

R - 2 - RS - 02

LSI の故障モデル式と加速寿命試験に 関する調査研究成果報告書

平成 3 年 3 月

財団法人日本電子部品信頼性センター

序 文

半導体メモリの技術進歩は著しく、21世紀の初めには、線幅が $0.1\mu\text{m}$ でDRAMで1ギガビットに達すると報告されております。

つい20年前には、一枚のシリコン基板に1,000素子を集積したICを大規模集積回路（LSI）と定義致しましたが、今日では数百万素子以上を集積したULSI（超々LSI）の時代に入って参りました。

一方このような微細化されたULSIの信頼性を確保するためには、ULSIの設計・製造プロセス段階で信頼性を作りこむことが重要になります。そのためには、半導体故障物理の研究成果が活用されると聞いております。

このような背景において、当センターでは、半導体メーカ、研究所、大学などから半導体故障物理の専門家にお集まりいただき、研究会を組織致しまして、平成2年度は「LSIの故障モデル式と加寿命試験」に関して内外の学協会の研究会、シンポジウム等の文献調査及び解析を致しました。

ここに、その成果を取りまとめ報告書を作成致しましたが、本報告書が広く関係方面のご参考になり、活用されることを心から期待致します。

尚、本事業の遂行に当たり、「半導体故障物理研究委員会」の木村委員長を始め、委員の皆様の多大なご尽力に対して厚くお礼申し上げます。

平成3年3月

財団法人 日本電子部品信頼性センター
理 事 長 高 木 昇

平成2年度半導体故障物理研究委員会構成表

(五十音順)

	氏	名	所	属
委員 長	木	村 忠 正	電気通信大学	
幹 事	和	田 嘉 記	日本電信電話株式会社	LSI研究所
委 員	井	内 隆 敏	三菱電機株式会社	
〃	石	田 大 士	株式会社日立製作所	
〃	植	木 憲 一	沖電気工業株式会社	
〃	小	野 寺 俊 哉	ソニー株式会社	
〃	鍵	沢 篤	シャープ株式会社	
〃	瀬	戸 屋 孝	株式会社東芝	
〃	千	野 健 一	住友金属鉱山株式会社	
〃	二	川 清	日本電気株式会社	
〃	和	田 哲 明	松下電子工業株式会社	
事 務 局	鳴	神 長 昭	(財)日本電子部品信頼性センター	

LSIの故障モデル式と加速寿命試験に 関する調査研究成果報告書

目 次

序文

平成3年度半導体故障物理研究委員会構成表

1. 緒言	1
2. 半導体デバイスの寿命分布と加速試験	5
2.1 信頼性と寿命分布	5
2.1.1 何故寿命分布があるか	5
2.1.2 何故分布を知ることが必要か	5
2.2 本報告書で取り上げた故障メカニズムの寿命分布について	9
2.2.1 エレクトロマイグレーション	9
2.2.2 ホットキャリア	16
2.2.3 TDDB	17
2.3 加速寿命試験	22
2.3.1 ストレスと劣化速度	22
2.3.2 温度ストレス加速	23
2.3.3 他のストレスによる加速	23
2.3.4 連続ストレス増加、ステップストレス増加方法	24
付録	
2 A 劣化、故障の物理的モデル	27
2 B 要素の複合による信頼性	31
3. ホットキャリア	39
3.1 ホットキャリアによる故障モードとメカニズム	39
3.1.1 Si-酸化膜界面の電荷	39
3.1.2 ホットキャリア現象による特性の劣化	41
3.1.3 ホットキャリア注入機構	44
3.2 加速寿命試験法	46
3.2.1 加速寿命モデル	47

3.2.2	標準的な試験方法	57
3.3	ホットキャリア効果に対する対策	65
3.3.1	デバイス構造上の対策	65
3.3.2	製造プロセス上の対策	69
3.3.3	回路上の対策	73
3.3.4	将来の動向	78
4.	エレクトロマイグレーション	83
4.1	故障メカニズムと故障モード	83
4.1.1	エレクトロマイグレーションの概要	83
4.1.2	エレクトロマイグレーションによる故障モード	86
4.2	加速寿命試験法	95
4.2.1	DC定電流ストレス試験法	95
4.2.2	パルス電流ストレス試験法	102
4.2.2-1	DCパルスストレス試験法	102
4.2.2-2	ACパルスストレス試験法	111
4.2.3	DC定電圧ストレス試験法	113
4.3	超高加速寿命試験法	118
4.3.1	従来配線パターンによる方法	118
4.3.2	SWEAT法	118
4.4	統計手法適用による試験時間短縮法	121
4.5	試験実施上でのいくつかの注意点	123
4.6	加速寿命試験の代替法	126
4.6.1	BEM法	126
4.6.2	微小抵抗値変化測定法	127
4.6.3	1/fノイズ測定法	127
4.7	その他の評価法	130
4.8	エレクトロマイグレーションに対する対策	138
4.8.1	EM耐性向上対策	138
4.8.2	スクリーニング手法	138
5.	ストレスマイグレーション	141
5.1	ストレスマイグレーション現象例	141
5.2	ストレスマイグレーションの故障メカニズム	142

