

R-23-RS-01

平成23年度

故障物理研究委員会研究成果報告書

— 負バイアス温度不安定性現象 (NBTI) と
中性子線ソフトエラー —

平成24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となっています。そのため、各種故障モード及び故障メカニズムを解明し、早急に対策を立てていく必要があります。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、これまでの調査の継続として最先端 CMOS LSI の故障物理で注目されている「負バイアス・温度不安定性 (NBTI)」を主テーマとして、その現象、メカニズム、回路特性への影響等に注目し、調査研究を行いまとめました。また、CMOS の微細化に伴い問題視されている中性子線によるソフトエラーについての調査研究を行いまとめています。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24年3月

財団法人 日本電子部品信頼性センター
理事長 斎藤 昇三

平成 23 年度故障物理研究委員会成果報告書

目 次

序文

平成 23 年度故障物理研究委員会委員構成表

まえがき	1
I. NBTI の最近の話題	2
1. NBTI 劣化モデル	2
1.1 はじめに	2
1.2 正孔トラップモデル	2
1.2.1 従来のモデルの問題点	2
1.2.2 正孔トラップの種類	4
1.2.3 酸化膜中への正孔注入メカニズム	5
1.3 Two-Stage Model	5
1.3.1 Two-Stage Model の劣化メカニズム	5
1.3.2 E' センターの役割	7
1.3.3 E' センターによる正孔捕獲の検証実験	8
1.4 微小トランジスタによる NBTI 回復特性	8
1.4.1 微小トランジスタの回復特性	8
1.4.2 TDDS 法による欠陥分析	9
1.5 回復成分と非回復成分	12
1.6 酸化膜中の水素の影響	13
1.7 まとめ	15
2. NBTI 劣化の回路特性への影響	17
2.1 NBTI 劣化課題の背景	17
2.2 NBTI 劣化による回路特性劣化	17
2.2.1 ロジック回路への影響	17
2.2.2 アナログ回路への影響	20
2.2.3 SRAM 回路への影響	23
2.3 回路劣化への対応	25
2.3.1 回路劣化シミュレーション手法	25
2.3.2 電力コントロールによる劣化抑制	29
2.3.3 IDDQ 測定を用いた NBTI 劣化予測	30
2.3.4 ランダムばらつきと NBTI 劣化ばらつきを考慮した回路特性劣化予測	32
2.4 おわりに	34
3. 単体 MOSFET を用いた NBTI 信頼性評価に及ぼす回復の影響	35
3.1 はじめに	35
3.2 V_T 変動の早い成分と遅い成分の切り分け	35
3.2.1 測定方法	35
3.2.2 V_T 変動成分の分離	35
3.2.3 長時間ストレスにおける V_T 変動予測	37
3.3 まとめ	38

II. ソフトエラーの歴史と最近の発見	40
1. はじめに	40
2. ソフトエラーの歴史	40
3. ソフトエラー発生機構	41
3.1 重粒子線侵入による電荷発生、収集機構	41
3.2 中性子線による電荷発生機構	42
3.2.1 高エネルギー中性子線による電荷発生機構	42
3.2.2 熱中性子線による電荷発生機構	43
4. ソフトエラー発生メカニズム	44
4.1 DRAM のソフトエラー	44
4.2 SRAM のソフトエラー	45
4.3 ロジック系	45
5. 測定方法	46
5.1 重粒子による SEU の場合	46
5.2 中性線ソフトエラーの評価	48
5.2.1 高エネルギー中性子線	48
5.2.2 熱中性子線	48
6. デバイスのソフトエラーのトレンド	49
6.1 DRAM と SRAM	49
6.2 フラッシュメモリ	50
6.3 ロジック	51
7. 熱中性子線の影響	51
8. 実動作（フィールド）試験	54
8.1 IBM のフィールド実験	54
8.2 Cypress 社のフィールド実験	55
8.3 富士通のフィールド試験	56
9. まとめ	57

まえがき

故障物理研究委員会の課題は、故障物理という LSI の信頼性の基礎についての調査研究が主ですが、委員会委員に日本を代表する主要 LSI 関連企業の現場で活躍している方々を中心に、大学、研究機関の方がメンバーとして加わっています。現場、製品の信頼性に直接従事している企業の方々が故障物理の調査研究に携わることで、机上の空論ではない、プロセス、設計、製品と密接に結びついた LSI の故障を、物理的、化学的、数学的基礎から考えるとともに、試験方法、プロセス、市場での故障、新材料や新デバイス構造などの信頼性の問題に関連付けた調査研究を行ってきました。その成果を、RCJ 信頼性シンポジウムにおけるセミナー、RCJ 成果報告書、その他の機会に発表してきましたが、少しでも、日本における半導体デバイスの信頼性向上に貢献できたのではないかと考えています。また、かつての委員の多くの方々が、現在、学会等において中心的立場で活躍していることも大変嬉しいことです。今後とも、引き続きのご支援をお願いいたします。

平成 23 年度は、現在 CMOS LSI の故障物理の分野でホットな話題となっている“ばらつきと信頼性問題”を継続して取り上げ、調査研究を行いました。しかし、前回報告よりあまり進展がなく、今回の報告書では、割愛させて頂きました。これまで継続して調査研究を続けている pMOS の NBTI (負バイアス温度不安定性) について、最近の NBTI 劣化メカニズム、回路への影響を中心にまとめました。その他、急激な微細化の進展に伴い、SRAM の中性子線によるソフトウェアについても、調査研究を行い、まとめました。

システム LSI は、従来にもまして高集積性、高機能性、複雑性が増している一方、信頼性の低下は許されません。また、従来並の信頼性が要求される一方、信頼性保証コストの低減も要求されており、一層効率的な信頼性方法の開発が求められています。このようなシステム LSI の信頼性保証の置かれた状況、技術的課題、解決策等についても、調査研究を行い、まとめました。本テーマは重要であり且つ困難なテーマですので、今後も継続して取り上げていく予定です。

日本電子部品信頼性センター (RCJ) 故障物理研究委員会は、今年度は委員会発足から、35 年目に当たり、長い歴史を持つ委員会です。これも、賛助会員、RCJ、信頼性に携わる多くの方々からのご支援とともに、これまで、故障物理研究委員会に参加していただいた多くの有能な委員の方々のお陰であり、あらためて厚く御礼申し上げます。