

氏 名	えだむら まなぶ 枝 村 学
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3982 号
学位授与の日付	平 成 20 年 1 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	誘導結合型プラズマエッチング装置におけるプラズマ制御の高度化に関する研究

論文調査委員	(主 査) 教 授 斧 高 一 教 授 稲 室 隆 二 教 授 福 山 淳
--------	--

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、半導体デバイスやマイクロマシン作製における微細加工に不可欠のプラズマエッチング装置のうち、高周波電流をコイルに流して生じる誘導電場によりプラズマを励起する誘導結合型プラズマエッチング装置について、プラズマ生成・維持とプラズマ・容器壁相互作用の機構解明から、それらの高精度制御方法の考案と新しい誘導結合型プラズマ装置の開発に至る一連の研究を行い、貴金属など難エッチング材料加工への適用を実証した結果をまとめたものであり、6章からなっている。

第1章は序論であり、半導体製造プロセスにおけるプラズマエッチング技術と装置の歴史と現状、およびプラズマエッチングにかかわる物理的・化学的反応機構に関する現在の理解を手短に述べるとともに、デバイスの微細化にともなうエッチング特性再現性低下の問題（ウェハを量産レベルすなわち連続的に千枚以上処理する際に、エッチング速度や形状・寸法精度・選択性が変動する現象）について説明している。

第2章では、誘導結合型プラズマ装置においてプラズマが容量結合的に生成・維持される放電（Eモード）と誘導結合的な放電（Hモード）の出現機構を、連続放電とパルス変調放電について系統的に調べている。具体的には、アルゴン／酸素混合ガスプラズマの電子密度・エネルギー分布、およびプラズマ電位を計測し、パルス放電では、プラズマ励起高周波パワーを数10 μ sから数 μ sの短い周期でオン・オフすることにより、プラズマの過渡挙動を解析した。その結果、連続放電において高周波パワーを増大するとEモードからHモードへの放電の遷移が生じること、Hモードの電子密度は $2 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 程度以上であること、またEモードはらせん形コイル中心部に生じる高電圧に起因することを明らかにした。さらに、パルス放電では、高周波パワーオン時にHモードのみが出現する場合とEモードからHモードへの遷移が出現する場合があること、Hモード出現の電子密度は $5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 程度以上であることを明らかにした。

第3章では、さらに、実際のエッチングプロセスに用いられるフッ素系プラズマ、特に、アルゴン／四フッ化炭素混合ガスプラズマについて、連続放電とパルス変調放電の挙動を系統的に調べている。プラズマ電子密度・エネルギー分布、プラズマ電位に加え、正・負イオンおよびラジカルの組成と密度を計測し、パルス放電における高周波パワーオフ時には、電子がフッ素原子に付着して負イオンが生成されること、イオンシースが徐々に崩壊し荷電粒子は両極性拡散によって容器壁で損失すること、またオフ時間が長いと電子密度が低下しほとんど正イオンと負イオンだけで構成されるプラズマになることを明らかにした。さらに、高周波パワーオン時の低電子密度におけるEモードの出現と持続時間はプラズマ容器壁でのプラズマ損失ひいては容器内壁の表面状態に大きく依存すること、Eモードではシースにおける電子の統計的加熱が支配的であることを明らかにした。

第4章では、上の第2章および第3章の結果をもとに、高周波パワーのコイルへの供給方法と周波数による連続放電のEモードひいてはE-Hモード遷移制御法を考案し、プラズマ電子密度・エネルギー分布およびプラズマ電位を計測して、それらの有効性を実証している。具体的には、らせん形コイル中心部への高周波パワー供給について、コイル外側端と接地電

位との間にコンデンサを挿入し、コイル全体の電圧分布の均一化と電圧低下をはかることにより、パワーを増大しても顕著な放電のモード遷移が無くプラズマ密度が連続的に増大することを示した。また、プラズマ励起高周波の周波数を高くすると、Eモードのプラズマ電子密度が高くなり、高周波パワー増大とともにプラズマ密度が連続的に増大してHモードに至ることを示した。誘導結合型プラズマエッチング装置では、通常、放電開始時やエッチングステップ切り替え時など、高周波パワーが時間変化する時にE-Hモード遷移が生じる場合が多いが、このような高周波パワー供給法と周波数制御により、低いパワーから高いパワーまで顕著なモード遷移無しにスムーズな放電ができるプラズマエッチング装置が得られた。

