

高調波解析によるエッチング装置管理に関する基礎研究

Basic Study on Etching Equipment Control by Harmonics Analysis

辻 利則 金子 正光 林 俊司 門川 裕 森 規

半導体メモリの急激な価格低下に伴い、半導体メーカーではチップコスト削減のために微細加工技術の開発が行われている。しかし、それに伴いプロセスマージンは大幅に減少し、製造装置の微小な特性の変化が不良品を生み出す原因となっている。また、この生産性の低下がチップコストを引き上げる一つの要因となり、悪循環をもたらしている。

プラズマエッチング装置では、製造装置の微小な特性変化をプラズマ放電状態を直接モニタリングすることで可能となるが、チャンバ内へプローブを挿入する方法が一般的であり、プラズマ放電状態が変化する制約やそのためのリスクが多く生産現場での装置管理には適さないことが指摘されている。

そこで、本研究では間接的なプラズマモニタリング手法としてRF高調波モニタリング技術を提案し、装置状態変化やエッチング処理状態変化との相関関係を検討した。その結果、プラズマ放電状態の変化によってRF高調波の電圧、電流の変化とそれらの位相差、有効電力の変化を観測することで、間接的なプラズマモニタリングへの利用が可能であることがわかった。

キーワード：高調波、RF高調波、プラズマ、エッチング、プラズマモニタリング

目 次

- I まえがき
- II 実験装置と方法
- III 波形処理方法
- IV 実験結果
 - 1 IVセンサの基礎特性
 - 2 装置、エッチング処理状態変化に伴うRF高調波の変化
- V まとめ

I まえがき

半導体メーカーでは、半導体メモリの急激な価格低下に対処するために、チップコスト削減による微細加工技術の開発が行われ、また生産性、品質の向上が望まれている。そのため、加工過程におけるエッチング処理においては、一般に次の方法が考えられている。

- ① スループット向上
- ② PM (Preventive Maintenance) 周期最適化
- ③ トラブルによる装置停止時間の低減

ただし、これらの方法には以下に示すような制限があり容易に実施できないのが現状である。

まず、スループット向上に関しては、処理時間の短縮が一番の対策方法であるが、開孔面積の小さいコンタクトホール等のエッチングにおいて、プラズマ発光の十分なS/N比変化が得られない為、エッチング終点検出 (EPD) が使用できず、長めの処理時間を設定している。これはエッチング不足や下地膜の突き抜けに対するマージン不足の一因にもなっており、また高エッチングレート条件もEPDなしでは安心して使えない。生産性向上ならびにプロセスマージン確保の為には安定した終点検出技術が必須とされている。

次にPM周期最適化については、最近の同一装置での多工程の処理や少量多品種のエッチング処理を行うことが多い為、PM周期を演繹的に求めにくくなっており最適化は困難である。そのため生産技術者は、PMの予測時期を早めに設定しており、PM工数や消耗パーツの増大を余儀なくされている。逆の場合では、予想もしないデポの増大やチャンバの劣化により、パーティクルや異常放電などによる品質トラブルを招き、大きな生産損害を被ることになる。また、予想もしない装置トラブルでは、製品品質に大きな影響を与え、生産性を大幅に低下させ、原因を特定するまで装置の使用は見送られることになる。これらの観点から、トラブルによる装置停止時間の低減化には、装置の異常と正常を判断するモニタリング技術の開発が急務とされている。

そこで、本研究では、生産性の向上で課題とされる以上の問題を解決するために、間接的なプラズマモニタリング手法としてRF高調波モニタリング技術を提案し、装置状態変化やエッチング処理状態変化との相関関係を調べ、その有効性に関し確認できたので、以下に報告する。

