

Selected Article

一般論文

半導体製造プロセスでの プラズマ発光分析終点検知モニタEV140Cの実用例

飯田 裕

半導体製造プロセスにおいて、プロセスチャンバ内のプラズマ発光の変化を監視し、製造プロセスの終点を検知する手法が広く使用されている。近年の終点検知モニタではCCD分光器の普及により、広帯域の分光スペクトル信号を複合的に用いて判定を行うことで、終点検知能力が向上している。しかし、同時に膨大な分光スペクトル信号のデータ量を扱うことになり、効果的な特徴抽出や、効率的なデータ処理が要求される。更に、大量生産の製造プロセスに対応するためには、多数の標本に対応する能力も要求されている。本稿では実際の製造プロセスで使用されているプラズマ発光分析終点検知モニタの実用例について解説する。

はじめに

半導体製造分野において製品デバイスの微細化が進む中、ドライエッチング加工技術は半導体製造プロセスの中でも非常に重要な技術として位置づけられている。また半導体以外のフラットパネルディスプレイ、MEMS、光学デバイス等の分野でも、新規加工技術の導入が絶え間なく続けられている。

プロセスチャンバ内のプラズマ発光にはプロセス中のさまざまな情報が含まれることから、その分析内容はプロセス終点検出の目的だけでなく、デバイス開発初期段階のプロセス評価や、製品生産時のプロセス管理等の広い範囲で利用されている。更にドライエッチングの加工プロセスにおける発光分析の重要性が高まっている中で、より効率的で、生産性を向上させるエンジニアリングツールが強く要求されている。

本稿では、プラズマ発光分析終点検知モニタEV-140Cの製造プロセスでの実用例について解説する。

測定原理と要求

図1にエッチングプロセス進行とプラズマ発光の信号変化を示す。

製造プロセス中のプロセスチャンバ内では、使用するプロセスガスのラジカルや、イオンによるプラズマ発光、エッチング対象膜からの乖離イオン、あるいは反応生成物などに起因するプラズマ発光が観察される。このプラズマの発光状態は、加工ウエハのプロセスの進行状況によって変化する。終点検知モニタは、このプロセス中の発光をチャンバ観察窓から光学ファイバを経由して、マルチチャンネルCCD分光器で広帯域の光を計測する。例えば酸化膜エッチングプロセスの終点検知をすることを考えてみる。エッチング処理が進行し、終点である酸化膜の境界面に近づくと、エッチングガスである CF_x に基づく発光は増加する傾向を示し、逆に反応生成物として生成されていたCOによる発光は減少する傾向が観察される。終点検知モニタは、この発光の変化が一定の閾値に到達した時点でプロセス終点として検知する。

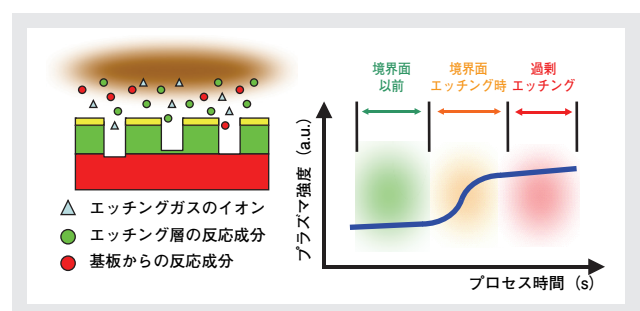


図1 エッチングプロセス進行とプラズマ発光の信号変化

プラズマ発光分析終点検知モニタとして、次の3つの主要な要求がある。

- ・終点検知に関連するラジカルやイオンからの発光波長を任意に選択できる。
- ・データの平滑化処理と終点検出条件の判定を、製造プロセスと同期してリアルタイムに処理できる。
- ・生産導入に際して、終点検知条件の信頼性評価ができる。

その他に、工程不良検出、プロセスチャンバ状態監視、プラズマ発光量に合わせたプロセス条件のリアルタイム制御、等の応用要求もある。

更に大切なことは、これら要求の一つ一つに対して正しく製造プロセスへ適用することができるか、妥当性が確認できることである。そのためには、発光分析モニタの終点情報でプロセス停止を行った結果、実デバイスの加工状態が適切であるか、評価、検証することが重要である。

