

R-19-RS-01

平成19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) を中心として

平成20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ー、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「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、調査研究のまとめを行っています。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20年3月

財団法人 日本電子部品信頼性センター
理事長 小林 俊明

平成 19 年度故障物理研究委員会成果報告書

目 次

序文

平成 19 年度故障物理研究委員会委員構成表

まえがき	1
1. NBTI (PMOS トランジスタの負バイアス不安定性)の信頼性	2
1.1 はじめに	2
1.2 NBTI の劣化メカニズム	3
1.3 表面チャンネルと埋込みチャンネル PMOS FET	3
1.4 NBTI とトランジスタ信頼性	4
2. NBTI 特性劣化	6
2.1 NBTI による特性劣化	6
2.2 I_{ds} 劣化の挙動	7
2.3 I_{ds} 劣化と V_t 劣化との関係	7
2.4 移動度劣化の挙動	8
2.5 G_m 劣化の挙動	9
2.6 Off leak 劣化の挙動	10
2.7 劣化の EOT 依存	10
2.8 劣化の L 依存	11
2.9 まとめ	12
3. NBTI の劣化と回復のメカニズム	13
3.1 序	13
3.2 R-D(Reaction-Diffusion)モデル	13
3.2.1 反応 (reaction)	13
3.2.2 水素の拡散	14
3.2.3 界面準位生成の電界依存	16
3.3 酸化膜トラップ (正の固定電荷) の生成	17
3.4 NBTI の回復現象	17
3.5 パルス AC ストレス時の回復の効果	19
3.6 まとめ	20
4. NBTI のパラメータ依存性	24
4.1 はじめに	24
4.2 温度依存性	24
4.3 ストレス電圧依存性	26
4.4 ゲート長依存性	29
4.5 プロセス条件依存性	30
4.5.1 ボロン(B)拡散の影響	30
4.5.2 窒素(N)濃度の影響	31
4.5.3 水素(H)の影響	33
4.5.4 重水素(D ₂)の影響	33
4.5.5 水分(H ₂ O)の影響	34
4.5.6 フッ素(F)の影響	34
5. NBTI の測定方法	36
5.1 はじめに	36
5.2 NBTI の評価方法	36

5.2.1 DC 測定法.....	37
5.2.2 On The Fly 法(OTF 法).....	38
5.2.2.1 G_m 測定法.....	38
5.2.2.2 I_{Dlin} 測定法.....	39
5.2.2.3 Ultra-Fast On The Fly 法(UF-OTF 法).....	39
5.2.3 Fast 測定法.....	40
5.2.3.1 Fast IV(I_D - V_G)測定法.....	40
5.2.3.2 Fast V_T (Direct V_T)測定法.....	41
5.2.3.3 測定法の比較.....	42
5.2.3.4 測定法による回復の影響と寿命予測.....	43
5.3 界面準位密度の測定方法.....	46
5.3.1 Charge Pumping 法(CP 法).....	46
5.3.2 On-the-Fly Interface Trap 測定法(OFIT 法).....	47
5.3.3 DCIV 法.....	48
5.3.4 界面準位測定法と回復現象の影響.....	49
5.5 まとめ.....	50
6. High- k 膜の NBTI.....	52
6.1 はじめに.....	52
6.2 PBTI と NBTI.....	52
6.2.1 電子トラップの存在と PBTI.....	52
6.2.2 NBTI と PBTI の high- k 膜厚との関係.....	59
6.3 早いトラッピング/デトラッピング現象と遅い現象.....	60
6.3.1 実験.....	60
6.3.2 V_T 変動、 D_{IT} 増加の時間依存性.....	64
6.4 High- k と SiO_2 の NBTI 劣化の相違.....	65
6.5 High- k 膜 NBTI 劣化のプロセス依存性.....	66
6.6 まとめ.....	69
7 回路特性への影響.....	71
7.1 はじめに.....	71
7.2 インバータ回路への影響.....	71
7.3 アナログ回路への影響.....	71
7.4 SRAM 回路への影響.....	74
7.5 シミュレーション技術.....	75
7.6 おわりに.....	78
あとがき.....	79
「付録 1」 NBTI 関連の文献 (IEEE 関連) 一覧.....	80
「付録 2」 パルス印加におけるゲート酸化膜の降伏特性 (パルス TDDB 特性).....	90
1. はじめに.....	90
2. 主要な 3 グループの論文の概要.....	90
2.1 J. Wu 等 (INTEL) の論文.....	90
2.2 Wier 等 (agere systems) の論文.....	94
2.3 Stadler 等 (infinion) の論文.....	97
3. まとめ.....	101

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 19 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 pMOS の NBTI (負バイアス温度不安定性) を取り上げ、調査研究いたしました。NBTI は MOS 技術開発当初から知られていた現象ですが、非常に短時間に現れる劣化現象であること、しきい値電圧変動マージンの減少等から、最近問題視されています。また、最近の μ 秒レベルの短時間測定技術の開発に伴い、これまで観測できなかった早い劣化/回復現象も見つかっており、従来の劣化メカニズムの見直しも進んでいます。このような展開も含め、NBTI 劣化現象、劣化メカニズム、測定方法、プロセス依存性、high-k 膜の NBTI、回路特性への影響等について取り上げました。なお、本年度の報告は途中段階で、完全にまとまったものではないことをご了承ください。

日本電子部品信頼性センター (RCJ) 故障物理研究委員会は、昨年 (平成 18 年度) に 30 周年を迎えました。今年度は 31 年目に当たり、委員会として新たな気持ちで一步を踏み出しました。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き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。