

プラズマ異常放電監視法開発

八坂 三夫^{*1}、北村 智行^{*1}、田間 政義^{*1}、竹下 正吉^{*1}、児玉 昭和^{*2}、岡村 浩治^{*2}、
上杉 文彦^{*3}、伊藤 奈津子^{*3}、板垣 洋輔^{*3}、萩原 宗明^{*4}、宮川 隆二^{*5}、浅野 種正^{*6}

^{*1}(株)東京カソード研究所、^{*2}NEC九州(株)、^{*3}NECエレクトロニクス(株)

^{*4}電子応用機械技術研究所、^{*5}熊本県工業技術センター、^{*6}九州工業大学

0.はじめに

半導体製造の前工程においては、エッチング装置、スパッタリング装置、アッシング装置、CVD装置など、プラズマを応用した製造装置が基幹部分を担っている。ひとつの工場だけでも、数100台のプラズマ装置がある。しかし、プラズマプロセスは、ウェハ処理を行うチャンバ内で異常放電が発生し、製品歩留まりや生産性に悪影響を与えるという問題がある。今後、ウェハレベル・チップサイズ・パッケージの普及による後工程でのプラズマ利用、マイクロマシンの実用化、FPD生産の拡大により、半導体以外の分野でも、プラズマ装置の利用台数は確実に増加し、更に、半導体の微細化、FPDの大型化、半導体以外の材料の利用、少量多品種によるレシピ数の増大により、経験に基づいた従来型の異常放電対策が難しくなり、深刻な問題に発展すると考えられる。

我々は、異常放電の即時検出方法を確立することで、その被害を最小化することを狙い、H10年からH16年にかけて研究を行ったので、その内容について説明する。

1.異常放電

異常放電にもいろいろな形態があるが、我々の研究では、マイクロアークと称される異常放電を対象としている。マイクロアークは、装置内の局所部分で突発的に発生し、短寿命且つ、放電エネルギーは小さいものの、パーティクル発生、被処理ウェハ表面の損傷、デバイスの絶縁破壊、金属汚染など、深刻な問題を引き起こす。

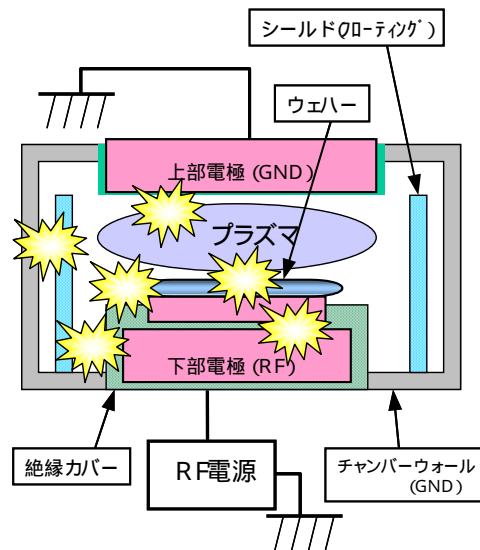


図1 異常放電発生部位とその要因
プラズマチャンバのあらゆる部位で、異常放電は発生している。

図1は、プラズマ装置における異常放電発生部位とその要因を示している。最も普及しているRF電源タイプのプラズマ装置は、原理的に異常放電は起こらないとされている。しかし実際は、上部電極表面、ウェハ端部、ウェハ表面、シールド・ウォール間、シールド下部電極間、下部電極内部など、プロセスチャンバを構成する殆どの部分で起こっている。異常放電の発生要因としては、部品消耗、絶縁性低下、デバイス構造、ウェハ端部構造、チャンバ内堆積物等が考えられている。プロセスでは、大気開放後、放電ON/OFF時、放電電力が大きい場合、直流バイアスをかけた場合などに起こりやすいことが知られている。しかし、異常放電が発生するメカニズムは未だに明らかにされていない。

3. AE法による異常放電の検出

2. 異常放電による被害事例

異常放電による被害は、ウェハ製品自体が使用不能になる直接的な被害と、チャンバ部品の損傷や装置停止など生産装置（或いは工程）への被害がある。実際の生産現場では、異常放電が発生した時点で気づかれることは無く、歩留まり悪化やウェハ検査でのパーティクルなど、2次的被害が認識されてからやっと異常放電が疑われ始める。つまり、異常放電発生からプロセス復帰までには、ウェハに付着した物質の分析、チャンバ構成部品の詳細な検査、部品交換、修理など、多大な時間と作業が費やされる。

