

主 論 文 の 要 約

論文題目 大規模集積回路プラズマプロセスにおける
微細パターン形状制御の研究
(Study on control of fine patterning
in ULSI plasma processes)

氏 名 根岸 伸幸

論 文 内 容 の 要 約

プラズマエッチングは、半導体産業発展の礎である微細化及び集積化を長年牽引してきた。世代の進展に従い、デバイス性能を向上させるために提案された、種々の構造や材料を導入するため、常に多様な課題を克服し、高度な加工技術を確立してきた。中でも絶縁膜エッチングは、3D NAND メモリに代表されるデバイスの三次元化を支える難易度の高い加工技術であり、加工形状異常に関する課題が多い。

ポストスケーリング時代を迎える今、プラズマエッチングに寄せられる期待は、微細化から複雑化への対応に大きく変化している。そのような状況の下、エッチング性能を更に向上するためには、チャンバ内で起こっている気相反応やウエハ表面反応などの現象を理解し、それに基づいてプロセスを構築することが益々重要となっている。

本研究では、絶縁膜エッチングにおけるパターンレベルからウエハレベルまでの種々の加工形状の課題に対し、主に中性ラジカルの輸送現象に着目、実験やモデル計算により原因の探索と究明を進めた。それに基づき、想定モデルを構築し、対策案の提案とその有効性の検証を行った。

本論文は 6 章で構成されており、以下に夫々の章の概要を示す。

第 1 章では、半導体デバイスの置かれている状況を、アプリケーションと技術の両面から俯瞰した。IoT (Internet of Things) 時代の到来により、多種多様な機器向けの半導体に加え、ビッグデータを高速に処理する高性能なマイクロプロセッサ (Micro Processing Unit: MPU) や大容量ストレージなど、サーバーやデータセンター向けの半導体需要が大きく喚起されている。一方で、微細化の終焉に伴い、従来のスケーリングに

よるデバイス単体の性能向上から、構造やレイアウト、更にはシステム全体で性能を向上させる取組みにシフトしていくと予想される。そのような状況の下、プラズマエッチングの重要性が増している現状を、デバイスとそれを実現するプロセスの潮流から示した。更に、本論文で扱う絶縁膜エッチングの適用状況と課題について、高アスペクト比コンタクト（High Aspect Ratio Contact: HARC）加工の例を中心に説明した。

第2章では、Dynamic Random Access Memory（DRAM）キャパシタや3D NANDのメモリホールを形成するHARC加工で課題となっているボーイング現象を採り上げた。まず最初に、高アスペクト比での現象を考察する準備として、パターン内のラジカル輸送について検討した。ガス圧力条件による平均自由行程が、パターンの代表長であるパターンの直径に比べ4桁程大きいことから、ガス分子やラジカルのパターン内輸送は、パターン側壁での衝突を経てパターン内に拡散していくKnudsen輸送に従うものとした。そして、パターン底での付着係数を用いて、パターン底に到達するラジカルフラックスのアスペクト比依存性を見積もった。

一方、ボーイング量のパターン寸法依存性やその発生位置、堆積実験による側壁堆積膜分布の評価結果等から、パターン内のラジカル輸送による側壁保護膜の不均一性と、チャージアップやマスクでのイオン散乱による側壁へのイオン入射に起因するボーイング発生モデルを構築した。また、それに基づく対策案を検討した結果、1)マスク形状の垂直化によりマスクでのイオン散乱を抑制し、2)希釈ガスであるArの低流量化による低付着ラジカルの選択的供給と、3)高ウエハ温度化による実効的な付着係数の低減により側壁保護膜を形成することで、選択性などエッチング特性を犠牲にすることなく、ボーイングを改善出来ることが分かった。

第3章では、同じくHARC加工にて課題となっているボトム形状異常について、マスクと異なる形状に変化してしまうディストーション、パターンの中心がボトムに行くに従いずれるツイスティングの改善を検討した。実パターンのアスペクト比を模擬するためマイクロチャンネルプレート（Microchannel-plate: MCP）を導入し、パターン底でのチャージアップ測定やフルオロカーボン堆積膜の組成分析を行った結果、アスペクト比の増大に従いチャージアップ電圧が増大すること、フルオロカーボン膜の低F/C比化が進展することを確認した。以上から、高アスペクト比領域ではエッチング自体が進行し難い状況になっていることを確認した。

