

氏名（本籍）	輿水 地塩（山梨県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲 第54号
学位授与日付	平成24年3月23日
専攻	システム工学専攻
学位論文題目	低コヒーレンス干渉計を用いたプラズマプロセス用温度モニターの開発とその応用
学位論文審査委員	(主査) 教授 土谷 茂樹 (副査) 教授 野村 孝徳 教授 田中 一郎 教授 伊藤 昌文（名城大学）

## 論文内容の要旨

半導体は高性能、省電力、低コストが継続して求められ、結果として用途が拡大してきた。その発展を支えているのが微細化技術である。さらなる発展にはプロセス中の基板や装置内の部品の温度を制御してプロセスを極めて正確に管理する事がますます重要となってきている。本研究では、プラズマプロセス中の基板や装置内の部品の温度、さらには薄膜の厚さを同時に精度良く計測する技術を構築し、さらにプラズマからの熱流速の計測方法を確立した。また温度計測技術をプラズマプロセス解析に応用して、プロセス開発に適応した。以下に各章ごとの要約を示す。

### 第1章 はじめに

本章ではエッチング装置やプロセスの概要、またプロセスに及ぼす温度の影響、さらにプロセス中のSi基板やチャンバー内の温度計測の必要性と現状の温度計測方法の課題について述べる。

### 第2章 低コヒーレンス干渉温度計の原理

低コヒーレンス光を使った干渉計を用いてSi基板の温度を計測する原理を記述する。

### 第3章 低コヒーレンス干渉温度計の高精度、高安定化

実プロセスでの温度計測の精度を確保する為に計測系の最適化を行い、温度校正、計測温度範囲、計測精度などについて調べた。実際のエッチングプロセスにおいて、計測範囲は室温から640℃、計測のばらつきは3 $\sigma$ で0.34℃で、計測周期は0.95秒であった。

### 第4章 エッチングプロセス中の基板の温度計測

低コヒーレンス干渉温度計は非接触方式であり、従来不十分であったプロセス中の基板や装置内のプロセスに影響を与えるSi部品の高精度温度計測が期待されている。そこで、実際のプラズマエッチング装置に搭載し、他の2種類の計測方法とそれぞれ同時計測を行い評価した。図1に示すように、プラズマプロセスは減圧環境下で行われる為に接触式の光ファイバー式蛍光温度計では十分な温度応答が得られないことが確認された。一連の実験で、低コヒーレンス干渉温度計はプラズマプロセス中の基板や装置内のSi部品の温度を非接触、高精度に計測可能であることが確認された。また従来方法では不可能であった高RFパワーのプロセス条件で計測できることが確認された。今後、プロセス中の温度フィードバックセンサーのみならず、プラズマプロセス解析などに貢献する事が期待される。

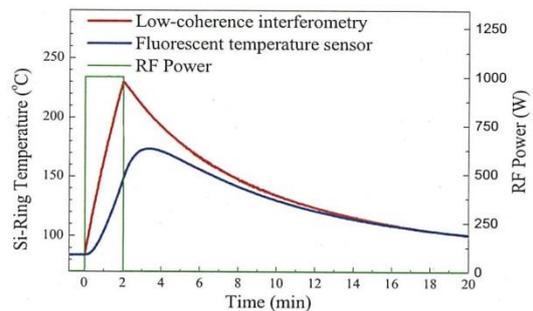


図1. Siリング温度の同時測定結果

### 第5章 低コヒーレンス干渉計を用いた基板温度と薄膜厚さの同時計測

プラズマプロセスでは、処理中の基板の温度に加え、薄膜の厚さを計測するニーズがあり、低コヒーレンス干渉温度計で両者をリアルタイムかつ同時計測する研究を行った。基板上の薄膜をエッチ

ング中に基板の温度を本方法で計測すると、エッチングにより薄膜の厚さに依存して温度測定精度が低下する。そこで、薄膜のエッチング中の干渉波形のピーク強度比からその時の薄膜の厚さを理論的に求め、その結果を用いてリアルタイムに光路長を補正して温度補正を行なう事を試みた。その結果、図2に示す様に従来約7.8°Cあったプロセス中の温度計測誤を温度補正(図中:With Compensation)する事で0.6°Cまで改善する事が確認された。さらに SiO<sub>2</sub> 薄膜の厚さ検出誤差はエッチング中(初期 2000nm から 0nm 終了)の各膜厚に対して 11nm 以内であった。これより、基板温度と薄膜厚さのリアルタイム同時計測を実用レベルで実現する事が出来た。