図2は、RIE酸化膜ドライエッチャにおいて、異常放電のスパークによりウェハ端部のタングステン膜が溶融し、ウェハへ飛散した例である。他にも、チャージアップによる異常放電により、ウェハ表面がクレタ状に破壊された事例や、スパークにより電極母材アルミが溶融してウェハへ飛散し、アルミ配線間をショートした事例などがあり、装置やウェハプロセスが変わると、被害の状況も多種多様に化する。被害を受けたウェハは、破棄するしかなく、それまでにかけた時間とコストは全て無駄になる。これらは、確認されたものだけであるので、潜在的な被害数は、更に大きいと考えられる。

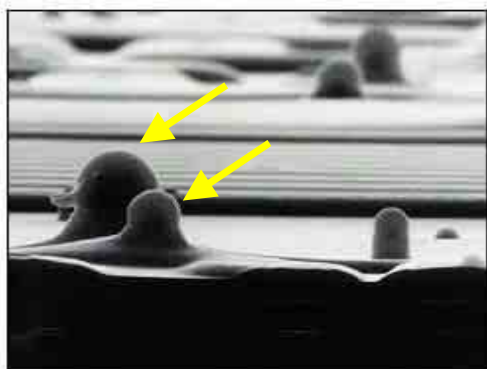


図2 異常放電によるウェハへの被害例
矢印は、異常放電のスパークによりウェハ端部のタングステン膜が溶融しウェハへ飛散した様子。

異常放電の検出方法としては、プラズマインピーダンス変動、電極の電流・電圧変動、高調波強度、発光など、異常放電発生に伴う過渡的な電磁気的変化を検出する例が多い。しかし、確実性、簡便性、位置特定性など実用上の問題があった。そこで、我々は視点を変え、電磁気的方法ではなく、固体の超音波により異常放電を検出するという全く新しい方式¹⁻⁵⁾を考案し、検証試験を実施した。

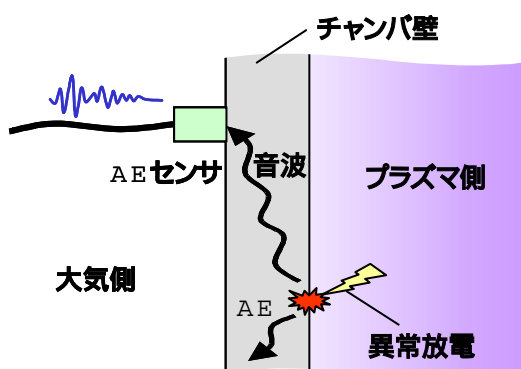


図3 超音波による異常放電検出原理

異常放電によってAE現象がおり、その超音波がチャンバ壁全体に伝播する。

図3は、プラズマチャンバの外側に取り付けた超音波センサで、チャンバ内部の異常放電を検出する原理を示す。チャンバ内で起こった異常放電によって、チャンバ壁が塑性変形あるいは破壊され、それまで貯えられていたひずみエネルギーが解放されることでAE（アコースティックエミッション）が起こり、超音波が発生すると考えている。つまり、異常放電はチャンバ内で起こるが、発生した超音波はチャンバ壁全体に伝播するため、チャンバの大気側に取り付けた超音波センサでも検出可能となる。

図4は、RIEエッチング装置にAEセンサをとりつけて、実際に超音波信号を検出した例を示す。10msの間に3回バースト状の信号が観測されているが、電氣的計測を同時に行う

ことで、これらバースト信号が、異常放電発生と完全に同期していることを確認している。それぞれのバースト信号の持続時間は、約 2 ms であり、異常放電が連続して発生する場合でも、1 ms 程度の分離分解能を有することがわかる。チャンバに複数のセンサを取り付けた場

合には、各センサに到達する超音波には通常数 10 μ s 程度の時間差が観測される。これは、5 km/s 程度の伝播速度を持つ超音波が、発生地点から各センサに至るまでの到達時間差に相当し、構造物の監視と同様、AE 発生地点を標定可能であることがわかる。

