

宜普电源转换公司eGaN[®]FET的 第七阶段可靠性测试报告



美国加利福尼亚州洛杉矶El Segundo市 宜普电源转换公司(EPC) Chris Jakubiec、Rob Strittmatter博士及周春华博士

与传统的功率MOSFET相比, 宜普电源转换公司 (EPC) 的增强型氮化镓场效应晶体管 (eGaN[®]FET) 继续以它极具竞争力的优势并贴近市场发展趋势, 驱动创新应用的发展, 并且扩大GaN的市场。其中的一些应用范例诸如无线电源传送、DC/DC转换、射频发射基站、卫星系统、音频放大器及光学遥感技术(Lidar) 等都可以发挥氮化镓场效应晶体管的卓越优势, 而其它的应用还有很多。

除了市场及应用的开发外, 同样重要的是我们要确保氮化镓场效应晶体管在目标应用中非常可靠地工作。EPC公司不间断地累积并增加大量的产品可靠性统计数据, 从而扩大对氮化镓产品的知识面及数据库, 以及证明eGaN技术是可行、可信赖的技术并且可以替代传统的硅技术。第七阶段可靠性报告除了提供之前各分报告的复审结果外, 也提供了全新的间歇工作寿命 (IOL) 可靠性数据、早期寿命失效率 (ELFR)、静电放电 (充电器件模型)、对多个使用最大芯片尺寸的产品系列及300 V产品进行可靠性测试的额外认证数据。

本文共有四个部分。第一部分提供氮化镓场效应晶体管的认证数据, 包括把产品的电压范围扩展至300 V的全新数据。第二部分涉及采用晶圆级芯片尺寸封装的eGaN产品的热机械可靠性数据, 包括最近期的温度循环测试和间歇工作寿命 (IOL) 测试数据。第三部分涵盖了采用大量样本所进行的器件早期失效测试, 以及提供了早期寿命失效率的上限。最后的部分提供产品可靠性的现场数据。

第一部分: 40 V至300 V产品的认证测试

认证测试的概述

EPC2025场效应晶体管是一种将氮化镓技术的电压能力扩展至300 V的领先产品。可靠性测试的结果表明, 在测试电压高达300 V的额定电压范围内, 各种器件的参数都保持稳定。我们也把器件的静电放电测试扩展至可覆盖三种标准的模型: 人体模型 (HBM)、机械模型 (MM)及充电器件模型 (CDM)。此外, 在发表本报告时, 我们对EPC公司的产品系列内使用最大芯片尺寸的产品完成了额外的可靠性测试。

我们把EPC氮化镓场效应晶体管 (eGaN FET) 置于与硅基功率MOSFET的典型测

试相同的条件下, 进行多种不同的应力测试。这些测试包括:

- 高温反向偏置 (HTRB) 测试: 在最高额定温度, 器件需要在漏极-源极电压条件下, 经受应力测试
- 高温栅极偏置 (HTGB) 测试: 在最高额定温度, 器件需要在栅极-源极电压条件下, 经受应力测试
- 高温存储 (HTS) 测试: 在最高额定温度下对器件加热
- 温度循环测试 (TC): 把器件置于交替性高/低的大温差情况下进行测试
- 高温高湿反向偏置 (H3TRB) 测试: 在高温下把器件置于潮湿情况下并施加漏极-源极电压

- 无偏置高压测试 (AC或高压炉) 测试: 在condensing条件下把器件置于压力、潮湿及高温的情况下进行测试
- 湿度灵敏度 (MSL) 测试: 把器件置于潮湿、高温、3次回流焊的循环测试条件下
- 静电放电 (ESD): 在人体模型 (HBM)、机械模型 (MM) 及充电器件 (CDM) 模型, 把器件置于静电放电测试
- 间歇工作寿命 (IOL): 使器件经受直流电脉冲的开关循环冲击, 从而将器件的结温加热至预定的温度, 然后再降到断电状态时的结点温度。

