

論文の内容の要旨

論文題目	LSI微細Cu配線におけるエレクトロマイグレーション信頼性に関する研究
学位申請者	横川 慎二

LSIの配線は、その黎明期から現在まで、LSIの性能や特性、集積度を決定する重要な技術の一つである。

現在のLSIは、数億を越えるデバイス素子を、縦横に張り巡らされた配線で結んだ超大規模集積回路にまで進化している。現在、トランジスタ数が6000万のLSIにおいては、総配線長が数百メートル、配線層間を結ぶビア数が10億近くまで回路規模が増加している。この規模の増大につれて、LSIの品質・信頼性に対して配線技術が占める寄与がますます大きくなっている。

LSIの配線について、その勃興期より信頼性上の大きな懸念点として挙げられたのが、エレクトロマイグレーションである。熱容量が大きなSi基板に近接し、周囲を熱伝導率の高いSiO₂などで覆われたLSI配線は、通常用いられる電線や回路基板上の配線と比べて放熱性が格段に優れている。そのため、何桁も大きな電流密度の電流を流すことが可能となり、集積回路動作の高速化に貢献することが出来る。ところが、この非常に高い電流密度が、LSI配線独特の信頼性問題であるエレクトロマイグレーションによる故障を誘起する。

製品寿命期間にエレクトロマイグレーションによる故障が発生するのを抑制するためには、LSI製品開発の全てのフェイズにおける対策が必要となる。すなわち、製品企画、設計、試作、製造、検査の各段階で、その故障確率を十分に低く保つための施策を作りこむことが求められる。そのために、故障物理メカニズムを正確に把握し、寿命予測のための物理・統計モデルを確立することが重要な鍵となる。特に、次世代のLSI製造プロセスの技術開発においては、信頼性を確保することがその技術の実現性を左右するといっても過言ではない。

そこで本論文では、先端ULSIの微細化の鍵となる、加工寸法100nm程度の微細なダマシンCu配線のエレクトロマイグレーション現象と、高信頼化について論ずる。信頼性試験に基づいて、寿命特性と故障メカニズムについて明らかにする。また、基礎物理特性を調査し、高信頼化を実現する施策について提言する。この提言に基づき、先端プロセス技術の開発ならびに比較検討を行う。本研究により明らかになったCu配線の故障メカニズムを考慮することは、今後のULSIプロセス技術の開発や

微細化を実現させる一助となると考えられる。また、本研究のアプローチは、今後も進展すると言われる次世代の集積回路、ナノデバイスの実現に対しても有効なアプローチであると考えられる。

本論文は8章から構成されている。以下にその概要を述べる。

第1章「序論」では、LSIの高集積化を進展させる際に、配線技術が果たす役割や重要性を概観し、本研究の背景、目的を明らかにする。また、故障物理モデルからLSI寿命予測モデルに至るまでのモデル化フェイズを示し、各フェイズの有機的な関係と必要性を示し、これに即して本研究の目的を示す。

第2章「LSI微細Cu配線の信頼性と故障メカニズム」においては、微細なダマシンCu配線の信頼性確保の要点と、従来型の寿命試験によるエレクトロマイグレーション信頼性評価について論じる。特に、後者はCu配線導入以前のプロセスに広く採用されているAl配線との比較に基づき、信頼性開発の要点を提案する。

第3章「ボイドの核形成と成長」においては、Blechのエレクトロマイグレーションの基礎モデルに基づいて、Cu配線のエレクトロマイグレーションにおけるボイドの核形成と成長について論じる。Blechの基本式における拡散係数と駆動力を、実験的に評価し、拡散メカニズムの基礎特性について検討した結果を示す。拡散係数の検討においては、活性化エネルギーと微細配線の結晶構造に基づいて、支配的な拡散メカニズムを検討する。また、エレクトロマイグレーションによるボイド発生条件である配線長としきい電流密度の評価により、電子風力、及び逆流応力などの原子輸送駆動力について詳細に検討する。

第4章「Cu配線エレクトロマイグレーションの寸法依存」においては、微細化に伴って劣化するエレクトロマイグレーション寿命を、第3章と同様にボイドの核形成、成長を分離した配線幅依存性調査を行う。微細化に伴う特性の変化についてBlechのモデルに沿って議論する。

実際のLSI稼働条件で配線に流れる電流は、直流電流ではなくパルス電流となる。そこで、第5章「パルス電流によるボイド核形成・成長挙動」では、パルス電流下でボイドの核形成と成長が受ける影響を評価し、実際にLSIが稼働する条件におけるエレクトロマイグレーション現象について考察する。

第6章「エレクトロマイグレーション寿命分布と故障モード」においては、物理的に分析した故障モードと寿命分布の関係を考察するために、新しいTest structureを提案し、その目的、機能、優位性を示す。このTest structureは、Optical beam-induced resistance change (OBIRCH)法を併用することにより、非常に低い累積確率領域の故障を、物理的、統計的に評価することを可能とする。これを持ちいて、エレクトロマイグレーション寿命分布を、物理的な故障モードの分析結果と関連付けて議論する。

