真空プロセス装置におけるパーティクル監視・制御技術

守屋 剛*1・松井 英章*1・寺澤 伸俊*1

Technology to Watch and Control Particles in Vacuum Processing Equipment

Tsuyoshi MORIYA*1, Hidefumi MATSUI*1 and Nobutoshi TERASAWA*1

*1Technology Development Center, Tokyo Electron Limited, 5-3-1 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-6325, Japan

(Received April 8, 2010, Accepted May 21, 2010)

Test wafers are regularly used for monitoring the daily chamber conditions from the viewpoint of particle contamination in the semiconductor manufacturing equipment. Since the number of particles contaminating on a wafer often varies, the particle management by the sampling inspection only observes the situation at the moment. *In situ* particle monitor (ISPM) is developed as a technique for real time monitoring the particle. This time, ISPM was installed in the mass production 300 mm plasma etcher at the bypass exhaust line connected with a dry pump. The ISPM count at one cleaning cycle and the correlation with the mass production yield were investigated. The ISPM count takes the decreasing tendency immediately after maintenance. The production yield also has fallen with the repeated etching processes. It is able to monitor the yield decrease by managing the logarithmic index of the ISPM count.

1. はじめに

19世紀の後半に半導体が無線検波器として使用されたことにはじまり、その後、半導体ダイオードやトランジスタなどの半導体デバイスが発明され使われてきた。複数のトランジスタを小さな半導体基板上に作りこんで高集積回路 (LSI) を作る技術が開発され、現在までに LSI の微細化技術は驚異的な発展をとげている。しかし、これは同時に半導体製造プロセスにおける微小なパーティクルとの戦いでもあった。

LSI の歩留りは集積度が向上するにつれて低下し、量産の初期段階では非常に低い歩留まりしか得られず、そのほとんどの不良がパーティクルによって引き起こされていることが報告されている¹⁾。一旦パーティクルが発生すると、半導体製造装置を停止して内部を洗浄しなければならないため、装置稼働率が低下してしまう。パーティクルの発生による装置稼働率の低下は装置の故障や通常のメンテナンスよりも大きい。

装置稼働率を高レベルで維持するためには、日常からパーティクルの管理を行い、突発的にパーティクルが発生しないようにする必要がある。そのため、半導体工場では、パーティクル測定用のウェーハや製品ウェーハを搬送 (処理) してウェーハ上に付着したパーティクル数が一定レベル以下になるように管理する方法と、レーザ光散乱法などを用いて装置内のパーティクルを計測する方法が用いられている。

現在、ほとんどの半導体製造装置において、ウェーハを用いた表面欠陥検査が行なわれているが、一部の半導体製造装置においては、排気ラインにとりつけたパーティクル計測器による管理を取り入れられている。このようなパーティクル監視への要求はすべての真空応用プロセス装置に共通する課題であり、重要な研究テーマのひとつである。

現在、半導体業界ではデバイスの性能向上やコスト低減のため、LSI の微細化や多層配線のような構造の複雑化、新材

料の採用などが行われている。微細化や構造複雑化に伴い、不良を引き起こす欠陥サイズの微小化も進んでおり、その結果、パーティクルによる歩留りの低下が進行している。メモリ、ロジックなど、半導体デバイスの製品種によらず、高歩留りはすべてに共通する強い要望であり、新製品開発後の量産歩留りをいかに早く安定させるかが重要なポイントのひとつである。もし、いち早く歩留りを上げることができなければ、開発コストの回収が長期化し、企業の競争力に影響を与えてしまうことになる。

特に、新規プロセスを運用開始した直後は、LSI の欠陥密度が高いレベルを推移する傾向にある²⁾。このような状況においては、**Fig. 1** に示すような取り組みが必要となる。

半導体デバイスの開発段階においては、市場投入までの時間を短縮し、いち早く市場ニーズに対応する必要がある。製品の量産立ち上げ段階では、高歩留まりで量産できるまでの期間を短縮し、さらに量産時の歩留りを高いレベルで安定させることが重要である。一般的には、シリコンペアウェーハに付着するパーティクル数でチャンバの清浄度を管理することが多く、一日に一回程度のパーティクルチェックが行なわれ、パーティクル数が規定値を上回ったか否かで、製品処理

Fig. 1 Yield trend after introducing new processes.