器件的稳定性是在施加应力偏置之后用直流电气测试来进行验证的。在时间点为零时 (time-zero) 和中间读取点测量室温下的电气参数。将诸如栅极-源极的漏电流、漏极-源极的漏电流、栅极-源极的阈值电压和导通电阻等电气参数, 把它们与数据手册上的规格进行比较。当某个器件超过数据手册上所规定的规格时, 就记录为该器件失效。在eGaN FET上施加的应力尽可能满足JEDEC的规范[1]。

我们焊接器件在FR5 (高Tg的FR4) 或聚酰亚胺适配卡上。适配卡的厚度为1.6 mm, 使用两层铜层。顶面铜层的厚度为1盎司或2盎司, 底层铜层的厚度为1盎司。焊接器件在适配卡上时, 使用Kester NXG1 type 3 SAC305焊锡[2]免清洗焊剂。

统计结果的总结

表1总结了可靠性测试结果，以及提供失效器件的复合统计的估计数值。在累计700万器件-小时的测试后，结果为没有器件发生失效情况。由于是零失效，统计数据代表了置信度为60%、出现最多失效器件的上限数值。这个上限数值基于样片的

规模，它将随着EPC公司继续收集可靠性测试的数据而将继续下调。对于某些应力测试，在合适的情况下，我们都计算了失效时间(FIT) 比率和平均失效时间 (MTTF)。这些计算方法都假设加速因子 (AF) 是1。因此，在不太严峻的环境下工作，我们

预测器件的失效比率将会更低。在其它的应力测试中，我们也提供了失效率(单位为ppm)及相关的应力时间。

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
All Tests	10879	0	7031968	—	—

表1:失效率的复合统计数据的上限数值。

高温反向偏置测试

基于标准认证的要求，为符合JEDEC的JESD22-A108[3]规范的要求，所有样片需要在80%的漏极-源极额定电压、在最高的额定温度条件下，经受1000小时的应力测试。进行应力测试的器件的类型均在40 V至300 V的电压范围内。

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)	$T = 150^\circ C, V_{DS} = 80 V$	0	77 x 2	3000
HTRB	EPC2016C	100	M (2.11 x 1.63)	$T = 150^\circ C, V_{DS} = 80 V$	0	77 x 3	2000
HTRB	EPC2032	100	XL (4.65 x 2.65)	$T = 150^\circ C, V_{DS} = 80 V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2036	100	S (0.95 x 0.95)	$T = 150^\circ C, V_{DS} = 80 V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2029	80	XL (4.65 x 2.65)	$T = 150^\circ C, V_{DS} = 64 V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2021	80	XL (6.10 x 2.35)	$T = 150^\circ C, V_{DS} = 64 V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2024	40	XL (6.10 x 2.35)	$T = 150^\circ C, V_{DS} = 32 V$	0	60 x 1	1000
HTRB	EPC2023	30	XL (6.10 x 2.35)	$T = 150^\circ C, V_{DS} = 24 V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC80xx	40	S (2.05 x 0.85)	$T = 150^\circ C, V_{DS} = 40 V$	0	77 x 3	1000
HTRB	EPC2014C	40	M (1.70 x 1.09)	$T = 150^\circ C, V_{DS} = 32 V$	0	77 x 1	2000
HTRB	EPC8004	40	S (2.05 x 0.85)	$T = 150^\circ C, V_{DS} = 32 V$	0	77 x 1	2000
HTRB	EPC2035	60	S (0.95 x 0.95)	$T = 150^\circ C, V_{DS} = 48 V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2010C	200	L (3.55 x 1.63)	$T = 150^\circ C, V_{DS} = 160 V$	0	77 x 2	3000
HTRB	EPC2012C	200	M (1.71 x 0.92)	$T = 150^\circ C, V_{DS} = 160 V$	0	77 x 1	1000
HTRB	EPC2025	300	M (1.95 x 1.95)	$T = 150^\circ C, V_{DS} = 240 V$	0	77 x 3	1000

表2:高温反向偏置测试 (HTRB)