これらの多様な要求に対応するため、プロセスエンジニアにとってより汎用性の高いリアルタイム終点検知システムの開発と、終点検知条件の作成、最適化作業、プロセス評価などを系統的にサポートし、スムーズに製造プロセスへ導入できるように、総合的なサポートソフトウェアの開発を進めてきた。

EV-140C製品仕様

主な製品仕様を表1に示す。

発光分析終点検知モニタEV-140Cは、プロセス装置へ

表1 主な製品仕様

項目	仕様
製品名	プラズマ発光分析エンドポイントモニタ
型式名	EV-140C
センサユニット	
波長範囲	200-800 nm
光学分解能	2.0 nm以下 @ $\lambda=200-500$ nm 2.5 nm以下 @ $\lambda=500-700$ nm (FWHM 理論分解能)
光学ベンチユニット	フラットフィールド収差補正型ポリクロメータ
CCDタイプ	裏面入射型CCDリニアイメージセンサ
A/D分解能	16ビット
露光時間	20 ms~2.5 s
外部接続	
分析用ファイバ仕様	合成石英ファイバ 230 μ m
リモートプロトコル	パラレルI/O / RS232C Ethernet
信号出力	・パラレルI/O用ポート ・アナログ出力用ポート 2ch出力 DC 0-5 V
センサユニットサイズ	142×257×152 mm (W×D×H DC仕様)
センサユニット質量	4.0 kg (DC仕様)

組み込むことを考慮した小型のセンサユニットと、コントローラユニットで構成されている。200-800 nmの広帯域のポリクロ分光器の検出器には、裏面入射型CCD検出器を搭載しており、全測定波長領域で高いS/N比での分光測定を可能としている。センサユニットとコントローラユニット間はLAN接続を採用し、分光データの高速度サンプリングとデータ転送を実現している。

コントローラユニット内にはリアルタイムモニタリング用のソフトウェアプラットフォームとして独自開発したSigma-Pを搭載している。CCD分光器で計測されたプラズマ発光の時間変化の情報から、終点検知に有効な波長の自動抽出を行う。更に、これらの測定信号のフィルタリング処理、信号強調処理や、論理式などの終点検知条件の設定が可能である。エンジニア自身がこれらの作業を効率的に行えるように、操作性の高い測定レシピの編集機能を用意している。

プロセス装置と同期させるために、パラレルIO、RS232C、Ethernetによるリモートシステム制御に対応することができる。また分光器の特定波長の信号や、演算処理を行った測定信号を、2chのアナログ信号としてリアルタイムに外部出力できるので、製造装置側でプロセス圧力や流量などを制御するための信号として利用することもできる。

データベースの採用により、製造プロセスで蓄積された大量のデータからの検索や、統計処理実行用の設定などの作業性が向上している。その他、複数データの比較表示機能や、保存されたスペクトルに対する終点検知の再処理機能などにより、過去に取得したデータを使って統計的にプロセスの最適化を行うことができる。

また本ソフトウェアでは、従来のPCA (Principal Components Analysis)による波形処理に代わる演算処理方法として、Rupture Intensityアルゴリズムという独自の特徴的な波形処理手法を提供している。

このアルゴリズムではエッチング中の境界面到達時に観察される信号変化を、2つの直線区間としてとらえて直線近似し、2区間の勾配変化に基づく角度とデータ数からRupture Intensityパラメータを算出する。通常の平滑化処理とは異なり、Rupture Intensityアルゴリズムでは、ノイズの大きい微小変化信号を、応答遅れのないスムーズな変化信号に変換することを特徴としている。

プラズマ発光分析終点検知モニタを利用したプロセスアプリケーションの実用例

図2は、半導体製造現場のプロセスエンジニアが発光分析終点検知モニタを利用したプロセスアプリケーションの実用例である。プラズマ発光現象には加工プロセス中の物理的／化学的情報が含まれるという性質から、生産プロセス試作開発段階から、実際の半導体製造の量産段階までのさまざまな段階で幅広く用いられる。

