

R-29-RS-01

SiCパワー半導体の信頼性

平成30年3月

一般財団法人 日本電子部品信頼性センター
故障物理研究委員会

SiC パワー半導体の信頼性

目 次

1. はじめに.....	1
2. SiC パワー半導体の概要.....	2
2.1 次世代パワー半導体への期待.....	2
2.2 パワー半導体の素子構造と性能の概要.....	3
2.2.1 パワー半導体の素子構造.....	3
2.2.2 パワー半導体の性能.....	4
2.2.3 パワー半導体としての SiC.....	5
2.3 炭化ケイ素 (SiC) 材料と結晶構造.....	6
2.3.1 SiC 材料.....	6
2.3.2 結晶構造.....	6
3. パワー半導体の基礎と性能指数.....	8
3.1 はじめに.....	8
3.2 基本的なパワー半導体.....	8
3.2.1 パワーダイオード(power diode).....	9
3.2.2 サイリスタ (thyristor).....	9
3.2.3 GTO (gate turn-off thyristor).....	10
3.2.4 IGBT.....	10
3.2.5 MOSFET.....	10
3.3 パワー半導体デバイスにおける損失.....	11
3.3.1 オン抵抗ジュール損失.....	11
3.3.2 オン、オフ時のスイッチング損失.....	12
3.3.3 オン抵抗を決める要素 (図 3.7(a),(b) 参照).....	13
3.4 Si、SiC、GaN パワーデバイスの構造.....	14
3.5 パワーデバイスの信頼性課題.....	14
3.6 性能指数 (Figure of merit: FOM)を表す式 [9].....	15
付録 :	23
A.1 BFOM の導出 ($BFOM = \epsilon \cdot \mu \cdot E_G^3$).....	23
A.2 KFOM における $t_D > \left[\frac{4\pi\epsilon A}{c \cdot v_s} \right]^{1/2}$ の導出 [A1].....	24
A.3 BHFFOM の導出.....	25
A.4 NHFOM の導出.....	25
A.5 HMFOM の導出.....	25
4. パワー半導体の信頼性.....	27
4.1 SiC バイポーラデバイスの通電劣化.....	29
4.1.1 先行研究と現象.....	29
4.1.2 積層欠陥構造.....	30
4.1.3 積層欠陥と抵抗劣化.....	31
4.2 SiC MOS デバイスの信頼性.....	35
4.2.1 SiC-SiO ₂ 界面特性.....	35
4.2.1.1 バンド構造.....	35
4.2.1.2 SiC-SiO ₂ 界面形状.....	37
4.2.1.3 界面準位 (実験結果).....	38
4.2.1.4 界面準位の起源.....	39

4.2.1.5	酸化膜トラップ	43
4.2.2	バイアス温度不安定性 (BTI)	45
4.2.2.1	はじめに	45
4.2.2.2	ヒステリシス特性	45
4.2.2.3	市販品の NBTI 及び PBTI	48
4.2.2.3.1	試料	48
4.2.2.3.2	測定方法	48
4.2.2.3.3	結果	50
4.2.2.3.4	別試料の結果	54
4.2.2.3.5	別試料 (古い試料) の結果	57
4.2.2.3.6	PBTS 及び NBTS 現象のまとめ	59
4.2.2.3.7	PBTS 及び NBTS による V_T 変動メカニズム	60
4.2.3	TDDB 特性	65
4.2.3.1	はじめに	65
4.2.3.2	真性 TDDB 特性	65
4.2.3.3	外因性 TDDB	67
4.2.3.4	まとめ	68
4.2.4	SiC MOSFET と Si MOSFET の界面特性や特性変動の挙動の相違	70
5.	SiC デバイスのシングルイベントバーンアウト (SEB)	72
5.1	はじめに	72
5.2	中性子線による電荷発生機構	72
5.3	シングルイベントバーンアウト (SEB) 発生メカニズム	74
5.4	測定方法	75
5.5	実験	76
5.5.1	Asai 等の実験	76
5.5.2	Akturk 等の実験	78
5.5.3	Lichtenwalner 等の実験	82
5.6	まとめ	83
6	パワーデバイスにおけるパッケージングの信頼性	85
6.1	はじめに	85
6.2	パッケージングの故障	85
6.2.1	ワイヤーボンド不良	85
6.2.2	はんだ接合不良	88
6.2.3	その他	89
6.3	支配的故障の寿命	89
6.3.1	ワイヤーボンディングの寿命モデル	89
6.3.2	はんだ劣化の寿命モデル	90
6.4	パワーサイクル試験	92
6.4.1	パワーサイクル試験について	92
6.4.2	パワーサイクル試験による劣化	94
6.5	まとめ	95
7.	最後に	97

1. はじめに

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ます。そのためには、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きました。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ます。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ます。

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す。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ます。本資料は、SiCパワー半導体の最新の故障物理についてまとめた資料です。注目した故障モードは、SiCバイポーラデバイスの通電劣化、SiC MOSデバイスのバイアス温度不安定性、TDDB、及びショットキーバリアダイオード(SBD)とMOSFETの中性線によるシングルイベントバーンアウト(SEB)です。そのメカニズムの詳細を含めて解説しました。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についても解説しました。

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、市販されています。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ます。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ます。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す。本資料では、SiCパワー半導体デバイスの各種故障モードと故障メカニズムについて解説しています。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す。