

報告番号	※ 甲 第 11042 号
------	---------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Study on atomic-scale plasma process based on substrate-temperature control by frequency-domain low-coherence interferometry (周波数領域型低コヒーレンス干渉を用いた基板温度制御による原子スケールでのプラズマ加工プロセスに関する研究)

氏 名 堤 隆嘉

論 文 内 容 の 要 旨

近年、携帯電話（スマートフォン）やタブレット型のパソコンなどの電子機器の性能は年々向上しており、半導体の新たな市場が生まれさらに拡大している。これらの電子機器の中核であるLSI（大規模集積回路）は無数のトランジスタで構成されており、トランジスタの微細化・高集積化によって性能の向上だけでなく消費電力の低下を生んできた。そのため、半導体デバイスの製造工程に用いられているプラズマエッチングプロセスにおいても、高精度な加工技術が要求されている。半導体デバイス製造での要求される加工寸法は1 nm以下になることが予想され、プラズマ内の活性種（ラジカル）と被加工物の最表面の原子1つまたは1原子層単位での化学反応を制御する必要がある。1原子層単位での化学反応において被加工対象物である基板の温度は重要なパラメータとなる。なぜなら、ラジカルと被加工物との化学反応速度やラジカルや反応生成物の基板への付着係数などが温度に強く依存しているためである。そのため、半導体をはじめとするデバイス製造において、1原子層単位での化学反応を制御するためには、高精度かつ高速な基板温度計測システムが求められる。しかし、プラズマプロセス装置内が真空中であることや各種半導体基板の放射プロファイルが小さいことから、有効な基板温度計測システムが存在しないのが現状である。さらに、プラズマプロセス時間に伴う基板温度の変動が、エッチングメカニズムの解明および加工形状制御をより複雑なものとしてきた。本研究では、周波数領域型低コヒーレンス干渉計を用いた半導体基板の高精度・高速な新規基板温度計測手法の構築を行った。さらに、エッチングプロセス中の基板温度をリアルタイムで計測し、プラズマ照射時間および冷却時間をフィードバック制御することで基板温度を高精度に制御した。それにより、有機膜のエッチング形状やラフネスおよび化学的膜質変化の基板温度依存性を明らかにした。

以下に本論文の各章の概要を示す。

第1章 序章

本章では、LSI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および基板温度が加工形状に及ぼす影響について述べた。また、プラズマ中のイ

オンの基板への衝突や基板再表面での電荷やラジカルの再結合が基板にエネルギーを与える。その基板へのエネルギー流入によるプロセス中の基板温度の変動について述べた。さらに、プラズマプロセス中での基板温度計測に伴う課題点を現存する温度計測手法を例に挙げて述べた。

第2章 プラズマ内部パラメータ計測法と形状評価法

本章では実験で用いたプラズマ内部パラメータの計測方法と形状の評価方法について述べた。本研究では、基板温度とプラズマおよび薄膜のエッチング形状との関係を解明するために、基板温度計測には周波数領域型低コヒーレンス干渉計 (FD-LCI)、プラズマの気相中に存在するラジカルの振る舞いの評価には発光分光法 (OES)、エッチング形状評価には走査型電子顕微鏡 (SEM) をそれぞれ用いた。

