

審査の結果の要旨

氏名 金 勲

ULSI の高集積化はムーアの法則として知られるように、3年で4倍のペースを維持しつつ進展しており、その結果、2006年時点ではゲート幅65nmでの量産が行われるに至っている。このような極微細デバイスでは、金属配線も同時にスケールアップされて極細配線となるのに対し、トランジスタ動作高速化のために電流量は変化せず、結果として配線中に流れる電流密度が飛躍的に増大する。ITRS(International Technology Roadmap for Semiconductor)の最新版によれば、ゲート幅45nmの次世代デバイスでは、Cu配線中の電流密度は $2.0\text{MA}/\text{cm}^2$ になると予想されており、エレクトロマイグレーションによる断線不良が健在化する恐れがある。また、微細化の進展に伴い、配線幅は縮小するものの、高さはほとんど変化しないため、配線の縦横比(アスペクト比)が増大している。従って、Cu配線形成プロセスには高アスペクト比の溝や孔にも均一に製膜できる技術の確立が求められている。

本論文は“A study on ultra thin and continuous CVD-Cu film for ULSI Cu interconnect”(ULSI多層配線用極薄連続CVD-Cu膜に関する研究)と題し、ULSI多層配線形成用Cu-CVD(Cheical Vapor Deposition)に関する検討を行ったものであり、全5章からなる。

第1章では、ULSI多層配線の現状と課題を検討し、上記の高電流密度化に伴う信頼性劣化に対しては、Cu配線との密着性が良いバリアメタル材料の導入が重要であること、また、Cu配線形成プロセスとしては、高アスペクト比化に対応できるCVDなどの化学プロセスの導入が必要であることをまとめている。特に、CVD法は量産性に優れる製膜技術であるため、本論文ではCVD法によるCu配線形成技術について検討を行うこととし、その際の具体的な課題としては10nm程度の膜厚で連続かつ表面平坦性の優れた膜を形成する必要があることを指摘し、具体的な達成目標として設定している。

第2章では、Cu配線と密着性の良い下地材料の検討を行っている。その材料選択において、冶金学的な考察を交え、下地材料は安定な高融点材料(融点 2000°C 以上)であること、Cuと固溶しないこと、Cuと金属間化合物を形成しないこと、電気抵抗が低いことなどを条件として挙げ、Mo, W, Ru, Osなどが有力な候補となることを示している。さらに、Cuとの密着性に関しては格子整合性が高い材料が望ましいことを挙げ、FCC系であるCuとの整合性が高い材料としてHCP系のRuやOsが最密充填面を介した整合性が高いことから有望であるとしている。このような予備的検討のもと、各材料とCuとの密着性に関して実験的検討を行っている。具体的にはスパッタリングを用いて各下地候補材料とCuを連続製膜し、さらに真空中でアニールすることによってCuの凝集がどの程度進行するか検討を行った。密着性の良い材料は濡れ性が良いことがYangの式から示されるので、上記アニール後の濡れ角の測定を行った。その結果、BCC系であるMoやTaなどはCuとの密着性が悪いが、HCP系のRuとOsは良好な濡れ性を示し、先に述べた冶金学的考察による

材料選択が的確であったことを示している。

第3章では、Ru 下地に Cu を CVD 製膜した結果について検討したことをまとめている。まず、(001) 面配向した Ru と現在下地として用いられている Ta との比較を行ったところ、Ru 上には平滑性の高い Cu 膜が形成できるのに対し、Ta 上では縞状の成長となることを示している。また、Ta 上に製膜した場合には Cu の CVD 原料ガスに含まれるフッ素が界面に偏析し、結果として密着性が著しく劣化しているのに対し、Ru 上ではフッ素が界面に検出されず、密着性が良好であることも示している。また、Cu-CVD の製膜条件を最適化した結果、基板温度 90°C、原料分圧 160mTorr の条件にて 18nm の極薄連続 Cu 膜の形成が可能であることを示している。しかし、(001)配向性が悪い ALD (Atomic Layer Deposition) により製膜した Ru 膜上では縞状成長になりやすいことから、下地の結晶配向性に左右されない製膜手法の開発が重要であると結論している。

第4章では、前章の考察をもとに、Cu 酸化膜の CVD 合成とその還元による Cu 膜形成を提案している。酸化膜は一般にその金属膜よりも表面エネルギーが低く、濡れ性の良い製膜が期待できる。具体的には H_2O_2 を酸化剤として Cu_2O 膜が 100°C にて形成できることを示している。また、形成した Cu_2O 膜の還元には蟻酸を用いるとやはり 100°C にて容易に Cu へ還元できることも示している。これらの新規 CVD ケミストリーを採用することによって、厚さ 10nm の極薄連続 Cu 膜が形成可能なことを示している。このとき、下地として(001)配向性の悪い ALD-Ru 膜を用いても特にモフォロジーが劣化することもなく、本手法の有効性をアピールしている。また、下地として Ta を用いると、 Cu_2O 形成時に Ta 表面が酸化され、この Ta 酸化膜は蟻酸による還元でも還元できないために界面にそのまま残り、抵抗増大、密着性劣化などの諸問題を引き起こすことも指摘している。これに対し、Ru は容易に還元される材料であるため問題とならない。すなわち、本手法には Ru 下地の採用が必須であることも主張している。

第5章はこれらの結果をまとめ、さらに将来展望を述べている。特に酸化と還元を組み合わせた新しい Cu-CVD 製膜手法は下地依存性がないことや低温製膜が可能であることなどから、有機半導体デバイスや MEMS デバイスでの配線形成技術としても有望であると指摘している。

このように本論文は ULSI 多層配線用 Cu 膜の新規形成プロセス開発に取り組み、冶金学的考察から最適な下地材料を選択するとともに、酸化と還元を組み合わせる新しい CVD 製膜手法を開発したものであり、マテリアル工学の発展に大いに資するものである。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。