

R-2022-RS-01

2022年度

## 故障物理研究委員会研究成果報告書

— SiC パワー半導体の故障物理と信頼性保証、及び  
— 先端 LSI の NBTI 現象と故障モデルの変遷 —

2023年3月

一般財団法人 日本電子部品信頼性センター



## 目次

前書き	1
第1部： SiC パワー半導体の故障物理と信頼性保証	1
1. 4H-SiC パワーMOSFET のゲート酸化膜信頼性	1
1.1 SiC パワーMOSFET について	1
1.2 SiC パワーMOSFET の代表的構造と特徴	3
1.2.1 縦型 DMOSFET と UMOSFET ( U字型トレンチ構造 MOSFET)	3
1.2.2 ボディダイオード	3
1.3 ゲート酸化膜の欠陥	4
1.4 界面トラップ, 界面近傍トラップ, 酸化膜中トラップ	5
1.5 ゲート酸化膜の絶縁破壊メカニズム	7
1.5.1 内因性と外因性要因によるゲート酸化膜の降伏メカニズム	7
1.5.2 ゲートリーク電流のメカニズムと酸化膜トラップ生成	9
1.6 酸化膜経時破壊 (Time Dependent Dielectric Breakdown: TDDB)	11
1.7 バイアス温度不安定性 (Bias Temperature Instability: BTI)	12
1.7.1 SiC MOSFET のバイアス-温度不安定性, Si MOSFET との比較	12
1.7.2 スタティック BTI	13
1.7.3 $V_{th}$ シフトの時間応答 (速い回復成分とほぼ非回復成分)	15
1.7.4 $V_{th}$ シフトの温度依存性	18
1.7.5 AC BTI とヒステリシス	21
1.7.5.1 NBTI	21
1.7.5.2 $V_{th}$ の回復特性	22
1.7.5.3 AC ストレス下の BTI	24
1.7.5.4 $V_{th}$ のヒステリシス	25
1.8 おわりに	28
2. SiC MOSFET 特性評価方法及び BTI 変動評価方法	32
2.1 はじめに	32
2.2 ゲート閾値電圧測定方法	32
2.2.1 SiC MOSFET のゲート閾値電圧測定時の留意点測定方法	32
2.2.2 MOSFET のゲート閾値電圧測定方法の種類	33
2.2.2.1 方法-1 定電圧 $V_{DS}$ 測定法	33
2.2.2.2 方法-2 ゲート-ドレイン短絡測定法	34
2.2.2.3 方法-3 ドレイン電流 $I_D$ 定電流測定法	34
2.2.2.4 方法-4 3点推定法	35
2.2.2.5 方法-5 高速ドレイン電流測定法	35
2.2.2.6 方法-6 コンディション&ゲート閾値測定法	36
2.2.2.7 方法-7 正負コンディション&ゲート閾値測定法	36
2.2.2.8 方法-8 トリプルセンスゲート閾値測定法	37
2.3 BTI 変動評価方法	37
2.3.1 PBTI 試験でのゲート閾値電圧測定法	38
2.3.2 NBTI 試験でのゲート閾値電圧測定法	38

2.3.3	ACBTI でのゲート閾値電圧測定法 .....	40
2.4	ゲート閾値電圧測定方法の評価事例 .....	40
2.4.1	ゲート閾値測定速度によるプロセス改善評価への影響 .....	40
2.4.2	信頼性試験に於けるトリプルセンス閾値電圧測定方式の有効性 .....	41
3.	SiC MOSFET の中性子線シングルイベントバーンアウト (SEB) .....	45
3.1	はじめに .....	45
3.2	中性子線による電荷発生機構 .....	45
3.3	シングルイベントバーンアウト (SEB) 現象 .....	47
3.4	測定方法 .....	48
3.4.1	中性子線発生装置 .....	48
3.4.2	試験方法 .....	50
3.4.3	試験結果の解析 .....	51
3.4.3.1	解析手順 .....	51
3.4.3.2	解析例 .....	52
3.5	照射実験結果 .....	53
3.5.1	Asai 等の実験 .....	53
3.5.2	Akturk 等の実験 .....	55
3.5.3	SEB 発生率 (FIT) - バイアス関係のユニバーサル曲線 .....	59
3.5.4	SEB 発生率 (FIT) の温度依存性 .....	62
3.5.5	SEB 発生率 (FIT) の SiC MOSFET と Si MOSFET の違い .....	63
3.6	パワーMOSFET の SEB 発生メカニズム .....	64
3.6.1	SiC と Si MOSFET の SEB 故障率の温度依存性 .....	65
3.6.2	SiC の MOSFET とダイオードの SEB の FIT/cm <sup>2</sup> 対 Bias/Vaval の関係の比較 .....	66
3.6.3	SEB 発生メカニズム .....	66
3.6.3.1	SEB 故障時の過渡電流特性 .....	66
3.6.3.2	SEB 発生メカニズム .....	67
3.7	SEB 軽減策 .....	70
3.7.1	ディレーティング手法 .....	70
3.7.2	各種構造の SiC MOSFET の SEB 耐性 .....	71
3.7.2.1	試料と照射施設 .....	71
3.7.2.2	実験方法 .....	72
3.7.2.3	実験結果 .....	73
3.8	太陽活動期による中性子線量増加の影響 .....	74
3.9	まとめ .....	75
4.	パワー半導体モジュールパッケージの信頼性 .....	77
4.1	はじめに .....	77
4.2	パワー半導体モジュールパッケージの構成 .....	77
4.3	信頼性要求の高まりと信頼性試験の概要 .....	81
4.3.1	高信頼性への要求 .....	81
4.3.2	パワーモジュールの信頼性試験規格 .....	81
4.4	パワーサイクル試験 .....	83
4.4.1	故障メカニズム .....	83
4.4.2	パワーサイクル試験方法 .....	84
4.4.2.1	温度プロファイル .....	84