5.2.1	拡散クリープ現象	142
5.2.2	ストレスマイグレーションに対する各種の要因	146
5.2.3	応力緩和のための配線微細構造変化	157
5.3	ストレスマイグレーションの加速試験方法	163
5.3.1	故障のモデル式、信頼度予測	163
5.3.2	加速寿命試験	164
5.3.3	SM耐性評価方法(目安)	167
5.4	SMの対策	168
5.4.1	応力緩和	168
5.4.2	配線微細構造の変動防止	172
5.5	スクリーニング方法	175
6.	酸化膜経時破壊	181
6.1	TDDBの故障現象と故障メカニズム	181
6.1.1	酸化膜の絶縁破壊現象	181
6.1.2	TDDB破壊現象	182
6.1.3	TDDBの故障メカニズムとその物理モデル	187
6.2	加速試験方法	207
6.2.1	試料作成方法	207
6.2.2	試験方法	208
6.3	対策	214
6.3.1	スクリーニング方法	214
6.3.2	改善策	216
6.3.3	最近の動向及び今後の課題	216
7.	結言	219

1. 緒 言

はじめに

半導体デバイスの信頼性、寿命を評価するための加速寿命試験は、関係する故障メカニズムの加速ストレスパラメータとそれに対する故障の判定パラメータを関係づける故障のモデル式にしたがって行われる。加速されたストレス下で得られた加速寿命試験データを、故障モデル式にしたがって通常使用ストレス条件下に外挿し、寿命を推定する。

モデル式とともに忘れてはならないのが寿命の統計的分布である。加速寿命試験をできるだけ短時間で経済的に行うことの必要から、試験サンプルの大きさが限られてくるが、少ないデータ点から信頼のおける寿命推定を行うためには、故障の統計分布が重要な役割を果たす。

信頼性評価の現場では、過去の多くのデータの蓄積、経験、故障物理的考察から、半導体デバイスの個々の故障メカニズムに対しそれぞれ独自の故障モデル式と故障データの統計分布を得、それに基づいて加速寿命試験を実施している。このように、文献等である一つの故障メカニズムに対して様々な故障モデル式が提案されているため、どの関係式がどの様な試料にどの様な試験条件下で加速寿命試験の故障モデル式として最適かその判断に戸惑う方も多いであろう。それらの故障モデル式には、故障物理に基づいて導出した一般性があるが実際上は修正が必要と考えられるものもあろうし、経験的に導出した特定サンプル、特定の現場にのみ通用すると考えられる実験式的なものもあろう。

本報告書は、半導体の様々な故障メカニズムのうち、ホットエレクトロン、エレクトロマイグレーション、ストレスマイグレーション、TDDB(経時的誘電破壊)を取り上げ、これらの故障メカニズムに対し、これまで学会、文献等で提案、報告されている種々の故障モデル式を調査、整理し、その物理的背景、故障データとの対応、妥当性を評価し、各故障メカニズムに対する最適な故障モデル式の提案とそれに基づいた適切な加速寿命試験方法を解説したものである。

本報告書をまとめるにあたって、特に以下の点を考慮した。

A 故障モデル式。その基づく物理的、経験的根拠。

故障モデル式は、ストレスと故障とを関係づける式である。これは、基本的には故障物理に基づいて導出されるべきものである。しかし、故障のメカニズムは単純ではなく、モデル式の導出には必ずある仮定、即ちモデル化の仮定が入るので、実際のデータとは必ずしも適合しないことがある。その場合には、数多くの寿命試験データからの経験式をも加味したモデル式を使うことが必要になる。このようなことから、ある故障メカニズムに対しデバイスメーカ各社で必ずしも同一の故障のモデル式が使われているわけではない。したがって、同じデバイスの信頼性評価でも使用する故障モデル式の違いにより寿命推定値が異なることが起こる。本報告書は、これまでに報告、提案されている種々の異なったモデル式を調査、整理し、その物理的根拠と各委員の経験を加味してそれぞれの故障モデル式の妥当性、適用限界等を論じ、一般性のあるモデル式を提

