

R-21-RS-01

平成21年度

## 故障物理研究委員会研究成果報告書

— LSI のばらつきと信頼性及び  
最近の話題 (NBTI、信頼性保証) —

平成22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。そのためには、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、最先端 CMOS LSI の故障物理で注目されている「LSI のばらつきと信頼性」を主テーマとして、その現象、メカニズム等に注目し、調査研究のまとめを行っています。また、継続テーマである NBTI や LSI 信頼性保証方法も採り上げ、調査研究を行いました。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 22 年 3 月

財団法人 日本電子部品信頼性センター  
理事長 赤尾 泰

# 平成 20 年度故障物理研究委員会成果報告書

## 目 次

序文

平成 21 年度故障物理研究委員会委員構成表

1	まえがき	1
I	LSI のばらつきと信頼性問題	2
1.	LSI のバラツキと信頼性	2
1.1	序	2
1.2	バラツキの要因と分類	2
1.3	ドーピングの離散的バラツキ	5
1.4	配線の電氣的パラメータのバラツキ	6
1.5	閾値電圧のバラツキ要因	7
1.6	バラツキと信頼性（文献紹介）	11
1.7	あとがき	14
2	SRAM におけるばらつき問題	17
2.1	SRAM とばらつき	17
2.2	SRAM 動作の安定性指標	17
2.3	ばらつきを考慮した安定性解析	21
2.4	ばらつきを考慮した設計手法	23
2.5	ばらつきとパラメトリック不良	25
II.	NBTI の最近の話題	30
1.	NBTI の劣化モデル	30
1.1	はじめに	30
1.2	正孔トラップによる NBTI 劣化モデル	30
1.2.1	従来のモデルの問題点	30
1.2.2	正孔トラップモデル	31
1.2.3	E' センターの役割	32
1.3	Two Stage Mode	34
1.4	まとめ	35
2.	NBTI 劣化の回路特性への影響	36
2.1	NBTI 劣化課題の背景	36
2.2	NBTI 劣化による回路特性劣化	36
2.2.1	ロジック回路への影響	36
2.2.2	アナログ回路への影響	39
2.2.3	SRAM 回路への影響	41
2.2.4	SRAM 回路への影響	41
2.3	回路劣化への対応	43
2.3.1	回路劣化シミュレーション手法	43
2.3.2	電力コントロールによる劣化抑制	47
2.4	終わりに	48
3.	NBTI の回復特性と RTN の関連性	49
3.1	正孔トラップモデル	49
3.2	NBTI 回復現象と 1/f ノイズの類似性	49
3.3	微小トランジスタの回復特性	52
3.4	まとめ	53

Ⅲ. 製品信頼性保証の最近の動向 .....	55
1. はじめに .....	55
2. 信頼性保証の基本的考え方と従来 of 信頼性保証 .....	55
3. 技術進展と信頼性 .....	59
4. 故障物理に基づく信頼性保証 .....	60
5. まとめ .....	64
あとがき .....	65

## 1 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 21 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”を取り上げ、調査研究を開始いたしました。最近の微細化と共に分子レベルのばらつきが問題となってきました。すなわち、分子サイズまでに縮小したトランジスタでは、電荷量及び材料の結晶粒の離散的性質に基づくランダムな統計的バラツキが問題となります。チップ上の隣同士の全く同じ形状の 2 つのトランジスタが、バラツキの広い統計分布の両端の大きく異なる特性を持つこともあります。すでに、SRAM の設計に大きな影響を与えており、ロジック回路では統計的タイミング問題を引き起こし、深刻なディジタル誤動作を生じているとの報告があります。統計的バラツキは、また、供給電圧のスケーリングを制限し、パワー損失を増加させます。この統計的バラツキと関連して、BTI (Bias Temperature Instability)、HCI (Hot Carrier Instability) による劣化が深刻な信頼性問題を引き起こします。このようなばらつきの要因、そのデバイス特性さらには信頼性への影響について調査しました。今年度は、本テーマを取り上げた初年度ですので、十分な報告にはなっていませんが、今後も継続して取り上げ、内容を充実していく予定です。

その他、従来から取り上げてきた NBTI 劣化現象の最近の理解の進展状況について、特に劣化メカニズムと、NBTI のランダム・テレグラフ・シグナル (Random Telegraph Signal (RTS)) ノイズとの関係について調査研究を行い、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、33 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。