AE 法による異常放電検出方式は、

- その場で検出できる
- 常時モニターが可能
- プラズマプロセスに影響が無い
- (チャンバ外壁への設置のみ)
- 発生位置の標定が可能

といった特徴を有し、現在のプラズマプロセスに適応できる極めて有用な検出手段である。

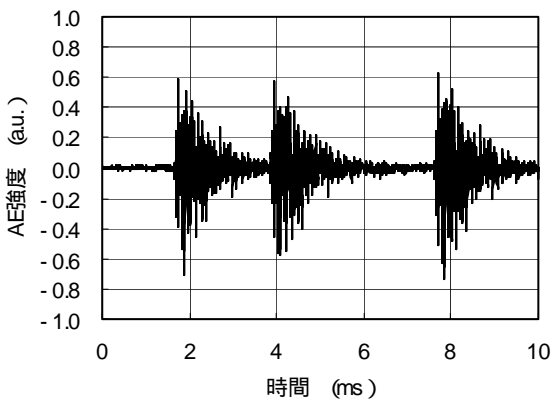


図4 異常放電による超音波の検出事例
チャンバの大気側壁面に貼り付けたAEセンサによって、異常放電と完全に同期した超音波信号が検出された。

4. 窓型プローブによる異常放電の検出

我々は、プラズマ状態の変化を検出可能な窓型プローブ^{6,7)}の開発も行った。本方式は、プロ

セスチャンバの既存の覗き窓に簡便に装着可能で、何らチャンバの改造は必要としない。そのため、AE法同様、

- その場で検出できる
- 常時モニターが可能
- プラズマプロセスに影響が無い。
- (チャンバのぞき窓への設置のみ)
- といった特徴を有する。

図5は、RIE装置にて、AEセンサで検出された超音波信号(b)と窓型プローブによって検出されたパルス信号(a)を示す。窓型プローブ信号が急激に立ち下がった後、若干遅れてAEセンサで超音波が検出されている。この時間差は、超音波の伝播時間と考えることができ、窓型プローブが、異常放電に伴うプラズマ変動を瞬時に検出することを示している。

AE法による検出方式単独では、音波伝播が悪い部位で異常放電が発生した場合、検出困難な場合があるが、本方式と組み合わせることで、チャンバ全体を高い信頼性で監視可能となる。

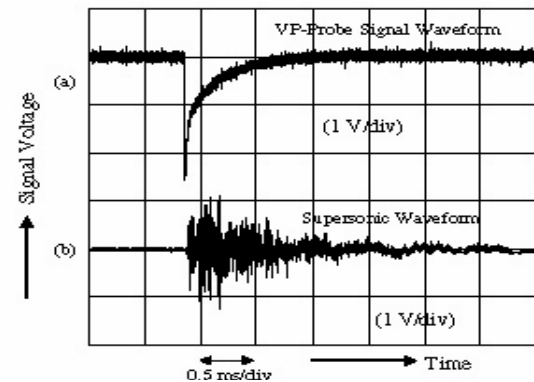


図5 異常放電発生時の窓型プローブ信号とAEセンサ信号

窓型プローブ信号が急激に立ち下がった後、若干遅れて超音波が検出される。

5. 異常放電監視システム

AE法と窓型プローブ法による異常放電検出技術を元に、図6に示すような異常放電監視システムを構築した。この監視システムは、窓型プローブにてプラズマ状態の変動を監視すると同時に、チャンバ壁に点在させた高感度な専用AEセンサによって、異常放電を検出する。

図7は、実際のプラズマチャンバの外側に、A Eセンサを貼り付けた様子を示している。センサは、直径32mm、高さ35mmと小さく、チャンバ外壁の任意の場所に貼り付けることができる。また、装置とプロセスにも全く影響を与えないため、たとえウェハ処理中であってもセンサを取り付け可能である。

異常放電の実時間観測性は、異常放電と機械振動ノイズの分別時間で決定されるため、その前処理となるA E信号の特徴量抽出は、ハードウェアによる高速化を行っている。

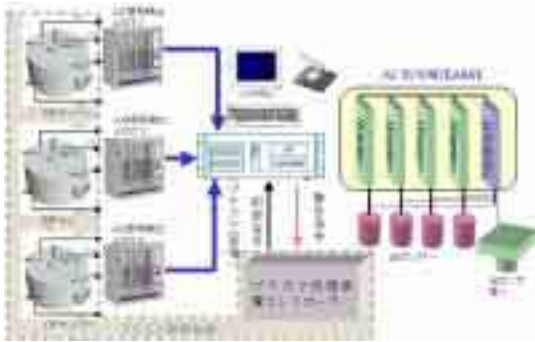


図6 異常放電監視システム

チャンバの外側に複数のA Eセンサを点在させて異常放電を常時監視し、専用ソフトにて発生位置を評定する



図7 A Eセンサを貼り付けた様子

A Eセンサは、数センチ程度と小さく、また、ウェハ処理中でも取り付け可能。

図8は、本事業で開発した異常放電検出ボードである。FPGAを使用することにより、特徴周波数成分、遅れ時間、立ち上がり時間、波高値等の実時間抽出を実現している。また、A E信号波形のメモリ機能を有しており、詳細な