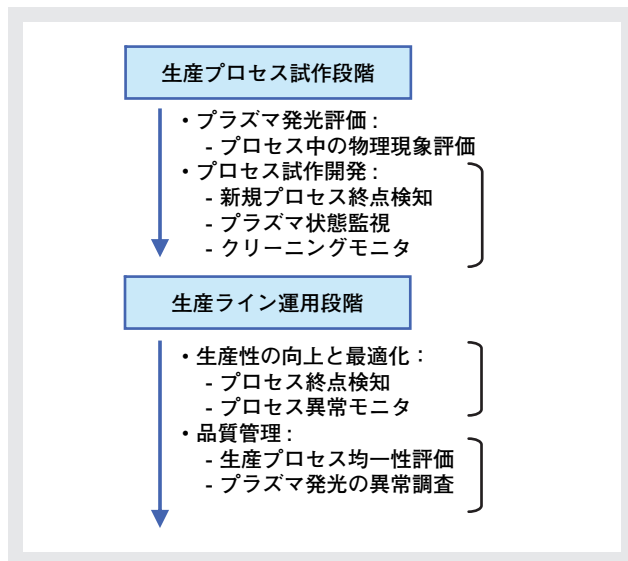


図2 プロセスアプリケーションの実用例

プロセス試作開発における新規プロセス終点検知条件作成

解析支援ソフトウェアにより、終点検知条件を作成するまでの解析環境を提供し、多角的な検証と解析時間の短縮を実現している。最初にプロセス中のプラズマ発光の時間変化の様子を、広帯域の分光器でスペクトルを連続して取得し、後のステップではこのデータに対するシミュレーションによる条件の最適化を行う。終点検知条件の作成は、次の3つのステップから構成される。

- 分光器で検知される全波長域から、プロセス中の信号変化の傾向が似ている発光波長を抽出し、解析する領域の限定を行うステップ。
- 最も変化量の大きい波長、演算窓条件を選択するステップ。
- 複数枚の同一プロセス結果を比較して条件の良否判断や、閾値設定を行うステップ。

これらのステップを一連の操作として、終点検知条件の

設定を行う。

A. 信号変化の分類

エッチングプロセス中は、200-800 nm範囲の分光スペクトル情報が約100 msの一定間隔で連続的にサンプリングされ、データ記録される。次にこの分光スペクトルは、各波長の時間変化データへ変換される。ソフトウェアがそれらのデータを、同様の特徴的な信号変化傾向を示すデータ群に自動分類する。エンジニアはプロセスの終点予想に対して、終点検知に利用できるプラズマ発光変化が含まれる波長の帯域の決定を行う。

B. 波長選択と信号強調アルゴリズム処理

波長帯域、時間域から解析区間を指定して、最も信号変化が大きい波長を自動抽出し、信号の総和平均データの算出を行う。このデータにRupture Intensityアルゴリズムによる信号強調の波形処理が行われる。

C. 閾値条件の設定

エンジニアは演算処理開始に対する閾値設定や、プロセス終点検知条件の閾値設定を行う。

図3に示すソフトウェア画面上で、複数回実行した同一プロセスの取得データに対して、信号比較と検知条件の閾値設定を行う。プロセスごとの変動分についての評価を行い、信号処理条件や終点検知条件が最適であるか検証を行う。

発光分光分析の専門的な知識がなくても、このような系統だった作業を段階的に行うことで、簡単な終点検知条件の作成を可能としている。

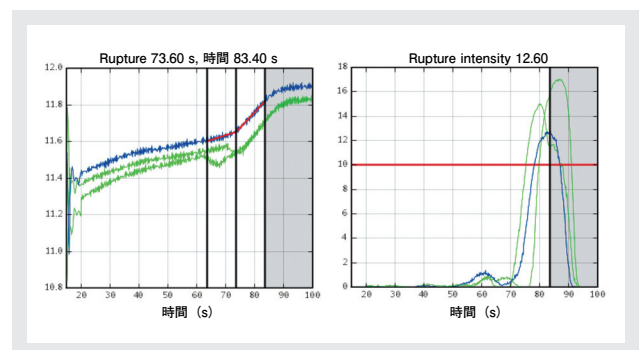


図3 複数データの信号比較と閾値設定画面

生産性の向上と最適化

実際の生産プロセスではプロセス担当のエンジニアにより、終点検知モニタの終点検知条件の調整が頻繁に行われている。これは製造装置間の個体差や、プロセス実行ごとに発生するプロセスチャンバ内の状態変化によって、プロセス中のプラズマの発光状態が変化することを、終点検知モニタの検知条件変更で対応しているためである。終点検知条件の調整後、保存されている過去のプロセスデータを用いて終点検知判定のシミュレーションを行い、最適化した終点検知レシピのプロセスに対する妥当性の評価を行う。そのシミュレーション結果の統計処理を行うことで、終点検知の安定性を確認する。図4の例では約600プロセス実行分の生産実績データに対して終点検知時間の統計を取ったものである。

