

EPCのeGaN[®] FETの信頼性試験： フェーズ7



Chris Jakubiec, Rob Strittmatter Ph.D., and Chunhua Zhou Ph.D., Efficient Power Conversion Corporation, El Segundo, CA

Efficient Power Conversion (EPC)社のエンハンスメント・モード窒化ガリウム(GaN[®]) FETは、従来のパワーMOSFETを上回る競争力のある特性によって、新たな市場のアプリケーションへと拡張し続けています。ワイヤレス・パワー、DC-DC変換、RF基地局の送信、衛星システム、オーディオ・アンプ、LiDAR(光による検出と距離の測定)は、eGaN FETの優れた特性を利用できるアプリケーションのわずかな数例にすぎません。

同様に重要なことは、eGaN FETが意図したアプリケーションにおいて本質的に信頼性があることを確かめることです。EPCのアプローチは、常に、信頼性試験データの統計量を増やすことであり、知識データベースを一段と強化し、eGaNの技術と製品は、従来のシリコン・デバイスに対して、実現可能で信頼性の高い置き換えソリューションであることを明らかにすることです。これまでのレポートから得られた結果の総合的な見直しに加えて、このフェーズ7のレポートでは、断続動作寿命 (IOL: Intermittent Operating Life)、初期寿命故障率 (ELFR: Early Life Failure Rate)、静電気放電 (デバイス帯電モデル)、および、チップ・サイズが最も大きいファミリーと300 Vの製品のうちのいくつかに対する追加の品質試験が含まれています。

このレポートの最初のセクションは、製品の電圧範囲を300 Vまで拡張し、新しいデータを含めたeGaN FETの品質データのデータベースに基づいています。セクションIIは、最新の温度サイクル(TC: Temperature Cycling)やIOLのデータなど、eGaN製品のウエハー・レベルのチップスケール・パッケージの熱機械的信頼性を扱います。セクションIIIは、多数のサンプルの母集団の初期故障試験をカバーし、初期寿命故障率の上限が与えられます。最後のセクションでは、フィールドでの信頼性データを示します。

パートI: 40 Vから300 Vまでの品質試験

品質試験の概要

EPC2025はeGaN技術の電圧能力を300 Vまで高めた代表的な製品です。信頼性試験では、デバイス・パラメータがデバイス定格の300 Vまで安定しているという結果でした。静電気放電試験も、人体モデル(HBM: Human Body Model)、マシン・モデル(MM: Machine Model)、デバイス帯電モデル(CDM: Charged Device Model)の3種の業界標準モデルをカバーするように拡張しました。追加の信頼性試験は、このレポートの作成時点でEPCの製品ポートフォリオの中で最大のチップ・サイズのいくつかの製品で完了しました。EPCのeGaN FETには、シリコン・ベースのパワーMOSFETで標準的な条件の下で、さまざま

なストレス・テストを実施しました。以下のテストが含まれます：

- 高温逆バイアス(HTRB: High Temperature Reverse Bias): 部品には、最大定格温度でドレイン・ソース間電圧が印加されます。
- 高温ゲート・バイアス(HTGB: High Temperature Gate Bias): 部品には、最大定格温度でゲート・ソース間電圧が印加されます。
- 高温保存(HTS: High Temperature Storage): 部品は、最大定格温度で加熱されます。
- 温度サイクル(TC: Temperature Cycling): 部品には、高温と低温の両極端が交互に加えられます。

- 高温高湿逆バイアス(H3TRB: High Temperature High Humidity Reverse Bias): 部品は、ドレイン・ソース間電圧を印加され、高温の下で高湿に曝されます。
- バイアスなしの圧力釜(オートクレーブ: AC、またはプレッシャ・クッカー試験): 部品には、凝縮条件の下で、圧力、湿気、温度が加えられます。
- 耐湿性レベル(MSL: Moisture Sensitivity Level): 部品には、湿気、温度、および、3サイクルのリフローが加えられます。
- 静電気放電(ESD: Electrostatic Discharge): 部品には、人体モデル(HBM)、マシン・モデル(MM)、デバイス帯電モデル(CDM)の下でESDが加えられます。
- 断続動作寿命(IOL: Intermittent Operating Life): 部品には、周期的なオン/オフの直流電力パルスを加えて、デバイスの接合部を所定の温度に加熱し、その後、オフ状態の接合部温度にします。

デバイスの安定性は、ストレスを加えた後、直流の電気的試験で検証されます。電気的パラメータは、時間ゼロで、室温における暫定的な読み出し点で測定されます。ゲート・ソース間の漏れ、ドレイン・ソース間の漏れ、ゲート・ソース間のしきい電圧、オン抵抗などの電気的パラメータをデータシートの仕様と比較します。部品がデータシートの仕様を超えたときに、不具合が記録されます。eGaN FETには、可能なら、最新のJEDEC(半導体技術協会)規格[1]を満たすようにストレスがかけられます。

部品は、FR5(高TgのFR4)、またはポリイミドのアダプタ・カード上に実装されました。銅の2層を備えた厚さ1.6 mmのアダプタ・カードを使用しました。表面の銅の層は、1オンスまたは2オンスで、裏面の銅の層は1オンスでした。アダプタ・カード上に部品を実装するときに、米ケスター社の無洗浄フラックスNXG1タイプ3はんだSAC305 [2] を使用しました。

統計結果のまとめ

表1は、信頼性試験の結果のまとめで、故障率の複合統計的推測を与えます。合計700万デバイス-時間を超える集計結果において、不具合はゼロでした。故障がないので、統計は、信頼度60%での最悪ケースの上限を表しています。これらの上限値は、サンプルの数量によ

