

R-15-RS-01

平成15年度

故障物理研究委員会研究成果報告書

— 最新 ULSI 要素技術の故障
物理とバーンイン技術 —

平成16年3月

財団法人 日本電子部品信頼性センター

平成15年度故障物理研究委員会研究成果報告書

目 次

序文

平成15年度故障物理研究委員会委員構成表

まえがき 1

I. 最新 ULSI の故障分布とバーンイン技術

1. 微細化 ULSI 摩耗故障の寿命分布	3
1.1 TDDB の寿命分布	3
1.1.1 TDDB の寿命分布	3
1.1.2 寿命分布ばらつき増大に伴う寿命予測への影響	6
1.1.3 高誘電率ゲート絶縁膜での寿命分布	10
1.1.4 まとめ	10
1.2 EM・SIVによる微細配線の寿命分布	12
1.2.1 はじめに	12
1.2.2 従来研究	12
1.2.2.1 EM の寿命分布	12
1.2.2.2 SIV の寿命分布	15
1.2.3 Via-EM の寿命分布	16
1.2.3.1 実験データによる実証	16
1.2.3.2 統計的適合度の考察	21
1.2.4 SIV の寿命分布	24
1.2.4.1 故障メカニズムと故障率	24
1.2.4.4 寿命分布	24
1.2.5 まとめ	26
2. 歩留まりと信頼性の関係	27
2.1 はじめに	27
2.2 モデル	27
2.2.1 歩留まり要素	27
2.2.2 クリティカル領域 (critical area)	28
2.2.3 欠陥分布	30
2.2.4 歩留まりと信頼性の関係のモデル	33
2.3 歩留まり低下、信頼性低下の主要因が粒子であるとの根拠 (実験データ)	35
2.4 歩留まりと信頼性の関係 (実験)	36
2.4.1 Van der Pol 等の報告	36
2.4.2 欠陥局在を考慮した報告	37
2.5 バーンイン有効性と歩留まりの関係	40
2.6 まとめ	43
3. バーンイン手法と最新技術	45
3.1 バーンイン手法	45
3.1.1 はじめに	45
3.1.2 バーンインの概念	45
3.1.3 バーンイン方法及び条件	47
3.1.3.1 用いる試料による分類	47
3.1.3.2 バーンイン条件による分類	47

3.1.3.3	バーンインストレスカバレッジの種類	48
3.1.3.4	標準的なバーンイン条件	49
3.1.4	バーンインモデル	49
3.1.5	摩耗故障分布に及ぼすバーンインの影響	51
3.1.6	まとめ	51
3.2	最近のバーンイン技術	52
3.2.1	はじめに	52
3.2.2	ウエハでの高電圧ストレス印加の効果	53
3.2.3	まとめ	55

II. 最近の話題

1.	高速トランジスタ技術 SiGe-HBT の信頼性	57
1.1	はじめに	57
1.2	SiGe-HBT の構造	58
1.3	SiGe-HBT の信頼性	58
1.3.1	逆バイアスストレス耐圧	58
1.3.2	順方向ストレス耐性	62
1.3.3	ESD 耐性	64
2.	微細トランジスタ技術と信頼性 (3次元構造トランジスタ)	67
2.1	はじめに	67
2.2	微細 MOSFET 技術	67
2.3	Fin 型 MOSFET の電気的特性	68
2.4	Fin 型 MOSFET の製造技術	71
2.5	3次元 MOSFET の信頼性	72
3.	パルスストレスによる NBTI 劣化現象	76
3.1	はじめに	76
3.1.1	NBTI の劣化メカニズム	76
3.2	パルスストレス条件下の NBTI 劣化現象	77
3.2.1	パルスストレスによる回復現象	77
3.2.2	AC ストレスによる回復現象	78
3.2.3	回復現象の酸化膜厚依存性	79
3.2.4	SiO ₂ 膜と SiON 膜の回復現象	80
3.3	NBTI ダメージによるホットキャリア劣化への影響	81
3.3.1	NBTI ダメージと HC 劣化	81
3.3.2	NBTI ダメージによる HC 劣化加速メカニズム	82
3.4	まとめ	83
4.	エレクトロニクス実装における信頼性解析技術	84
4.1	はじめに	84
4.2	半導体パッケージ技術の動向	84
4.3	実装信頼性解析技術の現状	85
4.4	はんだ接合の機械的信頼性解析・設計技術	85
4.4.1	はんだ接合部の非線形歪解析による疲労寿命評価	85
4.4.1.1	はんだ非線形機械特性 (クリープ特性)	85
4.4.1.2	はんだ歪振幅解析と疲労寿命予測	86
4.4.2	落下衝撃試験とはんだ接合部信頼性	88
4.4.3	熱サイクル負荷によるはんだ結晶成長過程の評価	89
4.4.4	疲労破壊寿命のバラツキ予測	90
4.4.5	今後の実装信頼性解析技術の展望	91

