

R-11-RS-01

平成11年度

故障物理研究委員会 成果報告書

— 薄層ゲート酸化膜の信頼性を中心として —

平成12年3月

財団法人 日本電子部品信頼性センター

序 文

近年、半導体の微細加工技術や多層金属配線技術等の開発が益々向上し、半導体集積回路の高集積化・高機能化・高性能化・高速化・低消費電力化が著しく進展し、新たな需要分野を喚起しております。

このような技術により集積されたULSIの信頼性を確保するためには、ULSIの設計・製造プロセスの開発段階で信頼性を作り込むことが重要な手法になってきました。そのためには、各種故障モード及び故障機構を解明し、対策を立てていく必要があります。そのため、半導体故障物理の研究が益々重要視されるようになってまいりました。

このような背景において、当センターでは、かねてより半導体メーカ、研究所、大学などから故障物理の専門家にお集まりいただき、研究会を組織して、最新半導体デバイスで問題となる信頼性問題について調査・研究を進めてまいりました。本年は、特に近年薄層化が進んでいるゲート酸化膜に関わる信頼性の問題、さらには最近注目されている銅配線技術を含んだ多層配線技術の信頼性に着目し、内外の文献調査及び検討を進めてまいりました。

ここに、平成11年度の成果を取りまとめました。多層配線技術の信頼性については調査・検討の途中段階で必ずしも十分にまとめられておりませんが、本報告書が広く関係方面のご参考になり、活用されることを期待致します。

なお、本事業の遂行に当たり、「故障物理研究委員会」の木村 忠正委員長を始め、委員の皆様のご多大なご尽力に対し、深謝致します。

平成12年3月

財団法人 日本電子部品信頼性センター
理事長 佐々木 元

平成11年度故障物理研究委員会 成果報告
—薄層ゲート酸化膜の信頼性を中心として—

目 次

まえがき	1
I. 薄膜ゲート酸化膜の信頼性	
1. 酸化膜の物性	3
1.1 酸化膜の伝導機構	3
1.1.1 酸化膜の構造	3
1.1.2 絶縁体の電気伝導	3
1.1.3 LSIのゲート酸化膜に流れる電流	4
1.1.4 直接トンネル電流とFNトンネル電流の境界(膜厚依存性)	9
1.2 MOS電荷の分類及びキャリアトラップの特性	11
1.2.1 MOS電荷の分類	11
1.2.2 酸化膜トラップ電荷	12
1.2.2.1 酸化膜トラップ電荷の測定方法及び電荷分布中心の評価方法	12
1.2.2.2 正孔トラップ	16
1.2.2.3 電子トラップ	18
1.2.2.4 FN電子注入により観測される電荷	21
1.2.2.5 まとめ	24
2. FNストレスによる薄層ゲート酸化膜のリーク電流増加現象	27
2.1 リーク電流増加現象	27
2.2 ソフトブレイクダウン後の伝導機構(パーコレーションモデル)	31
2.2.1 はじめに	31
2.2.2 パーコレーションモデル	31
2.2.3 まとめ	37
3. TDDBモデルと寿命予測	39
3.1 TDDB寿命の電界依存性	39
3.2 熱化学Eモデル(低電界TDDBモデル)	41
3.2.1 はじめに	41
3.2.2 構造と結合エネルギー	42
3.2.3 SiO ₂ の誘電特性	44
3.2.4 熱化学モデル	48
3.2.5 熱化学モデル(歪んだ結合状態との混合)	53

3.3 統一モデル	61
3.3.1 はじめに	61
3.3.2 TDDBの統一モデル	61
3.3.3 欠陥モデル	64
3.3.4 薄い酸化膜(<5 nm)に対する見直し	66
3.4 寿命分布と予測式	68
3.4.1 寿命分布の起源	68
3.4.2 TDDB(Time Dependent Dielectric Breakdown)の寿命分布	68
3.4.3 寿命予測法	68
3.4.4 まとめ	80
3. ゲート酸化膜の薄層化限界と信頼性	82
4.1 ゲート酸化膜の従来の問題点	82
4.2 現在のゲート酸化膜を決めている要因	82
4.3 酸化膜厚限界	83
4.4 薄い酸化膜の利点	85
4.5 まとめ	85
II. 最近の多層配線技術と信頼性	
1. Cu配線技術と信頼性	89
1.1 Cu配線技術	89
1.2 Cu配線の信頼性	90
2. 低誘電率層間絶縁膜の影響	99
2.1 低誘電率層間絶縁膜の必要性	99
2.2 低誘電率材料	99
2.3 層間膜のTDDB評価例	100
3. Al系多層配線の信頼性(W-AlCuビア接続の問題)	102
あとがき	106
平成11年度故障物理研究委員会構成表	107