てのみ制限されており、EPCが信頼性データを収集し続けられれば、下がり続けるでしょう。いくつかの適切なストレス・テストに対して、故障発生件数(FIT)と平均故障時間(MTTF)の両方を計算しました。これらの計算では、加速係数AF=1と仮定しました。このため、より厳しく

ない使用条件の下での動作では、推定された故障率は、さらに低くなるでしょう。他のストレス・テストに対して、故障率(ppmでの)は、関連するストレス期間と共に示しました。

ストレス・テスト	サンプル数	故障数	等価デバイス(時間)	故障の統計的WW上限(信頼度60%)	備考
HTRB	1754	0	2755000	333FIT (MTTF = 343 年)	$V_{DS} = 80\% V_{DS,max}$
HTGB	1694	0	2695000	340FIT (MTTF = 336 年)	$V_{GS} \geq 5.5V$
TC	630	0	707000	1500 ppm	初めの1000サイクル、 $\Delta T \geq 100^{\circ}C$
H3TRB	450	0	450000	2036FIT (MTTF = 56 年)	—
ELFR HTRB	5966	0	286368	150 ppm	初めの48時間
IOL	385	0	138600	NA	NA
すべてのテストの合計	10879	0	7031968	—	—

表1 故障の複合統計的上限のまとめ

高温逆バイアス

標準的な品質検査の一環として、JEDEC 規格のJESD22-A108 [3] に従って、サンプルには、1000時間のストレス期間に、最大定格温度でドレイン-ソース間の定格電圧の80%を印加しました。ストレス・テストの部品の種類は、40 V~300 Vの全耐圧範囲にわたっています。

ストレス・テスト	型番	耐圧(V)	チップ・サイズ(mm×mm)	テスト条件	故障品の数	全サンプル数(サンプル数×ロット数)	継続時間(時間)
HTRB	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	T = 150°C, $V_{DS} = 80V$	0	77 x 2	3000
HTRB	EPC2016C	100	M (2.11 x 1.63)	T = 150°C, $V_{DS} = 80V$	0	77 x 3	2000
HTRB	EPC2032	100	XL (4.65 x 2.65)	T = 150°C, $V_{DS} = 80V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2036	100	S (0.95 x 0.95)	T = 150°C, $V_{DS} = 80V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2029	80	XL (4.65 x 2.65)	T = 150°C, $V_{DS} = 64V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2021	80	XL (6.10 x 2.35)	T = 150°C, $V_{DS} = 64V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2024	40	XL (6.10 x 2.35)	T = 150°C, $V_{DS} = 32V$	0	60 x 1	1000
HTRB	EPC2023	30	XL (6.10 x 2.35)	T = 150°C, $V_{DS} = 24V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	T = 150°C, $V_{DS} = 40V$	0	77 x 3	1000
HTRB	EPC2014C	40	M (1.70 x 1.09)	T = 150°C, $V_{DS} = 32V$	0	77 x 1	2000
HTRB	EPC8004	40	S (2.05 x 0.85)	T = 150°C, $V_{DS} = 32V$	0	77 x 1	2000
HTRB	EPC2035	60	S (0.95 x 0.95)	T = 150°C, $V_{DS} = 48V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2010C	200	L (3.55 x 1.63)	T = 150°C, $V_{DS} = 160V$	0	77 x 2	3000
HTRB	EPC2012C	200	M (1.71 x 0.92)	T = 150°C, $V_{DS} = 160V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2025	300	M (1.95 x 1.95)	T = 150°C, $V_{DS} = 240V$	0	77 x 3	1000

表2 高温逆バイアス試験

注: EPC800xの結果は、EPC8000シリーズのすべての製品に適用されます。

HTRBストレス・テストに使ったサンプルに基づく故障の確率は、故障発生件数 (FIT) と平均故障時間 (MTTF) の両方を計算することによって推定しました。
計算の仮定：信頼度レベル = 60%、加速係数 (AF) = 1

ストレス・テスト	サンプル数	故障数	等価デバイス (時間)	FIT率	MTTF (年)
HTRB	1754	0	2755000	333	343

表3 HTRBのFITとMTTFの計算

高温ゲート・バイアス試験

部品には、JEDEC 規格のJESD22-A108 [3] に従って、1000時間のストレス期間に、最大定格温度でゲート・ソース間にバイアス電圧5.75 Vまたは5.5 Vを印加しました。ストレス・テストの部品の種類は、40 V~300 Vの全耐圧範囲にわたっています。