*1 東京エレクトロン株式会社技術開発センター (〒107-6325 東京都港区赤坂 5-3-1 赤坂 Biz タワー)

続行かメンテナンスかどちらかの判断が行われる。

一日一回のパーティクルチェックの合間に、突発的にパーティクルが発生してしまうと、それに気づかずに大量の製品ウェーハが処理されてしまい、歩留まりを低下させてしまう。そのため、歩留り低下対策のひとつとして、パーティクルモニタを用いたチャンバ内の清浄度管理が重要視されてきている。

2. 真空プロセス装置におけるパーティクル監視

これまでに、装置開発エンジニアや設備技術エンジニアらの努力によって、半導体製造装置内のパーティクル数は低減してきているものの、未だにチャンバ内のパーティクルを完全にゼロにすることはできていない。これからの真空応用プロセス装置には、つぎのような性能が要求されると考えられる。

- ①微小なパーティクルを低レベルに安定して抑えることができる。
- ②もし、突発的な原因でパーティクルレベルが増加した場合、それを即座に検知できる。
- ③異常を検知したら、その場で自動的に対処を施し、製品処理をいち早く復旧できる。

微小なパーティクルを低レベルに安定して抑えることについては、装置開発エンジニアらによって引き続き研究開発されていく課題である。突発的なパーティクル増加を即座に検知する手法については、従来のウェーハを用いたパーティクルチェックに替わる手法が望まれている。もし、半導体製造装置におけるパーティクル発生状況をリアルタイムで把握することができれば、装置が異常をきたしている状態で半導体を処理することを未然に防止することができる。

半導体製造装置内パーティクルのリアルタイムモニタリングは、1990年代にウェーハの300 mm 化が進められる中で開発が行われてきた。しかし、一部で研究開発ライン向けに採用されたものの、量産現場で活用されている例はあまりない。これはセンサの性能不足や誤った使用方法などが主な原因であったと考えられる。

排気系パーティクルモニタ（In-Situ Particle Monitor: ISPM）を用いてチャンバ状態を監視するためには、「適切な場所」に設置し、「適切な手法」を用いてパーティクル検出を行うことが重要である。ISPM によってチャンバの異常をいち早く検知できれば、即座に製品ウェーハの処理を中止し、チャンバのクリーニングを実行することで大量損失を防止することができる。

これまでの研究によれば、真空応用プロセスのひとつであるプラズマエッチング装置では、ISPM のカウントとウェーハ上パーティクルに相関が低いことが報告されている³⁾。ISPM によってウェーハ上パーティクルを予測できなかった理由として、プラズマ中の静電気力によるパーティクル挙動の指向性や、真空中でのガス粘性力低下によるパーティクル挙動の変化があまり理解されていなかったことが挙げられる。

静電気力によるパーティクル挙動の指向性とは、つぎのよ

うなものである。たとえば、プラズマ中に存在するパーティクルは正または負の電荷を帯びており、パーティクルの振る舞いは周辺の電界強度によって支配される。Fig. 2 に示すようなパーティクル可視化装置を用いて、プラズマ中のパーティクル挙動を確認した例を Fig. 3 に示す。

プラズマ放電中にパーティクルが発生し、それがバルクプラズマ中に進入すると、電子や正負イオンと衝突を繰り返す。時間平均的に観測すると、バルクプラズマのポテンシャル井戸に閉じ込められた電子との衝突を繰り返すため、パーティクル表面に電子が付着し負帯電する。負帯電したパーティクルは、ウェーハ近傍におけるイオンシースの正電位によって跳ね返され、ウェーハに付着せずに上下振動を繰り返しながら周辺部へと輸送されていく。

つまり、プラズマ処理装置において、真空チャンバから排気されたパーティクルはウェーハ表面を避けて排気されたパーティクルである。そのため、ターボポンプの前後などに ISPM を設置しても、ウェーハ上パーティクルと相関がとれない。

Fig. 2 に示した手法をプロセスチャンバ下部にあるマニホールドに設置し、低圧でのガス粘性力低下について確認した。実験の構成概念図を Fig. 4 に示す。プロセスチャンバからアルゴンガスを1000～2000 sccm 流しながら、マニホールドの吸入口を通してパーティクルを散布した。

様々な圧力におけるパーティクル挙動の違いを可視化した結果を Fig. 5 に示す。すべての圧力において、ガスは左上から右下の方向へ流れている。しかし、圧力26.66 Pa 以下では、パーティクルはまっすぐ落下していることがわかる。

Fig. 2 Schematic diagram of in-chamber particle monitor.

