

報告番号	甲 第 12497 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 超大規模集積回路製造用プラズマエッチングにおける加工形状の制御に関する研究
(Study on control of etch profile in plasma etching for ultra large-scale integration fabrication)

氏 名 酒井 伊都子

論 文 内 容 の 要 旨

1. 本研究の目的

本研究では、超大規模集積回路製造に用いられる Si に高アスペクト比のトレンチ（溝）やホール（穴）を形成するプラズマエッチング技術を中心に、超高速かつ高精度のエッチングプロセスを、その原理を解明しながらそのエッチング速度を限界まで追求し、構築することを目的とした。また、多層構造のエッチングマスクの形成において、形状異常の要因解析に基づき、マスク材料まで遡って検討することで高精度の形状制御プロセスを実現することを目的とした。プラズマ診断や表面解析を進めることで、それぞれの現象の原理を理解し、その理解に基づいた、将来のより高い要求あるいは派生する他材料における高アスペクト比高精度エッチングの技術開発に資する知見や基本的なデータを提供することを目的とした。

2. 本研究の概要

本研究では、Si トレンチエッチングを主な対象として、種々のサイズの Si トレンチを高速にかつ高精度に形状を制御して達成する技術について、その原理とアプローチを示した。以下に各章毎に概要を示す。

第1章では、本研究の背景として、大規模集積回路プロセスにおけるエッチング技術の発展を示し、デバイスの高集積化へ果たす重要性を述べた。また、本論文の主題であるシリコンに高いアスペクト比の溝や穴を形成するトレンチエッチング技術における形状制御

の要求と課題を示し、本研究の目的と研究の意義を示した。

第 2 章では、本論文に係るプラズマの診断技術、表面反応分析技術について計測原理と適用方法を述べた。エッチング技術の研究開発には、プラズマの計測と表面反応の分析を基礎とした現象の理解に基づく追究が重要である。そのために、プラズマ中のラジカル種の密度変化を発光分光法 (OES)、酸素原子密度の測定には真空紫外吸収分光法 (VUVAS) を採用した。また、プラズマ密度の評価には、表面波プローブ (SWP) を使用した。一方、サンプル表面上の組成物の分析には、プラズマ処理後のサンプルを、大気暴露によって変質させることなく解析できる、*in-situ* X 線光電子分光法 (XPS) を用いた。また、フーリエ変換赤外分光法 (FTIR) による解析を行った。

第 3 章では、システムインパッケージ (SiP) を実現するウェハレベルパッケージング技術におけるシリコン貫通孔、スルーシリコンビア (TSV) のエッチング技術について、生産性の高いプロセス技術を構築する原理的な背景を明らかにした。数十ミクロンの直径及び深さを有する TSV は、超高速加工及び形状制御の両方を必要とする。シリコンとの反応性が高い SF₆ を主たるガスとして採用し、高い RF 周波数及び高いガス圧力の条件で容量結合型 (CCP) のマグネトロン反応性イオンエッチング装置 (MERIE) を使用することで、加工形状を制御しながら非常に高いエッチング速度が得られた。O₂ の添加が効果的に作用していることを、プラズマ中の F と O の相対密度測定より示した。ホール径 40 μm の大型 TSV を 50 μm/分以上のエッチング速度で、8 μm 径の TSV ではアスペクト比 5 で 15 μm/分以上で垂直形状の加工を達成した。

第 4 章では、高アスペクト比加工において、形状を制御するための要である、パターンの内側壁面への堆積膜と、その生成、制御技術について、気相及び表面分析を駆使して解析し、側壁のエッチング抑制方法について詳細に議論した。SF₆/O₂ ガスプラズマを用いた TSV 用の高速エッチングプロセスにおける、穴の側壁での表面反応を追究し、特に O₂ ガス添加比率の観点から、Si 表面上の反応層の形成に焦点を当てて検討した。F 原子と O 原子が Si 表面で競争的に反応する側壁反応機構を調べるために、F と O の相対密度、基板温度、SiF₄ ガス添加の依存性を調べた。SF₆/O₂ ガスのダウンフロープラズマに曝された Si 表面を *in-situ* XPS で分析して、TSV 側壁における反応を類推した。Si 表面に Si、F、O を含む反応層が形成され、その厚さは O 原子密度と温度の影響を受ける。反応層の F/O 比の原子組成は、温度及び O₂ 流量比にかかわらず、ほぼ 2 程度で一定であることが分かった。SiOF 層が厚くなるにつれて、F ラジカルによる Si エッチングが抑制され、エッチング速度が低下したが、エッチングは停止しないことがわかった。

第 5 章では、穴の開口径が 140 nm で、アスペクト比が 50 を超えて非常に高い、ディープトレレンチエッチングプロセスにおいて、穴の側壁での特徴的なエッチング、エロージョンの発生機構について検討し、それを抑制する技術を提案した。HBr/SF₆/O₂ ガスプラズマによる Si ディープトレレンチエッチングの微細化に伴う側壁のエロージョン発生現象は、電極温度を 110°C から 140°C へ上げることで全く発生しなくなることを見出した。昇温脱離分