波形解析も可能である。

本システムは、ある特徴を持ったイベントの発生頻度の推移を表示させることも可能である。図9の赤線は、高い周波数成分を多く含む超音波信号の発生頻度をプロセス単位で示している。発生頻度が高いプロセスでは異常放電が起きていると考えられ、さらにプロセス中の何時にどのような異常放電が発生していたか解析することができる。



図8 異常放電検出ボード

検出した信号をハードウェアで処理することで、A E信号と機械振動を瞬時に判定する。



図9 異常放電発生頻度の時間変化例

ある特定の特徴を持つ信号が、通常より増加した場合異常と判断できる。

各A Eセンサに到達する超音波には、時間差が認められることを先に述べたが、本システムは、到達時間差から異常放電発生位置を標定する機能を持っている。発生点の標定は、A E信号検出ボードによって抽出された複数センサ間の信号到達時間差、チャンバ寸法、センサ取り付け位置、音速から、本研究で開発した専用ソフトウェアによって計算される。この機能によ

り、異常放電発生後の迅速且つ適切なメンテナンスの実施や、発生原因の早期究明が実現可能となる。

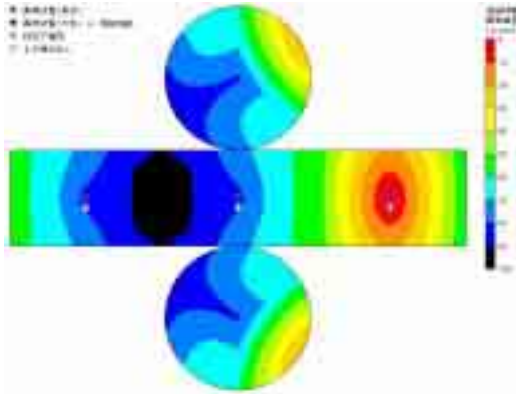


図 10 異常放電発生位置の表示例

チャンバの展開図上に、異常放電発生位置の標定結果を視覚的に表示する。

図 10 は、異常放電発生位置の標定結果をディスプレイ上に表示させた例である。プラズマチャンバの 2 次元展開図面上に、異常放電が発生した確率の高い箇所を赤色、低い箇所を黒色といった具合に視覚的に表示する。この例では、異常放電がチャンバ壁で発生したことが一目で判断できる。

6. 異常放電検出とパーティクルとの関係

装置内で発生するパーティクルは、異常放電によっても発生することが、ウェハ検査の結果などから推測されていた。しかしながら、実用的な異常放電検出方法が無かったために、異常放電とパーティクル発生を実時間で調べたデータは存在しなかった。そこで、今回開発した異常放電監視システムを使用して、両者の関係を実時間で探った。

図 11 は、異常放電とチャンバ内パーティクルの実時間観測を行うための実験系を示す。プラズマ装置は、平行平板型のドライエッチング装置であり、異常放電は異常放電監視システム、パーティクルはレーザ光散乱法パーティクル観測装置により計測した。プラズマの発生回数は、窓型プローブで観測されたパルス数とした。ウ

