

報告番号	※ 甲 第 10598 号
------	---------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Studies on Plasma Etching Process Based on Autonomous Control for Nano-meter Fabrication (ナノメートル精度加工に向けた自律制御プラズマエッチングプロセスに関する研究)

氏 名 鈴木 俊哉

論 文 内 容 の 要 旨

半導体デバイスは、情報処理の増大と機能の複雑に対応して、大容量かつ高速動作の要求に満足するため、素子の微細化と高集積化、さらに配線多層化などの最新のプロセス技術によって製造されてきている。しかし、素子の微細化に伴い配線が微細化され、数10 nm幅の加工においては、数nmの加工揺らぎがデバイスの性能に直に影響してくる。このため、既存のプラズマ処理技術での対応には限界がみられてきていた。そこで、加工揺らぎの原因には、装置の条件のドリフトなどであり、モニタリング技術を導入し、フィードバックやフィードフォワードに制御して、プロセス条件を自動的に最適化制御するアドバンスドプロセス制御 (APC) と呼ばれる、ウェハー間及びロット間の加工精度を向上させる技術が期待されている。すなわち、プラズマ内部パラメータ (イオン、ラジカル、中性粒子の密度など) は、チャンバ壁表面の状態によって影響を受けているにもかかわらず、この粒子と壁の相互作用についてほとんど理解されていなかった。例えば、プラズマ点火直後から基板やチャンバ内壁表面の温度が変化すると、表面でのラジカル損失確率は変化して、気相の活性種の密度に影響を与える。そこで、私はプラズマ内部パラメータをリアルタイムに計測して、壁表面でのプラズマと表面の相互作用について、ラジカル損失確率を含むて解明し、装置自体が自律的に最適なプラズマ内部パラメータを得るようにプロセス条件を制御する手法について研究し、その成果をもって信頼性の高い生産技術を構築することを目指している。

本研究ではまず、プラズマエッチング技術が数nmレベルの有機材料の加工に適用可能な技術かどうかを模索するため、直径10 nmの微細パターンを作成しエッチング形状制御の評価を行った。基板温度とラジカル密度比を制御することにより、従来の加工手法による微細化の限界4 nmを超えたゆらぎ1 nm以下の微細加工に成功しました。また、チャンバ壁の表面状態を意図的に変化させた後 H_2/N_2 プラズマ中の粒子密度をリアルタイム計測し、直前のプロセス履歴がプラズマ中のラジカル密度変化へ与える影響を調査した。真空紫外吸収分光とX線光電子分光を用いることで、壁表面の科学組成の変化とラジカル密度変化の関係性を明らかにした。また、チャンバ壁の表面状態を意図的に変化させた後、 H_2/N_2

パルスプラズマ中の表面損失確率の時間変化を同様に計測し、壁表面損失への影響を調査した。ラジカル密度の減衰曲線を調べることで分子ラジカルの表面損失確率や原子ラジカルの表面損失確率の計測に加え、これまでに報告のないプロセス中での表面損失確率の変化を評価し、プラズマ状態のシミュレーションに有用な知見の獲得に成功した。さらに、ガスのフィードバック制御によりラジカル密度比を理想値に制御し、そのプロセスのエッチング特性への影響を評価した。直前のプロセス履歴が内部パラメータ(壁付近のラジカル密度等)へ与える影響を抑制することにより、エッチング形状を垂直形状に近づけられることを示し、数 nm レベルの高精度加工プロセスへの指針を示した。

以下に本論分の各章の概要を示す。

第1章 序論

本章では、ULSIの発展とそれに伴って必要とされるプラズマエッチングプロセスの微細加工技術の高度化、そして微細加工を行う上での問題となっているプラズマ状態を乱す要因について述べた。また、プラズマのリアルタイム制御システムへの期待と、その展望について述べた。

第2章 有機膜のエッチング特性及びプラズマ中のラジカル密度評価方法

本章では、本研究で用いた有機膜(SilkTM)のエッチング特性解析技術およびプラズマ中の成分の分析方法について述べた。また、プラズマ照射によってエッチングを行った有機膜の形状や結合状態を評価に用いた、X線光電子分光法(XPS)、走査型電子顕微鏡(SEM)など薄膜評価方法の原理について述べた。また、プラズマ中のラジカル密度を分析するために用いた真空紫外吸収分光法(Vacuum Ultra Violet Absorption Spectroscopy: VUVAS)について述べた。