析法 (TDS) の評価から、高い基板温度で加工することで、トレンチ側壁に形成される堆積膜 (保護膜) に含まれる F や Br のハロゲン元素含有量が減少することがわかった。ハロゲン元素含有量が相対的に少ない堆積膜は F 原子によるエッチング耐性が高く、薄く形成された場合においても保護膜として機能することが示された。

第 6 章では、高アスペクト比の微細パターンを形成するための多層マスクシステムにおける課題を議論し、「よれ」と呼ばれるパターンの変形が発生しない、精密なマスクパターンにより高精度な SiO_2 エッチングを可能とする技術について述べた。幅 60 nm 未満の塗布型炭素膜 (SOC) のライン&スペース (L/S) パターンをマスクとして SiO_2 エッチングを行うと、SOC パターンに「よれ」が観察される。フルオロカーボンガスを用いた SiO_2 エッチングでは SOC 膜のフッ素化が生じ、膜中に過大なストレスを与え、細い L/S パターンにおいて変形を起こすことが判明した。SOC 膜中の水素含有量低減により、SOC 膜のフッ素化が抑制され、SOC パターンの「よれ」発生が防止された。最後に、34 at% の水素含有量の SOC を用いた積層型マスク (S-MAP) を用いて、精密に 56 nm L/S の SiO_2 パターン形成を実現した。

以上のように、本研究の成果は、微細かつ高アスペクト比のトレンチ及びホールエッチングにおける形状制御の方法をその原理的な背景を踏まえて構築したことである。また、多層マスクの形状がよれる課題に対しても表面分析とプロセス制御によって高精度化を達成した。これらの成果は、その技術的なアプローチと科学的な機構解析に基づいており、これらの知見が異なる材料、例えば SiO_2 膜や有機膜あるいは金属膜などへも展開できるものとする。特に現在 技術進展の著しい 3 次元構造デバイスで要求される微細・高アスペクトの加工の技術開発へも貢献するものとする。

3. 将来の展望

本論文では、高速化による生産性向上、高速エッチングプロセスにおける加工形状制御、高アスペクト比エッチングプロセスにおける加工形状制御、マスクの材料設計からの加工プロセス制御の点に関し、研究成果を論じてきた。今後の展望として、これらの課題に対する要求と対応がどのように変わっていくかを考察した。

今後の半導体デバイスにおいては、デバイス構造の 3 次元化が進む中、高アスペクト比加工におけるエッチング速度の低下が、製造コストを高め、事業性を脅かす事態となることが懸念される。いかに大量のエッチング種を生成するかを検討すると同時に、加工形状制御との両立のために十分な側壁反応抑制機構の構築を検討する必要がある。新たな、多ハロゲン含有ガス分子の採用や、従来の低圧力下で放電する非平衡プラズマ以外の、より高密度な活性種を供給できる大気圧近傍プラズマやクラスターイオンビームなどのガス活性化手法によるブレイクスルーが期待される。

また、エッチング速度の低下を抑制するためには、生成したエッチング種を効果的に高アスペクト比のパターンの底まで輸送することが不可欠であり、加工形状の制御と合わせ

てパターンの壁との相互作用を全ての深さにおいて、より精密に制御しなければならない。高アスペクト構造の底までのガスの輸送過程は、その壁の材料と温度の影響を受けて変化する。近年は使用される材料が多種多様になり、被加工膜としてシリコン以外にシリコン酸化膜、シリコン窒化膜、メタルやメタル酸化物などの高アスペクト比構造も必要とされてきており、プロセスを設計にはそれぞれの物性にきめ細かな注意を払う必要がある。エッチングプロセスの要求に応える形でマスクの積層構造や新材料の導入はさらに進むと考えられる。また、ガスとの相互作用が起きる壁の表面材料には、側壁保護のための堆積物や、エッチング反応の生成物の再付着も含まれ、全体として極めて複雑な現象である。この点から、本研究で用いた穴の側壁を模擬した実験による要因の切り分けからプロセス設計の指針を得る手法は今後も重要であると考えられる。

今後ますます微細でアスペクト比の高い構造の加工が要求され続けていくと予想される。実際の高アスペクト比の穴を用いて側壁での反応を調べるなど、実サイズ領域に特有な諸現象を把握し、その機構を解明するための評価手法、穴の中の反応をシミュレーションできる技術の開発が必要で、それらに基づいた最適なプラズマ設計とプロセス構築が重要な課題となる。

最後に、デザインルールがリソグラフィーの解像限界を超える微細化の世代での寸法制御では、マスク形成のプロセス統合が極めて重要となる。多層マスクプロセス、側壁転写プロセスにおいても、積層マスクを構成する材料の選定、及び開発をエッチングプロセスと組み合わせて進めることが不可欠である。プラズマエッチング装置の中や、エッチング処理の途中でのマスク形成・整形プロセスも融合し微細構造を形成するが有効な手段である。そのためにはエッチング装置のコンセプトから見直していく必要があると考えられる。