

# 宜普電源轉換公司eGaN®FET 第七階段可靠性測試報告



美國加利福尼亞州洛杉磯El Segundo市 宜普電源轉換公司(EPC) Chris Jakubiec、Rob Strittmatter博士及周春華博士

與傳統的功率MOSFET相比，宜普電源轉換公司(EPC)的增強型氮化鎵場效應電晶體(eGaN® FET)繼續以它極具競爭力的優勢並貼近市場發展趨勢，驅動創新應用的發展，並且擴大GaN的市場。其中一些應用的例子包括無線電源傳送、DC/DC轉換、射頻發射基站、衛星系統、音訊放大器及光學遙感技術(Lidar)等應用都可以發揮氮化鎵場效應電晶體的卓越優勢，而其他的應用還有很多。

除了市場及應用的開發外，同樣重要的是我們要確保氮化鎵場效應電晶體(eGaN FET)在目標應用中非常可靠地工作。EPC公司不間斷地累積並增加大量的產品可靠性統計資料，從而擴大對氮化鎵產品的知識面及資料庫，以及證明eGaN技術是可行、可信賴的技術並且可以替代傳統的矽技術。第七階段可靠性報告除了提供之前各份報告的複審結果外，也提供了全新的可靠性測試結果包括關於元件的間歇工作壽命(IOL)、早期壽命失效率(ELFR)、靜電放電(充電元件模型)測試結果，以及對多個使用最大晶片尺寸的產品系列及300 V產品進行可靠性測試的額外認證資料。

本文共有四個部份。第一部份提供氮化鎵場效應電晶體的認證資料，包括把產品的電壓範圍擴展至300 V的全新資料。第二部份涉及採用晶圓級晶片尺寸封裝的eGaN產品的熱機械可靠性資料，包括最近期的溫度循環/迴圈(TC)測試和間歇工作壽命(IOL)測試數據。第三部份涵蓋了採用大量樣品所進行的元件早期失效測試，以及提供了早期壽命失效率的上限。最後的部份提供產品可靠性的現場數據。

## 第一部份：40 V至300 V產品的認證測試

### 認證測試的概覽

EPC2025場效應電晶體是一種將氮化鎵技術的電壓能力擴展至300 V的領先產品。可靠性測試的結果表明，在測試電壓高達300 V的額定電壓範圍內，各種元件的參數都保持穩定。我們也把元件的靜電放電測試擴展至可覆蓋三種標準的模型：人體模型(HBM)、機械模型(MM)及充電元件模型(CDM)。此外，在發表本報告時，我們對EPC公司的產品系列內使用最大晶片尺寸的產品完成了額外的可靠性測試。

我們把EPC氮化鎵場效應電晶體(eGaN FET)置於與矽基功率MOSFET的典型測試相同的條件下，進行多種不同的應力測試。這些測試包括：

- 高溫反向偏置(HTRB)測試：在最高額定溫度下，元件需要在汲極-源極電壓條件下，經受應力測試
- 高溫閘極偏置(HTGB)測試：在最高額定溫度，元件需要在閘極-源極電壓條件下，經受應力測試
- 高溫存儲(HTS)測試：在最高額定溫度下對元件加熱
- 溫度循環測試(TC)：把元件置於交替性高/低溫度的大溫差情況下進行測試
- 高溫高濕反向偏置(H3TRB)測試：在高溫下把元件置於潮濕情況下並施加汲極-源極電壓

- 無偏置高壓測試(AC或高壓爐)：在condensing條件下把元件置於壓力、潮濕及高溫的情況下進行測試
- 濕度靈敏度(MSL)測試：把元件置於潮濕、高溫、3次回流焊的循環測試條件下
- 靜電放電(ESD)：在人體模型(HBM)、機械模型(MM)及充電元件(CDM)模型，把元件置於靜電放電測試
- 間歇工作壽命(IOL)：使元件經受直流電脈衝的開關循環衝擊，從而將元件的結溫加熱至預定的溫度，然後再降到斷電狀態時的結點溫度。

元件的穩定性是在施加應力偏置之後用直流電氣測試來進行驗證的。在時間點為零時(time-zero)和中間讀取點測量室溫下的電氣參數。將諸如閘極-源極的漏電流、汲極-源極的漏電流、閘極-源極的臨界電壓和導通電阻等電氣參數，把它們與數據手冊上的規格進行比較。當某個元件超過數據手冊上所規定的規格時，就記錄為該元件失效。在eGaN FET上施加的應力盡可能符合JEDEC的標準[1]。

我們把元件焊接在FR5(高Tg的FR4)或聚醯亞胺介面卡上。介面卡的厚度對於1.6 mm，使用兩層銅層。頂面銅層的厚度對於1盎司或2盎司，底層銅層的厚度為1盎司。焊接元件在介面卡上時，使用Kester NXG1 type 3 SAC305焊錫[2]免清洗焊劑。