第3章 直径10nmの微細パターン作成及びその電気特性の評価

本章では、プラズマエッチング技術が数 nm レベルの有機材料の加工に適用可能な技術として確立するために、微細パターンにおける加工時の側壁形状制御とその反応機構を検討・調査するために、数 nm の微細マスクを作成しそのエッチングを行った。結果、超臨界白金微粒子担持法を用い粒径を制御して白金微粒子を有機膜状に形成し、微粒子をマスクとしたエッチングにより直径10 nm、側壁エッチング1 nm以下の垂直エッチングに成功した。また、本アプローチを用いて作成した直径10 nm程度の微細な有機ピラーのデバイス応用として、電解電子放出特性を評価した。結果、加工条件を制御することにより非常に高い伝導性と電子放出特性が得られた。当研究成果は、プラズマエッチングによる数 nm レベルの微細構造の作成や、電解電子放出素子など新しいデバイス応用が期待出来る材料の加工プロセスとして期待される。

第4章 H₂/N₂ プラズマ中のラジカル密度へ前のプロセスが与える影響

本章では、プラズマプロセスのパラメータに特に大きな影響をもたらすチャンバ壁の影響に着目した。これまでもチャンバ壁の影響はプロセスドリフトとして広く知られており、制御時間的に安定しプロセス間でも再現性の高いプロセスを実現するためにはその影

響の制御は必要不可欠である。チャンバー壁の表面状態を意図的に変化させた後に H_2/N_2 プラズマ中の粒子密度を *in-situ* にて計測し、直前のプロセス履歴が内部パラメータ (壁付近のラジカル密度等) へ与える影響を調査した。結果、前プロセスが H_2/N_2 プラズマ (シーズニング)、 H_2 プラズマ、 N_2 プラズマの場合、大きな変化は見られなかった。しかしながら、 O_2 プラズマ、及び大気曝露を行った場合には、プラズマ点火後に密度が上昇し、緩やかに低下する結果となった。また、 O_2 プラズマの後では、 H_2/N_2 プラズマ点火後の H ラジカル密度が大きく増加する結果となった。この値はシーズニングの後の結果に比べて倍以上となり、ラジカル密度はチャンバー壁の状態に大きく左右されることがわかった。

第5章 H_2/N_2 プラズマ中の壁損失確率へ前のプロセスが与える影響

本章では、チャンバー壁の表面状態を意図的に変化させた後、 H_2/N_2 プラズマ中の粒子密度を *in-situ* にて計測し、直前のプロセス履歴が壁の状態およびその損失確率 (α) へ与える影響を調査した。その結果、シーズニング (H_2/N_2 プラズマ処理)、 H_2 プラズマ処理、 N_2 プラズマ処理、チャンバーの大気曝露それぞれの履歴によって損失確率が異なることがわかった。シーズニング条件に対して H_2 プラズマでは α の変化が見られなかったものの、大気曝露ならびに N_2 プラズマの履歴をもつ場合にはラジカル損失確率が H ラジカル N ラジカルともに増加が見られた。また、XPS の計測結果より、 N_2 プラズマ処理後や大気曝露後のチャンバー壁の表面損失確率が H_2 ガスを含む H_2/N_2 プラズマや H_2 プラズマ処理後に比べ大きくなった結果として、N 原子表面の変質が損失確率増加への直接の要因となることが明らかとなった。

第6章 ラジカル密度のリアルタイムフィードバック制御とそのエッチング特性への効果

本章では、チャンバー壁を大気に曝し表面状態を意図的に変化させた後、 H_2/N_2 プラズマ中の粒子密度を *in-situ* にて計測し、大気曝露の影響をリアルタイムに理想状態に抑制しエッチング特性を評価した。結果、大気曝露直後の H_2/N_2 プラズマ中の $H/(H+N)$ ラジカル密度比は、自動制御を行わなかった場合 N ラジカル比が増加しテーパ形状となる。また、自動制御により $H/(H+N)$ を理想的な値である 0.5 に制御を行った場合、テーパ形状は大幅に改善され理想に近い形状となり、チャンバーへ気の状態に関わらずラジカル密度の制御によりエッチング形状を制御出来る可能性を示唆した。また、チャンバー壁のラジカル密度比への影響を供給ガスのフィードバック制御により制御できることを示した。当アプローチは、装置自体が自律的に最適なプラズマ内部パラメータを得るようにプロセス条件を制御するな、プラズマプロセスの新しい制御手法として期待される。

第7章 結論

本章では、本論文を総括し、今後の課題と展望について述べた。本論文では、より高精度な微細加工を実現するために、プラズマエッチング中のラジカル密度の変化及び壁表面損失確率を明らかにした。その結果、同一プラズマ条件においても前処理がことなることによりラジカル密度が大きく異なり、その密度比を制御することにより目的の加工を出来ることがわかった。さらに表面損失確率などのシミュレーション应用到に有用な知見の獲得に成功した。今後さらに高精度な処理を実現し目的の値にパラメータを制御するためには、

現状 30 秒以上の長い制御時間を必要としている今後一層の制御系の理解と改良が必要である。本研究での知見は、より高精度で高速な制御系の開発には必要不可欠であり、今後到来が予想される数 nm レベルの有機材料の加工の実現に大きく貢献できると考える。