

(論文内容の要旨)

本論文は、半導体デバイスの製造プロセスにおける直径 $0.1\mu\text{m}$ レベルの高アスペクト比のコンタクトホールエッチング技術の確立を目指した絶縁膜のプラズマエッチング技術に関する研究成果をまとめたものであり、7章からなっている。

第1章は序論であり、研究の背景、課題およびその位置付けについて述べた上で、論文全体の構成と各章の概要を示している。

第2章では、絶縁膜プラズマエッチングの基礎として、各種のプラズマ源とエッチング装置の概要や SiO_2 のエッチングメカニズムについて簡潔に説明し、本論文で新規に用いたエッチングガスである C_5F_8 ガスの分子構造との特徴についても述べている。

第3章では、 C_2F_6 ガスによる低ガス圧力の誘導結合型プラズマ装置において、シリコン製の上部電極温度を 280°C に調整することによってフッ素除去効果を促進し、炭素対フッ素ラジカル比を高くすることでシリコン基板に対する選択比を 30 程度まで向上させた。また、基板選択比向上のために形成したコンタクトホール底部のポリマー膜を、酸素プラズマにバイアスパワーを印加することによって除去できることを示した。さらにこのとき、 5 mTorr 以下の低ガス圧力でポリマー膜を除去すると、酸素の打ち込みによってコンタクト抵抗が大きくなるが、 10 mTorr よりもガス圧力を高くすることによって酸素の打ち込みによるコンタクト抵抗の上昇を抑制できることを、オージェ電子分光法による酸素の深さプロファイルによって明らかにした。その結果、従来の容量結合型プラズマで形成したコンタクトホールに比べて p^+ 拡散層上におけるコンタクト抵抗は 40% 程度低く、 n^+ 拡散層におけるリーク電流も約 2 桁近く低減でき、良好なコンタクト特性が得られることを述べている。

第4章では、 C_2F_6 、 C_4F_8 、 C_5F_8 ガスを用いた低ガス圧力、誘導結合型プラズマにおけるポリマー膜の堆積が高分子ラジカルによって発現する新たなメカニズムを、電子付着質量分析 (EAMS) 法によって明らかにした上で、量産装置で実際にレジスト選択比を向上させた結果について詳細に述べている。高分子ラジカルは C_5F_8 ガスを使ったプラズマで最も多量に生成し、その量は $\text{C}_5\text{F}_8 > \text{C}_4\text{F}_8 > \text{C}_2\text{F}_6$ の順に多くなっており、ガス滞在時間によって高分子ラジカル比率を制御できることを EAMS 法によって見出した。すなわち、 C_4F_8 や C_5F_8 ガスプラズマでは、ガス滞在時間を短くすることによって高分子ラジカル比率を大きくできるが、 C_2F_6 ガスプラズマでは、逆にガス滞在時間を長くしないと高分子比率を大きくできないことを示した。また、 C_4F_8 、 C_5F_8 ガスプラズマでは、ガス滞在時間を長くすると生成された C_2F_6 が主成分を占めることも明らかにした。実際、ポリマー膜の堆積速度やレジストエッチング速度の挙動は、高分子ラジカルの生成の挙動と一致しており、レジストエッチング速度はその逆の傾向になっている。以上の実験装置で得られた知見を量産装置におけるエッチング特性と繋ぐために、ガス流量 Q に対する投入パワー W の比としてガス分子のプラズマ中でのエネルギー吸収量 W/Q を定義し、この値を相互比較の指針として量産装置におけるエッチング条件を設定し、 C_5F_8 ガスを用いたコンタクトホールエッチングプロセスを実施した。その結果、実験装置での基本的なプロセス性能を再現でき、 C_5F_8 ガスによってレジスト選択比を C_2F_6 ガスの場合より 4 倍程度大きくすることができた。さらに、 C_5F_8 を用いたプロセスでは、排出される PFC ガスの量が C_2F_6 および C_4F_8 の場合に比べてそれぞれ 83%、64% 減少することを確認し、地球温暖化対策にも有効であることを示した。

第5章では、実験装置においてキャピラリープレートで模擬したコンタクトホールに入射するイオンの挙動を明らかにした上で、量産装置における RIE ラグの改善を成し得た結果について述べている。まず、真空装置内に小型のプロセスチャンバを配置し、そのプロセスチャンバ自体をイオンエネルギーアナライザーのオリフィスに対して高精度に回転させることによってコンタクトホールに入射する Ar イオンの量とその角度分布を調べ、投入パワーを低減することによって Ar イオンの入射量が大きくなる領域が存在する現象を見出した。さらにキャピラリープレートのアスペクト比を大きくするとイオンの角度分布の幅が狭くなっており、コンタクトホール側壁部の反射によってイオンが収束することを示した。これらの知見を基に、量産装置においてバイアスパワーを 4.14 W/cm^2 から 2.23 W/cm^2 に低減することによって RIE ラグを大幅に改善できることを見出している。また、RIE ラグの延長線上にあるエッチストップ現象についても低バイアスパワー化によってエッチストップマージンが拡大することを示している。さらに、RIE ラグのモデル化にも取り組み、従来のモデルとの差を物理的な観点から明らかにしている。