5. 最新 SOI 技術と信頼性.....	93
5.1 はじめに.....	93
5.2 SOI 構造の特徴.....	94
5.2.1 利点.....	94
5.2.2 課題と対策.....	96
5.3 SOI 技術の信頼性.....	99
5.3.1 ホットキャリア不安定性.....	99
5.3.1.1 評価上の問題点.....	99
5.3.1.2 SOI MOSFET のホットキャリア劣化の特徴.....	100
5.3.1.3 寿命推定.....	103
5.3.2 NBTI 及び TDDB 信頼性.....	103
5.4 まとめ.....	104
あとがき.....	105

付録：信頼性の基礎概念と統計分布

1. はじめに.....	107
2. 信頼性の基本概念.....	107
2.1 基本概念.....	107
2.2 故障率曲線.....	109
2.3 故障分布.....	110
2.4 ワイブル分布と対数正規分布との違い.....	115
3. まとめ.....	117

まえがき

LSI の特性寸法の減少に連動して常に問題となってきた信頼性の課題は、ゲート酸化膜の経時破壊 (TDDB)、配線のエレクトロマイグレーション (EM) およびストレス誘起ボイド形成 (SIV)、ホットエレクトロン (HC) に起因する V_T 変動、負バイアス温度不安定性 (NBTI)、静電破壊 (ESD) などである。これらは、静電破壊を除くと、電流、電圧、温度、湿度などのストレス下で、時間とともに劣化が進行する摩耗故障である。これまで、本委員会でも、主としてこのような摩耗故障の故障物理に注目して来た。ゲート酸化膜が 2 nm を切り TDDB の故障メカニズムや故障の特性が大きく変り、また、Cu 配線材料や多層配線構造の導入によりビア部でのエレクトロマイグレーションやストレス誘起ボイド形成による故障が現れ、その対策に、ここ数年の間、信頼性研究者、技術者の多大な苦勞と貢献があった。そうした LSI の信頼性技術の基となるのが故障物理であった。故障物理を基とした LSI メーカーの摩耗故障対策の結果、市場に出荷される通常の LSI は、その有用期間の間には摩耗故障は現れないといっても過言ではない。

摩耗故障対策が十分になされた製品において、あらためて表に見えてきたのが歩留まり、初期故障、ゼロタイム故障で、特に、システム LSI など非常に多数のトランジスタ素子を有する大規模 LSI の開発で問題となっている。ひとつには、微細化によりわずかのプロセス変動や環境変動により、微小パーティクルの混入、微小寸法ずれを引き起こし、不良品数の増大 (歩留まりの低下)、あるいは、ストレスに非常に弱く初期故障を起しやすい製品を生じる。このような不良素子を除去するために、メーカーは出荷前にバーンインや高ストレス試験によるスクリーニングを行うが、その手法はメーカーのノウハウによるところが大きい。出荷前の信頼性試験の方法や条件については、JIS C7022 (現在は廃止されている) あるいは MIL-STD-883 などがあるが、これらの規格の試験方法、条件も、故障物理的理解が含まれてはいるものの、基本的には経験的に積み重ねたデータを基にしている。また、出荷前にテストを行い検出された不良製品を除去するが、非常に多数の素子を含む大規模 LSI では全ての構成素子をチェックすることは不可能であり、また、ユーザが加えると考えられるすべてのストレスの大きさやパターンに対してチェックできない。このような歩留まり問題、テストすり抜けによるゼロタイム故障、初期故障を低減するためのスクリーニング等の手法には、故障物理をこれまで以上に導入する必要があると考えられ、そうした技術の開発が始まっている。平成 15 年度の故障物理研究委員会では、これらの問題を主テーマとして取り上げた (2 章：歩留まりと信頼性の関係、3 章：バーンイン手法と最新技術)。しかし、このような、一面、泥臭い問題を故障物理的視点から科学的に検討した研究論文の発表は少なく、ノウハウ的な要素も多いため、今年度の報告書は当初意図したレベルには達していない。平成 16 年度も引き続きこのテーマに関する調査研究を行い、より充実した報告書を完成する予定である。