これらの統計処理機能は、実際のプロセス結果に対して行うことができるので、半導体生産プロセスの定期的な歩留まりの評価ツールとしても使用することができる。

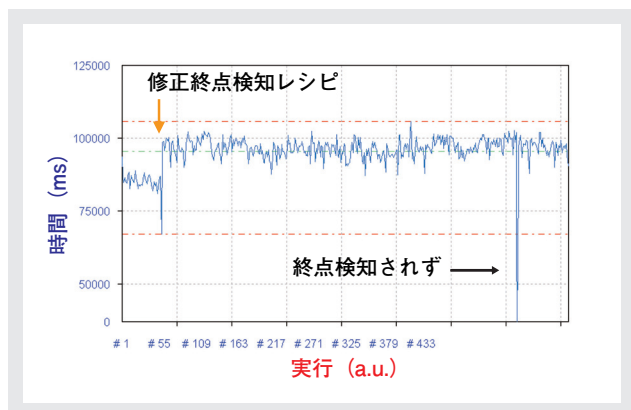


図4 終点検知時間の統計結果

品質管理におけるプラズマ発光の異常調査

生産プロセスの安定後においても偶発的なさまざまな理由から、プロセス異常が発生する場合がある。プロセスガスの供給量、RFパワー、圧力、ガスリーク等の要因が想定できるが、このようなプロセス異常を、プラズマ発光信号の変動として観測することができる。図5に挙げる例ではプロセスチャンバ内にN₂ガスリークが発生したことを仮定した場合の分光スペクトルで、N₂ガスによる固有ピークとして650 nm帯や750 nm帯のスペクトル変化が観察されている。このように終点検知時に記録されているスペクトルを評価することで、プロセス中のプラズマコンディション管理にも使用することができる。更に事前にこれらのプロセス異常状態をあらかじめ設定しておくこ

とで、生産プロセスのプロセス終点検知と、プラズマ異常の監視を同時に行うなどの応用が可能である。

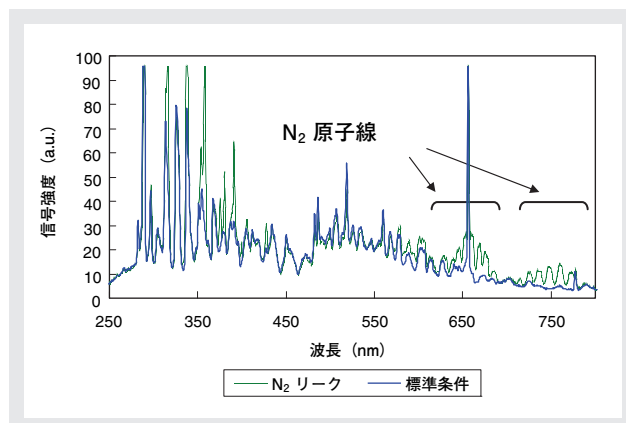


図5 プラズマコンディションモニタ・N₂ガスリーク例

おわりに

プラズマ発光分析技術を半導体製造プロセスの終点検知に使用するには、高性能な分光システム、測定と演算のリアルタイム性、及び高速かつ高感度な終点検知アルゴリズムが必要である。また解析支援ソフトウェアや統計解析機能のように、これまで時間を要していたプロセスレシピの最適化作業などの、煩雑なエンジニアリング作業の負荷低減のためのサポートソフトウェアも必要である。プラズマ発光分析終点検知モニタEV-140Cが、市場からのさまざまなプロセス管理要求に合致したプロセス終点検知モニタの総合ツールとして、半導体デバイス製造の生産性の向上やプロセスの改善に役立つことを期待している。

参考文献

- [1] HORIBA Jobin Yvon, OES Engineering & Dry Etch Process Control, 2008.



飯田 裕

Hiroshi Iida

株式会社堀場製作所
科学・半導体システム統括部