ドライエッチング装置内のプラズマとラジカルの空間分布解析*

田 中 潤 —*1

Spatial Distribution of Plasma and Radicals in Dry Etcher

Junichi TANAKA*1

*1Department of Nano-Process Research, Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
1-280 Higashi-koigakubo, Kokubunji, Tokyo 185-8601, Japan

(Received February 19, 2009, Accepted August 3, 2009)

Uniformity has always been a key issue for the dry etching process. However, studies of spatial distributions of plasma in a real etcher are scarce. In this study, spatial distributions of plasma and radicals were investigated using a periscope optical sensor. The distributions of $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ plasma were measured in a UHF plasma gate etcher. Spatial structures of plasma were studied, and a correlation between Ar emission intensity and ion saturation current distributions was found. The results revealed a ring-shaped generation of plasma under the top shower-plate and a change in the diameter of the ring depending on the magnetic field strength or gas pressure. The transport of supplied gas and produced etchant radicals was also studied by monitoring the distributions of Cl and Cl_2^+ . Collisions with background gases diffuse the supplied gas plume and increase the dissociation of the supplied gas. This knowledge will enable tuning the etching process uniformity more easily.

1. はじめに

半導体デバイスの製造プロセスでは、リソグラフィとドライエッチングによりウエハ上に回路パターンが形成される。ドライエッチングでは低圧に維持されたエッチングチャンバ中の反応性ガスに電力を印加してプラズマ化し、プラズマ中で生成されるイオンとラジカルによるリアクティブイオンエッチング(RIE: Reactive Ion Etching)が行われる。この際、高い製造歩留まりを確保するために、ウエハ面内での高い加工均一性が求められる。一方、半導体デバイスはその性能向上のため年々サイズが縮小されており、最も高い加工精度が要求されるゲート電極のエッチングでは、300 mm ウエハ上で1 nm レベルの加工均一性が要求されるようになってきている¹⁾。

上記のような均一な加工のために、エッチング装置では電力の印加方法、ガスの供給排気方法、チャンバ形状等が工夫され、プラズマやラジカルのウエハ面内分布の均一化が図られている。しかし、エッチングに関与する量を全て完全に均一にすることは困難であり、実際にはやや不均一な諸量の分布をうまく組み合わせて極力均一な加工結果を得るようにエッチング条件を調整することになる。

ゲート寸法のウエハ面内分布を調整する方法として、ウエハ温度の面内分布を調整する方法やエッチング条件によりプラズマやラジカルの分布を調整する方法がある。前者は、エッチング反応により生成された反応生成物のゲート側壁への再付着量をウエハ温度で制御する手法であり、ラジカル(反応生成物)のウエハ面内分布の理解が必要となる²⁾。後者のエッチング条件を調整する手法では、プラズマやラジカルの空間構造を変化させ、その結果ゲート寸法を均一化する。しかし、ウエハ上の加工結果は様々な要因の相乗効果で決まるため、加工結果のみを見るだけではプラズマの空間構造の変

化が判りにくく、特に様々な電磁波の伝播モードや共鳴を含む非線形なプラズマの分布制御法を体系的に理解することは困難である。すなわち、エッチング条件に応じてプラズマやラジカルの空間構造がどのように変化するかを知ることが、試行錯誤に依存しないエッチング均一化技術の鍵となる。

