

超小型残留ガス分析計 PressureMaster RGAシリーズ

池田 亨

要旨

線幅65 nmにせまる最新の半導体製造プロセスでは、ウエハ表面で所定の化学的・物理的反応状態を繰り返し再現できるか否かが最大の課題である。中でも、各種の真空機器を使うドライプロセスでは、機器内部に残留するガスの計測と制御が大変重要となる。エステックでは、真空計測機器のエキスパートであるアメリカのFerran Scientific Instruments社と提携し、四重極質量分析型の超小型残留ガス分析計PressureMaster RGAシリーズの発売を開始した。本稿では、四重極質量分析計の測定原理、ドライプロセスにおける残留ガス計測のニーズ、更にRGAシリーズの特徴と応用例を紹介する。

1 はじめに

四重極質量分析計(Quadrupole Mass Spectrometer: QMS)は1953年にPaul等によって発明¹⁾されて以来、常に最先端科学技術分野と深くかかわりながら高感度、高速応答の質量分析装置として発展してきた。特に、QMSの特徴を活かして、各種の真空機器内に残留するガスの組成を計測する残留ガス分析計(Residual Gas Analyzer: RGA)は、エレクトロ・メカニクスの進歩と共に目覚ましく発展している。

一方、高密度化・高機能化が進む半導体デバイスの製造現場では、プロセスを安定化させるために真空容器内の真空の質の管理が非常に重要なファクタとなっている。特に、高価なガスを使って複雑な化学反応を駆使するドライプロセスにおいては、チャンバ内の残留ガスを成分ごとに計測し、リアルタイムにコントロールすることが欠かせなくなっている。

エステックは、このたびアメリカの真空計測機器のエキスパートであるFerran Scientific Instruments社(FS)と提携し、超小型の残留ガス分析計PressureMaster RGAシリーズの販売を開始した。これにより、従来、マスフローコントローラ(MFC)を中心として流体の計測制御機器の製造販売を展開してきたエステックは、HORIBAの分析機器と合わせて、半導体プロセスの計測制御のソリューション・サプライヤとして大きく歩み始めた。

2 RGAの測定原理

RGAはイオン源、質量分析部、検出部とから構成される。残留ガスは高温のフィラメントから放出された熱電子と衝突しイオン化される。生成したイオンはイオンレンズで加速・収束されて質量分析部に導かれる。質量分析部では、4本の円柱形電極(四重極)に直流及び交流電圧を印加し、イオンの質量がふるい分けられる。分離されたイオンはファラデーカップで電流として検出される。このイオン電流が残留ガスの量(分圧)に比例する。なお、電子による残留ガスのイオン化効率はガス種によって異なり、通常、窒素の電離効率を1.0とし、各種ガスの相対電離効率とイオン電流とを掛け合わせて分圧を求める。図1にRGAの基本構成とQMSの動作原理を示す。

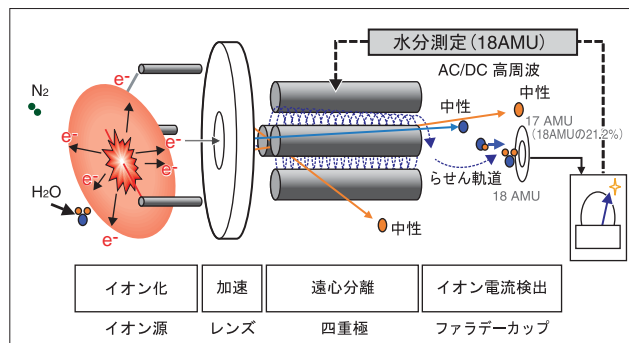


図1 RGAの基本構成と動作原理

3 半導体ドライプロセスと分圧測定

半導体デバイスの高密度化・高機能化に伴い、成膜やエッチング工程のドライ化が急速に進んでいる。高性能な製品を安定に作るためには、チャンバ内の状態を正確に把握し、プロセスを最適な状態に保つためのリアルタイム制御が不可欠となる。このための残留ガス分析計が強く求められている。

従来、半導体工場では、大型の汎用質量分析装置を使って、真空蒸着やスパッタリングなどの物理的成膜装置(PVD)やエッチング装置内の残留ガスを分析していた。しかし、これらの分析装置は、いずれも高真空下で極微量のサンプルを分析することを目指したもので、ドライプロセスのリアルタイムモニタとして使うには不便で高額であった。

また、化学的蒸着法(CVD)や反応性エッチングなどさまざまな真空技術が導入されており、そこで扱われる材料や真空度も非常に多様化している。これらのプロセスでは、幅広い性能と機能を持った残留ガス分析計が求められている。特に、化学的に活性の高いガスを含んだドライプロセスでは、フィラメントの損傷や、分析部の汚染などによる検出感度の劣化が大きな問題となっている。

4 超小型残留ガス分析計

残留ガス分析計は先端科学技術から半導体工場まで幅広い分野での用途が見込まれている。中でも、半導体のドライプロセスのin-situモニタとしての残留ガス分析計には次の3つの点が求められている^[2]。

