

氏名(本籍)	田中潤一(東京都)			
学位の種類	博士(工学)			
学位記番号	博甲第6418号			
学位授与年月日	平成25年3月25日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
審査研究科	数理物質科学研究科			
学位論文題目	エッチングプロセスにおける気相および表面反応の研究			
主査	筑波大学教授	工学博士	山田啓作	
副査	筑波大学教授	理学博士	白石賢二	
副査	筑波大学教授	博士(学術)	都倉康弘	
副査	筑波大学教授	工学博士	山部紀久夫	

論文の内容の要旨

半導体は高度情報化社会の根幹を支え、年間売上 30 兆円に及ぶ基幹産業である。それを支える半導体製造装置のマーケットも年間 3 兆円の規模を有しており、高い利益率を得ることができる有望な産業分野である。半導体デバイス製造における日本企業のプレゼンスは年々低下の一途を辿っている一方で、半導体製造装置に関しては日本企業が未だに世界のシェアの多くを占めている。その根幹には、半導体デバイスはコモディティ化するが、半導体製造装置はコモディティ製品にはなり得ないという本質的な違いがある。この半導体製造装置の業界は、グローバルトップランナーとして活躍し続け、現在の我が国の半導体全般に対するネガティブな潮流に歯止めを掛けて、日本の産業界に貢献することが使命である。

このような状況の下で、本論文では CMOS ゲート電極の寸法ばらつきを低減するエッチング技術研究を行った。特に、ウェハ表面やプラズマチャンバ表面に付着する堆積膜形成がゲート寸法に影響を与える点に注目して、シリコンエッチング時にこれらの堆積膜が引き起こす様々な加工ばらつきの発生メカニズムやそれを抑制する手法を中心に研究を進めた。

まず、堆積膜の形成メカニズムや表面構造が判っていないフロロカーボン保護膜を研究対象とし、イオン照射によって堆積膜がどのように成長するのか調べることにした。この研究によって世界ではじめて、CF系を扱うことのできるポテンシャルの開発を開成功した。この著者が開発したポテンシャルを用いたシミュレーションによりフロロカーボン堆積膜の成長メカニズムを明らかにした。表面に入射する分子として CF、CF₂、CF₃ の主要イオンを選んでアモルファスカーボンの初期表面に繰り返し照射したところ、どの場合にも表面に CF 膜が成長していくが、イオンに含まれる F 原子の割合が高い場合には、表面のフッ化が進むにつれて堆積膜の成長が止まるかエッチングに反転することが判った。また、成長した CF 膜にイオンを照射することによって表面から放出されるラジカルの種類が入射エネルギーによって変化することを示した。

次にクリーニングによるゲート寸法変動抑制の研究の結果を纏めた。まず、ウェハ間のゲート寸法変動を引き起こすプラズマチャンバに付着する堆積膜の挙動を調べるために、プラズマチャンバの壁に埋め込んだ ATR-FTIR 計測器を開発した。その赤外吸収スペクトルを用いてシリコンをエッチングしたときに壁に形成される堆積膜の堆積レートを調べた。その結果、シリコン反応生成物がエッチングガス中の酸素と反応して

シリコン塩酸化膜を形成すること、その堆積レートが酸素流量の2乗に比例すること、エッチング中でも酸素が無ければ堆積膜は成長しないこと等が判った。また、プラズマからのイオン照射がある状態では、最も安定なSiO₂に一部Clを含んだ状態で堆積膜の成長は進んでゆき、これが成長レートの酸素依存性を決めているというモデルを提案した。さらに、SiFの発光スペクトルが堆積膜の除去レートが一定の場合でも減衰していることを確認し、チャンバの壁の場所によってクリーニング終了のタイミングが異なっていることを示した。また、アルミ部品を用いたプラズマチャンバの場合に、微量のアルミがエッチング中に削られてチャンバ壁にアルミ系堆積膜が付着することを確認するため、アルミウエハを塩素プラズマでエッチングし、そこに酸素やフッ素を添加してAlOとAlFの堆積膜が成長することを確認した。AlOやAlFは蒸気圧が低いいためクリーニングが困難であるが、開発したプラズマ分布モニタによりチャンバ側壁に強いプラズマが生成される条件を見出し、この時にAlOやAlFがスパッタリングによりクリーニング除去できることを実証した。これにより、長期的なゲートCD変動を引き起こすアルミ系堆積膜を抑制したクリーニングを実用化した。このように、プラズマの分布と壁の堆積膜の除去の様子が同時に観測できるようになると、今後の大口径(450mm等)のエッチング装置開発時に、最適なクリーニングプロセスを構築することが容易になる。クリーニングの最適化には、装置の実効的なスループットの向上効果があり、半導体産業により一層の利益をもたらすことができる技術となった。

さらに、チャンバ壁の状態変化によって生じるウエハ間のゲート寸法ばらつきを補正する手法を研究した。プロセスの変動を抑えるには、エッチング後にゲート寸法を計測して、その目標値からのずれ量をフィードバックしてエッチング処理条件を制御する手法が知られている。これまでの研究から容易に推定できるように、酸素の添加量を変えることによってゲート側壁の堆積膜厚を調整し、ゲート寸法を制御できることを確認した。しかし、この制御によりゲートの寸法のみが変わっているのか、ゲートの形状まで変えてしまっているのかが不明であった。ゲートの特に裾部の形状が変わると後のエクステンション領域のインプラネーション工程などに悪影響を与える為、実用にならない。これを確認するために、数ナノメートル程度の微小な形状差をCD-SEMを用いて計測する技術を提案した。この方法を用いて、ゲート形状の酸素流量依存性を調べ、メインエッチングの始めの方のステップで酸素流量を制御してゲートの裾部の形状を変えずに寸法のみを制御する手法を確立した。

上記の研究で可能になった寸法計測に依存したターンアラウンドタイムの非常に長いフィードバック制御に対し、より早いフィードバック制御を実現するため、プロセスプラズマの発光スペクトルからゲート寸法を予測する技術の研究を行った。その手法としては、警視庁の科学捜査などでも利用されるケモメトリックスと呼ばれる手法を適用した。この方法では、発光スペクトルの主成分回帰モデルを作成してゲート寸法をその場で予測する。この手法を検証するため、チャンバ壁の状態を意図的に変化させた時のゲート寸法変動を用いて計算と実験を比較し、モデルの妥当性を検証した。エッチング結果がラジカルによって決まっていることは半ば自明ではあるが、観測されたプラズマ発光スペクトルの変化から数ナノメートルのゲート寸法変動を定量的に計算できることが示されたのは世界初の研究成果である。

以上のように本論文では、多くの複雑な要素を含むエッチング研究を多面的に研究し、エッチング技術自体の総合的な設計指針となる数多くのブレイクスルーとなる研究をまとめたものであり、世界的にみても高い学術的内容を有していると考えられる。

審査の結果の要旨

本論文ではCMOSデバイスのゲート電極の寸法ばらつきを低減するエッチング技術に関する研究をまとめたものである。本論文は、多くの要素を含んで非常に複雑なエッチング技術に対し、その最もキーとなる

部分に科学的に深く切り込んだ論文でその価値は極めて高い。また、こうした科学的なアプローチを通じて、エッチング中にチャンバ壁やウェハに付着するシリコン反応生成物と酸素の関係を計測とモデリング技術を用いて追及することにより、後記開発にシステムティックなプロセス検討手法を導入することに成功した。以上のように新規に見いだされた科学技術的知見が十分に議論され、本論文は博士（工学）に相当するものである。

平成 25 年 2 月 19 日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。