これらの空間分布を知るための方法として最も期待されるのはシミュレーションであり、例えば池川ら³⁾は直接粒子シミュレーションを用いて塩素プラズマにおいてエッチングチャンバ内の流れとラジカルの輸送問題を解析している。一方、実際にドライエッチングに用いられるガスケミストリは複雑でシミュレーションに必要な基礎データが不足していることが多く、シミュレーションの精度を確保するまでに膨大な時間を要する。そこでプラズマやラジカルの空間構造の測定技術があれば、複雑なケミストリを用いてもその空間構造を必要に応じて把握することができるようになる。このような空間構造の測定のためには、ラングミュアプローブ⁴⁾、レーザー誘起蛍光⁵⁾、吸収分光⁶⁾、発光分光⁷⁾等の手法が古くから用いられている。これらの計測手法の中で、エッチング反応に関わる多くのラジカルの状態を一括して容易に観測できるのは発光分光法である。ところが、研究用のプラズマチャンバと異なり量産用エッチング装置は長期安定性を重視して作られており、プラズマ発光の空間構造を測定できるような大きな観測窓は持たない。この問題を解決するため、筆者らは観測窓を要しないラジカル分布モニタ法を開発し、UHFを用いたエッチング装置内のエッチング反応生成物の空間分布構造を明らかにした⁸⁾。このモニタ法では、プラズマチャンバの下部から挿入した潜望鏡型の可動式光学プローブによりチャンバ内をスキャンしてプラズマ発光を計測するため、チャンバの側面に観測窓を設けずに空間構造を計測することが出来る。また、プローブ計測のようにアンテナとして作用して電磁波の伝播を乱しプラズマ分布を歪ませる導線をプラズマ中に挿入する必要がない。

本研究では、このラジカル分布モニタによってゲートエッチングで用いられる $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$ プラズマの空間構造を解析

* 平成18年8月31日 第67回応用物理学会学術講演会で一部発表

*1 日立製作所中央研究所ナノプロセス研究部(〒185-8601 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280)

し、それが処理条件によってどのように変動するのかを調べた。また、ラジカルの空間分布だけでなくプラズマの空間分布をこの測定法で把握する手法を検討した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験には **Fig. 1** に示す有磁場 UHF プラズマを利用したゲートエッチング装置を用いた。この装置はソレノイドコイルを有し、磁場によるプラズマ分布の制御ができる。チャンバの上面は石英のシャワープレートとなっており、これを通して UHF 波が低圧チャンバ内に放射されプラズマが生成される。シャワープレートの中央周辺からはエッチングガスが供給され、ウエハの周りに軸対称な流れを形成している。プラズマチャンバの下部からは潜望鏡型の光学プローブが挿入され、その回転および上下スライド動作によりチャンバ内のプラズマ発光の分布を観測することができる。光学プローブの視野はレンズによりコリメートされたビーム状になっており、観測ライン上のプラズマ発光の積分値が光ファイバを通して分光器に送られる。高さを一定にして回転動作したときの観測ラインの変化を **Fig. 1(b)** に示した。所望のラジカル

Fig. 1 Radical distribution monitoring system: (a) setup of periscope type optical probe in etching chamber; (b) illustration of lines of sight during horizontal scan.

の発光強度分布を計算するには、これらの角度毎に取得された発光スペクトルから着目したラジカルの発光ピーク強度を抽出し、それをアーベル変換することにより、各半径位置での局所的なラジカル発光強度を求める。アーベル変換は対象の軸対称性が必要となるが、エッチングでは軸対称性が著しく崩れた条件を用いることは無く、アーベル変換前のデータで左右対称性を確認していれば実用上問題ない。

上記の装置でのポリシリコンゲートのエッチングに用いられる $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$ プラズマの発光スペクトルを **Fig. 2** に示す。このスペクトルでは、エッチャントである Cl や Br ラジカル、及びエッチング反応生成物である Si , SiCl , SiCl_2 等のラジカルの発光ピークが観測される⁸⁾。

2.2 プラズマとラジカルの分布の計算

着目するラジカル種を X 、半径位置を r 、高さ位置を z と表記し、プラズマ密度を $n_p(r, z)$ 、ラジカル X の密度を $n_X(r, z)$ とすると、アーベル変換により得られた局所的なラジカル X の発光強度 $D_X(r, z)$ を表す簡略化した式は次のようになる⁸⁾。

$$D_X(r, z) = k_X(T_e) n_p(r, z) n_X(r, z)$$

ここで、プラズマ密度は電子密度と等しいとし、 $k_X(T_e)$ は電子温度に依存した係数である。この式から判るように、発光強度の分布を測定しただけでは、プラズマ密度、ラジカル密度、電子温度のそれぞれの分布を分離して知ることはできない。本研究は発光分光を用いた簡便な計測方法により、エッチング装置内部のプラズマの空間構造を知ることが目的であり、ラジカルやプラズマの絶対密度を求めることが目的ではない。このため、以下のような仮定をして分布を考えることとした。