II 実験装置と方法

図1に(a)負荷としてダミーロード (抵抗: 50Ω) を用いた場合、(b)プラズマエッチング処理の場合のそれぞれの実験配置図を示し、使用したプラズマエッチング装置を写真1に示す。電圧、電流波形の計測には、Scientific Systems社製のIVセンサ (S/N:09402) を用いた。IVセンサの電圧、電流の測定可能範囲はそれぞれ $20V_{rms}$ ~ $2kV_{rms}$ 、 $0.5A_{rms}$ ~ $20A_{rms}$ である。使用したRF発振器の周波数は $380kHz$ であり、通常使用時の出力は $800W$ である。また、使用したガスはAr、

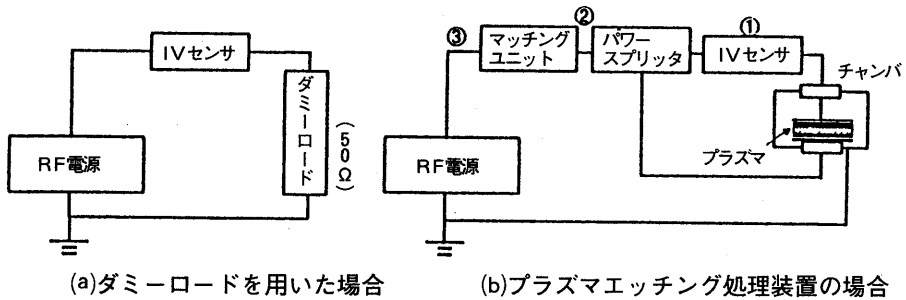


図1 実験装置配置図

CF₄、CHF₃である。本実験ではサンプルウエハとしてシリコンウエハと酸化膜ウエハを用いている。プラズマエッチング時のIVセンサの接続箇所は、図1(b)に示す①②③としたが、通常の計測ではチャンバとパワースプリッタ間の①に接続している。なお、IVセンサで検出された信号は、オシロスコープ(ソニーテクトロニクス TDS3000)で測定し、コンピュータに転送して解析した。

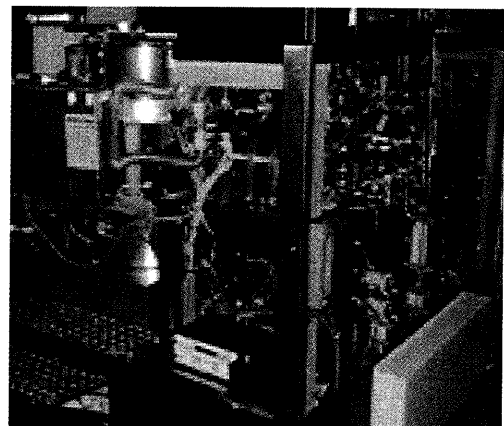


写真1 エッチング装置

III 解析方法

IVセンサで計測した電圧、電流波形の解析は、まず高調波のスペクトル強度分布を求めるために周波数解析を行った。図2に実験で観測される電圧、電流波形例を示し、図3にそれぞれの波形のスペクトル強度分布例を示す。図2からわかるように波形は正負対称波となり、図3に示すとおり偶数調波は小さくなるため、本研究ではプラズマ状態変化を示すと思われる奇数調波の基本波(380kHz)から第7調波までの高調波の解析を行った。

解析は、電圧、電流波形の各調波のスペクトル強度、またプラズマの状態変化に伴い電圧、電流の各調波の位相差が変化すると考え、各調波の位相差も求めている。位相差の算出は、同時に計測した電圧、電流の波形を周波数解析し、それぞれの各調波の位相を求め、それらの差(電圧の位相-電流の位相)を求めた。なお、周波数解析の精度を高めるために周波数解析を行うデータ数は、1周期のデータの丁度整数倍となるようにした。