第3章 半導体基板温度計測のための周波数領域型低コヒーレンス干渉計の構築

半導体基板が持つ表裏面の高い平行度および平坦性を利用することで、従来の低コヒーレンス干渉計から参照光ミラーを除去することができる。この干渉計を自己相関型周波数領域型低コヒーレンス干渉計 (ACT-FD-LCI) と名付け、ACT-FD-LCI を用いた基板温度計測法の特性を調べた。一般的に半導体デバイスに用いられる Si 基板 (厚さ:480 & micro;m) の温度計測の標準偏差は 550 °C 以下では 0.04 °C と高精度な基板温度計測法が構築できた。これは、干渉計から参照光ミラーを除き、Si 基板の表面および裏面での反射光の干渉を用いたことに起因している。なぜなら、これらの反射光は干渉計内を同経路で通過することで、それぞれの偏光状態は等しく、理想的な干渉が行われていると考えられる。また、ミラー振動や参照光除去による光強度低下に伴う電子回路でのノイズの軽減も精度向上の要因である。さらに、本方式は非接触式温度計測法であるため、非侵襲性および応答性の面で非常に優れた特性が得られた。つまり、ACT-FD-LCI は半導体製造でのプラズマプロセスだけでなく高速熱処理などの加工プロセスでの基板温度計測法としての有用性が得られる。しかし、Si 基板のバンドギャップ付近のエネルギーをもつ波長では、基板増加に伴う基板内部での光の吸収が顕著に現れる。それによる信号光の強度低下は精度の悪化および測定温度上限値の減少を引き起こした。

第4章 プラズマプロセス中の基板温度計測

プラズマと基板再表面との相互関係の理解を単純化するにあたり、プロセス中の基板温度を制御することは重要である。本章では ACT-FD-LCI によりプラズマプロセス中の基板温度の時間変化を計測し、基板の熱収支モデルの構築をおこなった。これまでプラズマプロセス中の基板での熱収支モデルがいくつか報告されている。しかし、プロセス初期では基板温度の時間変化は従来のモデルと一致していたが、プロセス時間の増加に伴いモデルとは異なる挙動を示した。これは、プラズマからの熱流入により、基板周辺に設置しているフォーカスリングの温度が上昇したことが原因と考えられる。基板に比べフォーカスリングが高温になり、フォーカスリングから基板へと熱移動が生じた。このため、従来のモデルに基板周辺部の温度変化を加え、基板のエネルギー流出を考慮した新規熱収支モデルを構築した。また、プロセス初期ではフォーカスリングの温度変化の影響が少ないことから、プ

ラズマ照射直後の基板温度の時間変化からプラズマからの熱流束を導出した。下部電極のバイアス電圧を変化させ、イオン衝突による基板への熱流束を変化させた。ACT-FD-LCIは、バイアス電圧に依存した基板温度の1℃未満の変化を計測できた。

第5章 基板温度制御による有機膜のエッチングプロセス

本章では、ACT-FD-LCIにより基板温度をリアルタイムに計測し、メインサーバーによりそれぞれの駆動装置を一括管理することで、放電時間および冷却時間をフィードバック制御する新規プロセスを構築した。それにより、任意の基板温度範囲でのプラズマプロセスが可能となった。従来のプロセスでは、プラズマ照射1分後では基板温度は90℃増加した。一方で、本システムでは基板温度を3℃程度の範囲で維持することが可能となった。また、放電時間と冷却時間の比であるDuty比はプロセスともに減少したことから、一般的に用いられているパルス放電では基板温度の制御は困難であることがわかった。このDuty比の変動は、第4章で述べたように、フォーカスリングの温度上昇による基板の熱流出量の減少が原因と考えられる。基板温度の変化率は下部電極のバイアス電圧の変化と密接に関わっていることがわかった。さらに、エッチング形状の基板温度依存性を調べるため、本システムをH₂/N₂プラズマに適用し有機膜であるSILKをエッチングした。プロセス基板温度の上昇はトレンチ幅の増大を促進した。これはエッチングにより生成された反応生成物のトレンチ側壁への付着係数や側壁の化学的膜質の温度依存性によるものである。

第6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、基板温度計測手法を用いてプラズマエッチング中の基板温度のフィードバック制御を行い、エッチング形状の基板温度依存性を解明した。また、プロセス中の基板温度を所望の温度域に制御することで、エッチングメカニズムやプラズマ表面相互作用の理解がより簡潔になった。今後、プラズマの気相診断法を用いてラジカル密度や電子密度・温度を含めた評価をおこなうことで、1原子層単位の反応を制御するプラズマプロセスの確立を目指す。