1の目標仕様は、ペリクル上の20 μm 標準粒子にて除去率90%以上である。ブロー条件6 L/minにて20 μm の異物が約99%除去できRP-1の目標仕様を満たしている。よって以下の実験では、この流量条件を採用した。

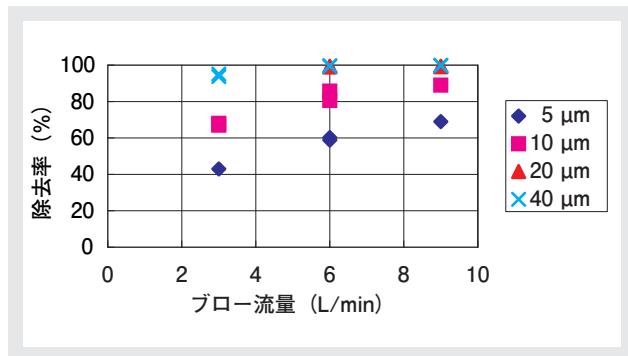


図4 各ブロー条件による標準粒子除去率の変化
バキューム流量10(L/min)

各標準粒子径による除去率の違い

図5に5~40 μm の各標準粒子径による除去率の違いを示す。

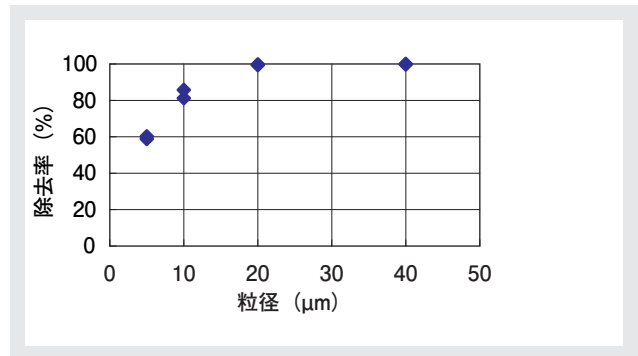


図5 各標準粒子径による除去率の違い
ブロー流量：バキューム流量=6：10(L/min)

図5より、粒径が小さくなるにつれ除去率は低下していることがわかる。これは、粒径が小さくなることによって空気力学的径が小さくなったためと考えられる。

除去率の再現性

標準粒子の付着直後の測定結果と、除去処理後におけるPD3測定結果(マッピングイメージ)を**図6**に示す。ここでは代表例として20 μm 標準粒子を選択した。

図6より、除去処理によって多数の標準粒子が除去されたことがわかる。除去処理後の検出異物を顕微鏡観察したところ9/14個が標準粒子であり、残りは標準サンプル作製以前に検出された実異物であった。除去前および除去処理後の標準粒子検出結果と除去率の再現性をまとめた結果を表2に示す。