ストレス・テスト	型番	耐圧 (V)	チップ・サイズ (mm×mm)	テスト条件	故障品の数	全サンプル数 (サンプル数×ロット数)	継続時間 (時間)
HTGB	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	T = 150°C, V _{DS} = 5.75 V	0	77 x 2	3000
HTGB	EPC2016C	100	M (2.11 x 1.63)	T = 150°C, V _{DS} = 5.75 V	0	77 x 3	2000
HTGB	EPC2021	80	XL (6.10 x 2.35)	T = 150°C, V _{DS} = 5.5 V	0	77 x 1	1000
HTGB	EPC2029	80	XL (4.65 x 2.65)	T = 150°C, V _{DS} = 5.5 V	0	77 x 1	1000
HTGB	EPC2023	30	XL (6.10 x 2.35)	T = 150°C, V _{DS} = 5.5 V	0	77 x 1	1000
HTGB	EPC2036	100	S (0.95 x 0.95)	T = 150°C, V _{DS} = 5.5 V	0	77 x 1	1000
HTGB	EPC2035	60	S (0.95 x 0.95)	T = 150°C, V _{DS} = 5.5 V	0	77 x 1	1000
HTGB	EPC2038	100	S (0.95 x 0.95)	T = 150°C, V _{DS} = 5.5 V	0	77 x 1	1000
HTGB	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	T = 150°C, V _{DS} = 5.5 V	0	77 x 3	1000
HTGB	EPC2014C	40	M (1.70 x 1.09)	T = 150°C, V _{DS} = 5.5 V	0	77 x 1	2000
HTGB	EPC8004	40	S (2.05 x 0.85)	T = 150°C, V _{DS} = 5.5 V	0	77 x 1	2000
HTGB	EPC2010C	200	L (3.55 x 1.63)	T = 150°C, V _{DS} = 5.75 V	0	77 x 2	3000
HTGB	EPC2012C	200	M (1.71 x 0.92)	T = 150°C, V _{DS} = 5.75 V	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2025	300	M (1.95 x 1.95)	T = 150°C, V _{DS} = 240 V	0	77 x 3	1000

表4 高温ゲート・バイアス試験

注：EPC800xの結果は、EPC8000シリーズのすべての製品に適用されます。

HTGBストレス・テストに使ったサンプルに基づく故障の確率は、故障発生件数 (FIT) と平均故障時間 (MTTF) の両方を計算することによって推定しました。
計算の仮定：信頼度レベル = 60%、加速係数(AF)=1

ストレス・テスト	サンプル数	故障数	等価デバイス (時間)	FIT率	MTTF (年)
HTGB	1694	0	2695000	340	336

表5 HTGBのFITとMTTFの計算

高温保存試験

部品は、JEDEC規格のJESD22-A103 [4] に従って、最大定格温度に加熱しました。

ストレス・テスト	型番	耐圧 (V)	チップ・サイズ (mm×mm)	テスト条件	故障品の数	全サンプル数 (サンプル数×ロット数)	継続時間 (時間)
HTS	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	T=150°C, 空气中	0	77 x 1	1000
HTS	EPC2016C	100	M (2.11 x 1.63)	T=150°C, 空气中	0	77 x 2	1000
HTS	EPC2021	80	XL (6.10 x 2.35)	T=150°C, 空气中	0	25 x 1	1000
HTS	EPC2029	80	XL (4.65 x 2.65)	T=150°C, 空气中	0	25 x 3	1000
HTS	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	T=150°C, 空气中	0	77 x 3	1000

表6 高温保存試験

注: EPC800xの結果は、EPC8000シリーズのすべての製品に適用されます。

高温高湿逆バイアス

部品には、JEDEC規格のJESD22A-101 [6] に従って、1000時間のストレス期間に、85%RH、85°Cにおいてドレイン-ソース間にバイアスを加えました。

ストレス・テスト	型番	耐圧 (V)	チップ・サイズ (mm×mm)	テスト条件	故障品の数	全サンプル数 (サンプル数×ロット数)	継続時間 (時間)
H3TRB	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	T = 85°C, RH = 85%, V _{DS} = 80 V	0	25 x 1	1000
H3TRB	EPC2016C	100	M (2.11 x 1.63)	T = 85°C, RH = 85%, V _{DS} = 80 V	0	25 x 2	1000
H3TRB	EPC2015	40	L (4.11 x 1.63)	T = 85°C, RH = 85%, V _{DS} = 40 V	0	50 x 1	1000
H3TRB	EPC2010C	200	L (3.55 x 1.63)	T = 85°C, RH = 85%, V _{DS} = 100 V	0	50 x 1	1000
H3TRB	EPC2012	200	M (1.71 x 0.92)	T = 85°C, RH = 85%, V _{DS} = 100 V	0	50 x 1	1000
H3TRB	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	T = 85°C, RH = 85%, V _{DS} = 40 V	0	25 x 3	1000
H3TRB	EPC2033	150	XL (4.65 x 2.65)	T = 85°C, RH = 85%, V _{DS} = 100 V	0	25 x 2	1000
H3TRB	EPC2029	80	XL (4.65 x 2.65)	T = 85°C, RH = 85%, V _{DS} = 64 V	0	25 x 1	1000
H3TRB	EPC2022	100	XL (6.10 x 2.35)	T = 85°C, RH = 85%, V _{DS} = 80 V	0	50 x 1, 25 x 1	1000

表7 高温高湿逆バイアス試験

注: EPC800xの結果は、EPC8000シリーズのすべての製品に適用されます。

H3TRBストレス・テストに使ったサンプルに基づく故障の確率は、故障発生件数 (FIT) と平均故障時間 (MTTF) の両方を計算することによって推定しました。計算の仮定: 信頼度レベル = 60%、加速係数 (AF) = 1

ストレス・テスト	サンプル数	故障数	等価デバイス (時間)	FIT率	MTTF (年)
H3TRB	450	0	450000	2036	56

表8 H3TRBのFITとMTTFの計算

圧力釜 (オートクレーブ、またはバイアスなしのプレッシャ・クッカー)

部品は、JEDEC規格JESD22-A102 [7] に従って、96時間のストレス期間に、蒸気圧29.7 PSIAの下で、121°Cにおいて100%RHに曝しました。ストレスの間、デバイスには、電気的なバイアスは加えていませんでした。