Fig. 3 Picture (a) and schematic diagram (b) of particle observation in plasma.

これは、ガス分子の平均自由行程が長いいため、パーティクルとガス分子との間に十分な衝突が得られず、ガス粘性力が低下することが原因である。66.66 Pa では一部、120 Pa では大半のパーティクルが排気口に吸い込まれている。

この実験条件において、式(1)に示すパーティクルの運動方程式と式(2)に示すストークスの抵抗則を用いて、流体抵抗モデルを数値計算した結果を **Fig. 6** に示す。実験結果と非常によく一致しており、低圧ではパーティクルがガスの流れに乗らないことが示されている。

$$\frac{du_p}{dt} = F_D + \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) g \quad (1)$$

$$F_D = \frac{18 \mu}{d_p^2 \rho_p C_c} (u_f - u_p) \quad (2)$$

ここで、 ρ_p はパーティクルの密度、 ρ_f は流体密度、 g は重力加速度、 F_D は単位質量あたりの流体抵抗力、 d_p はパーティクルの直径、 u_p はパーティクルの速度、 u_f は流体速度、 μ は流体粘度、 C_c はカニンガムの補正係数である。

Fig. 7 に、約66.66 Pa 以下の高真空領域とそれよりも高い圧力の中真空領域におけるパーティクル挙動の概念図をそれぞれ示す。高真空領域ではガス粘性力が小さいため、チャンバ内から図中の ISPM ①までパーティクルを輸送するのは困難である。パーティクルを観測するためには、真空チャンバ内でパーティクルを飛散させ、パーティクルを図中の ISPM ②まで輸送する必要がある。単に排気ラインに ISPM を設置しただけでは、チャンバ内のパーティクルを効果的に

観測することは困難であり、中真空領域で意図的にパーティクルを輸送する必要がある。

このように、プラズマ放電中に発生したパーティクルは静電気力によってウェーハへ付着しにくいこと、そして、プラズマエッチング等に用いられる高真空の圧力領域ではパーティクルが排気ラインへ輸送されないことなどの理由から、ISPMでのパーティクル監視がうまく活用されてこなかった。そこで、著者らはウェーハ処理のロット間に、チャンバ内のパーティクル汚染状況を監視するためのパーティクルモニタリング手法を開発した⁴⁾。

ウェーハ処理のロット間に、窒素などのガスでチャンバ内に衝撃波を発生させ、それによって飛散したパーティクルを排気ラインへ輸送し、ISPM で観測する。この方法を用い

Fig. 6 Calculation results for particle behaviors in each pressure.

Fig. 4 Configuration of particle visualization experiment.

Fig. 7 Particle behaviors in vacuum chamber.

Fig. 5 Particle behaviors in each pressure.

ば、定期的にチャンバ内のパーティクル汚染状態をモニタリングすることができるようになる。

代表的な ISPM の構造を Fig. 8 に示す。測定原理は、レーザ光源とフォトディテクタを使用したレーザ光散乱法によるものが主流である。真空排気ラインに設置され、ポンプライン内を流れるパーティクルがレーザ光を散乱する。散乱光は光学系を通じて光電子増倍管で電圧に変換され、Fig. 9 に示すような処理を施され、パーティクル数としてカウントされる。配管内を通過するパーティクルのうち、レーザ光を横切ったものがカウントされ、そのカバレッジは（レーザの断面積）/（配管の断面積）で表される。

たとえば、レーザ光の直径が 4 mm 程度、内径 25 mm の配管であれば、カバレッジは約 30 % にあたる。そこで、Fig. 10 に示す評価系を用いて、ISPM 内を通過したパーティクル数を計測する実験を行った。ネブライザで生成したポリスチレンラテックス（PSL）粒子を ISPM に導入し、ISPM によるパーティクルカウントと気中パーティクルカウンタによるカウントを比較した。

