

京都大学	博士（工学）	氏名	福本 浩志
論文題目	Model Analysis of Plasma-Surface Interactions during Silicon Oxide Etching in Fluorocarbon Plasmas (フルオロカーボンプラズマによる酸化シリコンエッチングにおける プラズマ-表面相互作用の数値解析)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、半導体デバイスやマイクロマシン作製プロセスに不可欠の微細加工技術であるプラズマエッチングのうち、フルオロカーボンプラズマによる酸化シリコンエッチングについて、プラズマ反応装置内のプラズマ特性をプラズマと固体表面との相互作用を考慮に入れて統一的に数値解析するとともに、二次元トレンチ (溝) と軸対称ホール (孔) の2種類の微細パターン構造に関して、微細加工形状とその微視的均一性を支配する機構解明に関する一連の研究成果をまとめたものであり、5章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、半導体製造プロセスにおけるプラズマエッチング技術とプラズマ反応装置の歴史と現状を手短に述べるとともに、フルオロカーボンプラズマによる酸化シリコンエッチングの特徴について説明している。さらに、実際のプロセスにおいて問題となるエッチングの形状異常や微視的均一性 (エッチング速度や形状・寸法精度が微細パターンの寸法やアスペクト比に依存する現象) に関わるプラズマ・表面相互作用の物理的・化学的機構について、現在の理解をまとめている。</p> <p>第2章では、誘導結合型高周波プラズマ装置における四フッ化炭素 (<math>\text{CF}_4</math>) ガスを用いた二酸化シリコン (<math>\text{SiO}_2</math>) エッチングについて、高周波電力によるプラズマ生成・維持をマックスウェル方程式と流体方程式を用いてモデル化し、プラズマ容器内の気相および容器壁と基板表面における数多くの反応過程を考慮に入れてプラズマ特性を数値解析している。具体的には、プラズマ電子密度・温度、フッ素原子密度、フルオロカーボンイオン・ラジカル密度、および反応生成物密度とエッチング速度との間の関係を、高周波電力、基板へのイオン入射エネルギー、ガス圧力、およびガス流量を変化させて系統的に調べた。その結果、エッチングに寄与する中性反応種はフッ素原子でありその密度は原料ガス分子と同じ程度であること、フルオロカーボンラジカルとエッチング反応生成物のシリコンフッ化物がフッ素原子の 1/10 程度の密度で存在し、表面堆積によりエッチング反応抑制種として作用すること、反応生成物の存在によりプラズマ特性は原料ガスのみの場合と比べて大きく変わること、基板から放出された酸素との反応による化合物も存在すること、を明らかにした。さらに、誘導コイルの配置を最適化することにより、プラズマ特性のプラズマ容器内の空間均一性、ひいてはエッチング速度の基板表面の空間均一性を向上できることを示した。</p> <p>第3章では、基板表面の微細パターン構造内の粒子輸送、表面反応、およびエッチング加工形状進展に関して原子スケールの数値解析モデルを提案している。具体的には、上の第2章の結果を用いて、二次元トレンチと軸対称ホールの2種類の構造について、微細構造内表面へのイオンと中性ラジカルの入射フラックスを粒子シミュレーションにより解析し、さらに表面反応過程をモンテカルロ法により解析することにより、イオン入射エネルギー、および被エッチング構造のパターン寸法 (溝幅、孔径) とアスペクト比に依存して変化するエッチング微細加工形状を系統的に調べた。その結果、ホールと比較してトレンチの方が、中性粒子に対する微細パターン構造の幾何学</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	福本 浩志
<p>的シャドーイング（陰影）効果が小さいことに起因して、パターン構造内表面に入射する中性粒子フラックスが大きく、エッチング速度やパターン側壁のアンダーカットが大きくなること、また、エッチング速度と形状のパターン寸法・アスペクト比依存性が大きくなること、を明らかにした。解析結果は既知の実験結果とほぼ一致し、この解析モデルが、現実の微細パターン構造に依存するエッチング形状の解析に適用できることを示した。</p> <p>第4章では、上の第3章で開発したモデルをもとに、さらに、基板表面上に形成されるシースを通過して表面にまで到達する高エネルギー電子について、その微細パターン構造内での輸送を考慮に入れてポアソン方程式を解くことにもとづき、微細構造内表面における電荷蓄積と微細構造内の電位分布の数値解析モデルを構築している。二次元トレンチと軸対称ホール の 2 種類の構造について比較した結果、ホールと比較してトレンチの方が、電子に対する微細パターン構造の幾何学的シャドーイング効果が小さいことに起因して、パターン構造内表面に入射する電子フラックスが大きく、入射イオンと電子の表面電荷中和が生じやすいこと、微細構造底部の電位が低くなること、また、構造底部電位のパターン寸法・アスペクト比依存性が大きくなることを明らかにした。</p> <p>第5章は結論であり、本論文で得られた結果を要約するとともに、今後の研究課題について触れ、今後のプラズマエッチング技術の発展に対応する解析モデル、特に、メートルサイズのプラズマ反応装置から、基板表面のナノメートルサイズの微細パターンにまで至るマルチスケールのハイブリッドモデルの重要性について提言を行っている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、半導体デバイスやマイクロマシン作製プロセスに不可欠の微細加工技術であるプラズマエッチングのうち、フルオロカーボンプラズマによる酸化シリコンエッチングについて、プラズマ反応装置内のプラズマ特性をプラズマと固体表面との相互作用を考慮に入れて統一的に数値解析するとともに、微細加工形状とその微視的均一性を支配する機構解明に関する一連の研究成果をまとめたものであり、その主な内容は以下のとおりである。

