

氏 名	湯 之 上 隆 <small>ゆ の が み たかし</small>
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論 工 博 第 3564 号
学位授与の日付	平 成 13 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	プラズマエッチングによる半導体素子の微細化の課題に関する研究開発

論文調査委員 (主査) 教授 今 西 信 嗣 教授 橘 邦 英 教授 森 山 裕 丈

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、ギガビットの DRAM (Dynamic Random Access Memory) の構築技術の確立を目指して、半導体素子の微細化にともなって顕現化した電氣的損傷などのプラズマエッチングの課題、ならびに Pt や Ru など新材料の微細加工に必要なプラズマエッチング技術についての研究結果をまとめたものであり、4章からなる。

第1章は序論であり、まず、プラズマエッチングによる微細加工の原理に関して、とくにプラズマエッチングの定義、等方性エッチングと異方性エッチング、反応機構によるプラズマエッチングの分類、プラズマを使う利点と欠点について、つぎに、本研究課題を取り上げる背景となった半導体素子の微細化にともなうプラズマエッチングの課題に関して、とくに DRAM における半導体素子の微細化、強誘電体メモリの出現、プラズマエッチングによる半導体素子の電氣的損傷、プラズマエッチングによる新材料の微細加工について、最後に本論文の目的と概要について述べている。

第2章はプラズマエッチングにより発生する電氣的な損傷と中性粒子エッチング装置の開発について論じている。まず、半導体素子の微細化とともに深刻化してきた SiO_2/Si の電氣的損傷について、これまでプラズマ中で発生するイオンが損傷の主要因と考えられていたが、真空紫外線や電子も電氣的損傷を引き起こすことを明らかにしたことを論じている。

真空紫外線が引き起こす SiO_2/Si の電氣的損傷については、まず、真空紫外線1個が SiO_2/Si 界面に誘起する固定正電荷 R_f の真空紫外線エネルギー E_p への依存性を求め、 R_f は $E_p - E_g$ に正比例することを見出した (E_g は SiO_2 のバンドギャップエネルギー (=8.8eV))。この依存性を真空紫外線による電子—正孔対発生モデルにより説明し、真空紫外線による SiO_2/Si の電氣的損傷は電子—正孔対発生によって誘起されると結論づけている。また、ガスプラズマ中での真空紫外線強度を $10^{11} - 10^{12} \text{ photons} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ と求め、電氣的損傷への真空紫外線の寄与を定量化した。

つぎに、プラズマ中で発生する電子による SiO_2/Si の電氣的損傷についても、真空紫外線の場合と同様に、 R_f で評価している。その結果、電子も SiO_2/Si 界面近傍に有効正電荷を発生させ、その R_f は、 SiO_2 膜厚20nm で最大となり、更に、電子エネルギーが25, 50, 80, 107.5, 125および140eV のとき、 R_f は極大となることを見出している。得られた結果を電子によるプラズモン生成モデルによって説明した。すなわち、 R_f のエネルギー依存性の極大値は、体積プラズモンまたは表面プラズモン励起エネルギーの整数倍に対応する。また、 R_f の SiO_2 膜厚依存性は、体積プラズモンの励起半径が約20nm であることから説明できる。以上のことから、電子による SiO_2/Si への電氣的損傷はプラズモン生成に起因していると結論づけている。

プラズマによる SiO_2/Si の電氣的損傷は、イオン、電子および真空紫外線によって引き起こされるが、その主たる要因はイオンと電子であると考え、電氣的損傷を低減する目的で開発した、荷電粒子を一切使わない中性粒子エッチング装置について論じている。まず、1本のマイクロ波放電管の中心部からイオンの中性化によって生じる運動エネルギーの高い中性粒子を供給し、放電管の周辺部から化学反応を起こす反応種を供給するコンパクトな同軸型中性粒子エッチング装置を試作し、そのビーム特性と SiO_2 エッチング特性を調べ、同軸型装置の限界を明らかにしたことを述べている。つぎに、エッチングの高速化と大口径化に対応できるタンデム型中性粒子エッチング装置を考案したことを述べている。

第3章では、ギガビット DRAM や強誘電体メモリの構築の上で必要となる耐熱性、耐酸化性に優れている Pt や Ru など新材料のプラズマエッチングによる微細加工技術の開発について論じている。