注:对EPC800x产品进行的测试结果适用于EPC8000系列的所有产品

基于进行了HTRB应力测试的样本的失效概率是通过计算失效时间比率 (FIT) 和平均失效时间 (MTTF) 估计出来的。计算时我们假设60%置信度, 加速因子(AF)是1。

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

表3:在高温反向偏置 (HTRB) 应力测试中计算出的失效时间 (FIT) 比率及平均失效时间 (MTTF)。

高温栅极偏置测试

根据JEDEC JESD22-A108[3]的规定, 器件需要在5.75 V或5.5 V栅极-源极偏置电压、在最高额定温度条件下, 经受1000小时的应力测试。进行应力测试的器件类型在40 V到300 V的电压范围内。

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 _{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:高温栅极偏置测试 (HTGB)

注:对EPC800x产品进行的测试结果适用于EPC8000系列的所有产品

基于进行了HTGB应力测试的样本的失效概率是通过计算失效时间比率 (FIT) 和平均失效时间 (MTTF) 估计出来的。计算时我们假设60%置信度, 加速因子(AF)是1。

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

表5:在高温栅极偏置 (HTGB) 应力测试中计算出的失效时间 (FIT) 比率及平均失效时间 (MTTF)。

高温存储测试

根据JEDEC JESD22-A103[4]的规定, 器件在最高额定温度加热的条件下, 经受1000小时的应力测试。

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: 高温存储测试

注: 对EPC800x产品进行的测试结果适用于EPC8000系列的所有产品

高温高湿反向偏置测试

根据JEDEC JESD22-A101[6]的规定, 器件需要在85%的相对湿度、85°C的温度、漏极-源极偏置的测试条件下, 经受1000小时的应力测试。

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 _{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: 高温高湿反向偏置 (H3TRB) 测试

注: 对EPC800x产品进行的测试结果适用于EPC8000系列的所有产品

基于进行了H3TRB应力测试的样本的失效概率是通过计算失效时间比率 (FIT) 和平均失效时间 (MTTF) 估计出来的。计算时我们假设60%置信度, 加速因子(AF)是1。

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

表8: 在高温高湿反向偏置 (H3TRB) 应力测试中计算出的失效时间 (FIT) 比率及平均失效时间 (MTTF)。

无偏置高压测试(无偏置压力锅)

根据JEDEC JESD22A-102[7]的规定, 器件需要在100%的相对湿度、121°C的温度和29.7 PSIA的蒸汽压力下, 经受96小时的应力测试。器件在应力测试期间不施加电气偏置。

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: 无偏置高压测试

湿度灵敏度测试

器件在85%的相对湿度和85°C的温度条件下, 经受168小时的应力测试。根据IPC/JEDEC J-STD-020[8]的联合标准, 器件还要经受三次无铅回流焊的测试。

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: 湿度灵敏度测试

注: 对EPC800x产品进行的测试结果适用于EPC8000系列的所有产品

静电放电测试

根据JESD22A-114 [9] Human Body Model、JESD22A-115 [10] Machine Model及JESD22C-101 [11] Charged Device Model的规定, 器件需要经受ESD、HBM、MM和CDM的测试。测试所选的器件是EPC2001 及EPC800x以涵盖芯片尺寸范围内的所有产品。

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: 对EPC2001器件进行的静电放电测试结果。

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: 对EPC2001C器件进行的静电放电测试结果。

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: 对EPC800x器件进行的静电放电测试结果。

注: 对EPC800x产品进行的测试结果适用于EPC8000系列的所有产品

第二部分：热机械可靠性测试

热机械应力测试

氮化镓功率晶体管的快速成熟继续在高频电源转换领域中催生了许多全新的功能。采用晶圆片规模封装 (WLCSP) 的氮化镓器件可以帮助设计师取得更高速度的性能，因为这些器件消除了与封装有关的寄生电感和热阻。EPC将继续在热机械应力测试下，评估这种封装的可靠性。除了对各代的所有eGaN器件进行温度循环 (TC) 测试外，EPC近期加入多次的间歇工作寿命(IOL) 测试。TC及IOL评估的结果详列如下。

