

報告番号	甲 第 11602 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 半導体エッチング装置における高周波と
直流の重畳印加によるフルオロカーボン
ガスプラズマの特性及び酸化膜の
エッチングメカニズムに関する研究

氏 名 大矢 欣伸

論 文 内 容 の 要 旨

プラズマを用いたドライエッチング技術は、過去約 40 年間にわたり、半導体デバイス製造の中心的な存在であり、素子の微細化を牽引することで半導体集積回路の発展を支えてきた。現代においても、半導体産業からは、さらに高難度のエッチングプロセスが要求されている。このようなエッチング加工を継続して性能向上させるためには、プラズマ内部の物理化学過程やエッチングの表面反応の素過程にまで立ち戻ってプロセスを理解し、これらに基づいて装置やプロセスを開発してゆく必要がある。科学的にエッチング現象を理解するには、気相反応と表面反応の 2 つに大きく分けて考える必要がある。気相反応とは、主にプラズマ中の電子がガス分子を電離や解離させて、エッチングに必要なイオンや中性ラジカルを生成した上で、それらが基板に輸送される過程である。また表面反応とは、基板に到達したイオンや中性ラジカルが、吸着・反応・脱離

と段階を経てエッチングを行う過程である。

本研究は、最先端の半導体プロセスを具現化する直流 (DC) 重畳印加によるフルオロカーボンプラズマエッチング装置を対象とし、将来の定量的な予測/制御を目指すため、プラズマ特性と表面反応メカニズムを解明することを目的とした。具体的には、課題 (1) 上部電極への負の直流電圧印加による電子の生成/消滅機構、(2) パルスプラズマ中での電子の時間的发展の振る舞い (3) $1,3\text{-C}_4\text{F}_6$ ガスを用いた高エネルギーイオン照射下でのエッチング表面反応を解明することを目的とした。

本論文は全 6 章で構成されている。第 1 章は序論であり、上記に説明したような、半導体集積回路の技術概要と最先端技術をていねいに紹介した上で、それを支えるプラズマエッチング技術の歴史的発展と現在の課題についてまとめ、本研究の目的を述べた。

第 2 章では、本論文で用いたエッチング装置、プラズマ測定手法、表面分析手法について述べた。具体的には、最先端の DC 重畳印加の容量結合型プラズマ (CCP: Capacitively Coupled Plasma) エッチング装置、フルオロカーボンガスの CCP 計測に優れた電子密度計測法である表面波プローブ法、エッチング反応表面の組成を高精度で組成分析できる X 線光電子分光法 (XPS)、 $< 1 \text{ nm}$ の深さ分解能で化学状態を分析できる飛行時間型二次イオン質量分析法 (TOF-SIMS) について説明している。

第 3 章では、上部電極 DC 電圧印加型 CCP 中の電子密度の時空間的な振る舞いについて述べた。印加 DC 電圧が電子密度の増減に与える影響を調べ、DC 電圧を増加させた時の電子密度は、下部電極の高周波 (RF) 電圧が高い時にのみ増加することを明らかにした。また同時に、この時の電子密度の空間分布を調べることで、上部電極の DC 電圧と下部電極の RF 電圧が高ければ、電子をプラズマ内部へ押し返す電界がプラズマの上層と下層で発生し、電子はプラズマ内部に捕捉され続け、プラズマバルク中での電離反応が促進され電子密度が高くなることを解明できた。一方、下部電極の RF 電圧が非常に低い時には、上部の DC 電圧を増加させると電子密度が減少する。これは上

部電極の DC 電圧によって加速された電子が下部電極でたやすく消滅してしまうことが原因であると解明できた。これらの知見を用いれば、今後、上部 DC 印加型プラズマエッチング装置における電子密度の予測と、それを利用したラジカル解離の予測に繋がられると期待できる。