ストレス・テスト	型番	耐圧 (V)	チップ・サイズ (mm×mm)	テスト条件	故障品の数	全サンプル数 (サンプル数×ロット数)	継続時間 (時間)
AC	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	T = 121°C, RH = 100%	0	25 x 1	96
AC	EPC2016C	100	M (2.11 x 1.63)	T = 121°C, RH = 100%	0	25 x 2	96

表9 圧力釜 (オートクレーブ) 試験

耐湿性レベル

部品は、168時間のストレス期間に、85°Cで85%RHに曝しました。さらに、この部品には、IPC / JEDECの合同規格J-STD-020 [8] に従った鉛フリー・リフロアを3サイクル実施しました。

ストレス・テスト	型番	耐圧 (V)	チップ・サイズ (mm×mm)	テスト条件	故障品の数	全サンプル数 (サンプル数×ロット数)	継続時間 (時間)
MSL1	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	T=85°C, RH=85%, リフロア3回	0	25 x 1	168
MSL1	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	T=85°C, RH=85%, リフロア3回	0	25 x 1	168
MSL1	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	T=85°C, RH=85%, リフロア3回	0	25 x 1	168
MSL1	EPC2029	80	XL (4.65 x 2.65)	T=85°C, RH=85%, リフロア3回	0	25 x 2	168
MSL1	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	T=85°C, RH=85%, リフロア3回	0	77 x 3	168

表10 耐湿性レベル試験

注:EPC800xの結果は、EPC8000シリーズのすべての製品に適用されます。

静電気放電

部品は、JEDEC規格JESD22A-114 [9] の人体モデル(HBM)と、JESD22A-115 [10] のマシン・モデル(MM)、JESD22C-101 [11] のデバイス帯電モデル(CMD)に従って、HBM、MM、CMBによるESDを実施しました。チップ・サイズの範囲をカバーするために、テストにはEPC2001とEPC800xを選びました。

テスト	型番	耐圧 (V)	チップ・サイズ (mm×mm)	テスト条件	合格した電圧	故障した電圧	JEDECのクラス
HBM	EPC2001	100	L (4.11 x 1.63)	2ピン間、G-S	(±) 400 V	(+) 500 V	1A
HBM	EPC2001	100	L (4.11 x 1.63)	2ピン間、G-D	(±) 1500 V	(-) 2000 V	1C
HBM	EPC2001	100	L (4.11 x 1.63)	2ピン間、D-S	(±) 2000 V	(+) 3000 V	2
MM	EPC2001	100	L (4.11 x 1.63)	2ピン間、G-S	(±) 200 V	(-) 400 V	B
MM	EPC2001	100	L (4.11 x 1.63)	2ピン間、G-D	(±) 400 V	(+) 600 V	C
MM	EPC2001	100	L (4.11 x 1.63)	2ピン間、D-S	(±) 600 V	—	クラスC以上

表11 静電気放電試験 EPC2001

テスト	型番	耐圧 (V)	チップ・サイズ (mm×mm)	テスト条件	合格した電圧	故障した電圧	JEDECのクラス
HBM	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	2ピン間、G-S	(±) 3000 V	(-) 4000 V	2
HBM	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	2ピン間、G-D	(±) 2000 V	(-) 3000 V	2
HBM	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	2ピン間、D-S	(±) 2000 V	(+) 3000 V	2
CDM	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	2ピン間、全ピン	(±) 1000 V	—	C3

表12 静電気放電試験 EPC2001C

テスト	型番	耐圧 (V)	チップ・サイズ (mm×mm)	テスト条件	合格した電圧	故障した電圧	JEDECのクラス
HBM	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	2ピン間、G-S	(±) 350 V	(-) 500 V	1A
HBM	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	2ピン間、G-D	(±) 350 V	(+) 500 V	1A
HBM	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	2ピン間、D-S	(±) 500 V	(+) 1000 V	1B
CDM	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	2ピン間、全ピン	(±) 500 V	(-) 500 V	1C
MM	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	2ピン間、G-S	(±) 25V	(+) 50 V	A
MM	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	2ピン間、G-D	(±) 100 V	(-) 200 V	A
MM	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	2ピン間、D-S	(±) 50 V	(+) 100 V	A

表13 静電気放電試験 EPC800x

注:EPC800xの結果は、EPC8000シリーズのすべての製品に適用されます。

パートII: 熱機械的信頼性

熱機械試験

GaNパワー・トランジスタの急速な成熟は、高周波電力変換における新しい能力を可能にし続けています。ウエハー・レベルのチップスケール・パッケージ (WL CSP) に収めたeGaNデバイスは、パッケージに関連する寄生インダクタンスや熱抵抗を排除しているため、設計者は、この高速性能を発揮させることができます。EPCは、熱機械的応力の下で、このパッケージの信頼性評価を拡張し続けています。eGaNデバイスのすべての世代に対する温度サイクル (TC) 試験に加えて、EPCは最近、大規模な断続動作寿命 (IOL) 試験の性能を追加しています。TCとIOLの両方の評価結果を以下に示します。

熱機械的応力の期間の信頼性に影響を与える主な要因は、チップと、それが実装されたプリント回路基板との熱膨張率(CTE)の全体的な

ミスマッチです。チップ(3 ppm/°C)とプリント回路基板(約10~14 ppm/°C)の間のCTEに比較的大きな差があるので、せん断ひずみは、この2つを接続するはんだ接合部で生じます。何回もの温度サイクルの後、応力の繰り返しは、疲労の原因となり、最終的には、はんだ接合部の不具合になります (例えば、図1参照)。