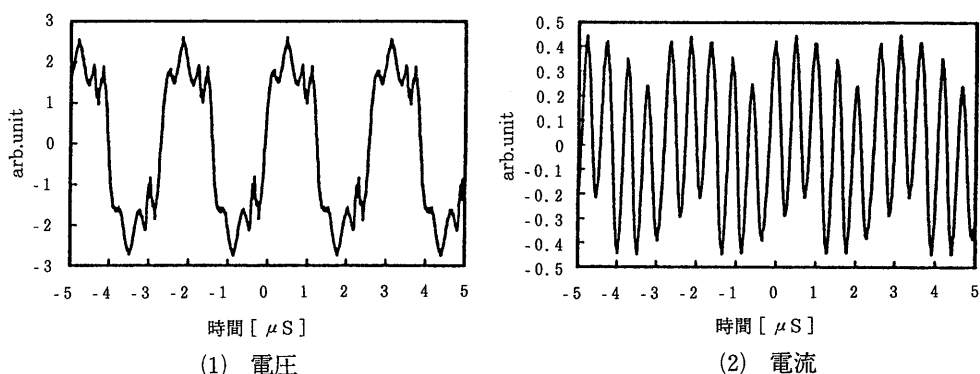


図2 電流、電圧波形例

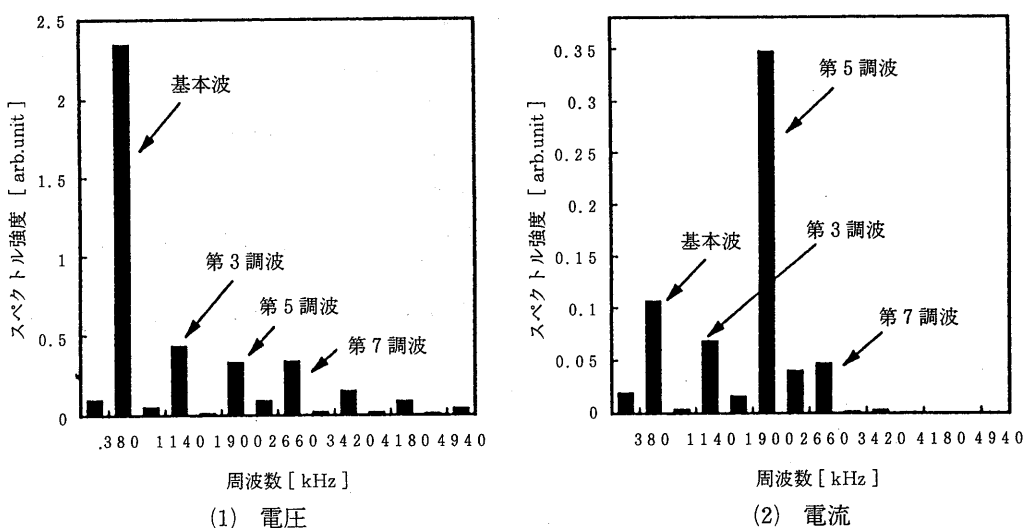


図3 電圧、電流のスペクトル強度分布例

IV 実験結果

1 IVセンサの基礎特性

IVセンサの取付による電圧、電流の変化、またその特性を確認するために負荷にダミーロード（抵抗 $R=50\Omega$ ）を用いて、RF発振器の出力を50W～800Wまで50W間隔で変化させ、そのときの電圧、電流波形を計測した。図4、5に印加した出力に対する電圧、電流のスペクトル強度と基本波の位相差の変化、IVセンサで計測された電圧、電流の値から算出した出力の変化をそれぞれ示す。図より、電圧、電流は印加した出力に対して増加し、位相差は初め 66° 程度あり出力の増加と共に徐々に減少が見られる。計測された電圧、電流の値から算出した出力は、印加した出力とほぼ比例関係であることがわかる。使用したケーブルの特性インピーダンス、負荷インピーダ