- ① プラズマCVDなど低真空度(≒ 10^{-2} Pa)での計測が可能なこと
- ② 小型でプロセス機器への装着が容易なこと
- ③ 長期間安定に作動し、メンテナンスフリーであること

PressureMaster RGAシリーズ(図2)は、これらのニーズを受けて開発された超小型残留ガス分析計である。



図2 超小型残留ガス分析計 PressureMaster RGAシリーズ

4.1 MicroPole™ Analyzer

PressureMaster RGAシリーズの最大の特徴は、超精密光エッチング加工技術及びガラス/金属接合技術を駆使して四重極を4本組み合わせたトータル16本のMicroPole™ Analyzer (MPA)^{[3]-[5]}(図3)である。MPAの開発により、大型の質量分析装置と同等以上の性能を持ちながら、廉価な残留ガス分析装置を実現した。

本分析部はプラグイン方式のユニットタイプで、あらかじめ圧力校正されたセンサユニットを差し込むだけで全圧及び分圧の絶対値を読み取ることができる。

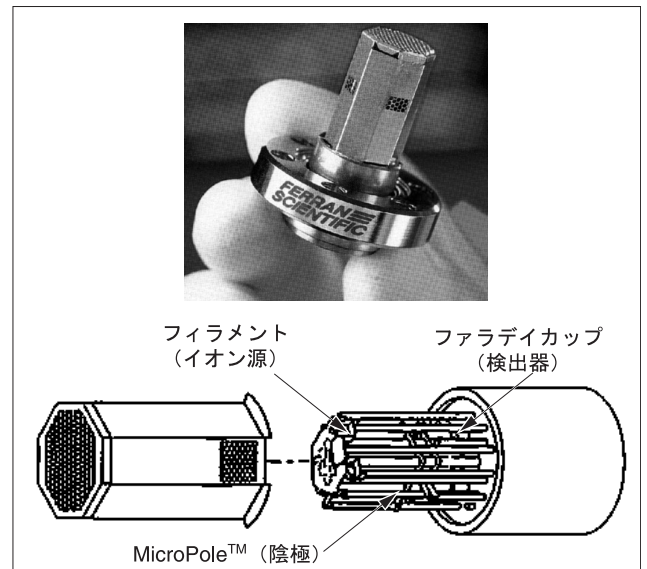


図3 MicroPole™ Analyzer

4.2 特徴

超小型残留ガス分析計は次のような特徴を持っている。

(1) 高圧対応(プラズマ励起圧力域で稼働可能)

- ・最大1.33 Paまでの圧力計測が可能
- ・プラズマシールド(SMPA型*1)によるフィラメントの保護機能付き
- ・任意の設定圧力によりフィラメントの自動消灯機能付き

(2) マルチポールの調整が不要

- ・電極の直接埋め込み構造により16本のポールを高い位置精度で維持
- ・電極材料の均一化と小型化により熱的安定性が高い

(3) ガスの放出を低減

- ・エッチングプレート配線により総メタル化
- ・超小型構造と熱源の近接化によるベーキングを可能とした

(4) 超小型で高感度・高分解能を実現

- ・四重極のマルチ化により感度と分解能を向上
- ・電氣的な補正により従来の精度を維持

(5) チューニングフリー

- ・計測ヘッド(MPA型*1, SMPA型)の特性をあらかじめ記憶させることによりチューニングフリーを実現
- ・シリアル制御によるマルチセンサ制御が可能である

*1 PressureMaster RGAシリーズにはMPA型とSMPA型があり、SMPA型はプラズマプロセスなどの厳しい環境でも使用できるようにメッシュ保護をしている。

5.1 クリーニング処理の完了検知

半導体製造現場では、各種の真空チャンバの稼働率を向上させるために定期点検(PM)を実施している。PM時にプロセスチャンバを大気に開放したり、チャンバ内壁を拭き取る際に水分が付着し、これがプロセスの稼働率を低下させる最大の問題となっている。

従来、PM後に水分が完全に除外されたか否かを特に確認せずに一晩排気を続けるか、あるいは大型のRGAを使って確認してきた。しかし、これらは、本来稼働率向上を目的とするPMが、逆に稼働率を低下させることになる。その上、既存のRGAは、残留ガスを低真空度から連続的に計測することが困難で、また高価なため計測器の購入費用効果(COO)の点で大きな問題であった。

図4に、PM完了後にPressureMaster RGAを使ってプロセスチャンバ内の分圧を連続計測した結果を示す。残留水分分圧は、排気開始約20分後にはほぼ飽和し、問題にならない程度にまで低下している。従来のRGAは、 10^{-4} Pa以上の低い真空度では作動が困難で、排気開始当初のデータがないために一晩中排気を続け、結果的に10時間以上を無駄にしていたことがわかった。