統計結果的總結

表1總結了可靠性測試結果，以及提供失效元件的複合統計的估計數值。在累計700萬元件-小時的測試後，結果為沒有元件發生失效情況。由於是零失效，統計資料代表了置信度對於60%、出現最多失效元件的上限數值。

這個上限數值基於樣品的規模，它將隨著EPC公司繼續收集可靠性測試的數據而將繼續下調。對於某些應力測試，在合適的情況下，我們都計算了失效時間(FIT)比率和平均失效時間(MTTF)。這些計算方法都假設加速因數

(AF)是1。因此，在不太嚴峻的環境下工作，我們預測元件的失效比率將會更低。在其他的應力測試中，我們也提供了失效率(單位為ppm)及相關的應力時間。

Stress Test	Sample Quantity	Fail Quantity	Equivalent Device (hrs)	Upper Bound Failure Statistic (60% Confidence)	Notes
HTRB	1754	0	2755000	333 FIT (MTTF = 343 yrs)	$V_{DS} = 80\% V_{DS(max)}$
HTGB	1694	0	2695000	340 FIT (MTTF = 336 yrs)	$V_{GS} \geq 5.5 V$
TC	630	0	707000	1500 ppm	First 1000 cycles, $\Delta T \geq 100^{\circ}C$
H3TRB	450	0	450000	2036 FIT (MTTF = 56 yrs)	—
ELFR HTRB	5966	0	286368	150 ppm	First 48 hrs
IOL	385	0	138600	NA	NA
<b>All Tests</b>	<b>10879</b>	<b>0</b>	<b>7031968</b>	—	—

表1:失效率的複合統計資料的上限數值

高溫反向偏置測試

基於標準認證的要求，對於符合JEDEC的JESD22-A108[3]標準的要求，所有樣品需要在80%的汲極-源極額定電壓、在最高的額定溫度條件下，經受1000小時的應力測試。進行應力測試的元件的類型均在40 V至300 V的電壓範圍內。

Stress Test	Part Number	Voltage (V)	Die Size (mm x mm)	Test Condition	# of Failure	Sample Size (sample x lot)	Duration (Hrs)
HTRB	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	T = 150°C, $V_{DS} = 80 V$	0	77 x 2	3000
HTRB	EPC2016C	100	M (2.11 x 1.63)	T = 150°C, $V_{DS} = 80 V$	0	77 x 3	2000
HTRB	EPC2032	100	XL (4.65 x 2.65)	T = 150°C, $V_{DS} = 80 V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2036	100	S (0.95 x 0.95)	T = 150°C, $V_{DS} = 80 V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2029	80	XL (4.65 x 2.65)	T = 150°C, $V_{DS} = 64 V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2021	80	XL (6.10 x 2.35)	T = 150°C, $V_{DS} = 64 V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2024	40	XL (6.10 x 2.35)	T = 150°C, $V_{DS} = 32 V$	0	60 x 1	1000
HTRB	EPC2023	30	XL (6.10 x 2.35)	T = 150°C, $V_{DS} = 24 V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	T = 150°C, $V_{DS} = 40 V$	0	77 x 3	1000
HTRB	EPC2014C	40	M (1.70 x 1.09)	T = 150°C, $V_{DS} = 32 V$	0	77 x 1	2000
HTRB	EPC8004	40	S (2.05 x 0.85)	T = 150°C, $V_{DS} = 32 V$	0	77 x 1	2000
HTRB	EPC2035	60	S (0.95 x 0.95)	T = 150°C, $V_{DS} = 48 V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2010C	200	L (3.55 x 1.63)	T = 150°C, $V_{DS} = 160 V$	0	77 x 2	3000
HTRB	EPC2012C	200	M (1.71 x 0.92)	T = 150°C, $V_{DS} = 160 V$	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2:高溫反向偏置測試(HTRB)

註:對EPC800x產品進行的測試結果適用於EPC8000系列的所有產品

基於進行了HTRB應力測試的樣本的失效概率是通過計算失效時間比率(FIT)和平均失效時間(MTTF)估計出來的。計算時我們假設60%置信度，加速因數(AF)是1。

Stress Test	Sample Quantity	Fail Quantity	Equivalent Device (Hrs)	FIT Rate	MTTF (Yrs)
HTRB	1754	0	2755000	333	343

表3: 在高溫反向偏置(HTRB)應力測試中計算出的失效時間(FIT)比率及平均失效時間(MTTF)

### 高溫閘極偏置測試

根據JEDEC JESD22-A108[3]的標準，元件需要在5.75 V或5.5 V閘極-源極偏置電壓、在最高額定溫度條件下，經受1000小時的應力測試。進行應力測試的元件的類型在40 V至300 V的電壓範圍內。