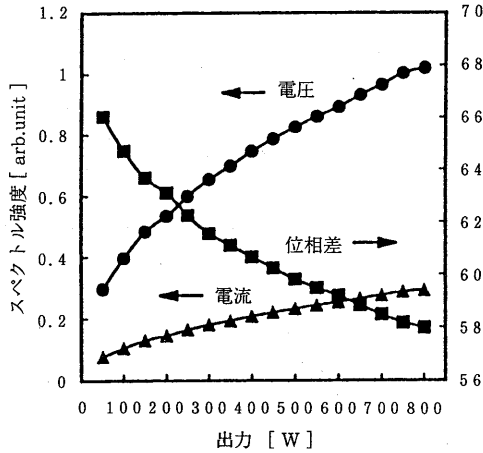


図4 印加出力に対するスペクトル強度と位相差の変化

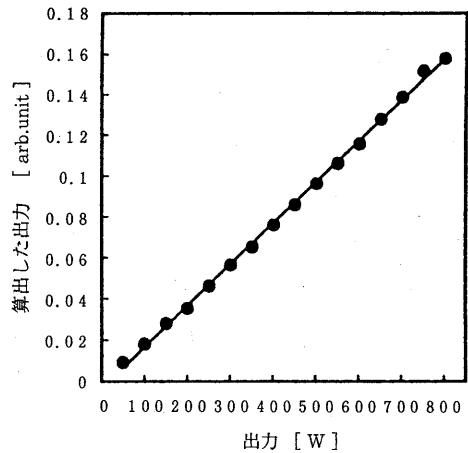


図5 印加出力と算出した出力の関係

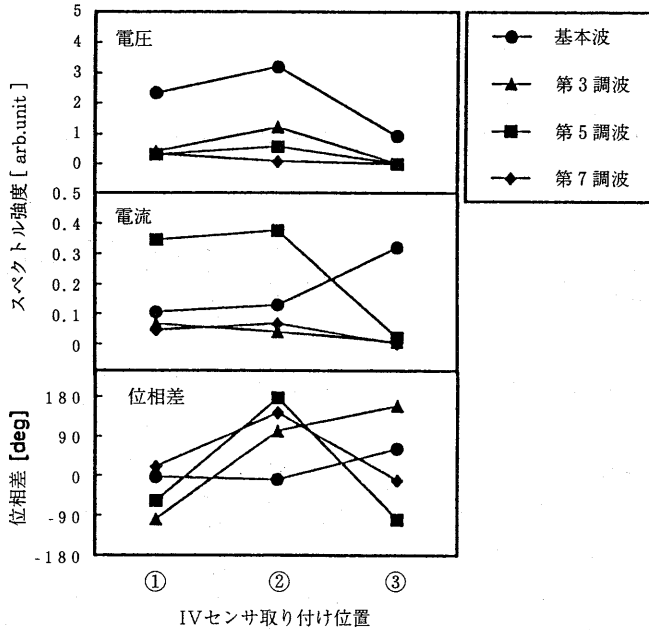


図6 IVセンサ各取り付け位置での高調波の変化

ンスは共に50Ωのものを使用しており、IVセンサの取付による反射波はほとんど生じないものと考えられ、印加した出力と算出した値がほぼ比例していることから、IVセンサの取付によるプラズマエッチング装置への影響は小さいことがわかった。また、計測される電圧、電流の絶対値は明らかにできないが、計測した電圧、電流の波形から相対的な評価が可能であることがわかった。

次にIVセンサを図1中の①②③に設置した場合の各調波の電圧、電流、位相差を図6に示す。チャンバ内のプラズマから発せられる高調波により、チャンバに近い位置①②では電流の第5調

波が大きく、電流はマッチングユニットとパワースプリッタの間②において高調波が大きくなった。③の位置においては、少しの高調波は観測されるがマッチングユニットの容量成分によってほとんどの高調波が吸収されている。電圧、電流の位相差に着目すると、位相差が 90° 以内では高調波電力は電源側から負荷側へ、位相差が 90° 以上では負荷側から電源側に向かって流れ込むため¹⁾、負荷側のチャンバより生じていることがわかった。