また、パターンラフネスの深さ方向の進展と、パターン側壁の直接観察によるマスクラフネスの転写の形態を評価した。その結果、深さの進展に伴い、パターンラフネスの形態がランダムからWigglingモードに移行すること、マスク（ネッキング部）のラフネスがパターン下方に転写しており、深くなるに従い高い空間周波数の成分が減衰、低い空間周波数の成分が増幅することを確認した。以上の結果から、エッチングの進展に従い、マスク変形により高アスペクト比領域でのイオンと堆積の不均一が発生し、それがきっかけとなって進行し易い方向にエッチングされることで、パターン変形が発生するボトム形状異常

発生モデルを構築した。高アスペクト比下でのチャージアップや堆積膜の低 F/C 比化は、パターン構造に依存する結果であり、それを改善することは容易ではない。そこで、プロセスで改善が期待出来るマスク変形の影響を評価するために、マスク変形の度合いが違うピッチが異なるサンプルを用いて検証を行った。その結果、本研究で用いた実験条件下において、マスク変形を抑制することで 20%程度ディストーションとツイスティングを改善出来ることを実証した。

第 4 章では、絶縁膜加工における ArF レジストダメージについて検討した。反射防止膜 (Bottom Anti-Reflection Coating: BARC) 条件および HARC 条件によるレジストダメージの評価結果、プラズマ計測や X 線光電子分光 (X-ray photoelectron spectroscopy: XPS) 測定などレジスト表面の分析結果から、HARC エッチング前のレジスト表面のマイクロマスクの抑制と、HARC エッチング中のフルオロカーボン膜の組成・厚さ制御によるマイクロマスクの進展抑制が、レジストダメージ改善に必要であることを見出した。これらの結果から、BARC エッチングにおける Ar レス化、HARC エッチングにおける Xe 添加と低圧化を提案した。

一方、フルオロカーボン堆積膜の熱ストレスによるパターン変形を評価し、上記 Xe 添加による堆積膜の高 F/C 比化及び低圧化による堆積膜の薄膜化にて、パターン変形が抑制されることが分かった。本検討により、堆積膜の制御がマスク変形に不可欠であることから、エッチング初期の過剰堆積を抑制するエッチングシーケンスの変更を提案し、レジストダメージに起因する LER (Line Edge Roughness) を半減することが出来た。

第 5 章では、ウエハレベルでの形状異常の課題として、ウエハ外周部付近で発生する非対称形状について検討した。中性粒子の影響を確認するために、酸素プラズマによるトリミングプロセスを用い、非対称形状と酸素原子密度分布の相関を評価した。その結果、酸素原子密度が高い側のトリミング量が低い側のそれに比べ大きく、非対称度と酸素原子密度分布の傾きとの間に強い相関があることを確認した。

また、気体分子運動論に基づく非対称度の定式化により、酸素原子密度分布の均一化とガス圧力の高圧化が非対称形状の改善に効果的であることを予測、実験にて有効性を確認した。この結果から、原子やラジカルなどの中性粒子のマクロな密度分布が、縦方向のエッチング速度分布だけでなく、パターンの非対称性というミクロな現象にも大きな影響を及ぼすことが分かった。

第 6 章では、本論文を総括し、今後の課題と展望を述べた。今後の課題では、本研究で取り組んだ各種現象の理解に対し、更なる定量性の向上を挙げた。例えば、ボーイングの改善策として、ウエハ温度の高温度化を提案しその効果を実証したが、夫々のラジカルの付着係数の温度依存性は実測出来ていない。モデル精度向上のためにも定量的な議論が今後の課題である。

今後の展望としては、既存のハードウェアに囚われず、新たなハードウェアやエッチング方式の導入も含め、想定メカニズムから考えられる対策案を総動員して検討することを

挙げた。それに関連して、近年研究開発が活発化している原子層エッチング (Atomic Layer Etching: ALE) についても触れた。ALE は、通常のエッチングで同時に起こっている反応種の供給、反応層の形成、エネルギー供給による反応層の除去をシリーズに行うことで、選択性と低ダメージ性を極限まで向上出来る。しかしながら、絶縁膜の ALE では、反応種の飽和吸着を実現出来ないことが課題である。今後、新規ガスの開発等による自己飽和性の実現が期待される。

最後に、プラズマエッチングへのデータ技術の活用について述べた。これまでは、開発者が物理現象の理解に基づきエッチングレシピの調整を行ってきたが、複雑化するプロセスの開発には、益々多くの時間を要することが懸念される。そのため、材料分野におけるマテリアルズインフォマティクスのように、エッチング分野においても人工知能 (Artificial Intelligence: AI) などデータ技術の導入が、今後促進されることが想定される。その際、ドメイン知識を持つエッチング分野とデータ技術分野の密な連携が、益々必要になるものと考えられる。