Stress Test	Part Number	Voltage (V)	Die Size (mm x mm)	Test Condition	# of Failure	Sample Size (sample x lot)	Duration (Hrs)
HTGB	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	T = 150°C, V <sub>DS</sub> = 5.75 V	0	77 x 2	3000
HTGB	EPC2016C	100	M (2.11 x 1.63)	T = 150°C, V <sub>DS</sub> = 5.75 V	0	77 x 3	2000
HTGB	EPC2021	80	XL (6.10 x 2.35)	T = 150°C, V <sub>DS</sub> = 5.5 V	0	77 x 1	1000
HTGB	EPC2029	80	XL (4.65 x 2.65)	T = 150°C, V <sub>DS</sub> = 5.5 V	0	77 x 1	1000
HTGB	EPC2023	30	XL (6.10 x 2.35)	T = 150°C, V <sub>DS</sub> = 5.5 V	0	77 x 1	1000
HTGB	EPC2036	100	S (0.95 x 0.95)	T = 150°C, V <sub>DS</sub> = 5.5 V	0	77 x 1	1000
HTGB	EPC2035	60	S (0.95 x 0.95)	T = 150°C, V <sub>DS</sub> = 5.5 V	0	77 x 1	1000
HTGB	EPC2038	100	S (0.95 x 0.95)	T = 150°C, V <sub>DS</sub> = 5.5 V	0	77 x 1	1000
HTGB	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	T = 150°C, V <sub>DS</sub> = 5.5 V	0	77 x 3	1000
HTGB	EPC2014C	40	M (1.70 x 1.09)	T = 150°C, V <sub>DS</sub> = 5.5 V	0	77 x 1	2000
HTGB	EPC8004	40	S (2.05 x 0.85)	T = 150°C, V <sub>DS</sub> = 5.5 V	0	77 x 1	2000
HTGB	EPC2010C	200	L (3.55 x 1.63)	T = 150°C, V <sub>DS</sub> = 5.75 V	0	77 x 2	3000
HTGB	EPC2012C	200	M (1.71 x 0.92)	T = 150°C, V <sub>DS</sub> = 5.75 V	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2025	300	M (1.95 x 1.95)	T = 150°C, V <sub>DS</sub> = 240 V	0	77 x 3	1000

表4: 高溫閘極偏置測試 (HTGB)

註: 對EPC800x產品進行的測試結果適用於EPC8000系列的所有產品

基於進行了HTGB應力測試的樣本的失效概率是通過計算失效時間比率(FIT)和平均失效時間(MTTF)估計出來的。計算時我們假設60%置信度，加速因數(AF)是1。

Stress Test	Sample Quantity	Fail Quantity	Equivalent Device (Hrs)	FIT Rate	MTTF (Yrs)
HTGB	1694	0	2695000	340	336

表5: 在高溫閘極偏置(HTGB)應力測試中計算出的失效時間(FIT)比率及平均失效時間(MTTF)

**高溫存儲測試**

根據JEDEC JESD22-A103[4]的標準，元件在最高額定溫度加熱的條件下，經受1000小時的應力測試。

Stress Test	Part Number	Voltage (V)	Die Size (mm x mm)	Test Condition	# of Failure	Sample Size (sample x lot)	Duration (Hrs)
HTS	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	T = 150°C, Air	0	77 x 1	1000
HTS	EPC2016C	100	M (2.11 x 1.63)	T = 150°C, Air	0	77 x 2	1000
HTS	EPC2021	80	XL (6.10 x 2.35)	T = 150°C, Air	0	25 x 1	1000
HTS	EPC2029	80	XL (4.65 x 2.65)	T = 150°C, Air	0	25 x 3	1000
HTS	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	T = 150°C, Air	0	77 x 3	1000

表6: 高溫存儲測試

註: 對EPC800x產品進行的測試結果適用於EPC8000系列的所有產品

**高溫高濕反向偏置測試**

根據JEDEC JESD22-A101[6]的標準，元件需要在85%的相對濕度、85°C的溫度、汲極-源極偏置的測試條件下，經受1000小時的應力測試。

Stress Test	Part Number	Voltage (V)	Die Size (mm x mm)	Test Condition	# of Failure	Sample Size (sample x lot)	Duration (Hrs)
H3TRB	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	T = 85°C, RH = 85%, V <sub>DS</sub> = 80 V	0	25 x 1	1000
H3TRB	EPC2016C	100	M (2.11 x 1.63)	T = 85°C, RH = 85%, V <sub>DS</sub> = 80 V	0	25 x 2	1000
H3TRB	EPC2015	40	L (4.11 x 1.63)	T = 85°C, RH = 85%, V <sub>DS</sub> = 40 V	0	50 x 1	1000
H3TRB	EPC2010C	200	L (3.55 x 1.63)	T = 85°C, RH = 85%, V <sub>DS</sub> = 100 V	0	50 x 1	1000
H3TRB	EPC2012	200	M (1.71 x 0.92)	T = 85°C, RH = 85%, V <sub>DS</sub> = 100 V	0	50 x 1	1000
H3TRB	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	T = 85°C, RH = 85%, V <sub>DS</sub> = 40 V	0	25 x 3	1000
H3TRB	EPC2033	150	XL (4.65 x 2.65)	T = 85°C, RH = 85%, V <sub>DS</sub> = 100 V	0	25 x 2	1000
H3TRB	EPC2029	80	XL (4.65 x 2.65)	T = 85°C, RH = 85%, V <sub>DS</sub> = 64 V	0	25 x 1	1000
H3TRB	EPC2022	100	XL (6.10 x 2.35)	T = 85°C, RH = 85%, V <sub>DS</sub> = 80 V	0	50 x 1, 25 x 1	1000