評価に用いた ISPM は、半導体レーザ（658 nm）を光源に、フォトマルチプライヤチューブ（PMT）を検出器に用いて、レーザ光を左右にスキャンして検出エリアを広くする機能を有する ISPM である。この ISPM において、内径 25 mm の配管におけるカバレッジは理論上 100 % である。

内径 100 mm の配管（LF100）と内径 25 mm の配管（KF25）のそれぞれにおける ISPM カウントと気中パーティ

クルカウンタによるパーティクル総数の比較を Fig. 11 に示す。内径 100 mm では ISPM でカウントできなかったパーティクルがかなりあるが、内径 25 mm では ISPM ではほぼ

Fig. 8 General configuration of ISPM.

Fig. 9 Principle of ISPM measurement.

Fig. 10 Experimental configuration for ISPM evaluation.

Fig. 11 Comparison between ISPM count and number of total particles.

Fig. 12 Correlation between ISPM count and pressure, voltage.

すべてのパーティクルをカウントできていることがわかる。ISPMを設置する際には、まずカバレッジを確認して、少数のパーティクルを漏れなくカウントできるように考慮しなければならない。

ISPMをプラズマエッチング装置の粗引きライン（内径25mm）へ設置し、前述の衝撃波と直流電圧印加によってパーティクルを飛散させ排気するシーケンス^{5,6)}を用いて、ISPMによりパーティクル数をカウントした結果をFig. 12に示す。

Fig. 12において、合計3回にわたり衝撃波と直流電圧印加が行われており、それぞれのタイミングにおいてパーティクルがカウントされている。さらに、3回繰り返すごとにISPMカウントが減少していることから、チャンバ内の状態変化を把握できていることが分かる。

3. ISPMを用いたパーティクル監視の事例

半導体製造装置の問題抽出やログデータ分析によるOEE向上を目的として異常検出・分類（Fault detection and clas-

sification: FDC）システムが注目されている。ISPMをFDCに用いることによって、つぎのようなメリットが得られる。

Fig. 13(a)に示すように、メンテナンス後などの装置立ち上げ時には、パーツの組み立て不良や洗浄不足、作業時に持ち込まれた異物、チャンバ内の清掃不良などに起因して、欠陥が発生することがある。ISPMを用いてチャンバ内状況を把握し、メンテナンス後の初期不良を回避することにより、量産移行までの時間を短縮することができる。

Fig. 13(b)に示すように、量産移行後のチャンバでは、欠陥が時間とともに増加するため、定期的にメンテナンスする必要がある。ISPMを用いて、チャンバが安定して運用されているかどうかをモニタし、チャンバ内状況が悪化したことを検知することで、最適なメンテナンスサイクルを知ることができ、装置稼働率を改善できる。

Fig. 13(c)に示すように、もし装置が何らかのトラブルによって突発的に異常を起こしたとき、それを即座に検知し、スクラップになるウェーハを最小限にすることができる。ま

Fig. 13 Patterns of particle outbreak on wafer.

Fig. 14 Typical result of ISPM usage in plasma etcher.

た、ISPM のデータを分析することによって、問題発生源をある程度特定することができるため、保守作業時間や内容も改善される。

Fig. 14に、半導体工場の量産用300 mm プラズマエッチング装置に ISPM を搭載し、ロット間隔で自動的に ISPM カウントを測定した結果を示す⁷⁾。この評価では、衝撃波と直流電圧印加はプラズマエッチング装置のソフトウェアで自動的に1ロット毎に実行されている。

Fig. 14は、メンテナンス作業（ウェットクリーニング）実施後のウェーハ上パーティクル数と ISPM カウントの推移を片対数プロットによる手法⁸⁾を用いて表している。ウェーハ上パーティクル数には特に傾向が見られないが、ISPM カウントはメンテナンス直後から約二日間に渡って、減少傾向が確認できる。また、メンテナンス作業から二日後以降は、ISPM カウントのレベルの変化はあるものの概ね安定している。このことから、メンテナンス作業から二日目に何らかの状態変化があったことがわかる。