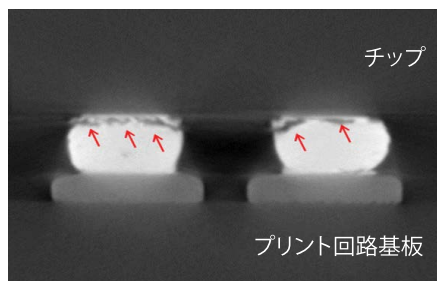


図1: 応力を加えられたデバイスのはんだ接合部における深刻なクラックが不具合になります。

はんだ接合部における熱機械的せん断ひずみは、次の簡単な式を用いて推定することができます。

$$\epsilon = \Delta\alpha * \Delta T \frac{DNP}{t}$$

ここで、 ϵ は、はんだ接合部におけるせん断ひずみ、 $\Delta\alpha$ は、チップとプリント回路基板との間のCTEの差、 ΔT は、サイクル中の温度変化、DNPは、チップ上の中点から、はんだ接合部までの距離、 t は、はんだ接合部の高さです。この結果、チップの中央から最も離れた接合部において最もひずみが大きくなるので、最初に不具合が生じます。バンプの高さを高くすることによって、TC / IOLの信頼性を向上させることができます。アプリケーションに最適なバンプのソリューションを見つけるために、EPCと連携することを勧めます。

温度サイクル

表14に、小型から特大までのサイズの範囲における複数の製品に対するTCの評価をまとめました。部品には、JEDEC規格JESD22-A104 [5] に従って、(-40°Cと+125°C)、または (0°Cと+100°C) のいずれかの間の温度サイクルを、それぞれ合計1000サイクル、または1500サイクル実施しました。

ストレス・テスト	型番	耐圧 (V)	チップ・サイズ (mm×mm)	テスト条件	故障品の数	全サンプル数(サンプル数×ロット数)	継続時間 (サイクル)
TC	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	-40°Cから+125°C、空气中	0	35 x 3	1000
TC	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	-40°Cから+125°C、空气中	0	77 x 3	1000
TC	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	-40°Cから+125°C、空气中	0	35 x 1	1000
TC	EPC2021	80	XL (6.10 x 2.35)	0°Cから+100°C、空气中	0	77 x 1	1500
TC	EPC2023	30	XL (6.10 x 2.35)	0°Cから+100°C、空气中	0	77 x 1	1500
TC	EPC2029	80	XL (4.65 x 2.65)	-40°Cから+125°C、空气中	0	35 x 2	1000
TC	EPC2010C	200	M (3.55 x 1.63)	-40°Cから+125°C、空气中	0	35 x 1	1000

表14 温度サイクル試験

注: EPC800xの結果は、EPC8000シリーズのすべての製品に適用されます。

表14に示されたTC試験では、製品が異なり、 ΔT も異なりますが、最初の1000サイクル ($\Delta T \geq 100^\circ\text{C}$ のとき) での故障率の最悪ケースの上限を計算するための統計をまとめ合わせるすることができます。この結果が表15になります。

ストレス・テスト	サンプル数	故障品の数	等価温度サイクル ($\Delta T \geq 100^\circ\text{C}$ のとき)	故障率の上限 (最初の1000サイクル)
TC	630	0	707,000	1500 ppm

表15 温度サイクルのFITとMTTFの計算

断続動作寿命

TCと同様に、IOLは、デバイスを周期的に極端な温度にします。周囲から加熱するのではなく、内部の接合部で電力を消費することによって自己加熱します。この電力レベルは、オンのフェーズの間、所定の温度 (T_{jON}) になるように調整され、その後、オフのフェーズの間、冷やして初期温度 (T_{jOFF}) に戻すことができるように減少 (またはゼロに設定) させます。このサイクルは、標準的な4分の周期で、数1000回も繰り返されます。

IOL実験の間、これらの部品は、ゲートのしきい電圧付近の1V~2Vの範囲、かつドレイン電圧4V~6Vにおいて線形モードで動作してい

ます。オペアンプのフィードバックでゲートを制御し、各部品に指定された電流 (ワット数) を流したままにします (図2参照)。この電力の設定値は、コンピュータ制御され、4分間隔で完全な加熱と冷却の波形を供給するように時間によって変化し、 $\Delta T_j=100^\circ\text{C}$ の周期的な温度変化にします。すべての部品は、まったく同じ周期的な波形を加えられます。温度は、赤外線カメラと高温計の両方を使って、チップのパッケージの裏面で定期的にモニターされます。どちらの場合も、温度センサーは、被試験デバイスの近くに、物理的に接触せずに配置します。図3に、オン状態の間のデバイスの標準

的な熱画像を示します。ランプダウンの期間だけ、各サイクルの開始時に、部品を冷やして周囲温度に戻すためにファンを使います。電力がモニターされ、すべての部品について連続して記録されます。温度は、テスト期間を通して、デバイスのサブセットに対して (ひとそりの高温計で) 連続的に記録されます。