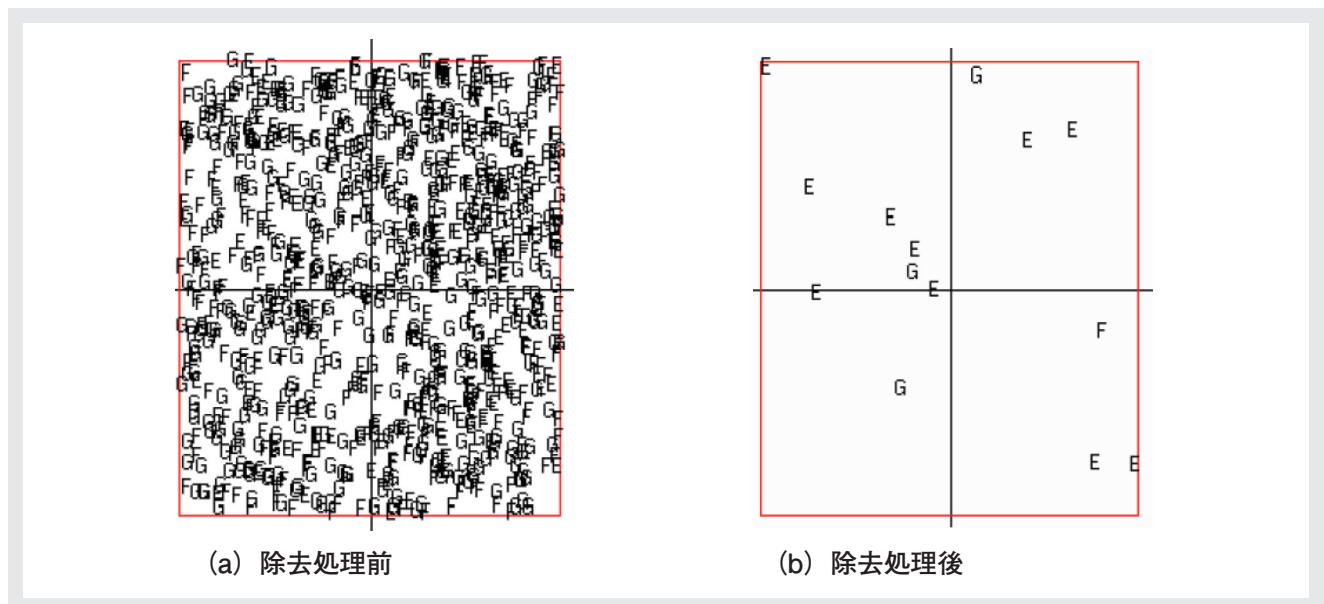


図6 除去処理前後におけるPD3の測定結果マッピングイメージ
ブロー流量：バキューム流量=6：10(L/min)

表2 標準粒子除去率再現性
20 μm標準粒子 ブロー流量：バキューム流量=6：10(L/min)

回数	1	2	3
除去前粒子数(個)	897	966	977
除去後粒子数(個)	7	9	5
除去率(%)	99.1	99.0	99.4

除去率は3回ともに99%以上であり高い再現性が得られた。

除去率経時変化

異物付着後の除去率経時変化は、レティクルを清浄に管理する上で重要な指標となる。レティクルに標準粒子を付着させ、レティクルケース内に格納した状態で一定時間保存した後、RP-1で除去処理を行った。保存時間と除去率の関係を図7のグラフに示す。ここでは代表例として、各ブロー条件での除去率の差が大きい10 μmの結果を示す。

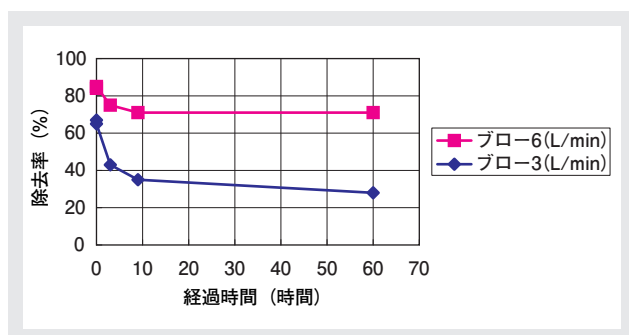


図7 標準粒子除去率の経時変化
バキューム流量 10(L/min)
10 μm標準粒子 保存状態：レティクルケース格納

図7より標準粒子付着後10時間以内にて除去率は、すみやかに低下している。ブロー条件3 L/minでは10時間以上経過後も低下しており、6 L/minでは変化は小さいが、緩やかな低下傾向が続いていると考えられる。

以上より、単純形状かつレティクル表面との接地面積が小さいホウ珪酸ガラス製粒子でさえ、レティクル表面に付着後長期間放置しておくと、除去率が低下することがわかった。標準粒子より複雑な形状を有する一般の異物であれば、この傾向はより顕著に現れると考えられる。すなわち、異物除去は、異物が付着した直後に行うことが望ましい。フォトリソグラフィ工程では、レティクル使用直後の異物除去がレティクルを清浄に維持管理するために有効であるといえる。

おわりに

今回作製した標準サンプルを用いた試験にて、除去率の再現性が得られた。これにより標準サンプルを用いた試験は、異物除去装置の性能評価に適切な手法であることを示せた。除去率の経時変化では、保存時間の増加に伴い、初期から10時間にかけて顕著に低下した。さらに10時間以上を経ても除去率の低下が続くことを確認できた。このことから、レティクル使用直後に異物除去処理を行うことは、レティクルを長期に清浄保存するために必要であるといえる。実際の異物による除去性能の評価は、標準粒子のように再現性が得られないため難しい。一般的な結果を得るためには、より多くの実異物の除去結果を積み重ねるしかない。少なくとも数千個以上の実際の異物について、その形状などと共に除去性能を議論する必要があると考えられる。

近年、さらなるプロセスの微細化に伴いレティクル価格は高騰しており、異物除去プロセスに対する自動化のニーズは、益々増加すると考えられる。これらのニーズに対応するため、更に微細な異物や除去困難な粘着性を有する異物も効果的に除去できる手法と評価方法の開発を進めていきたい。

参考文献

- [1] 高橋幹二著, 日本エアロゾル学会編, エアロゾル学の基礎, 森北出版株式会社(2003)



清水 智也

Tomoya SHIMIZU

株式会社堀場製作所
科学・半導体システム統括部
自動計測機器開発部