

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 深澤孝之

ULSI(超大規模集積回路)製造プロセスにおいて、プラズマを用いたエッチングが重要な役割を担っており、低/無磁場状態でプラズマ生成が可能なヘリコン波プラズマ(HWP)と誘導結合プラズマ(ICP)が注目されている。本論文は、まずRF周波数帯をプラズマの励起周波数として用いるこれらの2種類のプラズマをULSIドライエッチングに応用するにあたり、その生成から検討し、プラズマ特性を基にRF自己バイアス電圧(Vdc)特性を実験と理論から解明した。更に、ULSIエッチングで切望されているシリコン酸化膜(SiO₂)の高速・高選択比コンタクト孔エッチングをICPプラズマにおいて検討し、そのエッチングメカニズムを解明した。次いで、このメカニズムをHWPへ積極的に応用し同様に高速・高選択比エッチングを達成したもので、6章より成る。

第1章は序論であり、ULSIドライエッチング装置に用いられるプラズマの現状と、高密度プラズマの必要性および課題について概観し、本論文の目的・構成を述べている。

第2章では、一卷アンテナを用いたICPの生成からプラズマ特性について検討し、一卷アンテナがシリコン(Si)ウエハ上では、径方向に均一なプラズマ密度分布を生じ、空間的にシート状の密度分布を有し、電子密度及び電子温度が、その下流領域で急速に減衰することを示している。しかし、得られた均一なシート状プラズマを用いてエッチングを行ったところ、Vdcの印加が高密度プラズマでは困難になることを示し、Vdc特性の測定結果を基に計算した結果、アルゴンプラズマでは、Vdcが電子密度(Ne)の2乗に反比例していることを発見している。更に、実際にエッチングに用いる塩素プラズマにおいて、Vdc特性を考察した結果、負イオンの存在が示唆され、飽和電子電流と飽和イオン電流から求めた負イオン量は、ICPソース電力に依存し、低電力側では負イオン量が増加することを実験と計算から検証している。

第3章では、ICPを用いたSiO₂エッチング特性について述べている。C₄F₈に水素を添加し、ICPの下流領域でSiO₂のエッチングを行った結果、高速で、Siに対して高選択比のエッチングを達成している。この高速・高選択比の発現機構について、プラズ

マ特性およびエッチング特性の両面から検討した。その結果、ICPプラズマの下流領域では、高速電子の少ない拡散プラズマ領域であり、Siをエッチングし選択性を低下させているフッ素原子を水素原子が除去して生じたHFが、再分解されずに速やかに排気されることにより、高選択比SiO₂エッチングが達成されていることを明らかにしている。また高選択比SiO₂エッチングが達成されている条件下で、SiO₂及びSi上に生成される重合膜は、フッ素原子が少なく炭素が非常に多い組成をしており、これがSiのエッチングを阻止していることも示している。また、ICPのエッチング特性を研究中に、水素を添加すると孔径の減少と共にSiO₂のエッチング速度が低下する通常のマイクロローディング特性が生じるが、これは孔径の小さい時は、孔底に上述の炭素リッチな重合膜が生成したためと判明した。しかし、水素を添加しない場合、孔径の減少と共にSiO₂エッチング速度が早くなる逆マイクロローディング効果を示すことを新たに発見している。この発生原因を調べると、逆マイクロローディングは、重合膜生成が孔の開口部に生成し、孔底部では堆積が抑制され、フルオロカーボンイオン(CFx⁺)によりエッチングが進行することを明らかにした。

第4章では、第3章のSiO₂エッチングにおける微細な孔の中でのエッチング機構について、出現電圧質量分析法を用いたラジカル計測結果を基に考察している。ここでは、C₄F₈への水素添加の有無で生じたラジカルを多数の微細孔を有するMicrochannel Capillary Plate(MCP)中を通過させ、CF_x(x=1~3)ラジカル密度の微細孔内での減衰率のアスペクト比(孔の深さ/孔径)依存性を測定した。その結果、CF₁ラジカルは最も付着確率が大きく重合膜の主な先駆体であり、水素添加の無い場合には孔開口付近に堆積し、これが逆マイクロローディング効果を引き起こすことを明らかにした。また、水素添加によりこのCF₁ラジカルは、付着確率が1/2程に低下し、このためアスペクト比の高い孔底へも到達することが可能となり、アスペクト比の高い孔底にも重合膜を形成でき、このことが微細孔底部への重合膜形成量増加の起源であると考察している。このことは、微細孔側面のSiO₂や既に重合膜を形成しているCF膜の最表面を水素が終端し、重合膜の形成過程に重要な最表面のダングリングボンドを減少させるためであると推定している。また、エッチング特性、気相のラジカル密度、エッチング反応の進行する表面のXPS分析等を総合的に検討した結果、ラジカル密度比(CF₁/CF₂)と膜中のC-C/F比に相関があること示し、このCF₁/CF₂が増加する時に、高選択比のエッチングが達成されることを示している。炭素リッチな重

合膜がSiのエッチングを抑制するために、高選択比のエッチングが達成されるが、過剰な CF_1 ラジカルは SiO_2 のエッチングを阻害する効果があり、 SiO_2 のエッチング速度の低下を生じることを発見している。

第5章では、HWP HWP中のヘリコン波の伝搬特性について実験結果を基に検討している。一卷アンテナを用いたHWPを初めて生成し、従来からの二巻のヘリコンアンテナよりも、アンテナ付近で30%以上大きいプラズマ密度が得られることを示している。ヘリコン波の伝搬特性を測定した結果、これは伝搬しながらヘリコン波の位相速度を増加させるためであることを発見している。また、このプラズマ中に伝搬する電磁波を測定した結果、ヘリコン波の分散関係に合う波動電磁界が、30ガウスの低磁界でも観測されることを示している。更に、HWPを SiO_2 エッチングに適用すると、試料位置にまで高密度プラズマが生じ、高選択比を得ることはできなかった。しかし、ICPの高速・高選択比 SiO_2 エッチングの発生機構に則って、ヘリコン波がエッチングサンプルを設置する位置まで伝搬しないリング磁石を用いて改良することで、殆ど無限大の選択比を達成できることを示している。

第6章においては、本研究の総括である。

以上要するに、本研究はICPおよびHWPを用いて、高速・高選択比エッチングを達成すると同時にその発現機構に関して「拡散プラズマ領域でエッチングを行う」と言う新たな概念を提案し、MCP等の新しい解析手法を用いて微細孔内部でのエッチング現象を初めて研究したものであり、半導体ドライエッチング技術の展開に寄与すると

よって本論文は博士(工学)の学位申請論文として合格と認める。