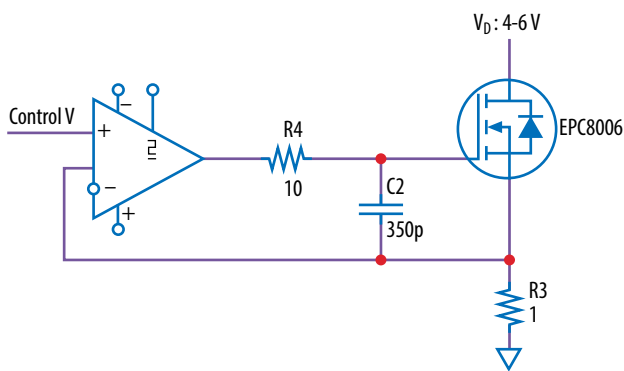


図2: IOLのテスト回路。デバイスへの電力は、オペアンプのフィードバックを使って安定化されます。

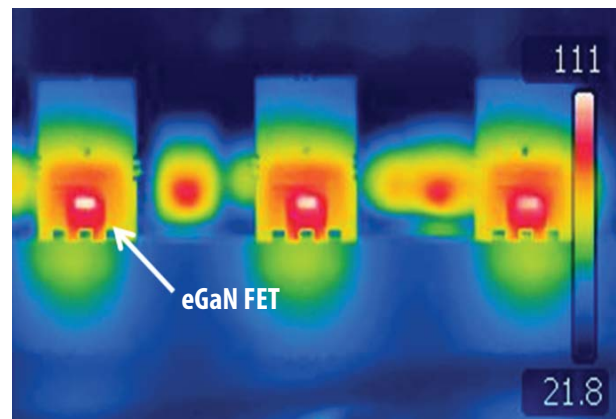


図3: IOL試験中の部品の赤外線熱画像。FET (白い領域) は、試験中、小さな長方形のプリント回路基板に取り付けられています。

現在までに、EPCは、eGaN製品 (表16参照) のチップ・サイズ的全範囲にわたって3種の別々の製品にIOL試験を実施しました。すべての場合において、部品は、ケスター社のNXG1タイプ3はんだSAC305を使って、プリント回路基板のアダプタ・カード (銅の2層で厚さ1.6 mm) に実装しました。その後、被試験部品は、 260°C での3サイクルのリフローを含めて、JEDEC規格JESD22-A113に従って、前処理されました。被試験部品は、電気的にプリスクリーニング (条件に合うものを選別) しただけでなく、すべてのパラメータがデータシー

トの仕様の範囲内であることを確かめるために、IOL試験を通して複数の間隔でポストスクリーニングしました。小さなチップのEPCのファミリーの代表として、EPC800xの3つのロットをテストし、すべての被試験部品は、6000サイクルのMIL-PRF-19500 [14] の要件に合格しました。大きいチップ (EPC2001C) の1ロットも、同じ条件でテストされ、6000サイクルに合格しました。特に大きなEPC2032の1ロットもテスト中です。このチップは、はんだバンプのエッジに対して最大のDNP値であり、eGaN FETの熱機械的な信頼性に対して最

悪のケースの代表です。これまでのところ、このロットは、継続中のテストにおいて3000サイクルに合格しています。

EPCは、さまざまな動作条件の下で、はんだ接合部の疲労故障の予測モデルを生成するために、複数の製品のTCとIOLのデータを蓄積し続けています。これらのモデルは、目的とするアプリケーションにおける不具合 (Nf) のサイクルを予測する助けになり、フェーズ8のレポートにします。

ストレス・テスト	型番	耐圧 (V)	チップ・サイズ (mm×mm)	テスト条件	故障品の数	全サンプル数 (サンプル数×ロット数)	継続時間 (サイクル)
IOL	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	$T_{j_off} = +25^\circ\text{C}$, $T_{j_on} = +125^\circ\text{C}$, $\Delta T_j = 100^\circ\text{C}$	0	77 x 3	6000
IOL	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	$T_{j_off} = +25^\circ\text{C}$, $T_{j_on} = +125^\circ\text{C}$, $\Delta T_j = 100^\circ\text{C}$	0	77 x 1	6000
IOL	EPC2032	100	XL (4.65 x 2.65)	$T_{j_off} = +40^\circ\text{C}$, $T_{j_on} = +140^\circ\text{C}$, $\Delta T_j = 100^\circ\text{C}$	0	77 x 1	3000

表16 断続動作寿命 (IOL) 試験の結果

パートIII：初期故障の評価

初期寿命故障率

初期寿命故障率 (ELFR) またはバーンイン試験は、半導体デバイスの信頼性試験における重要な要素です。図4に示されているよく知られた「バスタブ」曲線を参照すると、ELFR試験は、デバイスの動作寿命の開始時の初期故障期間において生じる故障モードを探し出せます。これらの故障モードは、通常は不十分な製造管理やデバイスのスクリーニングから生じる欠陥に起因しています。

ELFR試験には、統計的に有意なサンプル数と、短期間 (通常、48時間と168時間の間) のストレスが必要です。この出力は、指定された

初期期間中に、ランダムに選らんだ部品が、いつ故障するかを確率を表し、一般的に100万分率(ppm)で示される初期寿命故障率です。

非常に低いELFRを実現するためには、非常に大きなサンプル母集団をテストしなければなりません。例えば、100万個の部品で1個だけ (1 ppm) に影響を与える致命的な欠陥が含まれている仮定の製品を考えてみましょう。仮に、サンプル母集団が10万個の部品だったとしても、この故障モードは一度も観測されそうにありません。加速因子試験も助けにならないでしょう。この仮想の場合において、統計学的に厳密な唯一の解は、数100万個の部品をテストすることです。これが、なぜELFRが大規模な母集団を必要とするか、の基本的な理由で

す。コストと労力はかかりますが、ELFR試験は、EPCと顧客の両方に、明確で貴重な信頼性データを提供します。

EPCは、EPC2016C (中型サイズの100 VのFET) の大きなサンプル数 (5966個) を使って、HTRBストレスの下でELFRテストを完了しました。ストレス条件は、48時間の間、最大定格温度 (150°C) で V_{DS} に80 Vを印加しました。JESD47I [18] のガイドラインに従って、サンプルは、どのロットもテストに使った母集団の40%を超えない範囲で、連続していない4つの製造ロットから採取しました。表17は、テスト結果をまとめたものです。