表7: 高溫高濕反向偏置(H3TRB)測試

註: 對EPC800x產品進行的測試結果適用於EPC8000系列的所有產品

基於進行了H3TRB應力測試的樣本的失效概率是通過計算失效時間比率(FIT)和平均失效時間(MTTF)估計出來的。計算時我們假設60%置信度，加速因數(AF)是1。

Stress Test	Sample Quantity	Fail Quantity	Equivalent Device (hrs)	FIT Rate	MTTF (Yrs)
H3TRB	450	0	450000	2036	56

表8: 在高溫高濕反向偏置(H3TRB)應力測試中計算出的失效時間(FIT)比率及平均失效時間(MTTF)。

**無偏置高壓測試(無偏置壓力鍋)**

根據JEDEC JESD22A-102[7]的標準，元件需要在100%的相對濕度、121°C的溫度和29.7 PSIA的蒸汽壓力下，經受96小時的應力測試。元件在應力測試期間不施加電氣偏置。

Stress Test	Part Number	Voltage (V)	Die Size (mm x mm)	Test Condition	# of Failure	Sample Size (sample x lot)	Duration (Hrs)
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: 無偏置高壓測試

濕度靈敏度測試

元件在85%的相對濕度和85°C的溫度條件下，經受168小時的應力測試。根據IPC/JEDEC J-STD-020[8]的聯合標準，元件還要經受三次無鉛回流焊的測試。

Stress Test	Part Number	Voltage (V)	Die Size (mm x mm)	Test Condition	# of Failure	Sample Size (sample x lot)	Duration (Hrs)
MSL1	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	T=85°C, RH=85%, 3 reflow	0	25 x 1	168
MSL1	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	T=85°C, RH=85%, 3 reflow	0	25 x 1	168
MSL1	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	T=85°C, RH=85%, 3 reflow	0	25 x 1	168
MSL1	EPC2029	80	XL (4.65 x 2.65)	T=85°C, RH=85%, 3 reflow	0	25 x 2	168
MSL1	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	T=85°C, RH=85%, 3 reflow	0	77 x 3	168

表10: 濕度靈敏度測試

註: 對EPC800x產品進行的測試結果適用於EPC8000系列的所有產品

靜電放電測試

根據JESD22A-114[9] Human Body Model、JESD22A-115[10] Machine Model及JESD22C-101[11] Charged Device Model的規定，元件需要經受ESD、HBM、MM和CDM的測試。測試所選的元件是EPC2001及EPC800x以涵蓋晶片尺寸範圍內的所有產品。

Test	Part Number	Voltage (V)	Die Size (mm x mm)	Test Condition	Passed Voltage	Failed Voltage	JEDEC Class
HBM	EPC2001	100	L (4.11 x 1.63)	Pin to Pin G-S	(±) 400 V	(+) 500 V	1A
HBM	EPC2001	100	L (4.11 x 1.63)	Pin to Pin G-D	(±) 1500 V	(-) 2000 V	1C
HBM	EPC2001	100	L (4.11 x 1.63)	Pin to Pin D-S	(±) 2000 V	(+) 3000 V	2
MM	EPC2001	100	L (4.11 x 1.63)	Pin to Pin G-S	(±) 200 V	(-) 400 V	B
MM	EPC2001	100	L (4.11 x 1.63)	Pin to Pin G-D	(±) 400 V	(+) 600 V	C
MM	EPC2001	100	L (4.11 x 1.63)	Pin to Pin D-S	(±) 600 V	—	> Class C

表11: 對EPC2001元件進行的靜電放電測試結果

Test	Part Number	Voltage (V)	Die Size (mm x mm)	Test Condition	Passed Voltage	Failed Voltage	JEDEC Class
HBM	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	Pin to Pin G-S	(±) 3000 V	(-) 4000 V	2
HBM	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	Pin to Pin G-D	(±) 2000 V	(-) 3000 V	2
HBM	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	Pin to Pin D-S	(±) 2000 V	(+) 3000 V	2
CDM	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	Pin to Pin - All Pins	(±) 1000 V	—	C3