ラジカルの密度はアルゴン (Ar) を用いたアクチノメトリ法⁹⁾で計算する。アクチノメトリでは、エッチングガスに Ar を添加し、ラジカルと Ar のそれぞれの空間分布をアーベル変換により求めた後、各点でラジカルの発光強度を Ar 発光強度との比を取ることでプラズマ密度の影響を除外する。実際、この比を取る前の各ラジカルの発光強度分布はプラズマ密度分布の影響を強く受けており、どのラジカル種もほとんど同じような分布をしているように見える。そこで Ar との比を取ることで各ラジカルに固有な分布が顕著に見えるようになる。リファレンスとなる Ar の発光ピークは 750.4 nm が用いられることが多いが、今回はゲートエッ

Fig. 2 Optical emission spectrum from $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$ plasma during silicon etching.

チングで用いられる $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$ プラズマの観測をするため、我々が使用した分光器では Br と Ar のピークを十分に分離することができず、811.5 nm のピークを用いた。811.5 nm のピークはメタステーブルの影響を受ける可能性があることが知られているが、今回用いたプラズマでは750.4 nm と811.5 nm の発光強度の空間分布がほぼ同等であることを確認している⁸⁾。

また、プラズマ密度の空間分布を大まかに知るために、添加したアルゴンの発光強度分布を見ることとした。アルゴンは反応性が無いためにチャンバ内部で密度がほぼ一定と仮定すると、その発光強度は次式ようになる。

$$D_{\text{Ar}}(r, z) \propto k_{\text{Ar}}(T_e) n_p(r, z)$$

このアルゴンの発光強度は常にプラズマ密度と比例するわけではなく、電子温度が一定の領域ではプラズマ密度と比例し、電子温度が急激に変わる領域では電子温度分布を反映した分布となる。すなわち、アルゴンの発光強度が高い場所は、電磁波がプラズマ中の電子を加熱して電子温度が高くなる領域とプラズマ密度自体が高くなる領域を含んでおり、簡易的にプラズマが“強い”位置が特定できることになる。

また、アルゴンを添加しない実験でプラズマ密度分布を推定するためには、どのラジカルもプラズマ密度の影響を受けて類似した分布に見えることを利用する。すなわち、全てのラジカルの発光強度はプラズマ密度 n_p の項を含むため、観測された全ての発光ピークの平均値の分布はプラズマ密度分布と類似しているものと考えられる。この仮説を検証するため、ウエハ上の発光ピークの平均値の分布をエッチングレートの分布と比較した。

3. 結果と考察

3.1 ラジカルの分布

$\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ プラズマ（流量はそれぞれ75, 75, 2, 40 sccm*, 圧力は0.4 Pa）における、エッチャントである Cl ラジカル、エッチング反応生成物である SiCl_2 ラジカル、それに供給ガスの流れを反映すると考えられる Cl_2^+ からの発光の空間分布を Fig. 3 に示す。これらは Ar の811.5 nm の発光ピークを用いてアクチノメトリを実施した結果である。アーベル変換を用いているため左右対称であるが、空間構造を把握しやすいように左右両面を記載した。プラズマ発光により観測した空間分布を示す図は特に明記しない場合、高さ80 mm の位置にシャワープレートがあり、その中心部の直径170 mm 以内のガス導入域から一様にエッチングガスが供給され、ウエハステージはシャワープレートから140 mm の距離に位置し、チャンバ側壁は視野のやや外側に位置する。供給されたガスの流れは Fig. 3(c) の Cl_2^+ ラジカルの分布によって可視化されていると考えられる。ガスは導入域から下方に向かってジェット状に噴出しており、ほぼ同等の圧力での希薄流シミュレーション結果³⁾と一致する。Cl ラジカルは Cl_2 がプラズマ中で解離することにより生成されるが、0.4 Pa の低圧条件ではその解離が十分には進まず、供給ガスの

Fig. 3 Spatial distributions of radicals in $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$ plasma during poly-silicon etching.

