

学位論文題名

銅薄膜の堆積に関する研究

学位論文内容の要旨

本研究は、高性能・低消費電力の次世代微細 Cu 配線デバイスを実現する上で不可欠な、Cu 薄膜の成膜技術と素子分離絶縁膜の成膜技術について、微細化に対応したプロセスの構築と実用化を目的として行われた。このための課題としては、以下の三つの課題があげられる。

(1) Cu 薄膜の埋め込み成膜、(2) 素子分離絶縁膜の埋め込み成膜、(3) Cu 配線デバイス製造工程における低コスト化と環境負荷の低減。

第一の課題である Cu 薄膜の埋め込み成膜に関しては、Cu-CVD 法を用いた Cu 薄膜形成プロセスの構築と高性能化の研究を行い、Cu 原料の改善と反応促進物の添加による新たな Cu-CVD プロセスを提案した。まず、Cu-CVD 法による Cu 薄膜の成膜について基礎評価を行い Cu-CVD 法の課題を明らかにし、課題の解決には、Cu 原料錯化合物の化学構造最適化と反応促進物の添加による Cu 原子生成の促進が必要であることを指摘した。そのため次に、Cu 原料錯化合物の蒸気圧と化学構造に着目した基礎性能評価を行い、成膜速度を律速している要因が蒸気圧やリガンド-Cu 間の結合強さ以外の要因であることを明らかにした。また、Cu-CVD の性能向上には Cu 核が生成する成膜初期過程の改善が必要であることを指摘した。次に、成膜初期過程の改善のために Cu-CVD 反応系への H₂O 添加について検討を行い、H₂O 添加により堆積膜中の不純物量が増大する問題があることを明らかにした。これは、H₂O 添加系の成膜メカニズムの考察から、リガンド中の C-Si 結合が H₂O により加水分解することで分解生成物が膜に取り込まれるためと推論した。そこで本研究では、リガンドの化学構造を最適化した新たな原料の(hfac)Cu(3-Hexyne)を提案し、膜の抵抗率 2 $\mu\Omega$ cm、幅 440 nm 深さ 1750 nm (アスペクト比=4.0) の溝形状に対しての埋め込み成膜を実現した。本研究の意義は、Cu-CVD 法の性能向上方法の指針を示した点、将来の微細 Cu 配線デバイスにおける Cu 薄膜の埋め込み成膜方法として適用性が高いことを明らかにした点、であると考えられる。

第二の課題である素子分離絶縁膜の埋め込み成膜に関しては、HDP-CVD 法を用いた絶縁膜の埋め込み成膜技術について研究を行い、微細デバイスに対応した新たな HDP-CVD 埋め込み成膜プロセスを提案した。まず、絶縁膜の埋め込み要因の解析と成膜メカニズムを考察することにより、スパッタイルドの角度依存性とイオン性のデポジション成分が埋め込

み性能向上に重要な要因であることを明らかにした。これらの埋め込み要因とプロセスパラメータの関係を考察し、プラズマ生成パワーの増加と成膜圧力を低減させたプロセスにより、スペース幅 $0.13\ \mu\text{m}$ 、アスペクト比 3.9 の微細デバイスの STI 構造に対して絶縁膜の埋め込み成膜が可能であることを明らかにした。さらに、本研究の HDP-CVD 埋め込みメカニズム解析に基づき、新たな HDP-CVD 形状シミュレーションモデルを提案し、この HDP-CVD 形状シミュレーションにより、成膜形状を高精度に再現することが可能であることを明らかにした。本研究で構築した新たな HDP-CVD 埋め込みプロセスは、 $0.13\ \mu\text{m}$ 世代の微細デバイス製造工程で実用化されており、微細デバイスを実現する上で意義があるものとする。

第三の課題である Cu 配線デバイスの製造工程における低コスト化と環境負荷の低減に関しては、高価な温室効果ガスを大量に使用している HDP-CVD 工程のクリーニングプロセスに着目し、温室効果ガスの使用量を削減する技術について研究を行った。クリーニング特性の基礎評価から、反応系の温度の高温度化、ラジカル輸送過程における失活の防止、プラズマ励起によるラジカル生成の高効率化、が重要であることを明らかにし、課題を解決する方法として、熱アシストを加えたプレヒートクリーニングによる高効率化と、高効率プラズマ源と環境負荷の小さな代替ガスを用いる新クリーニングシステムを提案した。このプレヒートクリーニングプロセスを HDP-CVD の量産プロセスとして実用化し、クリーニング時間短縮による工程の処理能力向上、 NF_3 ガス使用量の 20%削減を実現した。特に、 NF_3 ガスの使用量 20%削減は、HDP-CVD 工程の温室効果ガス使用量削減に大きく寄与するものであり、本研究の意義は大きいと考える。また、環境負荷の小さな代替ガスとして C_3F_8 ガスの適用について研究を行い、より高速のクリーニング速度を得るには、プラズマによる解離を促進させる必要があることを明らかにした。本研究では、解離促進のために μ 波の伝送損失の小さな TEM モードプラズマ源を提案し、HDP-CVD 工程の温室効果ガス使用量を 3~4 割削減できる可能性が高いことを明らかにした。温室効果ガスを用いたクリーニングを行う他の半導体製造装置への適用可能性が高く、温室効果ガス使用量削減に大きく寄与する点で本研究は意義があるとする。