第 4 章では、最新の商用 CCP エッチャーにおけるフルオロカーボンガスリッチなパルスプラズマ動作条件において、0.1 μs オーダーでの電子密度の高速時間分解計測に初めて成功した。その結果、RF オフ後、電子密度は 10 μs 以下で急激に減衰するが、その後はイオンイオンプラズマ（正イオンと負イオンのみからなるプラズマ）の状態ではプラズマが維持され続けていることを明らかにした。これにより、放電オフ後の負イオンがどのような条件でエッチングに利用できるかというプロセス改善の指針が示された。また、この電子密度の急激な減衰挙動は 1,3-C₄F₆ や c-C₄F₈ ガスの影響であり、CF₄ や CHF₃ ガス中では電子密度は急激には減衰しない。そのため、パルス動作による負イオンの活用のためには、これらのガス種の違いに応じて、パルス動作の周波数を制御しなければならないことも明らかになった。また、本研究で用いた 1,3-C₄F₆ や c-C₄F₈ が多く添加されているガス条件においては、実際のエッチングに使用されているパルス周波数条件の 5 kHz が最適であることを証明できた。プラズマの定量的なモデリングに向けては、1,3-C₄F₆/Ar/O₂ 2Pa の条件におけるプラズマオン時間が約 100 μs 以上に遅いパルス動作では、電子密度の振る舞いを定常値の矩形波で近似すれば、密度値が 10% 以内の誤差範囲内で見積もれることを明らかにした。これにより、パルスプラズマ装置中でのラジカル密度を定量的に見積もることを可能にした。

第 5 章では、マスク材料に対して SiO₂ エッチング速度が高くなる（高選択比）条件である 1,3-C₄F₆/Ar/O₂ ガスプラズマでの SiO₂ エッチングにおいて、実際に反応が起きている、非常に薄い (< 2 nm) SiOF 表面反応層の存在を捉えることに成功した。これまで、SiO₂ エッチングにおいては反応層の上にあるフルオロカーボン膜の情報だけ

でエッチングモデルが組み立てられていたため、幅広いエッチング条件の全てのエッチング速度の結果に対して、定量的な十分な説明と予測が行えなかった。本研究では、十分なモデル化できるパラメータとしてエッチング反応層厚さを新たに見いだすことができた。エッチング反応層は被エッチング体の SiO_2 がエッチング反応生成物の SiF_4 に反応する前の中間体である SiOF 元素組成からなり、その反応層厚さとエッチング速度との間に相関関係があることを明らかにした。その結果、反応層に伝わる実効的なイオンエネルギーがエッチング速度を支配していると考えられていた 1 つのエッチング速度抑制領域は、実は 2 つの領域として捉えるべきであることがわかった。新たに見つかった領域では、イオンエネルギーだけでなく、エッチャントや反応生成物の輸送にも支配されることが示唆された。これらの反応メカニズムをエッチング速度予測モデルに組み込めば、量産プロセスで非常に重要な高選択比プロセスでの高精度な予測モデルを構築できる。

第 6 章において、以下の節に説明するような、本論文の結論と今後の展望について述べている。

本論文の結論は、最先端の半導体プロセスを具現化する DC 重畳印加によるフルオロカーボンプラズマエッチング装置において、将来の定量的な予測/制御を目指すために必要なプラズマ特性と表面反応メカニズムを解明することができた。具体的には、表面波プローブや TOF-SIMS 分析の測定分解能を向上させた上で、最新装置に搭載されている新機能（上部電極への DC 印加、シンクロパルス、 $1,3\text{-C}_4\text{F}_6$ 高イオンエネルギーエッチング）を含んだプラズマエッチングにおいて、物理パラメータとしては最も重要な（1）電子密度の時空間の振る舞いと（2）エッチング反応層の振る舞いを明らかにすることができた。今後の装置開発やプロセス開発においては、本研究で用いた測定技術を利用することで、プラズマエッチングの物理的本質を抑えた効率的な開発を行うことが可能となる。また、本研究で得られた電子密度の時空間の振る舞いに関する知見を

取り入れることで、プラズマの実践的簡易シミュレーションを製作できる。このプラズマ簡易シミュレーションを基に、エッチング反応層の振る舞いを取り入れたエッチング速度予測モデルを作成すれば、トライ&エラーに頼らない、エッチング反応の予測／制御を行いながらの装置／プロセスの開発が達成できる。

将来に向けては、これらのモデリング機能をエッチング装置自身に取り込んだうえで、最適な装置状態が管理できる自己診断機能や、長期的に安定稼働するためエッチング条件を変更する自律制御機能、エッチング性能を最大化するためエッチング条件を自己構築できる学習機能などを搭載し、エッチング装置のインテリジェンス化や人工知能(AI)化が期待できる。また、エッチング製造装置が今後も発展し続けることにより、半導体集積回路の進歩、情報化社会の更なる発展を通じて、人類に幸福をもたらすことも確信できる。