第1に、プラズマエッチングによる Pt 加工では、反応生成物の蒸気圧が極めて低いため、パタンの側壁に反応生成物が付着する。この側壁付着物は、通常のレジスト除去や洗浄では除去できない。側壁付着物をなくすため、側壁に傾斜をつけたレジストが使われているが、寸法変動が大きくなり微細加工ができない。そこで、頭は丸く根元は垂直なラウンドレジストを用いて、プラズマエッチングによる側壁付着物がなく、かつ寸法変動の小さい Pt 電極用微細加工技術を開発したことを述べている。さらに、側壁付着物の発生機構を明らかにしたうえで、本技術により $0.1\mu\text{m}$ の Pt の微細加工を実現したことを述べている。

第2に、ギガビット DRAM には、寸法 $0.1\mu\text{m}$ 、高さ $0.45\mu\text{m}$ の高アスペクト比構造の電極が必要となる。この電極形成のためのプラズマエッチングによる高異方性 Ru 微細加工技術の開発について論じている。まず、Ru についてのプラズマエッチング機構を考察したうえで、高異方性加工には反応生成物の制御が重要であるとの結論に達した。その結果、反応生成物の揮発性を高めるための高真空条件、パタン側壁に付着した反応生成物の効率的なエッチングのための高密度プラズマ条件、更に反応生成物の効率的な排気のための大流量高速排気条件をプラズマエッチングに取り入れ、アスペクト比（縦／横比）4.5 の Ru を異方性89度で加工できるプラズマエッチング技術を世界で初めて開発したことを述べている。

第4章は、結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、ギガビットを超える DRAM (Dynamic Random Access Memory) など $0.1\mu\text{m}$ レベルの超微細加工によって顕現化したプラズマエッチングにより発生する電気的な損傷ならびにプラズマエッチングによる新材料の微細加工技術について研究開発を行った結果をまとめたものであり、主な成果は次のとおりである。

(1)プラズマ中で発生する真空紫外線による SiO_2/Si の電気的損傷を評価した。すなわち、真空紫外線が SiO_2/Si に誘起する有効正電荷の光子エネルギー依存性を電子—正孔対発生モデルによって説明し、 SiO_2/Si の真空紫外線による電気的損傷は電子—正孔対発生によって誘起されることを明らかにした。

(2)プラズマ中で発生する電子による SiO_2/Si の電気的損傷を評価した。すなわち、電子が SiO_2/Si に誘起する有効正電荷の測定を行い、正電荷生成量の電子エネルギー依存の極大値が体積プラズモンまたは表面プラズモン励起エネルギーの整数倍に対応すること、また、正電荷生成量の SiO_2 膜厚依存の最大値がプラズモンの反応体積の大きさに対応することから、 SiO_2/Si の電子による電気的損傷はプラズモン生成に起因することを明らかにした。

(3)プラズマによる SiO_2/Si への損傷の主たる要因であるイオンや電子を使わない中性粒子エッチング装置を開発した。1本のマイクロ波放電管で、イオンの中性化により生成する運動エネルギーを持った中性粒子と、化学反応を起こす反応種を同時に供給するコンパクトな同軸型中性粒子エッチング装置を試作し、損傷性と SiO_2 エッチング特性が著しく改善されることを示した。また、エッチングの高速化と大口径化を目指したタンデム型中性粒子エッチング装置を考案した。

(4)頭は丸く根元は垂直なラウンドレジストを使うことにより、側壁付着物がなく寸法変動の小さな Pt 用のプラズマエッチング技術を開発した。また、側壁付着物発生機構を明らかにし、 $0.1\mu\text{m}$ レベルの Pt の微細加工を実現した。

(5)反応生成物の揮発性を高めるための高真空条件、パタン側壁に付着した反応生成物の効率的なエッチングのための高密度プラズマ条件、さらに反応生成物の効率的な排気のための大流量高速排気条件をプラズマエッチングに取り入れ、寸法 $0.1\mu\text{m}$ 、高さ $0.45\mu\text{m}$ の高アスペクト比構造の Ru を異方性89度で加工できるプラズマエッチング技術の開発に成功した。

以上要するに、本論文は、プラズマエッチングにより発生する電気的損傷機構ならびに新材料の微細加工におけるプラズマエッチング条件を詳細に調べ、ギガビットを超える DRAM 構築技術の基礎を築いたもので、その成果は学術上、実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12年12月11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。