流れがあるチャンバ中央部では密度が小さくなっている。ウエハ上でのシリコンのエッチングでも Cl ラジカルは消費されるため、下からの拡散もほとんど無いことも原因と考える。一方、チャンバ上部の外周ではガスの流れが渦を巻く³⁾ことにより、 Cl_2 ガスの滞在時間が長くなって解離し易くなり、Cl ラジカル密度が上がる。

エッチング反応生成物の SiCl_2 ラジカルはウエハから放出され上方に拡散していくが、ガス流れにより排気されるためウエハ中心部で密度が高くなる Fig. 3(b) のような分布となっている。この反応生成物の分布がガスの流れによりどのように変化するかを筆者らは報告している⁸⁾。

3.2 発光強度とプラズマ密度の関係の検証

3.2.1 エッチングレートと発光強度の比較

前述のように、Ar を添加せずにプラズマ密度を推定するための指標として、分光器で観測された250から850 nm の間の全ての発光強度の平均値をとった平均発光強度を用いる手法を検討した。この手法の妥当性を検証するため、ポリシリコンの $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$ プラズマ（流量はそれぞれ75, 75, 2 sccm）によるエッチング処理において、ウエハから約10 mm の高さで観測した平均発光強度分布とエッチングレート分布を比較した。この実験では比較を容易にするためにレート均一性のあまり良くない条件を用いた。さらに標準的な磁場条件（Medium magnetic field）と強い磁場条件（Strong magnetic field）の二つの条件を用いて、磁場でプラズマ分布を変えたときの変化の様子を比較した。

$\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$ プラズマにおいてエッチングレートはプラズマ密度と Cl ラジカル密度に依存すると考えられるため、まず、Cl ラジカルのウエハ上の分布を調べた。Cl ラジカルの分布を見るため、Ar を40 sccm 添加して Cl と Ar の発光強

* sccm : 標準状態（1 気圧 = 1.013×10^5 Pa, 0°C）における気体流量を毎分・ 10^{-6} m^3 を単位として示したもの。

度比の分布を測定し Fig. 4(a) に示した. Fig. 4 ではウェハ上分布の変化に着目するため, 全ての量をそれぞれのウェハ中心の値で規格化してある. Fig. 4(a) において, Cl ラジカルの分布は 200 mm ウェハの上部ではほぼ平坦であり, かつ, 磁場の変化の影響をほとんど受けない. このためエッチングレート分布は主にプラズマ密度分布を反映しているものと考えられる. この実験において, HBr/Cl₂/O₂ プラズマへの Ar 添加によりプラズマ分布が変わることが懸念されたが, Ar 添加量が 0 から 40 sccm の間で平均発光強度分布はほぼ同じ分布となり, Ar 添加の影響は無視できる.

HBr/Cl₂/O₂ プラズマによるポリシリコンのエッチングレートを Fig. 4(b) に示す. エッチングレートは磁場の影響を受けて分布が変化しており, 上記の議論からその原因はプラズマ密度分布の変化にあると考えられる. そこで Fig. 4(c) に示した平均発光強度と Fig. 4(b) のエッチングレートの分布を比較すると, その挙動はほぼ一致しており, 平均発光強度が定性的にはプラズマ密度と同じ分布を持っているものと考えられる. この手法はガスケミストリや装置に依存し

Fig. 4 Effect of magnetic field on the distributions of plasma emission and etch rate in HBr/Cl₂/O₂ plasma at 0.4 Pa. All values in these figures are normalized with the values at the wafer center. (a) Ratios of Cl emission intensity to Ar emission intensity with Ar gas addition, (b) etch rates of poly-silicon, (c) averaged emission intensities between 250 and 850 nm in wavelength.

汎用性があるわけではないが, Ar を添加せずにプラズマ分布を推定するための簡便な方法として有用である

3.2.2 イオン飽和電流と発光強度の比較

次に Ar の発光強度によりプラズマ分布を推定する手法を検証した. ここで用いたプラズマ装置では電磁波によるプラズマの加熱は主にシャワープレート直下で行われ, そこからプラズマが下方に拡散するため, ウェハ上では電子温度はほぼ均一と考えられる. また, 不活性ガスである Ar の分布もほぼ均一と考えると, Ar の発光強度分布はプラズマ密度分布と定性的に一致することが期待できる. したがって, Ar 発光強度分布は飽和イオン電流の分布ともほぼ一致すると考えられる.

