

R-20-RS-01

平成20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 (NBTI) 現象と
ランダム・テレグラフ・シグナル (RTS) ノイズ現象 —

平成21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、さらに最近微細化・高集積化の制限要因になるのではと注目されているランダム・テレグラフ・シグナル (RTS) ノイズ現象に注目し、調査研究のまとめを行っていました。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 21 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 20 年度故障物理研究委員会成果報告書

目 次

序文

平成 20 年度故障物理研究委員会委員構成表

まえがき	1
I NBTI 現象とメカニズム	2
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 表面チャネルと埋込みチャネル PMOS FET	3
1.4 NBTI とトランジスタ信頼性	4
2. NBTI の劣化と回復のメカニズム	6
2.1 序	6
2.2 R-D (Reaction-Diffusion) モデル	7
2.2.1 反応 (reaction)	7
2.2.2 水素の拡散と界面準位生成のべき乗時間依存	11
2.2.3 界面準位生成の電界依存	13
2.3 酸化膜トラップ生成モデル	14
2.4 温度依存性	15
2.5 NBTI の回復現象	15
2.5.1 回復のメカニズム	16
2.5.2 パルス AC ストレス時の ΔV_T シフト	19
2.6 まとめ	21
3. NBTI のパラメータ依存性	25
3.1 はじめに	25
3.2 温度依存性	25
3.2.1 NBTI の活性化エネルギー	25
3.2.2 ゲート絶縁膜中の窒素 (N) の影響	27
3.2.3 界面準位と正電荷トラップの影響	27
3.3 電圧 (電界) 依存性	28
3.3.1 Power Law Model (べき乗モデル)	30
3.4 ゲート長依存性	32
3.5 プロセス条件依存性	33
3.5.1 窒素 (N) 濃度の影響	33
3.5.2 水素 (H) の影響	35
3.5.3 重水素 (D_2) の影響	35
3.5.4 水分 (H_2O) の影響	35
3.5.5 フッ素 (F) の影響	36
3.6 まとめ	38
4. NBTI の測定方法	39
4.1 はじめに	39
4.2 NBTI の評価方法	39
4.2.1 DC 測定法	40
4.2.2 On The Fly 法 (OTF 法)	41

4.2.2.1	G_m 測定法	41
4.2.2.2	I_{Dlin} 測定法	42
4.2.2.3	Ultra-Fast On The Fly 法 (UF-OTF 法)	42
4.2.2.4	On The Fly 法の問題点	43
4.2.3	Fast 測定法	44
4.2.3.1	Fast IV (I_D - V_G) 測定法	44
4.2.3.2	Fast V_T (Direct V_T) 測定法	45
4.2.3.3	測定法の比較	46
4.2.3.4	測定法による回復の影響と寿命予測	47
4.3	界面準位密度の測定方法	51
4.3.1	Charge Pumping 法 (CP 法)	51
4.3.2	On-the-Fly Interface Trap 測定法 (OFIT 法)	52
4.3.3	DCIV 法	53
4.3.4	界面準位測定法と回復現象の影響	54
4.4	まとめ	55
5.	High-k 膜の NBTI	57
5.1	はじめに	57
5.2	PBTI と NBTI	57
5.2.1	電子トラップの存在と PBTI	57
5.2.2	NBTI と PBTI の high-k 膜厚との関係	64
5.3	早いトラッピング/デトラッピング現象と遅い現象	65
5.3.1	実験事実	65
5.3.2	早い成分と遅い成分の分離測定方法	67
5.3.2.1	回復特性の実測と予測曲線	67
5.3.2.1.1	ユニバーサル回復曲線	67
5.3.2.1.2	通常測定装置による MSM 測定	70
5.3.2.2	簡易法-1	73
5.3.2.3	簡易法-2	76
5.4	High-k 膜と SiO_2 の NBTI 劣化の相違	77
5.5	High-k 膜 NBTI 劣化のプロセス依存性	79
5.6	La 酸化膜添加によるしきい値電圧コントロールと信頼性	81
5.6.1	はじめに	81
5.6.2	しきい値電圧コントロール	82
5.6.3	メカニズム	83
5.6.4	La ドープ high-k 膜の信頼性	85
5.6.4.1	Selete グループ	85
5.6.4.2	SEMATEC グループ	88
5.6.5	まとめ	91
5.7	まとめ	91
6	回路特性への影響	94
6.1	はじめに	94
6.2	ロジック回路への影響	95
6.3	アナログ回路への影響	98
6.4	SRAM 回路への影響	100
6.5	シミュレーション技術	102
6.6	おわりに	106

II	RTS (Random Telegraph Signal) ノイズ現象.....	108
1.	RTS 概論.....	108
1.1	デバイスの微細化による RTS の顕在化.....	108
1.2	RTS 理論形成の歴史.....	109
1.3	各種デバイスにおける RTS 起因の不具合事例.....	109
1.4	今後の展望.....	110
2.	$1/f$ ノイズと RTS ノイズ.....	112
2.1	MOS トランジスタの低周波ノイズ.....	112
2.2	McWhorter のモデル.....	112
2.3	Hooge の実験式.....	113
2.4	$1/f$ ノイズと RTS ノイズの出現境界.....	114
3.	デバイス特性劣化と RTS ノイズとの関係.....	116
3.1	V_{th} の変動.....	116
3.2	移動度の劣化.....	117
3.3	ゲートリーク電流の増加.....	118
4.	RTS ノイズの測定方法.....	119
4.1	低周波ノイズ測定的前提条件.....	119
4.2	単体 MOS トランジスタの測定例.....	119
4.3	大規模アレイ Test structure を用いた測定例.....	121
4.4	測定条件.....	123
4.5	統計解析.....	124
5	RTS ノイズの発生メカニズム.....	131
5.1	MOS トランジスタのパラメータ依存性 (サイズ、動作電圧).....	131
5.2	プロセス条件依存性.....	132
5.3	シミュレーション解析.....	133
6	デバイス特性と RTS ノイズ.....	134
6.1	フラッシュメモリにおける RTS ノイズ.....	134
6.2	CMOS イメージセンサにおける RTS ノイズ.....	135
7	まとめ.....	136
	あとがき.....	137

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 20 年度は、昨年に引き続き現在 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。

また、本年度から、MOS デバイスの微細化によって製品性能上の大きな問題として顕在化してきたランダム・テレグラフ・シグナル (Random Telegraph Signal (RTS)) ノイズを取り上げました。RTS とは、ドレイン電流がランダムに、かつ量子的な変化をする現象で、MOS デバイスの寸法が 100nm 以下になると顕著になる現象です。微細化 MOSFET では、RTS 現象により、デジタル回路のしきい値電圧 V_{th} が変わるため、場合によってはキャリア一個のために回路誤動作が発生することになります。この RTS 現象は、MOS デバイス微細化・大規模集積化の制限要因になるのではと懸念されています。但し、その発生機構や ULSI への影響はまだ未解明の状況です。そこで、本委員会でも、この現象を取り上げ、検討することにしました。

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、32 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。