2 装置、エッチング処理状態変化に伴うRF高調波の変化

プラズマ状態変化に伴う高調波の変化を把握するために、印加するRF発振器の出力、チャンバ内の圧力を変化させることでプラズマ状態を変化させ、IVセンサにより電圧、電流を計測した。

図7に(a)RF発振器の印加出力、(b)チャンバ内の圧力を変化させたときの電圧、電流の各調波のスペクトル強度、位相差の関係を示す。図7(a)より、RF発振器の出力増加に伴い、電流の第3調波の減少、他の周波の増加が見られ、電圧では第5調波が他の周波に比べ大きな変化が見られた。図7(b)からは、電圧の第3調波で特に大きな変化が見られ、電流では第3、5調波が増加し、基

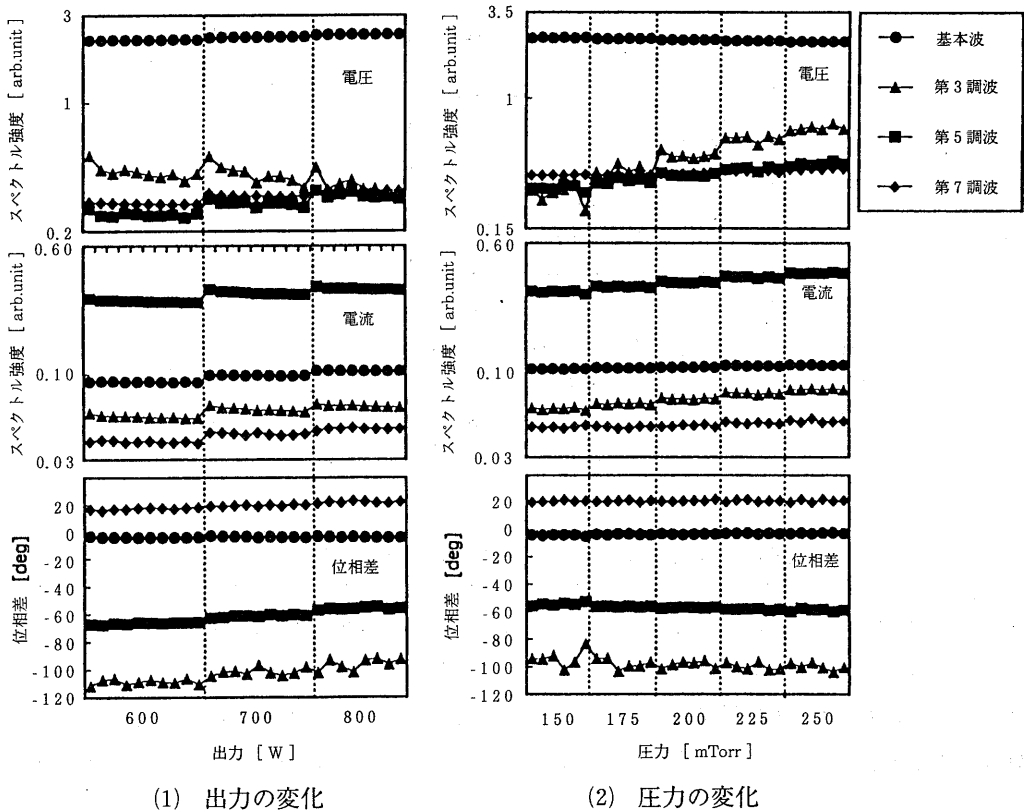


図7 プラズマ状態変化に対する高調波の変化

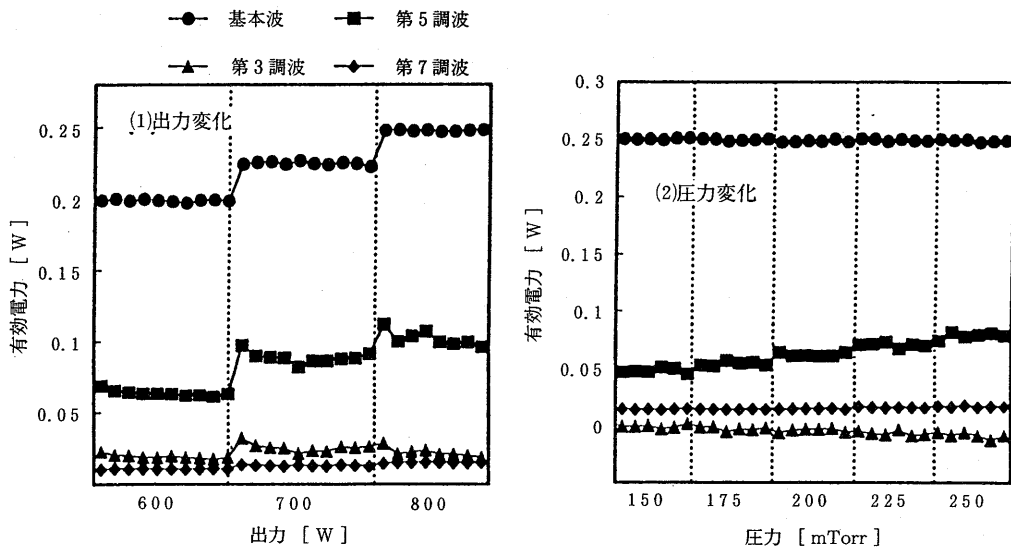


図8 プラズマ状態変化に対する有効電力の変化

本波、第7調波では著しい変化は見られなかった。

次に各調波から求める有効電力は電圧、電流、位相差の積となるため、各調波の変化分をうまく捉えることができると考え、図8に示すように(1)出力、(2)圧力の変化に対する各調波の有効電力の変化を計算した。図8(1)より出力の変化に対しては、基本波と第5調波がほぼ比例して増加し、圧力の変化に対しては、基本波、第3調波の減少、第5調波の増加が見られた。

図9には酸化膜エッチング過程における電圧、電流の各調波のスペクトル強度、位相差の時間変化を示す。酸化膜のエッチングの進行中においては、ほとんど高調波の変化は見られないが、エッチング終了と思われる開始から80秒付近で急激に変化する高調波が観測された。電圧、電流共に、第7調波の減少、第3、5調波の増加が見られ、位相差においては第3調波が大きく変化した。また、エッチングの終了を示