Fig. 15および Fig. 16に、メンテナンス作業から二日以内とそれ以降における ISPM トレンドを近似した結果をそれぞれ示す。メンテナンス作業から二日以内の ISPM カウント推移は $y = 142e^{-1.98x}$ に近似され、それ以降は $y = 4.89e^{-0.015x}$ に近似され、係数に大きな差が有ることがわかった。

そこで、メンテナンス作業から二日目前後において、評価に用いたプラズマエッチング装置で処理をした回数に対する量産歩留まりを調査した結果を Fig. 17および Fig. 18に示す。これらの図における横軸は、一枚のウェーハが最終処理されるまでの全工程のうち当該装置で処理された工数を示している。Fig. 17においては、当該装置での処理を重ねるたびに歩留まりが低下する一方、Fig. 18においては、当該装置での処理回数に関わらず歩留まりが一定であった。

Fig. 15 ISPM trend within 2 days after tool maintenance.

Fig. 16 ISPM trend over 2 days after tool maintenance.

Fig. 17に示すように、メンテナンス作業から二日目までの間、プラズマエッチング処理に対する歩留まりの変化は $y = -2.0x + a$ (a は任意) に線形近似された。このことから、この期間、評価に用いた装置でエッチングするたびに、歩留まりが落ちていたことがわかる。一方、Fig. 18に示すように、メンテナンス作業から二日目以降は $y = 0.3x + b$ (b は任意) に線形近似され、エッチング処理で歩留まりが低下していないことがわかる。

このような結果になった原因として、メンテナンス作業が不十分であったか、もしくは真空チャンバ内の水分が十分に除去できていなかったことなどが考えられる。これは ISPM カウントの推移と歩留まり低下の相関が取れた事例であり、この結果を応用すれば、メンテナンス作業後の ISPM カウントの減少傾向が無くなるまで、シーズニングや In-situ クリーニングなどを実施しなければならないことがわかる。このように、ISPM カウントの経時変化から、チャンバ内のパーティクル汚染状況を監視することができる。

Fig. 17 Correlation between yield and etching times within 2 days after tool maintenance.

Fig. 18 Correlation between yield and etching times over 2 days after tool maintenance.

4. おわりに

真空プロセス装置において、ISPMを用いたチャンバコンディショニングの管理が可能であり、状況に応じてIn-situクリーニング等により自動的に復旧する機能の確立が望まれている。現在、いくつかの半導体量産ラインで運用されており、今後もさらに広く使われていくと考えられる。本稿で説明したチャンバコンディショニングマネジメント技術によって、冒頭に示したような問題が解決され、半導体製造におけるコスト競争力向上の一助になるであろう。

謝辞

本研究にあたりまして、ご協力・ご助言を頂きましたルネサスエレクトロニクスの渡部氏、塩屋氏、寺門氏、坂森氏、そして、東京エレクトロンATの長池氏、宮内氏に深く感謝致します。

〔文 献〕

- 1) F. Uesugi, N. Ito, T. Moriya, H. Doi, S. Sakamoto and Y. Hayashi: *Shinku*, **41** (1998) 776 [in Japanese].
- 2) N. W. Hatch and D. C. Mowery: *Management Science*, **44** (1998) 1461.
- 3) K. M. Takahashi and J. E. Daugherty: *J. Vac. Sci. Technol. A*, **14** (1996) 2983.
- 4) R. Burghard, T. Moriya, K. Matsuzaki, H. Nagaike and H. Nakayama: *Proc. 15th. Int. Symp. Semiconductor Manufacturing*, Tokyo, 2006, p. 7.
- 5) T. Moriya, M. Shimada and K. Okuyama: *Clean Technology*, **16**, No. 2, 2006, 16 [in Japanese].
- 6) T. Moriya and H. Nagaike: *Clean Technology*, **17**, No. 9 (2007) 6 [in Japanese].
- 7) M. Shioya, T. Moriya, H. Matsui and S. Watanabe: *Proc. AEC/APC Symp. Asia*, Tokyo, 2009, MS-P-047.
- 8) M. Sugimoto: *Proc. 17th. Int. Symp. Semiconductor Manufacturing*, Tokyo, 2008, PC-P-033.