

報告番号	乙 第 7202 号
------	------------

主論文の要旨

論文題目 **LSI デバイス微細 Cu 配線のプロセスと高信頼性化に関する研究**
(Study on Manufacturing Process and Reliability of Cu Interconnects in Advanced LSI)

氏 名 虎澤 直樹

論文内容の要旨

今日、半導体 LSI(Large Scale Integration)デバイスでは、従来用いられてきた Al(Aluminum)配線に代わって Cu(Copper)配線が導入され量産技術として確立している。しかしながら、今後ますます配線の微細化が進むと、埋め込み不良、実効電気抵抗率や配線間容量の増加等が生じ、その結果、電気特性や信頼性が劣化するという問題が発生する。従って、高性能・高信頼性の微細 Cu 配線を形成するには、新規の材料技術や製造プロセス技術に関する研究開発が必要である。

本論文は、LSI デバイスの Cu 配線の微細化に伴って顕在化する Cu 埋め込み特性、電気特性、信頼性に関する諸問題を解決するため、メタル・絶縁膜材料技術、製造プロセス技術の観点から研究開発を行った結果をまとめたものであり、全7章で構成している。

第1章では、LSI デバイス Cu 配線の製造プロセスと諸問題について述べた。Cu 配線の微細化に伴って顕在化する問題としては、Cu 埋め込み特性、配線・ビア抵抗や配線 RC(Resistive-Capacitive)等の電気特性、エレクトロマイグレーション(EM : Electromigration)や経時的絶縁破壊(TDDB : Time Dependent Dielectric Breakdown)等による信頼性の劣化が挙げられる。本研究は、これらの問題を解決するための科学的知見や指針を得ることを目的としている。

第2章では、本研究で検討した RuTa(Ruthenium Tantalum)膜や TiN(Titanium Nitride)膜等のメタル膜、ELK(Extremely Low-k)膜等の絶縁膜、配線形状等の出来映えを評価するために使用した分析装置、分析・解析方法について説明した。

第3章及び第4章では、微細 Cu 配線の埋め込みのために必要なバリア/Cu シード成膜後のトレンチやビアの開口幅/径の確保と側壁における連続的な Cu シード膜の形成のため、バリア膜上に薄膜 Cu シードを凝集なく連続且つ平滑に形成する Enhanced Cu シード技術の検討を実施した。

第3章では、微細 Cu 配線の Enhanced Cu シード技術として RuTa 合金バリアを検討した結果について述べた。従来からバリア材料として用いられている Ta(Tantalum)膜に比べ、RuTa 膜の比抵抗は約 1/3 であるため、RuTa バリアの適用によりビア抵抗の低減が可能である。RuTa 膜は Ru(002)に優先配向し Cu(111)間とのミスフィットは、Ta(110)と比較して約 1/4 である。そのため、Ta 膜と比べて RuTa 膜と Cu 膜の格子整合は良好であり、RuTa 膜上において良好な Cu 膜の濡れ性を確認した。従来からバリア構造としては遷移金属とその窒化物の積層膜が用いられており、本実験においても RuTa 膜と RuTa(N) (Ruthenium Tantalum Nitride)膜を積層にした RuTa/RuTa(N)膜をバリア構造として検討した。Cu 配線への RuTa/RuTa(N)バリアの適用により、トレンチ側壁に薄膜 Cu シードを凝集なく連続且つ平滑に形成でき、45nm 幅の微細 Cu 配線のボイドフリー埋め込みを達成した。また、RuTa/RuTa(N)膜は、従来の Ta/TaN 膜と同等の Cu 拡散に対するバリア性を有することを確認した。RuTa/RuTa(N)バリアの Cu 配線への適用により、ビア EM 耐性は Ta/TaN バリアと比べて約 3600 倍長寿命化することを明らかにした。以上より、Cu 埋め込み特性、電気特性、信頼性の観点から、微細 Cu 配線における Enhanced Cu シード技術として、RuTa 合金は有望なバリア金属材料と結論付けた。

第4章では、Cu 配線のバリア膜として、RuTa 合金を窒化した RuTa(N)膜の有効性を検討した結果について述べた。本実験で検討した RuTa(N)膜は、熱的安定性に乏しく、温度が 240°C 以上になると、膜中から N(Nitrogen)が脱離し再結晶化して結晶粒が粗大化することが分かった。これは、本実験では RuTa 合金中の Ta 濃度が 10at.% と低く Ru 中の Ta は固溶状態であるため、RuTa(N)膜中の N が Ta や Ru と化合物を形成しないことに起因すると考察した。また、RuTa(N)単層膜のバリア性やビア EM 耐性は、RuTa 単層膜と比較して非常に悪いことが分かった。これは、RuTa(N)膜は、熱処理時の N 脱離により大傾角粒界構造になることで、Cu 原子の粒界拡散の活性化エネルギーが小さくなり拡散係数が増加するためと考察した。これらの結果より、RuTa 合金の窒化特性は、他の遷移金属の窒化特性と異なる挙動を示すことを明らかにした。以上より、RuTa 合金を窒化すると、電気特性や信頼性に重大な影響を与えることから、Cu 配線のバリア膜として、RuTa(N)単層膜の適用は困難と結論付けた。但し、RuTa 合金の窒化特性は、Ta 濃度に大きく依存すると考えられることから、今後は RuTa 合金中の Ta 濃度に関する研究が必要と考えられる。