表12: 對EPC2001C元件進行的靜電放電測試結果

Test	Part Number	Voltage (V)	Die Size (mm x mm)	Test Condition	Passed Voltage	Failed Voltage	JEDEC Class
HBM	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	Pin to Pin G-S	(±) 350 V	(-) 500 V	1A
HBM	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	Pin to Pin G-D	(±) 350 V	(+) 500 V	1A
HBM	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	Pin to Pin D-S	(±) 500 V	(+) 1000 V	1B
CDM	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	Pin to Pin - All Pins	(±) 500 V	(-) 500 V	1C
MM	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	Pin to Pin G-S	(±) 25V	(+) 50 V	A
MM	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	Pin to Pin G-D	(±) 100 V	(-) 200 V	A
MM	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	Pin to Pin D-S	(±) 50 V	(+) 100 V	A

表13: 對EPC800x元件進行的靜電放電測試結果

註: 對EPC800x產品進行的測試結果適用於EPC8000系列的所有產品

**第二部份：熱機械可靠性測試**

**熱機械應力測試**

氮化鎵功率電晶體的快速成熟繼續在高頻電源轉換領域中催生了許多全新的功能。採用晶圓片規模封裝 (WLCSP) 的氮化鎵元件可以幫助設計師取得更高速度的性能，因為這些元件消除了與封裝有關的寄生電感和熱阻。EPC將繼續在熱機械應力測試下，評估這種封裝的可靠性。除了對各代的所有eGaN元件進行溫度循環(TC)測試外，EPC近期加入多次的間歇工作壽命(IOL)測試。TC及IOL評估的結果詳列如下。

在熱機械應力測試中，影響元件的可靠性的主要因素是晶片與PCB之間的熱膨脹係數(CTE)的不匹配。因為晶片 (3 ppm/°C)和PCB (~10-14 ppm/°C)的熱膨脹係數的差異相對地較大，因此連接二者的焊點會發生剪應變。在經過許多次的溫度循環後，重複應力作用將使材料出現疲勞性破壞，最終焊點會失效(舉例說

明見圖1)。

焊點中的熱機械性剪應變可以用以下簡單的公式得出估計數值：

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

其中ε是焊點中的剪應變，Δα是晶片和PCB熱膨脹係數(CTE)之差，ΔT是循環過程中的溫度

變化，DNP是焊點與晶片中心之間的距離，t是焊點的高度。距離晶片中心最遠的焊點承受著最大的應力，因此會最先發生失效的情況。通過增加焊凸塊的高度，可以提高元件的TC/IOL的可靠性。建議客戶與我們找出針對他們的應用的最優焊凸塊解決方案。

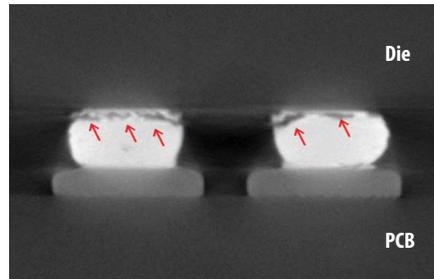


圖1：經過應力測試後，失效的焊點發生嚴重的開裂

**溫度循環測試**

從表14看到，進行溫度循環測試評估的多種產品的尺寸由小至加大。根據JEDEC標準 JESD22-A104[5]的規定，元件要在 -40°C 和 +125°C或0°C 和 +100°C之間，分別經受1000次或1500次的溫度循環(TC)測試。

Stress Test	Part Number	Voltage (V)	Die Size (mm x mm)	Test Condition	# of Failure	Sample Size (sample x lot)	Duration (Cys)
TC	EPC2001C	100	L (4.11 x 1.63)	-40 to +125°C, Air	0	35 x 3	1000
TC	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	-40 to +125°C, Air	0	77 x 3	1000
TC	EPC800x	40	S (2.05 x 0.85)	-40 to +125°C, Air	0	35 x 1	1000
TC	EPC2021	80	XL (6.10 x 2.35)	0 to +100°C, Air	0	77 x 1	1500
TC	EPC2023	30	XL (6.10 x 2.35)	0 to +100°C, Air	0	77 x 1	1500
TC	EPC2029	80	XL (4.65 x 2.65)	-40 to +125°C, Air	0	35 x 2	1000
TC	EPC2010C	200	M (3.55 x 1.63)	-40 to +125°C, Air	0	35 x 1	1000

表14：溫度循環測試

註：對EPC800x產品的測試結果可適用於EPC8000系列的所有產品

雖然在表14所列出的溫度循環測試涉及不同的產品和不同的ΔT，但我們可以合併統計資料，從而計算出最初進行的1000次循環中，元件的失效率的上限(ΔT >= 100°C的條件下)。結果見表15。

Stress Test	Sample Quantity	Fail Quantity	Equivalent Temp Cycles (ΔT >= 100°C)	Upper Bound Failure Rate (first 1000 cycles)
TC	630	0	707,000	1500 ppm

表15：在溫度循環測試中計算出的失效時間(FIT)比率及平均失效時間(MTTF)