ェハは、10 枚を 1 ロットとしてロット単位で連続処理した。

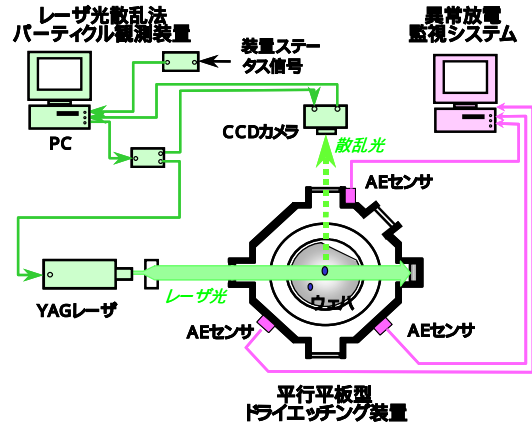
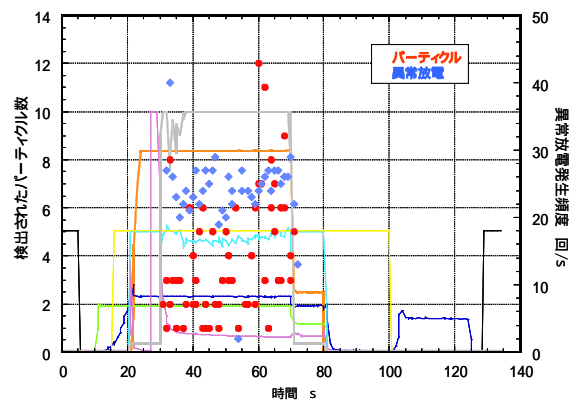
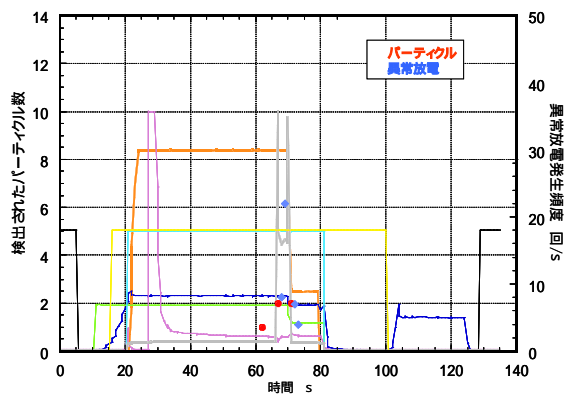


図 11 異常放電とパーティクルの関係確認用実験系

異常放電は異常放電監視システムにより、また、パーティクルは、レーザ光散乱法パーティクル観測装置により実時間観測を行う。



(a)



(b)

図 12 異常放電とパーティクルの関係 (a) は 5 枚目、(b) は 7 枚目のウェハ

図12(a)は、5枚目ウェハを処理した場合の計測結果を示す。RF電源が投入され、ウェハ処理が始まると同時に、異常放電が激しく発生していることが分かる。また、異常放電発生頻度が高い間、パーティクルも多数観測されている。図12(b)は、7枚目のウェハの場合を示す。ウェハ処理が始まって異常放電は発生しておらず、パーティクルも観測されていない。しかし、ウェハ処理が終わる直前、RFパワーが低下する時期に、異常放電とパーティクルが同時に観測されている。異常放電発生頻度が高い場合に、チャンバ内のパーティクル量が急増する現象は再現性があり、両者が深く関係していることが分かる。

しかしながら、図13に示すように、異常放電は下部電極の周辺で発生しているにもかかわらず、パーティクルは上部電極近傍で観測されるという、興味深い点も確認された。異常放電によってチャンバ内表面の堆積物が剥離するとすれば、パーティクルに作用する力と運動、逆に、剥離した堆積物が異常放電発生にどのように影響するかなど、機構の解明が今後の課題である。

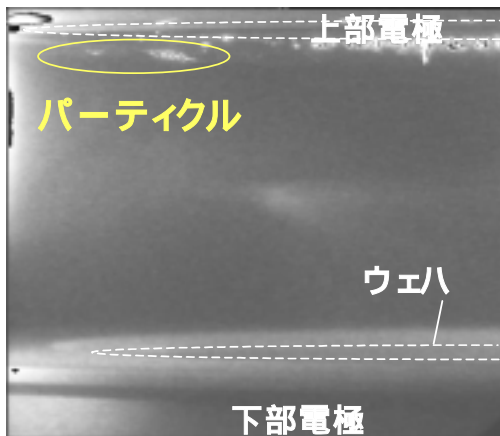


図13 チャンバ内で実時間観測されたパーティクル
異常放電は下部電極周辺で起きているにもかかわらず、パーティクルは上部電極近傍で観測される。

7.装置内状態との関係

異常放電監視システム開発の最初の時点で、意図的に異常放電を起こす手段を検討し、プロセスチャンバを大気開放した直後や、ウェハ裏面を水分を含ませたウェスで拭いた場合に異常放電が起こりやすいことを見出した。このことは、チャンバ内の水分が異常放電に影響を与えることを連想させる。そこで、異常放電発生頻度と、チャンバ内水分量を実時間計測し、両者の関係について調査を行った。