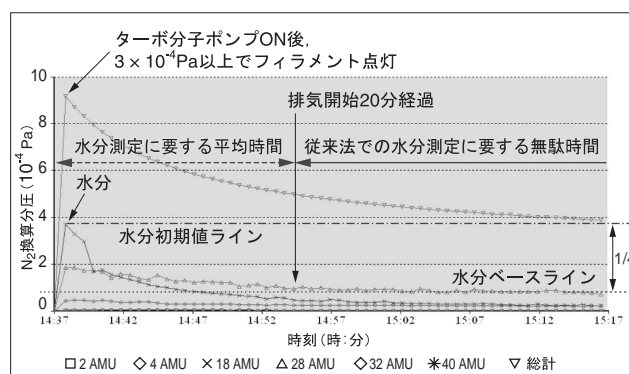


図4 プロセスチャンバ内残留ガスの連続計測

5 実測例

ますますコスト競争が激しくなる半導体工場では、プロセスを常に最適状態に管理し、それをいかに速く回転させるかが生き残りのための絶対条件となっている。このために、RGAを使って、ドライプロセスのリアルタイム・モニタリングによる生産性向上のためのさまざまな取り組みが行われている。ここでは、残留水分の連続監視によるクリーニング処理の完了検知と、イオン注入プロセスにおけるフォトレジストの硬化処理の異常検知への応用例を紹介する。

5.2 フォトレジストの硬化処理の異常検知

図5^[6]に、フォトレジストの硬化処理方法が異なる3種類のシリコン基板にイオンを注入した時のチャンバ内の $\text{CO}^+/\text{C}_2\text{H}_4^+$ (28 AMU)の分圧変化を示す。一つは、正常な硬化を施したウエハ、もう一つは硬化が不十分なもの、残りの一つはレジストなしのウエハである。

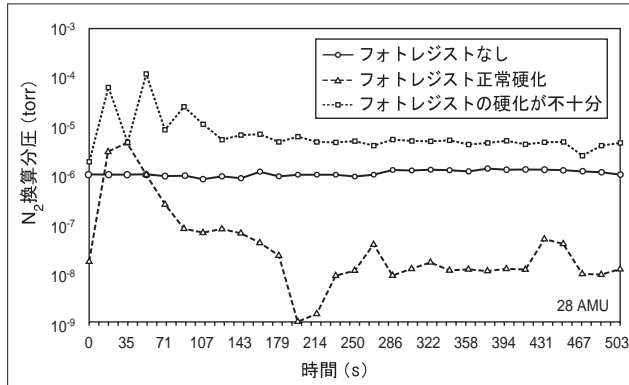


図5 イオン注入時における $\text{CO}^+/\text{C}_2\text{H}_4^+$ (28 AMU)の分圧の推移
参考文献[6]より

正常なウエハの場合は、当初増加してから減少して谷となり、その後増加して 2×10^{-8} torrに近づく。硬化が不十分な場合には、当初増加し、増減を繰り返しながら 5×10^{-6} torrに近づく。レジストなしの場合は、注入プロセスの間中ほとんど変化せず 1×10^{-6} torr程度である。この結果、RGAがプロセス異常診断にも十分に使い、半導体プロセスの投資費用対効果(ROI)の著しい向上に役立つものであることを示唆している。

なお、本試験の詳細はT.P. Schneiderらの既報^[6]を参照願いたい。

6 おわりに

半導体デバイスの厳しいコストダウン競争激化を背景に、プロセスの安定化を目指して各種真空チャンバ内の残留ガスのリアルタイムモニタリングがクローズアップされている。本稿で紹介したPressureMaster RGAシリーズは、既存の大型QMSに匹敵する高感度を維持しつつ、従来品の1/5~1/10と小型化を実現し、複雑な構造を持ったクラスター装置には大変有利である。

今後は、小型化と通信機能を更に充実し、従来、経験と勘に頼ることが少なくなかったドライプロセスの生産性向上にお役に立ちたいと願っている。

参考文献

- [1] Paul W, Steinwedel H. A new mass spectrometer without a magnetic field. Z Naturforsch 1953;8a:448-450
- [2] S. Boumsellek and R. J. Ferran, Trade-offs in Miniature Quadrupole Designs; Journal of American Vacuum Society, Mass Spectrom 2001, 12, 633-640.
- [3] R. J. Ferran and S. Boumsellek, High-pressure effects in miniature arrays of quadrupole analyzers for residual gas analysis from 10-9 to 10-2 Torr; Journal of Vacuum Science and Technology, A 14 (3), May/June 1996
- [4] Ferran, R. J. U.S. Patent. 1995, 5,401,962
- [5] Ferran, R. J. U.S. Patent. 1999, 5,857,890
- [6] Real Time In-Situ Residual Gas Monitoring During Ion Implantation In High Volume Semiconductor Manufacturing by T.P. Schneider, P. Krocak, Texas Instruments and B. Van Eck, International SEMATECH. As Featured in Future Fab International Edition 4 January 1998.



池田 亨
Toru Ikeda

株式会社エステック
開発本部 VEGA プロジェクト
チームリーダー