ストレス・テスト	型番	耐圧 (V)	チップ・サイズ (mm×mm)	テスト条件	故障品の数	全サンプル数 (サンプル数×ロット数)	継続時間 (時間)	ELFR (信頼度60%の上限)
HTRB_ELFR	EPC2016C	80	M (2.11 x 1.63)	T = 150°C, V _{DS} = 80 V	0	1610 x 1 1621 x 1 1614 x 1 1121 x 1	48	150 ppm

表17 HTRBの下でのELFR

故障が何も発生していないので、(最初の48時間で) 故障率に対する信頼度の上限値60%は150 ppmです。この値は、以下のJEDEC規格の74A式による χ^2 統計に基づいて計算しました[12]。(ガウス統計を使うと、わずかに低い値120 ppmが得られることに注意してください[13])。

$$ELFR = \chi^2(\alpha, 2r+2)/(2*N)$$

ここで:

α : 信頼度 (60%)

r: 故障の総数

$\chi^2(\alpha, 2r+2)$: カイ2乗分布係数 (= 1.83、信頼度60%で故障0のとき)

N: テストしたデバイスの総数

上記で計算された初期寿命故障率は、基本的な統計原則に基づいており、その検出力は、大きなサンプル数に基づいています。これは、初期故障の根本的な確率過程についてのいかなる仮定も必要とせず、仮定した加速係数を用いた任意の外挿も必要としません。この結果、比較的小さなサンプル数に依存する他の試験方法を使って一致させることが難しい確かな統計的根拠となります。

150 ppmのELFRは、最初の48時間にわたるEPC2016Cの真の故障率を表すものではないことに注意することが重要です。これは単に、信頼度60%の最小の上限であり、テストしたサンプルの数によってのみ制限されます。そうであっても、150 ppmのレベルは、将来のテストのために新しい水準を設定し、eGaNデバイスの信頼性試験の主要なマイルストーンとなります。この故障率を達成するためには、厳密な

プロセス制御、および、製造された各デバイスの厳しいスクリーニングと物理的な検査が必要です。

EPCは現在、フェーズ8のレポートを完成するために、ゲート・バイアス・ストレス (HTGB) の下での初期故障データを収集しています。

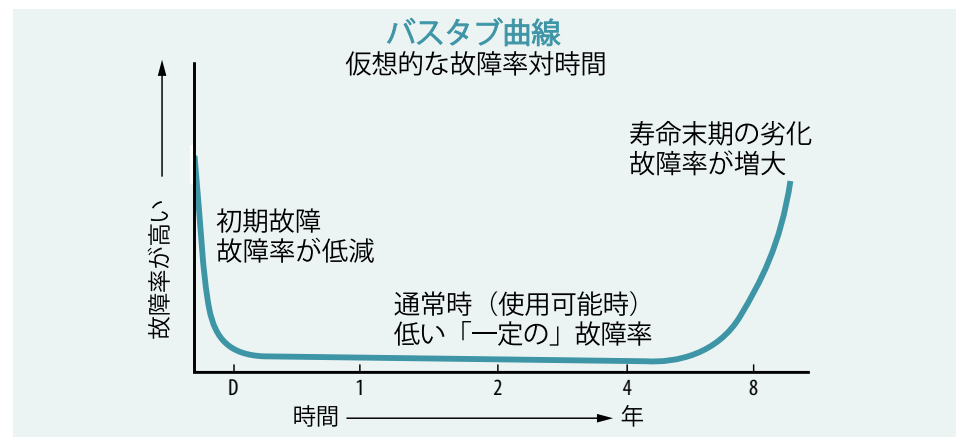


図4 仮想のバスタブ曲線は、製品の動作寿命を通じて確率的故障率を示します[15]から。

パートIV: フィールド信頼性

eGaN FETが顧客のアプリケーションで動作している間、その信頼性がどうなるかが最も重要です。EPCは、顧客のアプリケーションでの信頼性を測定するためにフィールドでの信頼性データをモニターしています。過去6年間にわたって、フィールドからの戻り、および、フィールドにおいて搭載された部品の総数を追跡しています。図5は、EPCの異なる製品ファミリーにおいて蓄積されたフィールドにおけるデバイス時間の分布を示しています。このレポート(2016年1月)の時点では、フィールドで追跡されたデバイス時間は合計170億以上です。

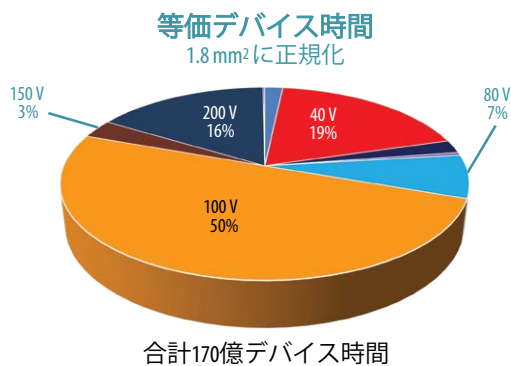


図5 EPCの異なる製品ファミリーの間で蓄積されたフィールドにおけるデバイス時間の分布を示す円グラフ。

結論

このフェーズ7のレポートでは、新たに製品化された特大のデバイスと300Vの製品の品質データを示しました。デバイスの全サイズにわたって初めて実施したIOL試験を含めて、熱信頼性の評価も報告しました。初期故障試験に対して、現在までのeGaN FETの最大のサンプル数を使って、150ppmの上限ELFRを得ることができました。さらに、eGaN製品に対して、効果的なプロセス制御を実証し、適切な方法でスクリーニングしました。そして最後に、フィールドに存在する製品に対して、複合FIT率は0.24だったと報告しました。この値は、現在までの現場でのすべての評価と一貫性があり、eGaN FETは確かな信頼性を備えていることを示しています。