第5章では、新規の Cu 配線の製造技術であるメタルハードマスク(MHM: Metal Hard Mask)プロセスにおいて最適な TiN マスクの提唱を行った。MHM プロセスは、従来のレジストマスクに代わりメタルマスクを使用することで、レジストを除去する O₂(Oxygen)アッシングが不要になるため、層間絶縁膜へのダメージを抑え比誘電率(k 値)の増加を抑制で

きる。しかしながら、MHM プロセスではメタルマスクの残留応力に起因したトレンチエッチング後の層間絶縁膜の変形により、Wiggling 現象と呼ばれるトレンチ形状異常が発生する。応力シミュレーションにより、Wiggling は、標準の L/S(Line and Space)パターンのトレンチに比べて、大面積のスペースに囲まれた配線密度の低い特殊パターンのトレンチで発生しやすいことを見出した。これは、特殊パターンのトレンチは、高い残留圧縮応力を有する TiN マスクに囲まれており、トレンチ形成後に TiN マスクが応力を緩和するため大きく伸張することに起因する。また、Wiggling の発生により Cu 埋め込みが阻害され、配線内におけるボイドの発生を確認した。Wiggling 改善のため、TiN 成膜時の成膜モードやスパッタ粒子エネルギーの制御による膜質改善を行い、TiN マスクの残留圧縮応力を低減した。特に、TiN 成膜時のスパッタ粒子エネルギーの低減により釘打ち効果の影響が小さくなるため、残留圧縮応力の低減効果は大きく、また、繊維構造を有する TiN 膜が形成されることを見出した。MHM プロセスに繊維状の低応力 TiN マスクを適用することで Wiggling を抑制でき、その結果、Cu 配線のボイドフリー埋め込みを実現した。以上より、Cu 配線 MHM プロセスにおけるマスクとしては、繊維状 TiN 膜が最適と結論付けた。

第 6 章では、超低容量、高信頼性、高チップパッケージング耐性を有する多層 Cu 配線構造実現のため、層間絶縁膜に ELK 膜を適用した MHM セルフアラインビアプロセスを開発した結果について述べた。ELK 膜は、SiOC(Silicon Oxycarbide)膜中に空孔を形成することで k 値を 2.4 に低減しているが、機械的強度が低いためプロセスダメージによる k 値の増加や膜の剥離等の問題がある。また、リソグラフィの技術的限界からビアサイズの縮小が困難となり、ビアと配線間の分離幅の狭小化に起因した TDDB 耐性劣化が問題となっている。本研究で開発した MHM セルフアラインビアプロセスの適用により、ELK 層間絶縁膜へのプロセスダメージを完全に抑制し、ELK 膜の特性を最大限に引き出した超低容量配線を実現した。セルフアラインビアは、ビアエッチング工程において、エッチングイオンエネルギーの低減と CF(Carbon Fluoride)系デポジションガスの増加により、MHM に対して層間絶縁膜のエッチング速度を速く制御することで実現した。これにより、ビアを配線幅と同等のサイズに制御できるため、ビアと配線の分離幅を拡大でき、ビアと配線間の TDDB 耐性を向上した。また、ELK 膜と SiC(Silicon Carbide)系ライナー膜の界面に O-rich 遷移層を形成する界面酸素制御技術を開発し、結合エネルギーの高い Si-O 結合を形成することで界面密着強度を向上した。本技術の適用により、十分なバンプ強度を有する多層 Cu 配線を形成でき、チップパッケージングの信頼性向上を実現した。以上より、本研究で開発した ELK 膜を用いた MHM セルフアラインビアプロセスと界面酸素制御技術は、超低容量、高信頼性、高チップパッケージング耐性を有する多層 Cu 配線構造を実現するために有望な製造プロセスと結論付けた。

第 7 章では、本研究の遂行によって得られた科学的知見や指針を総括した。

以上、本研究で提唱したメタル・絶縁膜材料技術、製造プロセス技術を用いることにより、微細 Cu 配線の高性能化・高信頼性化が可能であることを明らかにした。