間歇工作壽命(IOL)測試

與溫度循環測試一樣，間歇工作壽命(IOL)測試也需要將元件置於極端的溫度循環條件下。不過，不會通過提高環境溫度來加熱，而是通過在內部結點所散出的電力來自我加熱。在通電時期，通過調節功率電平來達到預設的溫度( $T_{JON}$ )，從而把功率逐步降低(或設為零)，使得可以在斷電時期降溫至開始時的溫度( $T_{JOFF}$ )。把這個周期重複數千次，而典型的循環週期為4分鐘。

在間歇工作壽命的實驗中，元件工作在線性區，閘極電壓在接近臨界的1 V至2 V範圍內，而汲極電壓範圍為4 V至6 V之間。利用運算放大器的回饋來控制閘極，從而保持流經元件的特定電流(和瓦數)，見圖2。功率的設置點是由電腦控制的，它會隨著時間而變化，從而在4分鐘的時間間隔內，完成加熱和冷卻的波形，其循環溫度變化為 $\Delta T_j = 100^\circ\text{C}$ 。所有元件都經受完全相同的循環波形。使用紅外線相機和高溫計定期監視晶片背面的外殼的溫度。在這兩種情

況下，溫度感測器都非常接近於測試元件，但並沒有直接接觸。圖3顯示了元件在通電狀態下的典型熱圖像。風扇只在ramp-down階段使得元件可以降溫至與每個循環週期開始時的相同環境溫度。隨後繼續監視和記錄元件的功率。在整個測試過程中，我們會使用多個高溫計記錄一子集的元件的溫度。

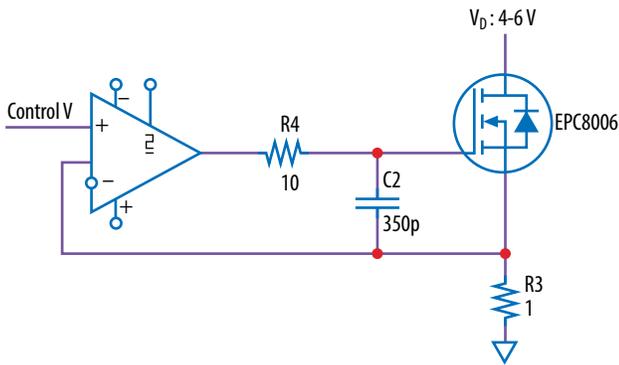


圖2:間歇工作壽命電路測試。使用運算放大器的回饋來調節供給元件的功率。

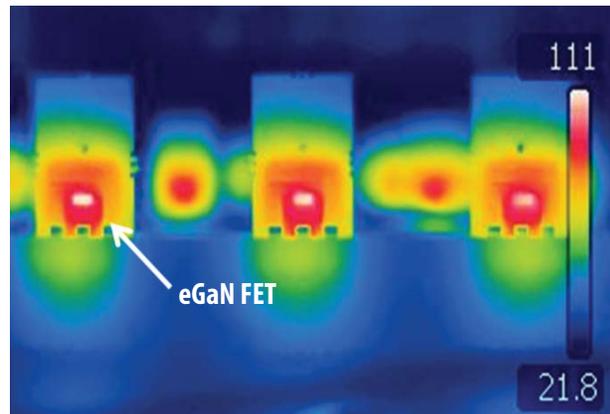


圖3:在間歇工作壽命測試過程中，元件的紅外線熱圖像。在測試時，把場效應電晶體(白色部份)焊接在PC板的小正方形位置上

到目前為止，EPC對三種不同的eGaN產品進行了間歇工作壽命測試，這些產品涵蓋所有的晶片尺寸(見表16)。在所有情況下，我們使用Kester NXG1 type 3 SAC305焊料把元件焊接到PCB的介面卡上(1.6 mm厚、2層銅層)。然後元件根據JEDEC JESD22-A113標準配置好，包括在 $260^\circ\text{C}$ 的溫度下，進行3次回流焊。在整個間歇工作壽命測試過程中，在不同的時間間隔，對元件進行電氣方面的預篩選及後篩選的過程，以確保所有參數都符合數據手

書內的數值。最具代表性並使用EPC細型晶片的3個批次的EPC800x產品系列都通過了MIL-PRF-19500[14]標準所要求的6000次循環測試。在相同條件下，我們也測試了1個批次的大型晶片(EPC2001C)，它們同樣地通過了6000次循環測試。此外，我們對1個批次的加大型晶片(EPC2032)進行測試。這種晶片代表了具有最差的熱機械可靠性的產品，其邊緣錫球具有最大的DNP數值。到目前為止，這個批次的產品都已經通過了3000次循環測試，而且測試正在繼續進行中。

EPC繼續對多種產品的溫度循環和間歇工作壽命進行測試並累積相關的數據，以構建出在各種工作條件下可以用來預測焊點因疲勞而失效的模型。這些模型將有助於客戶在他們的目標應用中預測到元件在多少個循環後會失效的情況( $N_f$ )。我們將在第八階段可靠性測試報告中詳細闡述這些模型。

Stress Test	Part Number	Voltage (V)	Die Size (mm x mm)	Test Condition	# of Failure	Sample Size (sample x lot)	Duration (Cys)
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:間歇工作壽命(IOL)測試結果