第7章「エレクトロマイグレーション高信頼化技術」においては、45nm世代プロセスにおいて問題となっている、微細化に伴う特性、信頼性上の課題を述べる。また、この課題を解決するためのプロセス技術を研究・開発する際に有効な、新しい抵抗率評価手法を提案する。この評価手法を用いて、代表的なプロセス技術の比較検討を行い、手法の有効性を示す。さらに、Cuへの不純物添加による高信頼化技術に関して、故障物理メカニズムに基づく改善効果の検討を行い、32nm世代以降へつながる高信頼化の方向性と指針を示す。

第8章「結言」においては、本論文の結論をまとめ、今後のシステムLSIの信頼性開発における課題について総括する。

本論文にて判明した故障物理メカニズムを考慮し、開発したプロセス技術と評価手法を用いて信頼性改善を図ることにより、より高い信頼性を有するLSIを実現することが期待される。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 横川 慎二

審査委員主査 鈴木 和幸

委員 木村 忠正

委員 名取 晃子

委員 田中 健次

委員 椿 美智子

委員

委員

本発表では、先端ULSIの微細化の鍵となる、加工寸法100nm程度の微細なダマシンCu配線のエレクトロマイグレーション現象と、その高信頼化について論じられている。エレクトロマイグレーション寿命を検証する信頼性試験が行われ、寿命特性と故障メカニズムについて明らかにされている。また、基礎物理特性の評価結果に基づいて、高信頼化を実現する施策が提案されている。

この提言に基づき、先端プロセス技術の開発ならびに比較検討が行われている。本研究により明らかになったCu配線の故障メカニズムは、今後のULSIプロセス技術の開発や微細化の実現に大きく寄与するものと考えられる。また、本研究のアプローチは、今後も進展する次世代の集積回路、ナノデバイスの実現においても有効と考えられる。

第1章「序論」では、LSIの高集積化を進展させるにおいて、配線技術が果たす役割や重要性が概観され、本研究の背景と目的が示されている。また、故障物理モデルからLSI寿命予測モデルに至るまでのモデル化フェイズと、各フェイズの有機的な関係と必要性が述べられ、これに即して本研究の目的が説明されている。

第2章「LSI微細Cu配線の信頼性と故障メカニズム」においては、微細なダマシンCu配線の信頼性確保の要点と、従来型の寿命試験によるエレクトロマイグレーション信頼性評価結果について論じられている。特に、Cu配線導入以前のプロセス世代で採用されているAl配線との比較結果が示され、信頼性開発の要点が提案されている。

第3章「ボイドの核形成と成長」においては、Blechのエレクトロマイグレーションの基礎モデルに基づいて、Cu配線のエレクトロマイグレーションにおけるボイドの核形成と成長について論じられている。Blechの基本式における拡散係数と駆動力が実験的に評価され、拡散メカニズムの基礎特性に関する検討結果が示されている。拡散係数の検討においては、活性化エネルギーと微細配線の結晶構造に基づいて、支

配的な拡散メカニズムが明らかにされている。また、エレクトロマイグレーションによるボイド発生条件である配線長としきい電流密度の評価により、電子風力、及び逆流応力などの原子輸送駆動力に関する詳細な検討結果が示されている。

第4章「Cu配線エレクトロマイグレーションの寸法依存」においては、微細化に伴って劣化するエレクトロマイグレーション寿命が、第3章と同様にボイドの核形成、成長に分離されて調査され、微細化に伴う特性の変化がBlechのモデルに沿って議論されている。

第5章「パルス電流によるボイド核形成・成長挙動」では、実際のLSIの稼働条件を想定したパルス電流下でのボイドの核形成と成長が評価され、LSI稼働条件において発生しうるエレクトロマイグレーション現象について実証されている。

第6章「エレクトロマイグレーション寿命分布と故障モード」においては、物理的に分析した故障モードと寿命分布の関係を明らかにするために新しいTest structureが提案され、その目的、機能、優位性が示されている。このTest structureは、Optical beam-induced resistance change (OBIRCH)法を併用することにより、非常に低い累積確率領域の故障を、物理的、統計的に評価することを可能としている。これをもちいて、観測されたエレクトロマイグレーション寿命分布と、物理的な故障モードの分析結果との関連性が示されている。

第7章「エレクトロマイグレーション高信頼化技術」においては、45nm世代プロセスにおいて問題となっている、微細化に伴う特性、信頼性上の課題が示されている。また、この課題を解決するための新しい抵抗率評価手法が提案されている。さらに、この評価手法を用いた、代表的なプロセス技術の比較検討が実施され、その有効性が示されている。また、Cuへの不純物添加による高信頼化技術に関して、故障物理メカニズムに基づく改善効果の検討が行われ、32nm世代以降へつながる高信頼化の方向性と指針が示されている。

第8章「結言」においては、本論文の結論をまとめられ、今後のシステムLSIの信頼性開発における課題が総括されている。

以上より、ダマシンCu配線のエレクトロマイグレーションの故障物理特性が明確にされ、かつ特性・信頼性を効果的に評価する手法と次世代のプロセス技術の信頼性改善メカニズムが明らかにされた本論文は、博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものであると、審査員全員一致にて判定した。