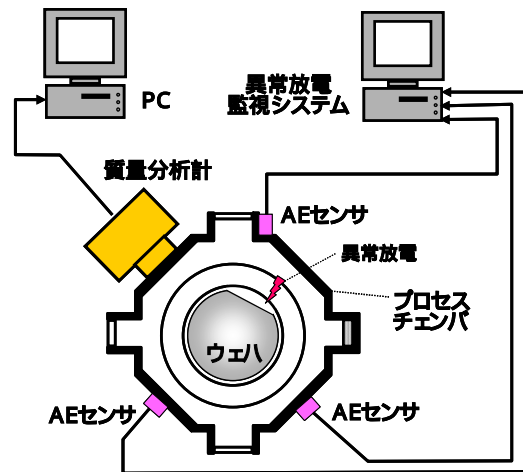


図14 異常放電と水分量の実験系

異常放電は開発した異常放電監視システムにより、プロセスチャンバ内のガス雰囲気は四重極質量分析計により実時間計測した。

図14は、実験システムの概略図である。プラズマ装置は、平行平板型のドライエッチング装置で、異常放電は開発した異常放電監視システムにより、プロセスチャンバ内のガス雰囲気は四重極質量分析計にて計測した。ウェハは、10枚を1ロットとして3ロット連続で処理した。

結果を図15に示す。左列図中の点線は、質量分析計による水分分圧に比例した信号強度の変化の様子、右列図中の三角はウェハ1枚の処理中に計測された異常放電の発生回数を示している。左右の図はそれぞれ同時期に計測された。