第5章では、さらに、誘導コイルを内側と外側に2分割し、コイル下に多数のスリットを有する金属薄板からなるファラデーシールドを設けた新しい構造の誘導結合型プラズマエッチング装置EMCP (Electro-Magnetically Coupled Plasma) を考案し開発している。この装置では、高周波パワーを3分割してそれぞれに供給し独立制御することにより、連続放電におけるEモードとHモードの独立制御とともに、プラズマ密度の空間分布の制御、およびファラデーシールドへのパワーを調節してプラズマ容器壁へのイオン入射エネルギーを制御し、容器内壁の表面状態を制御することも可能となった。フッ素および塩素系プラズマを用いて、難エッチング材料である貴金属材料 (Pt, Ir)、磁性材料 (NiFe)、金属酸化物材料 (Al_2O_3) を有する実デバイスの微細加工に適用した結果、この新しいEMCP装置が、量産レベルの千枚以上のウエハ連続処理においても、エッチング速度や形状・寸法精度・選択性などのエッチング特性の変動がほとんど生じない再現性・量産性に優れた装置であることを実証した。すでに多くのEMCP装置が、難エッチング材料を有するデバイスの加工を中心に使われている。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、今後の研究課題について触れ、将来のプラズマエッチング装置技術について提言を行っている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、半導体デバイスやマイクロマシン作製の微細加工に不可欠な誘導結合型プラズマエッチング装置について、プラズマ生成・維持とプラズマ・容器壁相互作用の機構解明、およびそれらの高精度制御方法の考案と新しい誘導結合型プラズマ装置の開発から、貴金属など難エッチング材料加工における装置性能実証に至る一連の研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下のとおりである。

(1) 誘導結合型プラズマ装置においてプラズマが容量結合的に生成・維持される放電 (Eモード) と誘導結合的な放電 (Hモード) の出現機構を、連続放電とパルス変調放電について系統的に調べた。具体的には、アルゴン/酸素およびアルゴン/四フッ化炭素混合ガスプラズマの電子密度・エネルギー分布、プラズマ電位、イオン・ラジカル密度を計測し、パルス放電では、励起高周波パワーを短い周期でオン・オフすることによりプラズマの過渡挙動を解析した。その結果、連続放電においてパワーを増大するとEモードからHモードへの放電の遷移が生じること、Hモードの電子密度は $2 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 程度以上であることを明らかにした。さらに、パルス放電では高周波パワーオン時にHモードのみが出現する場合と、EモードからHモードへの遷移が出現する場合があること、Hモード出現の電子密度は $5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 程度以上であること、また低電子密度におけるEモードの出現と持続時間は、プラズマ容器内壁の表面状態に大きく依存することを明らかにした。

(2) 上の結果をもとに、高周波パワーのコイルへの供給法と周波数による連続放電のEモードひいてはE-Hモード遷移制御法を考案し有効性を実証した。具体的には、らせん形誘導コイル中心部への高周波パワー供給について、コイル全体の電圧分布の均一化と電圧低下をはかり、パワーを増大しても顕著な放電のモード遷移が無くプラズマ密度が連続的に増大することを示した。またプラズマ励起高周波の周波数を高くすると、Eモードのプラズマ電子密度が高くなり、高周波パワー増大とともにプラズマ密度が連続的に増大してHモードに至ることを示した。

(3) さらに、コイルを内側と外側に2分割し、コイル下にファラデーシールドを設けた新しい構造の誘導結合型プラズマエッチング装置を考案し開発した。高周波パワーを3分割してそれぞれに供給し独立制御することにより、連続放電におけるEモードとHモードの独立制御とともに、プラズマ容器内壁の表面状態制御も可能となり、難エッチング材料である貴金属材料、磁性材料、金属酸化物材料を有する実デバイスの微細加工に適用して、量産レベルのウエハ処理枚数での加工性能を実証し、高精度なプラズマエッチング装置・プロセス技術を確立した。

以上要するに本論文は、誘導結合型プラズマエッチング装置について、容量結合的なEモードと誘導結合的なHモードの放電機構を系統的な実験により調べ、EモードとHモードを独立に制御できる新しい方法・装置を構築して、難エッチング材料を有する実デバイス加工への適用を実証したものであり、得られた成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年12月27日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。