4.4.2.2	抵抗増加のモニタリング .....	86
4.4.2.3	Si IGBT のジャンクション温度と熱抵抗推定方法.....	86
4.4.2.4	SiC MOSFET のジャンクション温度と熱抵抗推定方法.....	91
4.4.3	IGBT パワーモジュールのパワーサイクル試験.....	93
4.4.3.1	スイスの LESIT プロジェクト (1993-1995) .....	93
4.4.3.1.1	モジュールの構造 .....	93
4.4.3.1.2	パワーサイクル試験方法 .....	94
4.4.3.1.3	パワーサイクル試験結果.....	95
4.4.3.1.4	寿命予測式.....	96
4.4.3.2	パワーサイクル試験における寿命予測式 .....	96
4.4.4	SiC MOSFET モジュールのパワーサイクル試験 .....	98
4.4.4.1	応力シミュレーション .....	98
4.4.4.1.1	応力シミュレーション方法 .....	98
4.4.4.1.2	応力シミュレーション結果 (Si IGBT と Si MOSFET の比較) .....	102
4.4.4.1.4	実験による検証.....	107
4.4.4.2	パワーサイクル試験による Si IGBT と SiC MOSFET の比較.....	109
4.4.4.3	SiC MOSFET のパワーサイクル耐性強化 .....	113
4.4.4.3.1	接続技術の改良 .....	113
4.4.4.3.1.1	Ag シンタリング (銀焼結) .....	113
4.4.4.3.1.2	Cu シンタリング (銅焼結) .....	114
4.4.4.3.2	ワイヤボンディングの改良 .....	116
4.4.4.3.2.1	Cu ワイヤ .....	116
4.4.5	パワーサイクル試験のまとめ .....	120
4.5	耐湿性.....	123
4.5.1	はじめに.....	123
4.5.2	風力タービンのコンソーシアムの報告 .....	123
4.5.3	パワーモジュールの湿度の影響による故障メカニズム .....	124
4.5.3.1	湿気 (水分) の侵入経路.....	124
4.5.3.2	腐食メカニズム .....	125
4.5.3.3	腐食の加速モデル .....	127
4.5.4	高電圧高湿高温逆バイアス試験方法 (HV-H <sup>3</sup> TRB) .....	127
4.5.5	高電圧高湿高温逆バイアス試験結果 .....	128
4.5.5.1	Si IGBT の耐湿性 .....	128
4.5.5.1.1	Zorn 等の試験結果 .....	128
4.5.5.1.2	Peters 等の試験結果 .....	130
4.5.5.2	Si IGBT と SiC MOSFET の耐湿性の比較.....	133
4.5.6	SiC MOSFET の H <sup>3</sup> TRB と PCT の複合効果.....	136
4.5.7	SiC MOSFET の H <sup>3</sup> TRB と PCT の同時試験の提案 .....	141
4.5.7.1	背景.....	141
4.5.7.2	ダイナミックダイナミック H <sup>3</sup> TRB による故障例と対策.....	142
4.5.7.3	ダイナミック H <sup>3</sup> TRB の試験規格としての採用の動き .....	143
4.5.7.4	耐湿性試験のまとめ.....	144
4.6	まとめ.....	145
附属書 A	コフィン・マンソン則とモロー則 .....	148
A.1	応力とひずみ.....	148
A.1.1	応力 (Stress) .....	148
A.1.2	ひずみ (Strain) .....	149
A.1.3	ポアソン比.....	150
A.1.4	熱ひずみ.....	150
A.1.5	応力とひずみの関係 .....	151