右上段図中、ウェハ1枚目から4枚目までの異常放電発生回数がグラフ上にプロットされて

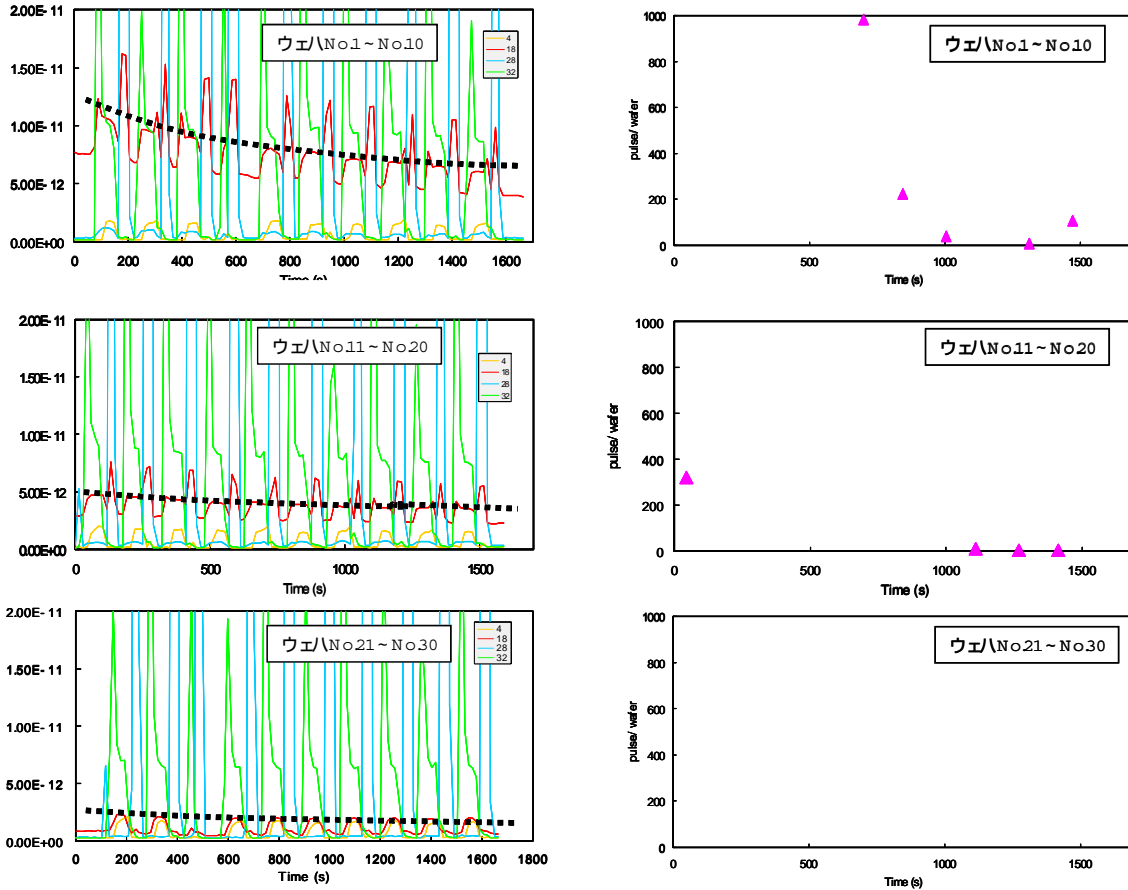


図 15 異常放電と装置内水分量の関係

チャンバ内の水分分圧が高い程、異常放電の発生頻度も高い

いないが、これは激しい異常放電によりプラズマ装置が停止したためであり、実際には相当数発生している。全体の傾向としては、上段から下段に向かい、つまり、処理枚数が増えるにつれ、水分量を示すベースラインが減少し、これに対応して、異常放電の発生頻度も上段から下段に向かい減少している。つまり、チャンバ内の水分分圧が高い程、異常放電の発生頻度が高くなることを示している。ウェハ処理数の増加に伴い、水分分圧が減少する理由としては、プラズマ放電によりチャンバ内部品に吸着した水分が脱離し、排気されることを繰り返すことで、チャンバ内水分が減少するためと考えている。

今回開発した異常放電監視システムと、チャンバ内水分分圧計測装置を組み合わせることで、チャンバ内水分量が、異常放電発生に関わっていることが明らかになった。このことは、チャンバ内水分量から異常放電発生を予知できる可能性を示唆している。

8.まとめ

チャンバの大気側に取り付けた複数のAEセンサ、及び、チャンバの覗き窓に取り付けた窓型プローブにて異常放電を検出する全く新しい異常放電監視システムを開発した。本監視システムは、

- 1) リアルタイムで常時監視可能
- 2) プラズマの発生方式を問わない
- 3) プラズマチャンバに改造が不要
- 4) プラズマプロセスに影響が無い
- 5) 異常放電の発生部位を標定可能

といった、優れた特徴を有している。本システムを、半導体製造工場のプラズマ処理装置に取り付けることにより、ロット単位のウェハの被害を、1枚のみの被害に低減できる他、異常放電発生後の迅速且つ適切なメンテナンスの実施、

異常放電発生原因の早期究明に貢献できると考えている。

開発した監視システムの応用として、装置内状態監視システムと組み合わせて実時間観測した結果、これまで経験的にしか知られていなかった異常放電と装置状態の関係を、定量的に示すことができた。これらの結果は、単なる異常放電の事後検知に留まらず、異常放電による二次的被害の予測、或いは異常放電発生の予知という、一歩進んだ異常放電対策の可能性を示唆した。

今後の予定としては、現場の要求を最大限に取り入れて、異常放電監視システムの完成度を高め、事業化推進に努力していく。また同時に、H15年度とH16年度にかけて経済産業省の地域新生コンソーシアム事業に採択されたのを受け、「プラズマ処理装置向け異常放電抑止システムの開発」に取り組み、異常放電監視技術を核にした、異常放電発生原因の解明と究極の異常放電対策である抑止の実現に取り組んで行く。

in Plasma Processing Equipment」, Jpn.J.Appl.Phys.Vol.42(2003)pp. L157 L159

- 7) 「窓型プローブ、プラズマ監視装置、及び、プラズマ処理装置」, 特願 2002-122240

参考文献

- 1) 「Detection of Supersonic Waves Emitted from Anomalous Arc Discharge in Plasma Processing Equipment」, Jpn.J. Appl. Phys. Vol. 39(2000)pp. L1286 -L1288
- 2) 「プラズマ異常放電検出装置及びその検出方法」, 特願 2000-89840
- 3) 「異常放電検出装置、異常放電検出方法、及び、プラズマ処理装置」, 特願 2001-370610
- 4) 「半導体製造プラズマ装置の異常放電と超音波(プラズマ異常放電の検出と部位標定)」, 超音波TECHNO. Vol. 14 No.3 (2002) pp.41-46
- 5) 「Micro Arc Monitoring by using Detection of Supersonic Waves emitted from Micro Arc Sites in Plasma Processing Chamber」, Proceedings of the ISSM 2002, October 2002
- 6) 「Micro Arc Monitoring by Detecting Charge Build-Up on Glass Surface of Viewing Port due to Plasma Dispersion