そこで, ウェハステージ上にプローブを埋め込んだプレートを設置して飽和イオン電流の分布を測定した. 実験では半径方向の 3 箇所 (75, 75, 2, 40 sccm, 圧力は 0.4 Pa) の飽和イオン電流を測定し, ウェハから約 10 mm の高さ位置で測定した Ar 発光強度分布と比較した. 本実験は 4 通りの磁場条件で行い, それぞれの条件で飽和イオン電流と Ar 発光強度の分布を測定した結果を Fig. 5 に示す. 磁場条件を変更したときの飽和イオン電流と Ar 発光強度の分布の変化の様子はほぼ一致しており, Ar の発光強度分布からプラズマの空間構造を推定できるものとする.

3.3 処理条件によるプラズマの空間構造の変化

処理条件により前節の HBr/Cl₂/O₂/Ar プラズマの空間分布がどのように変化するかを Ar の発光強度分布により調べた. 弱磁場から強磁場になるときのプラズマの空間構造の変化を Fig. 6 に示す. 弱磁場から中磁場で特徴的なのはシャワープレート直下の 2 重のリング構造である. 半径 70 mm 近傍と最外周に強いプラズマリングがあり, プラズマの生成がこの 2 重リングに局在化しており, 前節で述べたようにシャワープレートの直下で発生したプラズマが下方に拡散して行く空間構造になっている様子がわかる. 磁場を強くしていくと中心側のリングが弱くなり, Fig. 6(c) の強磁場条件では外周リングのみの外周高プラズマ分布となる. 磁場の効果として一般的に考え易いのは, プラズマの封じ込めであり, 磁場を強くするとプラズマ中央部の密度が上がり易いと予想していたが, Fig. 6 に見られるようにプラズマの生成分布が大きく変わった結果, プラズマ封じ込めのみを考慮した

Fig. 5 Ion saturation current and Ar emission intensity: magnetic field strengths are different in conditions A, B, C, and D.

予想とは反対に外周高のプラズマ分布となった。電磁波とプラズマの強い非線形相互作用の結果として得られるプラズマ密度分布の変動の原因を正確に推定することは困難であるが、磁場強度によってシャワープレート直下のプラズマの誘電率が変化してシャワープレートを含む実効的な導波路形状が変わり、供給された電磁波の共振状態が変わってプラズマ過熱の位置が変わったことが原因であると考えている。

Fig. 6 Effect of magnetic field strength on spatial distribution of Ar emission intensity in HBr/Cl₂/O₂ plasma.

Fig. 7 Effect of pressure on spatial distribution of Ar emission intensity in HBr/Cl₂/O₂ plasma: (a) 0.4 Pa, (b) 1.0 Pa, (c) 3.0 Pa.

次に処理圧力によるプラズマ空間分布の変化を調べた。HBr/Cl₂/O₂/Ar プラズマの圧力を0.4, 1.0, 3.0 Pa として Ar の発光強度分布を観測した結果を Fig. 7 に示す。圧力を上げるとシャワープレート直下のプラズマリングの径が大きくなっており、圧力が分布制御の一つの制御手段となることを確認できた。また、圧力が 3 Pa のときには、中央部にもプラズマ加熱領域が発生していることがわかる。圧力条件変更のもう一つの影響はプラズマの拡散距離に表れる。シャワープレート直下で発生したプラズマは下方に拡散していくが、圧力が低いほどその拡散距離が長くなる様子が Fig. 7 で見られる。この様子は、チャンバの中心軸上の高さ方向の Ar 発光強度分布をプロットした Fig. 8 において明瞭に確認できる。圧力が低い 0.4 Pa や 1.0 Pa の場合にプラズマが拡散し易く、シャワープレートから離れても Ar の発光強度は減衰しにくい。一方、圧力が高いとシャワープレート直下に高密度のプラズマが生成されるが、拡散距離が短いためシャワープレートから離れるとプラズマ密度が急激に減衰するため、ウエハへのプラズマの輸送効率は低い。このことから、圧力が高い条件はシャワープレートをクリーニングする用途や、シャワープレート直下の高密度プラズマでエッチングガスを解離してラジカルをウエハに供給するダウンフロー処理に適していると言える。