A.1.6 クリープ (creep) と疲労 (fatigue) による破壊.....	152
A.2 疲労とひずみの関係.....	152
A.2.1 低サイクル疲労 (コフィン・マンソン則) .....	153
A.2.2 統合された疲労寿命式 (Morrow の式) .....	155
第II部 先端 LSI の NBTI 現象と故障モデルの変遷.....	156
1. はじめに.....	156
2. NBTI の劣化モデル.....	156
2.1 酸化膜中の欠陥と界面準位の役割.....	157
2.2 従来のモデルの問題点.....	158
2.2.1 回復の温度依存性.....	158
2.2.2 回復のバイアス依存性.....	159
3. 微小トランジスタによる NBTI 回復特性.....	159
3.1 微小トランジスタの回復特性.....	159
3.2 TDDS 法による回復特性の分析.....	161
4. 正孔トラップモデル(欠陥中心モデル).....	165
4.1 Two-Stage Model の劣化メカニズム.....	166
4.1.1 ステージ 1.....	166
4.1.2 ステージ 2.....	167
4.2 回復成分の劣化モデル.....	167
4.2.1 酸化膜中への正孔注入メカニズム.....	168
4.2.2 2重 Well モデル.....	169
4.2.3 Non-radiative Multi Phonon (NMP)モデル.....	171
4.2.4 Multi State NMP モデル.....	171
4.2.5 水素関連欠陥の役割.....	176
4.3 非回復要素(Permanent parts)の劣化メカニズム.....	177
4.3.1 Two stage model (Stage 2).....	177
4.3.2 Gate Side Hydrogen Release model (GSHR model).....	178
4.3.3 拡散-反応(Reaction -Diffusion)モデル.....	178
4.3.4 非回復成分(界面準位)の回復.....	179
5. 拡散-反応(Reaction-Diffusion)モデル.....	180
5.1 拡散-反応モデルに基づく NBTI の劣化回復メカニズム.....	180
5.2 Transient Trap Occupancy Model (TTOM).....	181
6. まとめ.....	184
後書き.....	187

## 前書き

半導体技術の進展は急速であり、このような新しい技術により開発された半導体の信頼性を確保するためには、半導体の設計・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る。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、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きている。このような背景から、一般財団法人日本電子部品信頼性センターは、40年以上にわたり、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・研究を進めてきている。取り上げるテーマは、その時代の最先端の半導体技術であり、その故障物理の調査研究を行い、成果を公表してきている。

最近注目されている半導体技術は、省電力の要請に伴う、変換効率の高いSi以外のSiCやGaN材料のパワー半導体の開発である。故障物理委員会も、この次世代パワー半導体を取り上げ、その故障物理に注目し調査研究を進めている。本資料は、実用化が進んでいるSiCパワー半導体の最新の故障物理と最新LSIの重要な故障モードであるNBTI（負バイアス温度不安定性）についてまとめた。第I部が、SiCパワー半導体の最新の故障物理と信頼性保証、第II部が、最新LSIのNBTI（負バイアス温度不安定性）現象とモデルの変遷についてまとめている。

第I部のSiCパワーMOSFETの故障物理関連では、最初にSiCパワーMOSFETのSiC-SiO<sub>2</sub>の界面特性のSi-SiO<sub>2</sub>界面特性との違いを取り上げている。基板の違い（SiCとSi）、酸化温度の違い（SiCは高温（1150℃程度）、Siは900℃程度）等により、SiC-SiO<sub>2</sub>界面では、界面欠陥密度、酸化膜内部の欠陥密度が高く、様々な特性を持つ欠陥があり、室温でもMOSFET特性劣化が起こる。このバイアス温度不安定性（BTI）による閾値電圧V<sub>th</sub>の変動の挙動をまとめている。またゲート酸化膜の各種欠陥に起因する酸化膜経時破壊（TDDB）も重要であり、TDDB発生メカニズム、スクリーニング方法についてまとめている。また、様々な特性を持つ欠陥により、閾値電圧V<sub>th</sub>も測定方法により異なる値が測定され、測定方法の標準化が問題となっており、この状況もまとめている。

SiCパワーMOSFETは特性変動問題の他に、地上に降り注ぐ中性子線によるシングルイベントバーンアウト（SEB）も問題視されている。その試験方法、SEB発生メカニズムと対策方法を含めてまとめている。

さらに、大電力、高発熱が特徴のパワーデバイスのパッケージング技術とその信頼性も重要である。パッケージングは、Si IGBTでも重要な課題であり、Si IGBTとSiCパワーMOSFETの両方について、パッケージ信頼性についてまとめた。

第II部のLSIのNBTI（負バイアス温度不安定性）現象とモデルの変遷では、旧モデルのレビューと2つのモデルへの集約、最新の実験結果とモデルの融合性などについてまとめた。

SiCパワー半導体では、SBD（ショットキーバリアダイオード）とMOSFET等が実用化され、市販されている。市販しているベンダーからは、信頼性試験データが公表されている。但し、一般に、試験規格に沿った試験項目とその結果のみが公表されている。それらの信頼性試験データを理解するには、故障物理の知識が必須である。本資料では、SiCパワー半導体デバイスの各種故障モード、故障メカニズム及び試験方法について解説している。この分野で活躍している皆様に、本資料が参考になれば幸いである。