(1) 誘導結合型高周波プラズマ装置における四フッ化炭素 ( $\text{CF}_4$ ) ガスを用いた二酸化シリコン ( $\text{SiO}_2$ ) エッチングについて、高周波電力によるプラズマ生成・維持をマックスウェル方程式と流体方程式を用いてモデル化し、プラズマ容器内の気相および容器壁と基板表面における数多くの反応過程を考慮に入れてプラズマ特性を数値解析した。プラズマ電子密度・温度、フッ素原子密度、フルオロカーボンイオン・ラジカル密度、および反応生成物密度と、エッチング速度との間の関係を系統的に調べた結果、エッチングに寄与する中性反応種はフッ素原子でありその密度は原料ガス分子と同じ程度であること、フルオロカーボンラジカルとエッチング反応生成物のシリコンフッ化物がフッ素原子の 1/10 程度の密度で存在し、表面堆積によりエッチング反応抑制種として作用すること、基板から放出された酸素との反応による化合物も存在すること、を明らかにした。

(2) 基板表面の微細パターン構造内の粒子輸送、表面反応、およびエッチング加工形状進展に関して原子スケールの数値解析モデルを提案した。具体的には、上の(1)の結果を用いて、二次元トレンチ(溝)と軸対称ホール(孔)の2種類の構造について、微細構造内表面へのイオンと中性ラジカルの入射フラックスを粒子シミュレーションにより解析し、さらに表面反応過程をモンテカルロ法により解析することにより、被エッチング構造のパターン寸法(溝幅、孔径)に依存して変化するエッチング微細加工形状を調べた。その結果、ホールと比較してトレンチの方が、中性粒子に対する微細パターン構造の幾何学的シャドーイング(陰影)効果が小さいことに起因して、エッチング速度、パターン側壁のアンダーカット、およびエッチング速度と形状のパターン寸法依存性が大きくなることを明らかにした。

(3) 上の(2)で開発したモデルをもとに、さらに入射電子の輸送を考慮に入れてポアソン方程式を解くことにもとづく微細構造内の電荷蓄積と電位分布の数値解析モデルを構築し、ホールと比較してトレンチの方が、電子に対する微細パターン構造の幾何学的シャドーイング効果が小さいことに起因して、微細構造底部の電位が低くなること、構造底部電位のパターン寸法依存性が大きくなること、を明らかにした。

以上要するに本論文は、フルオロカーボンプラズマによる酸化シリコンエッチングについて、誘導結合型高周波放電によるプラズマ生成から、基板表面の微細構造内の粒子輸送・表面反応にまで至る統一的な数値解析モデルを構築し、トレンチとホールの異なる2種類のパターン構造に対するエッチング加工形状の違いとその機構を明らかにしたものであり、得られた成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成24年4月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。