最後に本研究を総括すれば、本研究は、高性能・低消費電力の Cu 配線デバイスを実現する上での課題である、Cu 薄膜の埋め込み成膜、素子分離絶縁膜の埋め込み成膜、Cu 配線デバイス製造工程における低コスト化と環境負荷の低減、について改善の指針や課題の解決方法を提案したものである。Cu-CVD 法の高性能化の方向について指針を与えたこと、微細な素子分離領域の絶縁膜埋め込みを達成したこと、量産工程において HDP-CVD 装置の温室効果ガス使用量を削減したこと、は本研究の大きな成果である。中でも、温室効果ガス使用量の削減を実現したことは、Cu 配線デバイス製造工程の低コスト化を実現しただけでなく、全地球的な環境問題に対して大きく貢献できるものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 西 則 雄

副 査 教 授 坂 入 信 夫

副 査 助 教 授 野 水 基 義

副 査 教 授 覚 知 豊 次 (北海道大学大学院工学研究科)

学 位 論 文 題 名

銅薄膜の堆積に関する研究

本研究の目的は、高性能・低消費電力 Cu 配線デバイスを実現する上で必要不可欠な、Cu 薄膜の製膜技術と素子分離絶縁膜の埋め込み製膜技術に関し研究を行い、次世代微細デバイスに対応した製膜プロセスの構築と実用化を行うことにある。本研究では、このような目的に沿った研究を行い以下の 3 つの項目について述べている。

(1) Cu-CVD(Cu-Chemical Vapor Deposition)法を用いた銅薄膜形成プロセスの構築と高性能化

(2) HDP-CVD(High Density Plasma-Chemical Vapor Deposition)法を用いた素子分離絶縁膜の埋め込み製膜プロセスの構築と実用化

(3) HDP-CVD 法を用いた絶縁膜成膜工程の低コスト化と環境負荷を低減する新たな成膜プロセスの構築と実用化。

(1) では、Cu-CVD 法の課題である埋め込み性能と堆積速度を実用可能なレベルに向上させるために、新規な Cu 原料を用いた Cu-CVD プロセスの構築と、水を添加することで成膜反応を促進させた新たな成膜プロセスを開発した。この新規銅原料と水添加の成膜プロセスにより、従来の 2 倍の堆積速度でアスペクトレシオ 4:1 (深さと幅の比が 4:1) の段差を埋め込める銅埋め込み成膜が可能となった。これにより、次世代の銅配線デバイスに適用できるレベルの Cu-CVD 性能が得られた。

(2) では、銅多層配線デバイスの素子分離絶縁埋め込み成膜に関し、従来の HDP-CVD 法について成膜メカニズム解析により新たな HDP-CVD 埋め込みプロセスを開発した。

(3) では、銅多層配線デバイスの低コスト化と環境負荷の低減に関し、HDP-CVD 工程の低コスト化と環境負荷低減技術について研究を行った。HDP-CVD 装置の反応チャンバーのクリーニングには、高価な温室効果ガスを大量に使用

している。本研究では、従来のクリーニングガスの使用料を削減するプロセスの構築と、安価で環境負荷の小さなガスを使用した新規クリーニングガスプロセスを開発し、温室効果ガスの使用料を 20%削減することが可能となった。この結果は、温室効果ガスを用いたクリーニングを行う他の半導体製造装置への適応可能性が高く、温室効果ガス使用量削減に大きく寄与する点で本研究は意義があると考えられる。

本研究を総括すれば、本研究は、高性能・低消費電力の Cu 配線デバイスを実現する上での課題である、Cu 薄膜の埋め込み成膜、素子分離絶縁膜の埋め込み成膜、Cu 配線デバイス製造工程における低コスト化と環境負荷の低減、について改善の指針や課題の解決方法を提案したものである。Cu-CVD 法の高性能化の方向について指針を与えたこと、微細な素子分離領域の絶縁膜埋め込みを達成したこと、量産工程において HDP- CVD 装置の温室効果ガス使用量を削減したことは本研究の大きな成果である。中でも、温室効果ガス使用量の削減を実現したことは、Cu 配線デバイス製造工程の低コスト化を実現しただけでなく、全地球的な環境問題に対して大きく貢献できるものである。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また申請者は研究者として誠実かつ研究熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。