次に、これらの圧力条件でラジカルの空間分布を調べ、チャンバ内での輸送現象がどのようになっているのかを調べた。この圧力範囲では流れは分子流と連続流の間の中間流であり、供給されたガスの輸送を考えるには分子の自由飛行に背景分子との衝突を加味して考える必要がある。Cl₂ の分布が供給されたエッチングガスの流れを反映すると考えられるが、Fig. 9 では圧力が上がるに従って噴流が広がっている様子が見られる。これは、下方に向かってガス導入口から飛び出した供給ガス中の Cl₂ 分子が、0.4 Pa 程度の低圧ではそのまま直進しやすく、3 Pa 程度の圧力では他の分子と衝突して拡散し噴流が広がっていることを反映しているものと考えている。また、Cl ラジカルの分布を見ると、圧力が高くなるにつれてその分布がチャンバの中央部に寄ってきてい

Fig. 8 Diffusion of plasma along center axis.

Fig. 9 Effect of pressure on spatial distribution of Cl and Cl₂ in HBr/Cl₂/O₂ plasma: (a) 0.4 Pa, (b) 1.0 Pa, (c) 3.0 Pa.

る。これは、圧力が高くなると Cl₂ 分子の滞在時間が増加して解離しやすくなるためである。ただし、依然として半径 50 mm 以内の中心部ではガス流れの排気効果により Cl ラジカルの発光強度が低くなっている。これらの結果から、高圧条件はイオン性よりもラジカル性の強い RIE に向いていると言える。

4. ま と め

ラジカル分布モニタを用いてゲートエッチングに用いられる HBr/Cl₂/O₂/Ar プラズマの空間構造を調べた。

実験で得られた Cl₂⁺ の空間分布により供給ガスの流れを可視化できることを既存のシミュレーション結果との比較により確認した。また、エッチャントである Cl やエッチング反応生成物である SiCl₂ ラジカルの輸送現象が、このガス流れに影響されていることを示した。さらに、エッチングレートやイオン飽和電流との比較により、平均発光強度や Ar 発光強度分布がプラズマ密度分布と相関が強いことを示した。この Ar 発光強度分布を用いて、プラズマがシャワープレート直下でリング状に発生しており、その発生分布が磁場条件や圧力条件により制御できることを示し、圧力に応じてプラズマの拡散距離が変わることも確認した。さらに、圧力によってガスの噴流や Cl ラジカルの生成分布が大きく変わることを示した。

これらの結果より、ラジカル分布モニタによりプラズマやラジカルの空間分布を知ることができ、これらの空間構造を考慮してプロセスを構築していくことが可能になった。

〔文 献〕

- 1) International Technology Roadmap for Semiconductors, 2007.
- 2) J. Tanaka, M. Kurihara, M. Izawa, Y. Nakahara, K. Matsumoto, H. Arai, K. Okamoto, T. Maruyama and N. Fujiwara: *Proc. Int. Symp. Dry Process*, Tokyo, Japan, 2007, p. 281.
- 3) M. Ikegawa, Y. Ogawa, R. Fukuyama, T. Usui and J. Tanaka: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **66** (2000) 1992.
- 4) L. J. Mahoney, A. E. Wendt, E. Barrios, C. J. Richards and J. L. Shohet: *J. Appl. Phys.*, **76** (1994) 2041.
- 5) M. A. Sobolewski and K. L. Steffens: *J. Vac. Sci. Technol. A*, **17** (1999) 3281.
- 6) S. Takashima, S. Takahashi, X. Jia, H. Kano, K. Yamakawa, S. Den and M. Hori: *Proc. Int. Symp. Dry Process*, Nagoya, Japan, 2006, p. 335.
- 7) S. Shannon, J. P. Holloway, K. Flippo and M. L. Brake: *Appl. Phys. Lett.*, **71** (1997) 1467.
- 8) J. Tanaka and G. Miya: *J. Vac. Sci. Technol. A*, **25** (2007) 353.
- 9) M. V. Malyshev and V. M. Donnelly: *J. Vac. Sci. Technol. A*, **15** (1997) 550.