第三部份：評估元件的早期失效情況

元件的早期失效比率

早期壽命失效率(ELFR)或老化測試是對半導體元件進行可靠性測試中的一個重要部份。參考著名的“浴盆”曲線(見圖4)，ELFR測試的目的是在元件開始工作時，在其早期失效區域找出失效的模式。這些失效模式是由元件的缺陷所引致的，通常在製造元件時控制不好或在篩選元件時發生。

ELFR測試要求對很大數量的樣品進行短時間(通常是48至168小時)的應力測試，從而得出元件的早期壽命失效率，典型的單位是每百萬元

件有多少個失效元件(ppm)，這是一個隨機選出的一個元件，在規定的初始使用期間內，元件失效的概率。

對於實現非常低的ELFR比率，必須測試非常大量的樣品。例如假設產品具有致命性的缺陷但只是在1百萬個元件中只有一個(1ppm)元件是這樣的，那麼即使樣品的數量是10萬個，也不大可能觀察到這個失效產品。加速因數測試也沒有用。在這種假設的情況下，唯一在統計資料上可以解決這個問題的，是測試數百萬個元件。這就是ELFR要求非常大量的樣品的主要理由。雖然成本高及需要動員大量人

手，但ELFR測試可以為EPC及其客戶提供清晰及寶貴的可靠性數據。

EPC公司在HTRB應力條件下對大量的(5966個元件)、中型尺寸的100 V場效應電晶體(EPC2016C)完成了ELFR測試。應力條件是80 V  $V_{DS}$ 、最大額定溫度為150°C並測試48小時。根據JEDEC JESD471[18]的指標，樣品是從4個非連續生產的批次中抽取的，沒有任何一個批次的產品超過全部待測樣品總數的40%。表16提供了測試結果的總結。

Stress Test	Part Number	Voltage (V)	Die Size (mm x mm)	Test Condition	# of Failure	Sample Size (sample x lot)	Duration (Hrs)	ELFR (upper bound 60% confidence)
HTRB_ELFR	EPC2016C	80	M (2.11 x 1.63)	T = 150°C, $V_{DS}$ = 80V	0	1610 x 1 1621 x 1 1614 x 1 1121 x 1	48	150 ppm

表17: 在HTRB測試條件下所得出的 ELFR結果

由於沒有發生失效情況，置信度上限為60%的ELFR失效率(在第一個48小時內)是150 ppm。這個數值是用以下根據JEDEC標準的74A公式、基於 $\chi^2$ 統計計算出來的。(請注意，如果使用高斯(Gaussian)統計公式，所得的結果是稍微低於120 ppm[13])。

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

$\alpha$ 代表置信度(60%)

r代表失效總次數

$\chi^2(\alpha, 2r+2)$ : Chi-square分佈因數  
(60%置信度和0失效的條件下是1.83)

N是受測試的元件的總數

以上的早期壽命失效率計算方法是基於基本的統計學原理，它的可信性在於採用非常大量的樣品。它不需要假設元件早期失效的潛在隨機過程，也不需要使用假設性的加速因數去作出任何推斷。因此，在統計資料方面，它具有一定的權威性，是相對地採用較少數量樣品的其他測試方法所不能及的。

請注意，非常重要的是，150 ppm的ELFR失效率並不代表在第一個48小時內，EPC2016C的真實失效率。它只是在60%置信度下最小的上限值，僅受限於待測樣品的規模。即使這樣，150 ppm的水準也代表了eGaN元件在可靠性測試中的一個重大的里程碑，並對於未來的測試設定了全新的標桿。實現到這個失效率