まえがき

集積回路の縮小化は留まるところを知らず、ゲート酸化膜厚さは 5 nm を切り、技術予測によれば 2008 年頃には 1 nm (酸化膜換算で) を切る。薄くなるゲート酸化膜の信頼性を確保するための材料、構造あるいは電源電圧、回路など種々の点からの対策が検討されているが、一方、信頼性物理、故障モード、寿命の評価方法の再検討、信頼性限界に対する考え方の見直しが始まっている。

経時破壊 (TDDB :Time Dependent Dielectric Breakdown) に対する酸化膜信頼性を確保するために電源電圧を下げる必要があるが、ゲート酸化膜への陰極からの電子注入がおよそ 5 nm 以上の膜厚では FN (Fowler-Nordheim) トンネル注入であったのが、5 nm 以下の薄膜では直接トンネル注入に変わるという根本的な違いが現われる。また、実使用の低電界での TDDB 寿命をより正確に予測することが要求され、電界加速式の再検討がなされている。これまでの厚い膜に対しては、FN 電子注入理論に基づいて導かれた寿命 (MTTF: Mean Time to Failure) の電界 (\mathcal{E}) 加速式 ($MTTF = A\mathcal{E}^2 \exp(B/\mathcal{E})$, A, B は定数; $1/\mathcal{E}$ モデル) が使われていたが、低電界 ($< \sim 5$ MV/cm) での TDDB 実験データが得られるにつれ、 $1/\mathcal{E}$ モデルより悲観的 (安全側) な MTTF を与える加速式 ($MTTF = C \exp(-\gamma\mathcal{E})$, C, γ は定数; \mathcal{E} モデル) に従うと主張する研究発表が報告されてきている。低電界領域の信頼できる TDDB 寿命データの取得と低電界領域まで適用できる電界加速式の導出は、現在、TDDB における大きな課題である。さらに、薄膜の TDDB 寿命の分布も異なることが見い出されている。このように、5 nm 以下の薄い酸化膜の TDDB のメカニズムと寿命評価方法が再検討されている。

薄い酸化膜に特有の新たな劣化も見い出されている。ストレス印加の初期にはストレス誘起による洩れ電流 (SILC: Stress Induced Leakage Current) が現われ、さらに最終的な破壊 (hard breakdown) に至る前の洩れ電流の増加 (soft breakdown) が観測される。一方、ロジック LSI ではオフ時のゲート酸化膜の許容洩れ電流限界を $I_{\text{off}} = 1 \text{ nA}/\mu\text{m}$ ($I_{\text{gate}} = 1 \text{ A}/\text{cm}^2$) まで認め、酸化膜厚は $1.5 \mu\text{m}$ 程度まで薄くできるとする考え方も提案されている。このように、酸化膜厚さが薄くなることにより、従来の酸化膜劣化機構、加速寿命式、信頼性評価方法の基本が変化する。

本報告書の I 部では、薄い酸化膜の信頼性について最近の文献調査をもとに議論しまとめた。II 部では、近年、Cu 配線金属材料の導入が始まり Cu 配線膜のエレクトロマイグレーション信頼性が注目されていることから、これについても最近の研究論文を調査し紹介する。シリコンを主とする半導体微細加工技術の進歩は、マイクロマシンの分野の発展をもたらした。マイクロマシンの作製技術、機能、そして信頼性は集積回路の信頼性と共通するところが多く、本委員会ではマイクロマシンの信頼性についての調査、議論も平行して進めている。平成 11 年度の調査研究結果については、平成 12 年度成果報告書にまとめて報告する。