参考文献:

- [1] <https://www.jedec.org>
- [2] Kester NXG1 Lead-Free No-Clean Solder Paste Data Sheet Rev: 13Oct10
- [3] JEDEC STANDARD Temperature, Bias, and Operating Life (<https://www.jedec.org>)
- [4] JEDEC STANDARD High Temperature Storage Life (<https://www.jedec.org>)
- [5] JEDEC STANDARD Temperature Cycling (<https://www.jedec.org>)
- [6] JEDEC STANDARD Steady State Temperature Humidity Bias Life Test (<https://www.jedec.org>)
- [7] JEDEC STANDARD Accelerated Moisture Resistance (<https://www.jedec.org>)
- [8] IPC/JEDEC Joint Standard Moisture/Reflow (<https://www.jedec.org>)
- [9] JEDEC STANDARD Electrostatic Discharge (ESD) Sensitivity Testing Human Body Model (HBM) (<https://www.jedec.org>)
- [10] JEDEC STANDARD Electrostatic Discharge (ESD) Sensitivity Testing Machine Model (MM) (<https://www.jedec.org>)

その時間における合計127のフィールドからの戻りのうち、わずか3件がeGaN FETの動作限界内の故障に関連していました。残りの故障は、eGaN FETのアセンブリ、または適切でないプリント回路基板のレイアウト(例えば、回路内の浮遊インダクタンスによる電圧オーバーシュート)に関連すると分かりました。EPCは、eGaNデバイスのレイアウトとアセンブリの両方で顧客を支援するために、訓練を受けた技術スタッフをそろえています。

図6は、過去6年間に出荷したすべてのeGaN製品のフィールドにおける信頼性のFIT率(10⁹

時間内の故障)の動向を示しています。これらの計算は、すべての製品が搭載され、元の出荷日から稼働中であることを前提としています。この値は、フィールドでの累計デバイス時間と、確認されたフィールド故障に基づくFIT率の上限(信頼度60%のとき)を表しています[16]。

全体として、私たちのフィールドでの経験では約0.24 FITで、少なくともシリコンMOSFETと同等です。過去6年間にわたって、FIT率が年々増加するという疲労を示唆する傾向も、このトレンド・チャートではみられません。

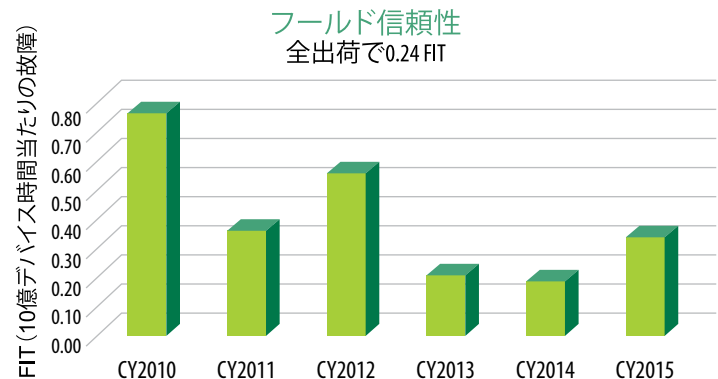


図6: 過去6年間に搭載されたすべてのeGaN製品のフィールド信頼性のトレンド・チャート。値は、信頼度60%のFIT率の上限を表します。

次のレポート(フェーズ8)では、モノリシック・ハーフブリッジや、より特大のデバイスを含めた新製品に関する品質の検査結果を示す予定です。拡張したELFR試験の結果を示します。すなわち、非常に大きなサンプル母集団の統計的な「上位集合」を形成するために、新しいストレス条件と蓄積データを拡大します。熱機械的信頼性に対しては、チップ・サイズ、バンプ構成、ストレス条件に基づく故障までの全体を推定できるようにする検証された予測モデルを提供していく予定です。

- [11] JEDEC STANDARD Electrostatic Discharge (ESD) Sensitivity Testing Charged Device Model (CDM) (<https://www.jedec.org>)
- [12] JEDEC Standard No. 74A Early Life Failure Rate Calculation Procedure for Semiconductor Components (<https://www.jedec.org>)
- [13] Edward Dudewicz and Satya Mishra, "Modern Mathematical Statistics", John Wiley and Sons, 1988.
- [14] MIL-PRF-19500P Standard, "General Specifications for Semiconductor Devices", (<http://www.everyspec.com>)
- [15] Dennis Wilkins, "The Bathtub Curve and Product Failure Behavior; Part One: The Bathtub Curve, Infant Mortality and Burn-in", Reliability HotWire eMagazine, Issue 21, November 2002.
- [16] Arrhenius/FIT Rate Calculator, Maxim Integrated, <https://www.maximintegrated.com/en/design/tools/calculators/general-engineering/qafits.cfm>
- [17] Alex Lidow, Johan Strydom, Michael de Rooij, David Reusch, "GaN Transistors for Efficient Power Conversion", Second Edition, John Wiley and Sons, 2015.
- [18] JEDEC STANDARD Stress-Test-Driven Qualification of Integrated Circuits (<https://www.jedec.org>)