第6章では、量産装置におけるエッチングプロセスの安定化に向けて、実際の Si 基板のエッチ生成物がエッチング特性へ及ぼす影響について述べている。具体的には、誘導結合型プラズマ装置を用いたアルミニウム配線へのヴィアホールエッチングにおいて、Al がヴィアホールからプラズマ中に飛散することを OES によって明らかにし、飛散した Al はプロセスチャンバ内の所々に付着することを XPS 分析によって示した。しかも Al の飛散量はヴィアホールのアスペクト比に依存することを示し、各所に付着したアルミニウムがエッチストップ現象を引き起こすことを見出した。さらに銅配線へのヴィアホールエッチングにおいても Cu がプラズマ中に飛散し、プロセスチャンバ壁面に付着することによってエッチング特性が影響を受けることと Cu によってプラズマ密度が上昇することを PIM (Plasma Impedance Monitor) および OES (Optical Emission Spectroscopy) を用いて明らかにした。Cu によって SiN 膜のエッチング速度は 1/3 に低下する一方で、SiO₂ 膜のエッチング速度は 1.5 倍近くまで逆に上昇することを見出した。SiN 膜のエッチング速度が遅くなるのは、プロセスチャンバ壁面に付着した Cu の触媒効果によって CF₂ ラジカルが変質した結果、CF₃ ラジカルが主成分となり、SiN 膜上で CF₃ ラジカルによるポリマー膜が形成するためであることを XPS 分析によって明らかにした。一方、SiO₂ 膜上では厚いポリマー膜が形成されず、プラズマ密度の上昇で、ウェーハに流入するイオン電流が大きくなり SiO₂ 膜のエッチング速度が速くなることを示した。プロセスチャンバ壁面に付着した Cu はダミーエッチングによってプロセスチャンバ外に排出でき、エッチング特性およびプラズマ状態も銅が飛散する前の状態に初期化できることも明らかにした。最後にフルオロカーボンプラズマ中で発生し、ウェーハ上に付着するパーティクルが自己バイアス電圧と相関があることを見出し、自己バイアス電圧を中心に装置のパラメータを組み合わせることによってウェーハ上に付着するパーティクル数を仮想的に測定できる新しいセンシング技術を開発した結果について示している。

第7章は総括であり、最終的にアスペクト比 17 の $0.1 \mu\text{m}$ 径コンタクトホールエッチングで得られた良好な加工形状を示すとともに、本研究の成果をまとめている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、システムオンチップなどの半導体デバイスの製造におけるナノレベルの微細加工技術として必須のプラズマエッチング技術に関して、高密度プラズマ源と C_5F_8 ガスを組み合わせて、直径 $0.1\mu\text{m}$ レベルの高アスペクト比のコンタクトホールエッチング技術の確立を目指した研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 従来の標準的な C_2F_6 ガスを高密度の誘導結合型プラズマ源と組み合わせたコンタクトホールエッチングにおいて、チャンバ内に付加的に配置したシリコン板によるフッ素除去効果によって、シリコン基板に対する選択比を 30 程度まで向上させることができ、従来の容量結合型低密度プラズマ源を用いる場合に比べて良好なコンタクト抵抗が得られることを示している。
2. C_2F_6 、 C_4F_8 、 C_5F_8 ガスを用いた誘導結合型プラズマにおいて、レジスト選択比が高分子ラジカルが存在によって発現するメカニズムを、電子付着質量分析法によって明らかにし、必要な高分子ラジカルが C_5F_8 ガスを使ったプラズマ中で最も多く生成され、その相対量をガス滞在時間によって制御できることを見出している。また、エッチング速度がデバイスパターンに依存する RIE ラグやエッチストップと呼ばれる現象に関して、コンタクトホールに入射するイオン量が、バイアス電力を下げることによって大きくなる領域が存在することを発見して、この問題に対する解決の方向を見出している。
3. 上で得られた知見を実際の量産装置に適用することによって、製造プロセスにおける RIE ラグの低減に成功している。
4. アルミニウム配線や銅配線上へのヴィアホールエッチングにおいて、飛散した Al によってエッチストップが発生することや Cu によって SiN や SiO_2 のエッチング速度が変化する現象に対して、その具体的な解決方法を示している。
5. さらに、本研究で採用した C_5F_8 ガスと高密度プラズマ源を用いた量産化プロセスが地球温暖化対策に有効であることも示している。

以上の内容を総括すると、本論文は半導体デバイス製造プロセスにおける高アスペクト比のコンタクトホールエッチング技術について、実験室レベルでの基礎研究の知見をもとに実際の量産プロセスでの実用的な制御法を確立した過程での研究成果をまとめたものであり、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 21 年 2 月 23 日に、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。