R-25-RS-01

平成２５年度

故障物理研究委員会研究成果報告書

－ 新しい電子材料・電子デバイス、
パワー半導体の動向と信頼性、
及び **LSI** の信頼性 －

平成２６年３月

一般財団法人　日本電子部品信頼性センター

序　　文

3年で4倍の高集積化が達成されるという微細化技術進展のムーアの法則が維持される（More Moore）一方、3次元デバイス等の微細化技術とは異なる視点（More Than Moore）での高集積化が進んでいます。また、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が進展しています。

このような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、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、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の開発の方向性について、ムーアの法則が維持される（More Moore）の方向と微細化技術とは異なる視点（More Than Moore）の方向性について解説しています。また、最近注目されている「パワー半導体の信頼性」についても、2~3年前より検討を進めており、その中間報告をまとめています。さらに、LSIの信頼性として、「コンタクトの信頼性問題」、「実デバイスの長期信頼性試験結果の報告」等各種テーマを取り上げ豊富な内容となっています。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」の委員の皆様の多大なご尽力に対し深謝致します。

平成２６年３月

一般財団法人　日本電子部品信頼性センター
理事長　木村　忠正

平成 25 年度　故障物理研究委員会成果報告書

目　　次

序文
平成 25 年度故障物理研究委員会委員構成表

第Ⅰ部　新しい電子材料、電子デバイス

1　新しい電子材料、電子デバイス 1
1.1　はじめに 1
1.2　MOSFET の信頼性課題 3
1.3　歪 Si/SiGe によるチャネル移動度向上 5
1.4　SOI (silicon on Insulator) MOSFET 9
1.5　Fin-FET 11
1.6　無接合（Junctionless）MOSFET　（Lilienfeld transistor,　Pinch-off nanowire MOSFET） 11
1.7 トンネル FET 13
1.8 終わりに 14

第Ⅱ部　パワー半導体の動向と信頼性 16
１．SiC 系パワー半導体の現状と信頼性 16
1.1　はじめに 16
1.2　パワー半導体 17
1.2.1　パワー半導体について 17
1.2.2　パワー半導体の性能指標 18
1.2.3　パワー半導体としての Si と SiC 19
1.3　SiC の結晶構造 21
1.3.1　SiC 材料 21
1.3.2　SiC 単結晶構造 22
1.4　SiC デバイスの信頼性問題 1：順方向電圧劣化 23
1.4.1　先行研究 23
1.4.2　積層欠陥 25
1.4.3　抵抗劣化のメカニズム 27
1.4.4　積層欠陥の拡張原因 28
1.5　SiC デバイスの信頼性問題 2：酸化膜信頼性 29
1.5.1　ゲート酸化膜 TDDB 29
1.5.2　製品レベルでの信頼性 31
1.6　まとめ 31

2　GaN 系パワー半導体の現状と信頼性 33
2.1　はじめに 33
2.2　GaN デバイスの可能性 34
2.2.1　GaN デバイスの用途 34
2.2.2　電子デバイスとしての適用領域 35
2.2.3　競合コスト比較 35
2.3　Ⅲ-Ⅴ族半導体によるトランジスタ 36
2.3.1　GaAs HEMT(High Electron Mobility Transistor)の誕生背景と原理 37
2.3.2　GaN　HEMT について 40
2.3.3　2DEG 形成と AlGaN バリア厚の関係 41
2.4　GaN HEMT の実用化に向けての課題と対策 42
2.4.1　課題: ノーマリオフ化 42
2.4.1.1　対策 1: 障壁層の薄層化 44
2.4.1.2　対策 2:　p 型ゲート構造 44
2.4.2　課題: 電流コラプス 45
2.4.2.1　対策 1:　表面パッシベーション膜 47
2.4.2.2　対策 2: フィールドプレート(FP)の導入 48
2.5　GaN HEMT の信頼性問題 50
2.5.1　構造欠陥の空間的分布 50
2.5.1.1　評価デバイス構造 50
2.5.1.2　ストレス条件と電気的特性 50
2.5.1.3　構造劣化の形態観察 51
2.5.2　MIS 型 HEMT における絶縁膜の信頼性 53
2.6　実用化に向けて残された課題 54
2.6.1　シリコン基板上の GaN 結晶の厚膜化 54
2.6.2　シリコン基板上の GaN 結晶内のピット形成とその影響 55
2.7　まとめ 57
3.　パワーデバイスにおけるワイヤーボンディングの信頼性 59
3.1　序論 59
3.2　Al ワイヤーボンディングの信頼性 60
3.2.1　はじめに 60
3.2.2　Al ワイヤーボンディングの特徴と信頼性評価方法 61
3.2.3　ボンディング部のクラック長率とシェア強度の関係 63
3.2.4　熱疲労試験後の Al ワイヤー内部破断 63
3.2.5　ボンディング破壊のメカニズム 64
3.2.6　ボンディングの信頼性評価 66
3.2.7　ボンディングの高信頼性について 67
3.2.8　ボンディングの温度効果 68
3.3　まとめ 71

第Ⅲ部　LSI の信頼性 73

1.　コンタクトの信頼性（Al, W, Cu コンタクトから GaN まで） 73
1.1　コンタクトの役割と重要性 73
1.1.1　整流作用とショットキー障壁 73
1.1.2　Si デバイスにおけるオーミックコンタクトの原理の説明 74
1.2　LSI におけるコンタクトの歴史 75
1.2.1　コンタクトの要求性能 75
1.2.2　プロセス技術の変遷 75
1.2.3　スケーリングにおける位置づけ 76
1.3　コンタクトの信頼性事例 78
1.3.1　Al コンタクトの信頼性 78
1.3.2　W コンタクトの信頼性 80
1.3.3　Cu コンタクトの信頼性 87
1.4　パワーデバイスにおけるコンタクト 91
1.4.1　GaN におけるオーミックコンタクトの研究例 92
1.4.2　GaN におけるコンタクト劣化の事例 93
1.5　まとめ 94
2.　実デバイスの摩耗故障－64K～4M DRAM の 3 年間加速試験の例－ 96
2.1　はじめに 96
2.2　試験試料と試験条件 96
2.2.1　試験試料 96
2.2.2　加速試験条件 96
2.3 試験結果と考察 97
2.3.1　高温動作試験 97
2.3.1.1　64K MOS DRAM 97
2.3.1.2　256K MOS DRAM 102
2.3.1.3　1M CMOS DRAM 102
2.3.1.4　4M CMOS DRAM 104
2.3.2　低温動作試験 104
2.3.3　高温高湿動作試験 105
2.3.3.1　64K MOS DRAM 105
2.3.3.2　256K、1M、4M DRAM 109
2.3.4　温度サイクル試験 109
2.4　まとめ 111