要求嚴格控制製程、嚴格篩選元件和實測檢查每個元件。

EPC公司現正收集在高溫開極偏置測試(HTGB)中所取得的早期失效資料，並且將於第八階段可靠性測試報告中發表。

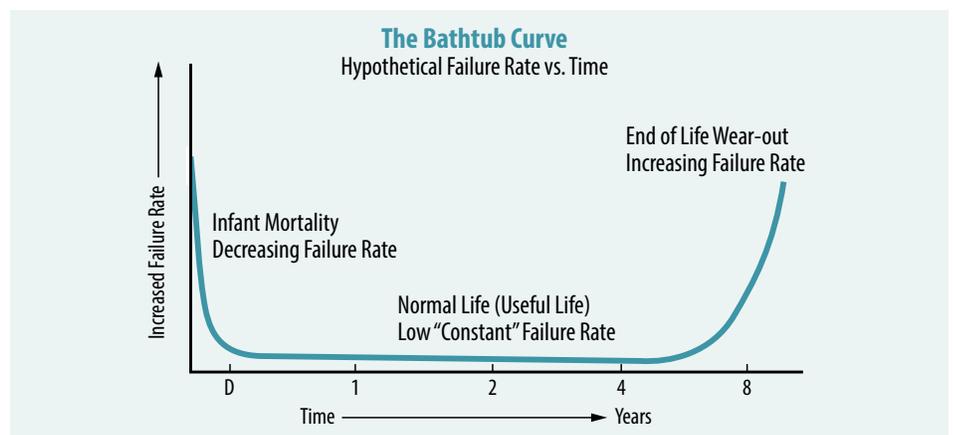


圖4: 假設的浴盆曲線展示了產品的工作壽命中的隨機失效率

### 第四部份：可靠性的現場數據

最重要的是在客戶的應用中，eGaN FET可靠地工作。EPC公司透過監視可靠性的現場數據來估計元件在客戶的應用中的可靠性。在過去的6年間，我們收集了現場數據及現場受測元件的總數量。圖5顯示了EPC公司對不同產品系列進行及累計的元件現場測試小時的分佈圖。在2016年1月發表此報告時，共收集了170億小時受測元件的現場數據。

在這個時間跨度內所收集的127個現場資料中，在工作極限下，只有3個元件失效是與

eGaN FET有關的。剩餘的失效元件與eGaN FET的組裝有關，或是與PCB佈局的不良設計有關(比如電路中的雜散電感可能引致電壓過衝)。EPC公司擁有優秀的技術團隊，可對於客戶解答關於佈局及組裝eGaN元件的問題。

圖6顯示了針對在這6年間已經付運的eGaN產品可靠性的現場數據--FIT比率的趨勢(10<sup>9</sup>小時內的失效元件)。我們假設所有產品已經被使用，並且從最初交貨日期開始就一直在操作。根據累計的元件受測小時的總數，以及確

認了元件失效的現場數據，這些數值代表了失效率的上限(置信度為60%)。

總的來說，我們所取得的現場數據大約是0.24 FIT比率，這個比率最低限度與矽基MOSFET元件相同。此外，趨勢圖中並沒有證據顯示在今後數年內的FIT比率會增加而代表元件會在6年內失效。

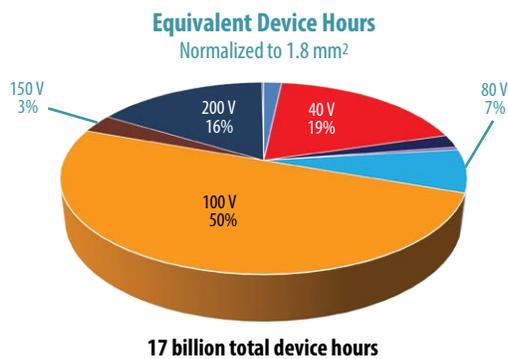


圖5：顯示了不同產品系列所累計的元件受測小時的現場數據的分佈圖

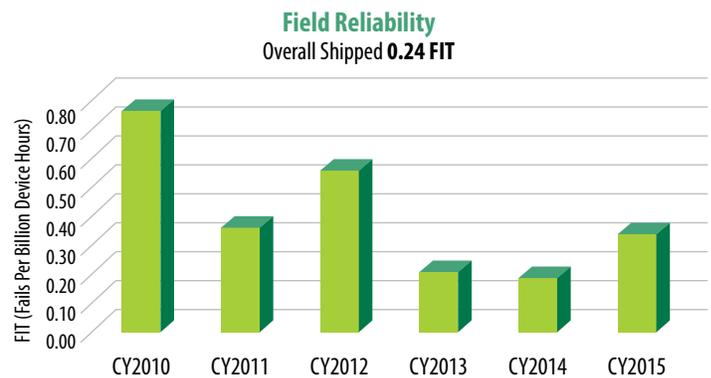


圖6：在過去6年間，所有被使用的eGaN產品的現場可靠性測試的趨勢圖。FIT比率的置信度上限為60%

### 總結

在此第七階段可靠性測試報告中，我們提供了全新加大型元件及300 V產品都通過測試的數據。我們也報告了熱機械可靠性的評估分析，包括首次對所有不同尺寸的元件進行了間歇工作壽命(IOL)測試。通過採用大量的eGaN FET樣品進行早期失效率測試，得出ELFR失效率的上限對於150 ppm，從而展示出我們對eGaN產品採取了嚴謹的製程控制和篩選。最後，我們報告了產品的複合0.24 FIT失效率的現場數據。這個數值與我們直至目前為止所發表的評估結果是一致的，以及表明eGaN FET是非常可靠的元件。

在下一份(第八階段)的可靠性報告中，我們計劃展示所有全新產品的可靠性認證結果，包括單片半橋式產品及更多的加大型元件。此外，我們將介紹範圍更廣的ELFR失效率結果，包括加入全新的應力條件和彙集數據，從而以非常大量的樣品，取得統計學上的超集(super-set)數據。針對熱機械可靠性測試，我們計劃構建一個經過驗證的預測性模型，讓客戶可以根據晶片的尺寸、錫塊的配置和不同的應力條件而預測元件在多少個循環測試後會發生失效的情況。

### 參考資料：

- [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>)
- [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>)