在热机械应力测试中，影响器件的可靠性的主要因素是芯片与PCB之间的热膨胀系数(CTE)的不匹配。因为芯片(3 ppm/°C)和PCB (~10-14 ppm/°C)的热膨胀系数的差异相对地较大，因此连接二者的焊点会发

生剪应变。在经过许多次的温度循环后，重复应力作用将产生材料的疲劳性破坏，最终焊点会失效 (范例见图1)。

焊点中的热机械性剪应变可以用以下简单的公式得出估计数值：

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

其中ε是焊点中的剪应变，Δα是芯片和PCB热膨胀系数 (CTE) 之差，ΔT是循环过程中的温度变化，DNP是焊点与芯片中心之间的距离，t是焊点的高度。距离芯片中心最远的焊点承受着最大的应力，因此会最先发生失效的情况。通过增加焊凸的高度，可以提高器件的TC/IOL的可靠性。建议客户与我们找出针对他们的应用的最优焊凸解决方案。

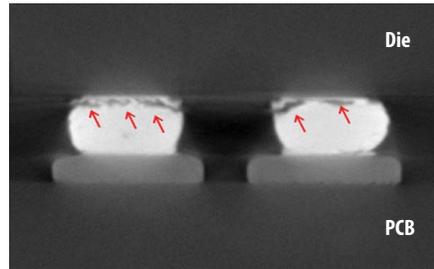


图1: 经过应力测试后，失效的焊点发生严重的开裂。

温度循环测试

从表14看到，进行温度循环测试评估的多种产品的尺寸由小至加大。根据JEDEC标准 JESD22-A104[5]的规定，器件要在-40°C 和+125°C或0°C 和+100°C之间，分别经受1000次或1500次的温度循环(TC)测试。

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: 温度循环测试

注: 对EPC800x产品的测试结果可适用于EPC8000系列的所有产品

虽然在表14所列出的温度循环测试涉及不同的产品和不同的ΔT，但我们可以合并统计数据，从而计算出最初进行的1000次循环中，器件的失效率的上限(ΔT >= 100°C的条件下)。结果见表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: 在温度循环测试中计算出的失效时间 (FIT) 比率及平均失效时间 (MTTF)。

间歇工作寿命 (IOL) 测试

与温度循环测试一样，间歇工作寿命 (IOL) 测试也需要将器件置于极端的温度循环条件下。不过，不会通过提高环境温度来加热，而是通过在内部结点所散出的电力来自加热。在通电时期，通过调节功率电平来达到预设的温度(T_{jON})，从而把功率逐步降低(或设为零)，使得可以在关断时期降温至开始时的温度(T_{jOFF})。把这个周期重复数千次，而典型的循环周期为4分钟。

在间歇工作寿命的实验中，器件工作在线性区，栅极电压在接近阈值的1 V至2 V范围内，而漏极电压范围为4 V至6 V之间。利用运算放大器的反馈来控制栅极，从而保持流经器件的特定电流(和瓦数)，见图2。功率的设置点是由电脑控制的，它会随着时间而变化，从而在4分钟的时间间隔内，完成加热和冷却的波形，其循环温度变化为 $\Delta T_j=100^{\circ}\text{C}$ 。所有器件都经受完全相同的循环波形。使用红外线相机和高温计定期监视芯片背面的外壳的温度。在这两种

情况下，温度传感器都非常接近于测试器件，但并没有直接接触。图3显示了器件在通电状态下的典型热图像。风扇只在 ramp-down 阶段使得器件可以降温至与每个循环周期开始时的相同环境温度。随后继续监视和记录器件的功率。在整个测试过程中，我们会使用多个高温计记录一子集的器件的温度。