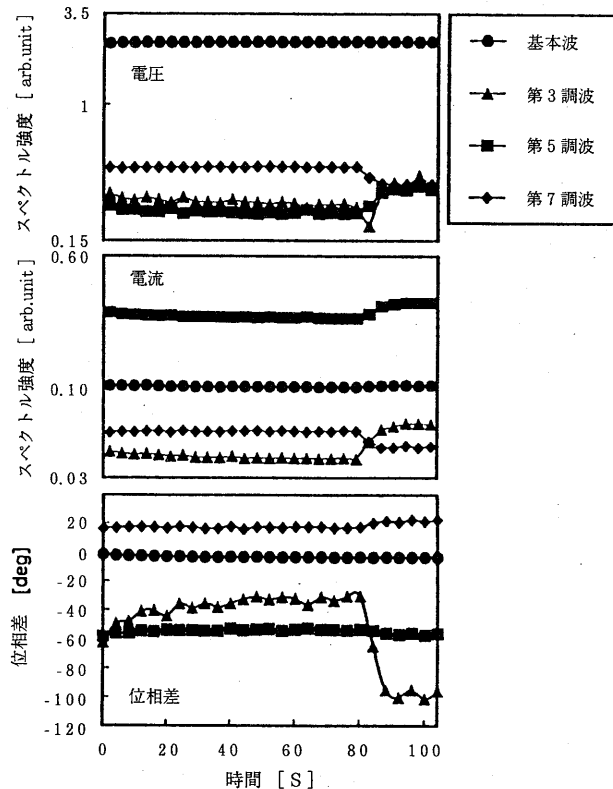


図9 酸化膜エッチング時の高調波の変化

表1 各実験条件における高調波の変化

| 実験条件 | 項目 | 基本波 | 第3調波 | 第5調波 | 第7調波 |
|---------------------|------|------|-------|------|------|
| 出力変化 | 電圧 | 小(増) | 中(減) | 中(増) | 中(増) |
| | 電流 | 小(増) | 中(増) | 中(増) | 小(増) |
| | 位相差 | | 中(増) | 小(増) | 小(増) |
| | 有効電力 | 大(増) | 中(増) | 大(増) | 小(増) |
| 圧力変化 | 電圧 | 小(減) | 大(増) | 小(増) | 小(増) |
| | 電流 | | 中(増) | 大(増) | 小(増) |
| | 位相差 | | 小(変動) | 小(減) | |
| | 有効電力 | | | 中(増) | |
| 酸化膜 エッチング 終了時 | 電圧 | | 中(増) | 中(増) | 中(減) |
| | 電流 | | 大(増) | 中(増) | 中(減) |
| | 位相差 | | 大(減) | | 小(増) |
| | 有効電力 | | 中(減) | 中(増) | 中(減) |

すと思われる電圧、電流、位相差の各調波の値は、シリコンウエハで行った標準の状態とほぼ同様の値になることがわかった。

本実験の三つの条件で計測した、各調波の電圧、電流、位相差、有効電力の変化の傾向をまとめたものを表1に示す。ここで、表に示す大、中、小の表現は各調波の変化量を比較するために示したもので、括弧内の増、減はそれぞれの値の増加、減少の傾向を示している。表1より、出力変化では電圧、電流のほとんどの高調波で出力の増加と共に増加傾向であることがわかり、電圧の第3調波では減少傾向も見られることもわかった。圧力の変化では有効電力の第5調波での増加が顕著に見られ、他の実験条件と異なる特性を示すことがわかった。酸化膜エッチングウエハを用いた実験では、位相差、有効電力の第3調波での減少傾向の特性を示すことがわかった。今後、数多くの実験データの蓄積が必要と思われるが、本実験の結果からプラズマの状態変化によって電圧、電流の各調波のスペクトル強度、位相差の変化が異なることがわかり、各調波の変化を計測することで、プラズマモニタリングが可能であることがわかった。

V まとめ

本研究では、間接的なプラズマモニタリング手法としてRF高調波モニタリング技術を提案し、装置状態変化やエッチング処理状態変化との相関関係を検討した。以下に本研究で得られた結果を示す。

(1)装置状態の変化として行ったRF発振器の出力変化、チャンバ内の圧力の変化の実験で、高調波の計測により装置状態変化のモニタリングが可能であることがわかった。

(2)エッチング処理状態変化に伴う高調波の変化を見るために行った酸化膜エッチングの実験に

高調波解析によるエッチング装置管理に関する基礎研究 (辻 利則)

においては、エッチングの終了時に各調波で大きな変化が見られ、エッチング処理状態変化についてもモニタリングが可能であることがわかった。

今後は、実際の現場で使用できるプラズマモニタリングシステムを開発するために装置状態変化、エッチング処理状態変化による高調波変化の発生メカニズムをプラズマ状態変化を模擬する等価回路の作成等により行い、様々な状態変化と高調波の相関関係を導く必要がある。

謝 辞

本研究の実験に際し、実験装置、器具等を使用させて頂いた神奈川県八王子市の沖電気工業(株)の方々に謝意を表す。なお、本研究の実験の一部は本学の実験講義室を使用し、波形解析処理においては本学の大学共同研究情報機器を利用したことを記す。

最後に、本研究は、宮崎沖電気株式会社と宮崎公立大学の産学共同研究費の援助を得たことを記す。

参考文献

- (1)「工場電気設備における高調波の現状と対策」、電気学会技術報告(Ⅱ部)、第396号、pp.12-17