案している。

B 適切な加速ストレスの選択。そのストレスの有効な大きさ、また加速限界。加速寿命試験における適切なストレスとは、その最終製品としてのデバイスの使用環境を考慮して、注目する故障メカニズムをそしてその故障メカニズムだけを有効に加速するものでなければならない。加速ストレスと言うからには、そのストレスの増加により劣化現象が単調に、かつ加速度的に増加するものが望ましい。例えば、温度加速については、アレニウスの関係式に従って劣化が指数関数的に増加する現象(エレクトロマイグレーション、腐食など)がよく知られている。一方、ストレスマイグレーションは配線金属の相変化などが関係し、温度に対し複雑な変化をする。ホットエレクトロン現象は低温ほど大きいといったことを理解する必要がある。また、実際に起こり得ないストレスを考慮する必要はないであろうし、過度にストレスを加えて材料特性の変化、別の故障メカニズムを誘起してもいけない。このように、適切なストレスの選択は、ユーザの使用環境を十分に考慮し、故障の物理を理解すると共に、多くの経験的データをも考慮して行うことが重要である。

C 寿命判定基準

故障判定基準の選択は、正しい寿命予測や試験時間、サンプル数の節約に大きく影響する。例えば、エレクトロマイグレーションによる配線金属の劣化は、標準的には断線を故障判定基準とするが、最近では試験時間の節約のために抵抗値の変化量(例えば5%)を故障判定基準とする論文も多く見られる。故障判定基準として抵抗値変化を使用して良いか、その判定基準量を何%までに下げられるかは難しい問題で、その後の断線時間との大きな相関が保証されていなければならない。抵抗値変化の他にも、初期のボイド形成、光の反射率変化、ノイズ発生量などと故障を関連づける試みも報告されている。

ホットキャリアによる劣化では、FETでは I_{DS} や G_m の現象を劣化判定パラメータにとるが、メモリでは V_{CC} マージンやアクセス時間の劣化をとるといったように同じ故障メカニズムに対し判定パラメータのとり方が異なることがあることにも注意したい。

D 試験デバイスの構造

半導体デバイスの各種故障メカニズムに対する耐性を独立に調べるには、専用の試験デバイス(TEG: test element group)を作るのが一般的である。TEGは目的の故障メカニズムのみを加速できる構造であり、故障モデル式における個々の加速ストレスを独立に印加でき、その故障メカニズムによる劣化を測定出来る構造であることが望ましい。

E 故障データの統計分布と寿命推定

加速寿命試験に必要な試験サンプル数、試験時間、故障データ数は、信頼性評価の重要な問題である。これらは、適切な試験方法、ストレス限界値、判定基準をとることにより、大幅に減少させることができるものであり、それには、故障メカニズムを正しく理解することに加えて、その故障発生 of 統計的性質を的確に把握しておくことが大切である。例えば、ワイブル分布と対数

正規分布は、データが中央値の周りの狭い範囲に分布しているときにはほとんど区別できないが、実際に必要な少ない累積故障確率に対する推定寿命値はどちらの分布を仮定するかで大きく変わってくる。十分なデータ数をとることが基本であるが、故障物裡の基本に立って、分布の要因を探り、寿命分布を推定することができれば、それは寿命試験の時間とコストを下げることにつながる。2章では、ここで取り上げた故障メカニズムによる故障の統計的性質を、これまで報告された故障データによる経験的分布と、故障物理から推定される理論的分布の両面から検討している。

以上のような観点から半導体デバイスの故障モデルと加速寿命試験方法をまとめた解説書はほかにあまり例を見ないと思われる。本書が半導体デバイスの信頼性の向上に少しでもお役にたてれば幸いである。

なお、本報告書は、日本電子部品信頼性センターの「半導体故障物理研究委員会」に於て平成元年4月から平成3年3月までの2年間にわたる研究討論の成果をまとめたものである。その間、日立製作所中央研究所の武田英次氏、日本大学工学部の大西一功氏にはご指導ご教示を頂きました。この紙面を借りて委員一同感謝致します。