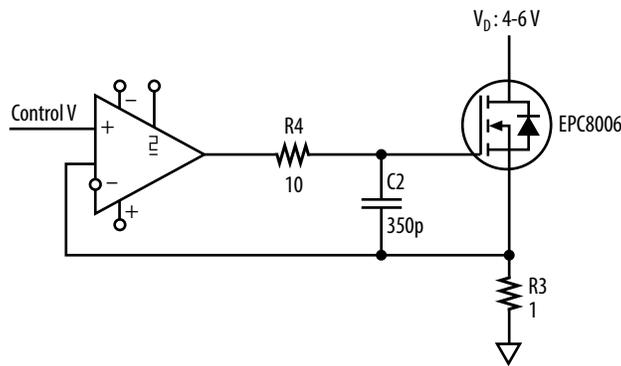


图2: 间歇工作寿命电路测试。使用运算放大器的反馈来调节供给器件的功率。

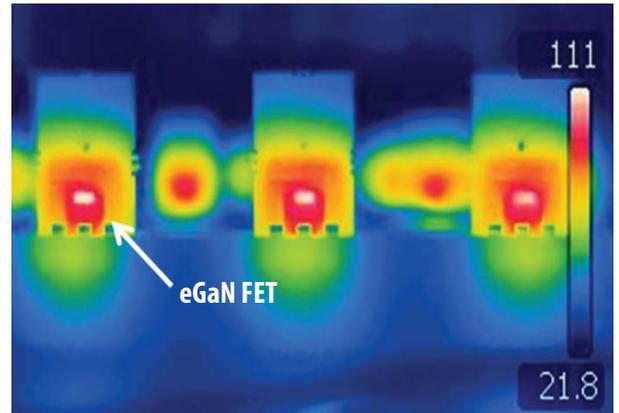


图3: 在间歇工作寿命测试过程中，器件的红外线热图像。在测试时，把场效应晶体管(白色部分)焊接在PC板的小正方形位置上。

到目前为止，EPC对三种不同的eGaN产品进行了间歇工作寿命测试，这些产品涵盖所有的芯片尺寸(见表16)。在所有情况下，我们使用Kester NXG1 type 3 SAC305焊料把组件焊接到PCB的适配卡上(1.6 mm厚、2层铜层)。然后组件根据JEDEC JESD22-A113标准配置好，包括在260°C的温度下，进行3次回流焊。在整个间歇工作寿命测试过程中，在不同的时间间隔，对组件进行电气方面的预筛选及后筛选的过程，以确保所有参数都符合数据手册内的数值。最具代表性并

使用EPC细型芯片的3个批次的EPC800x产品系列都通过了MIL-PRF-19500[14]标准所要求的6000次循环测试。在相同条件下，我们也测试了1个批次的大型芯片(EPC2001C)，它们同样地通过了6000次的循环测试。此外，我们对1个批次的加大型芯片(EPC2032)进行测试。这种芯片代表了具有最差的热机械性可靠性的产品，其边缘锡球具有最大的DNP数值。到目前为止，这个批次的产品都已经通过了3000次循环测试，而且测试正在继续进行中。

EPC继续对多种产品的温度循环和间歇工作寿命进行测试并累积相关的数据，以构建出在各种工作条件下可以用来预测焊点因疲劳而发生失效的模型。这些模型将有助于客户在他们的目标应用中预测到器件在多少个循环后会失效的情况(N_f)。我们将在第八阶段可靠性测试报告中详细阐述这些模型。

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: 间歇工作寿命 (IOL) 测试结果。

第三部分: 评估器件的早期失效情况

器件的早期失效比率

早期寿命失效率(ELFR)或老化测试是对半导体器件进行可靠性测试中的一个重要部分。参考著名的“浴盆”曲线(见图4), ELFR测试的目的是在器件开始工作时, 在其早期失效区域找出发生故障的模式。这些故障模式是由器件的缺陷所引致的, 通常在制造器件时控制不好或在筛选器件时发生。

ELFR测试要求对很大数量的样片进行短时间(通常是48至168小时)的应力测试, 从而得出器件的早期寿命失效率, 典型的单

位是每百万器件有多少个器件发生故障(ppm), 这是一个随机选出的一个器件, 在规定的初始使用期间内, 器件发生故障的概率。

为了实现非常低的ELFR比率, 必须测试非常大量的样片。例如假设产品具有致命性的缺陷但只是在1百万个器件中只有一个(1 ppm) 器件是这样的, 那么即使样片的数量是10万个, 也不大可能观察到这个失效产品。加速因子测试也没有用。在这种情况下, 唯一在统计数据上可以解决这个问题, 是测试数百万个器件。这就是ELFR要求非常大量的样片的主要理