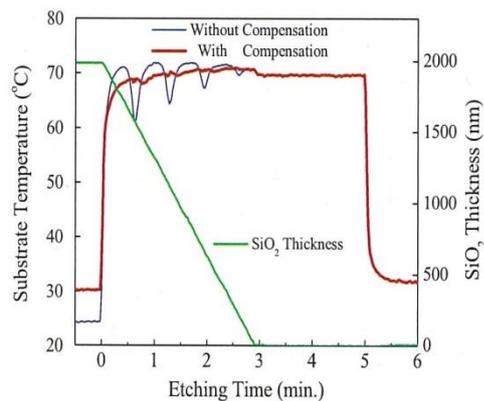


図2 エッチング中のSiO<sub>2</sub>薄膜の厚さと基板温度の同時計測

## 第6章 プラズマからの入熱計測

エッチングプロセスの向上には、メカニズムの理解と共に、加工に影響を与える各種パラメーターに関して理解を深める必要がある。そこで、本温度計で実プロセス中の基板の温度変化を測定し、基板への熱流を計測する手法を評価した。下部電極に2周波数を印加する装置の場合、RF周波数には関係なく、2種類のRFパワーの合計の約45%が基板で熱となる事が明らかになった。またこの熱流は、電界で加速され基板へ入射するイオン衝撃に起因する事が計算より示された。また本方法の計測のばらつきは6%であった。今後はプラズマ源やRF印加方式のプロセス特性差の解析のみならず、本計測法により装置内の熱収支を明らかにする事で、プロセス毎に相応しい装置の姿を追求していくことが可能となった。さらに本手法は熱収支解析よりエネルギー効率の向上への貢献も期待される。

## 第7章 低コヒーレンス干渉温度計の高アスペクトレシオエッチングプロセスへの応用

低コヒーレンス干渉温度計を装置に組み込みプロセス解析に用いた事例を示す。本温度計を用いた解析により、課題であった基板最外周部での加工形状の悪化は、装置内部品の温度上昇によるラジカル分布の均一性の低下が原因であることを明らかにした。また本温度計により改善方向性を具体的に示す事が可能となり、生産性の向上に貢献する事が出来た。今後、プロセス解析や特性向上に対し更なる活用が期待される。

## 第8章 総括

年々高まるプラズマプロセス中の温度計測要求に対して、低コヒーレンス干渉温度計の研究を遂行した。その結果、従来不可能であった高RFパワープロセスでの基板温度や高温になるSiリングの温度をリアルタイムで高精度に計測する事が可能となった。さらにエッチングプロセス中の薄膜厚さの基板温度との同時計測を可能とし、刻々と変化する薄膜厚さに依存して発生する基板温度計測誤差を論理的に補正し、±0.6°C以内の計測を実現した。また温度変化を検出する事でプラズマからの熱流を±6%のばらつきで計測することが出来た。今後、より高精度なプロセス解析やプロセス中の薄膜厚・温度同時リアルタイムモニターとして活用される事が期待される。

最後に本研究の成果をプラズマエッチングのみならず、半導体製造プロセスの開発に繋げさらなる微細化を可能とし、世の中の人々がより豊かに生活出来るように貢献していきたい。

## 論文審査の結果の要旨

論文内容について審査し、博士論文としての必要な条件を満たしていると認められた。

本論文は、年々高まるプラズマプロセス中の基盤の高精度温度モニタリングの要求に対応するため、高真空、高周波電界存在下での温度計測に適する低コヒーレンス干渉温度計を開発すると共にこれを実プラズマエッチング装置に搭載、評価した結果をまとめたもので、次の点に特徴を有する。(1) エッチング中の基板やチェンバー内の部品の温度のリアルタイムかつ高精度な計測手法を実現した。(2) 薄膜エッチングプロセス中の薄膜の厚さと基盤の温度のリアルタイムかつ高精度な同時計測手法を実現した。(3) エッチングプロセス中のプラズマからの熱流の解析方法を確立した。(4) 低コヒーレンス干渉温度計によりエッチングプロセスにおける課題の原因解明を行い生産性向上の指針を得た。従来、基盤の温度モニタリング装置を実装置に搭載し高精度な温度計測を実現した例はなく、オリジナリティーが高く工学的にも有用な研究と判断された。なお、予備審査では文章の推敲不足が指摘されたが、その後の修正で改善された。

## 最終試験の結果の要旨

公聴会・最終試験を2012年2月1日に実施した。論文の内容及び関連事項についての試問を行った結果、質疑応答が適切であり、最終試験に合格と判定した。

論文審査及び最終試験の結果を総合的に検討し、博士学授与に値すると判断した。