

氏 名	お さ の ゆう ご 小 佐 野 祐 吾
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2718 号
学位授与の日付	平 成 18 年 9 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 航 空 宇 宙 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	An Atomic Scale Model of Plasma-Surface Interactions and Numerical Analysis of the Feature Profile Evolution during Silicon Etching in Chlorine-Containing Plasmas (塩素系プラズマによるシリコンエッチングにおけるプラズマ・表面相互作用の原子スケールモデルと形状進展の数値解析)
論文調査委員	(主 査) 教 授 斧 高 一 教 授 青 木 一 生 教 授 稲 室 隆 二

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、塩素系プラズマによるシリコンエッチングについて、プラズマと固体表面との相互作用とエッチング加工形状進展に対する原子スケールの新しい数値解析モデルを構築し、幅 100nm 以下のスケールの微細加工形状とその微視的均一性を支配する機構を論じた結果をまとめたものであり、5 章からなっている。

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の歴史と現状を述べるとともに、プラズマ・表面相互作用と、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）との関係について、現在の理解をまとめている。さらに、プラズマ・表面相互作用とエッチング形状進展に関するこれまでの数値解析モデルと解析手法について説明している。

第 2 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、塩素プラズマによるシリコンエッチングを対象に、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、二次元トレンチ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、基板をシリコン原子内包の原子サイズの二次元格子で模擬し、最表面シリコン原子と入射粒子との反応とともに、基板内へのイオンの侵入と反応をモンテカルロ法によって解析した。この新しい解析モデルは、各粒子と表面との相互作用による表面反応層の形成や表面ラフネス、およびエッチングによる表面移動が、原子スケールの精緻さで表現できる特徴を有する。また、平坦な表面から幅 20nm 程度の微細パターン構造にいたる広い範囲のエッチング加工形状進展に対応できる。基板表面への各粒子入射フラックスとイオン入射エネルギーに依存して変化する表面反応層厚さやエッチング速度について、解析結果は既知の実験結果とはほぼ一致し、この解析モデルが、現実のエッチング表面の解析に適用できることを示した。

第 3 章では、プラズマエッチングにおける表面反応過程をより現実のプラズマ条件に即して解析するため、上で開発したモデルをもとに、表面への入射粒子として反応生成物と酸素を加え、表面反応としてシリコン塩化物のみならず酸化物や酸塩化物の形成・堆積・脱離も考慮に入れた発展モデルを提案している。この発展モデルは、多層の表面反応層と酸化・堆積層をあわせて表現できる特徴を有する。さらに、基板表面への各粒子の入射フラックス比、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幅に依存して変化するエッチング微細加工形状について、系統的な数値解析を行い、塩素／酸素混合プラズマによるシリコンエッチングの既知の実験結果と比較している。その結果、プラズマから流入する反応生成物の付着・堆積は広いパターン側壁ほど顕著なテーパ形状を生じること、パターン内部からのエッチング反応生成物のパターン側壁への再付着・堆積は狭いパターン側壁ほど顕著なテーパ形状を生じること、酸素による表面酸化はいずれもテーパ角度の増大につながることを明らかにした。さらに、流入する酸素フラックスが大きくなると、幅 100nm 程度以上の広いパターンでは、狭いパターンほどエッチング速度が小さい状態（RIE ラグ）から狭いパターンほど逆にエッチング速度が大きい状態（逆 RIE ラグ）に変化するが、幅 100nm 程度以下の狭いパターンでは RIE ラグの状態のままであること、を

示した。これは、パターン内表面でのエッチング反応と、反応生成物の付着・堆積や表面酸化による保護膜形成過程が競合して生じた現象であり、従来の数値解析では予測されず、本研究で初めて明らかにされたものであり、本解析モデルの有用性を示している。

第4章では、それまでの章で構築した解析法に、さらに、イオンと基板表面との衝突に関して、イオンの表面での反射と基板内への侵入の自己無撞着な取り扱いを付加したより高精度なモデルを提案している。具体的には、基板表面に入射する塩素イオンが基板のシリコン原子と二体衝突を繰り返すものとし、衝突パラメータと散乱イオンの速度を三次元空間において衝突ごとに連続して計算する解析モデルを構築し、分子動力学による理論的なイオン反射角度・エネルギー分布との比較により、このモデルが、イオンの基板表面での反射・侵入がエッチングに及ぼす影響の解析に適用できることを示した。この解析モデルは、基板表面でのイオンの非弾性・非鏡面反射を自己無撞着に扱える特徴を有する。エッチング微細加工形状の数値解析と、塩素／酸素混合プラズマによるシリコンエッチングの既知の実験との比較により、パターン幅に依存してパターン底部の側壁近傍に形成されるマイクロレンチと呼ばれる微細溝の発現が、パターン側壁に浅い角度で入射して反射するイオンと保護膜形成との競合に起因することを初めて明らかにした。

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簡単に触れ、将来のプラズマエッチング技術に対応する解析モデルについて提言を行っている。

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、特に、塩素系プラズマによるシリコンエッチングについて、プラズマと固体表面との相互作用とエッチング加工形状進展に対する原子スケールの数値解析モデル構築と、幅100nm以下のスケールの微細加工形状とその微視的均一性を支配する機構解明を目標に研究した成果についてまとめたものであり、その主な成果は次のとおりである。

(1) 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、二次元レンチ構造内表面へのイオンと中性反応種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た。さらに、基板をシリコン原子内包の原子サイズの二次元格子で模擬し、最表面シリコン原子と入射粒子との反応とともに、基板内へのイオンの侵入と反応をモンテカルロ法によって解析した。基板表面への各粒子入射フラックスとイオン入射エネルギーに依存するエッチング速度について、塩素プラズマによるシリコンエッチング実験との比較を行い、この新しい解析モデルが、現実のエッチング表面の解析に適用できることを示した。

(2) プラズマエッチングにおける表面反応過程をより現実のプラズマ条件に即して解析するため、上のモデルをもとに、表面への入射粒子として反応生成物と酸素を加え、表面反応としてシリコン塩化物のみならず酸化物や酸塩化物の形成・堆積・脱離も考慮に入れた発展モデルを構築した。多層の表面反応層と堆積層をあわせて表現できることが本モデルの特徴である。各粒子の基板表面への入射フラックス比と被エッチング構造のパターン幅に依存して変化するエッチング微細加工形状について、塩素／酸素混合ガスプラズマによるシリコンエッチング実験との比較により、構造内表面での反応生成物の付着・堆積と酸化による保護膜形成過程の重要性を明らかにした。

(3) さらに、イオンと基板表面シリコン原子との衝突に関して、二体衝突の衝突パラメータと散乱イオンの速度を、衝突ごとに連続して計算することにより、イオンの表面における反射と基板内への侵入の両者を自己無撞着に扱うモデルを構築した。エッチング微細加工形状の数値解析と、実験との比較により、パターン幅に依存してパターン底部の側壁近傍に形成されるマイクロレンチと呼ばれる微細溝の発現が、パターン側壁に浅い角度で入射して反射するイオンと、保護膜形成との競合に起因することを初めて明らかにした。

以上要するに本論文は、塩素系プラズマによるシリコンエッチングについて、微細パターン構造内の粒子輸送、表面反応、および加工形状進展に関する原子スケールの新しい解析法を構築し、実験と比較してその妥当性を示すとともに、パターン表面におけるイオンの反射・侵入の重要性を定量的に明らかにしたものであり、得られた成果は学術上、実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18年7月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。