

審査の結果の要旨

氏名 清水 秀治

半導体集積回路 (ULSI) はスケーリング則に従った微細化により、素子の動作速度向上と低消費電力化を達成するとともに、高集積化による多機能化を実現してきた。さらなる微細化の結果、デバイス構成薄膜の膜厚が原子サイズに近づき、材料の物理化学的限界の影響が深刻化している。さらなる微細化と高性能化を両立させるには新規マテリアルの導入とそれらを作製する新規プロセス構築が必須となっている。ULSI-Cu 多層配線では、微細化に伴い信号伝達遅延時間の増大が深刻な問題となるとともに、電流密度増大によるエレクトロマイグレーション (EM) 起因の断線不良顕在化などが課題として挙げられ、これらを解決する新規マテリアルプロセスの創製が待望されている。

本論文は、“Design of thin-film materials and their processing for highly reliable, high-performance ULSI Cu interconnect systems” (高性能高信頼性 ULSI-Cu 配線システム構築を目指した材料・薄膜形成技術の設計) と題し、ULSI-Cu 多層配線を形成する低誘電率 Cu キャップ膜、および、低抵抗 Cu 拡散防止膜 (バリアメタル) としての Co(W)合金膜の材料および薄膜形成プロセス設計を目指したものであり、全部で5章からなる。

第1章は序論であり、ULSI 配線形成工程 (バックエンドプロセス) のこれまでの歴史的展開と微細化に伴う課題、また、それに対応するためのマテリアルとプロセスの現状についてまとめている。特に低誘電率 Cu キャップ層の必要性と要求事項についてまとめ、低誘電率かつ Cu および酸素拡散防止性能の高い SiCH 膜の合成を研究課題とすることを示している。また、もう1つの検討課題であるバリアメタルに関しても、現状の Ta/TaN に代わる低抵抗・高信頼性バリアメタルとして、Co(W)合金薄膜が単層バリアメタルとして有望であることを示し、その作製プロセス設計を本研究の目的とすることを述べている。

第2章は本論文の研究戦略についてまとめている。次世代 ULSI に要求される低誘電率 Cu キャップ膜および Co(W)単層バリアメタルの合成に際して、要求事項を達成するための基本的な考え方と、薄膜の構造・機能設計、さらにはそれらを実現するプロセス設計の基本方針を示している。

第3章では、低誘電率 Cu キャップ層作製プロセス開発について詳述している。まず、Cu や酸素などの拡散を阻止する性能 (バリア性) を保ちつつ、誘電率を低下させるには、Si-CH₂-Si および Si-C₂H₄-Si ネットワーク構造を持つ高炭素

組成 SiCH 膜が有望であることを示している。このような構造を形成するためのプラズマ CVD 用原料ガス分子に対して量子化学計算により分子の解離エネルギーや重合反応の活性化エネルギーを検討し、4つの候補分子を選定した。実際にこれら4つの原料ガスを用いて SiCH 膜を作製したところ、従来の原料ガスであるテトラメチルシランを利用したプロセスよりもいずれも誘電率が低くバリエーションを持った SiCH 膜の合成が可能であった。また、予測通り高炭素組成ほど低誘電率化し、膜中のナノサイズ空隙が少ないことを陽電子消滅分光法により明らかにしている。

第4章では、Cu 配線のバリエーションとして、従来の Ta/TaN 二層構造に代わり、Co(W)合金単層膜が低抵抗かつ Cu との密着性に優れ、拡散バリエーションも良い高信頼性配線システム用材料として有望なことを各種冶金学的考察から明らかにし、これを作製する手法として CVD/ALD 法を提唱している。その原料ガスとしてすでに実績のあるカルボニル化合物を用いた場合には、カルボニル基由来の酸素により W が酸化され低抵抗 Co(W)合金膜が形成できないことから、酸素非含有原料ガスの採用が必須であることを示し、メタロセン化合物を原料として採用することを提唱した。メタロセンは安定物質であり、その分解を促進するには NH₂ ラジカルが有効であることを量子化学計算から示した。NH₂ を供給する手法として、ホットワイヤー ALD プロセスを新規に構築し、実際に低抵抗 Co(W)薄膜の合成に成功した。また、アミディネート化合物による Co(W)合金膜の ALD 合成にも成功した。これらの Co(W)合金膜は W の添加により Cu 拡散活性化エネルギーが増大し、W 添加によって Co 粒界に W が偏析して表面・粒界拡散を抑制したことを示した。また、TEM 観察による微細構造解析により、バリエーションを發揮させる所望の構造が構築されたことを確認している。

第5章はまとめであり、上記検討の結果から ULSI-Cu 配線の微細化に伴う高抵抗化や低信頼性化などの諸問題を今回開発したマテリアルプロセスにより解決可能であることを示すとともに、実際に Cu ダマシン配線を形成し、量産プロセスに供することが可能であることを示している。

このように、本論文では、所望のデバイス性能を実現するための機能・構造制御を検討し、量子化学計算や冶金学・反応工学的知識をもとに新規マテリアルプロセス設計手法を確立しており、マテリアル工学の進展に多大な貢献をしている。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。