由。虽然成本高及需要动员大量人手, 但ELFR测试可以为EPC及其客户提供清晰及宝贵的可靠性数据。

EPC公司在HTRB应力条件下对大量的(5966个器件)、中型尺寸的100 V场效应晶体管(EPC2016C) 完成了ELFR测试。应力条件是80 V V_{DS} 、最大额定温度为150°C并测试48小时。根据JEDEC JESD47I[18]的指标, 样片是从4个非连续生产的批次中抽取的, 没有任何一个批次的产品超过全部待测样片总数的40%。表16提供了测试结果的总结。

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测试条件下所得出的 ELFR结果。

由于没有发生失效情况, 置信度上限为60%的ELFR失效率 (在第一个48小时内)是150 ppm。这个数值是用以下根据JEDEC标准的74A公式、基于 χ^2 统计计算出来的。(请注意, 如果使用高斯(Gaussian) 统计公式, 所得的结果是稍微低于120 ppm[13])。

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

其中:

α 代表置信度 (60%)

r代表失效总次数

$\chi^2(\alpha, 2r+2)$: Chi-square分布因子
(60%置信度和0失效的条件下是1.83)

N是受测试的元件的总数

以上的早期寿命失效率计算方法是基于基本的统计学原理, 它的可信性在于采用非常大量的样片。它不需要假设器件早期失效的潜在随机过程, 也不需要使用假设性的加速因子去作出任何推断。因此, 在统计数据方面, 它具有一定的权威性, 是相对地采用较少数量样片的其它测试方法所不能及的。

请注意, 非常重要, 150 ppm的ELFR失效率并不代表在第一个48小时内, EPC2016C的真实失效率。它只是在60%置信度下最小的上限值, 仅受限于待测样片的规模。即使这样, 150 ppm的水平也代表了eGaN器件在可靠性测试中的一个重大的里程碑, 并为未来的测试设定

了全新的标杆。实现到这个失效率要求严格的工艺控制、严格的器件筛选和实测检查每个器件。

EPC公司现正收集在高温栅极偏置测试(HTGB) 中所取得的早期失效数据, 并且将于第八阶段可靠性测试报告中发表。

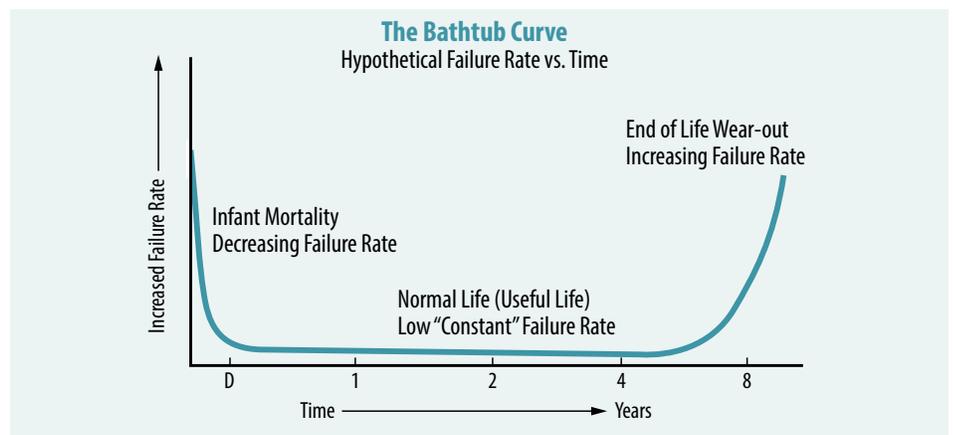


图4: 假设的浴盆曲线展示了产品的工作寿命中的随机失效率。

第四部分: 可靠性的现场数据

最重要的是在客户的应用中, eGaN FET可靠地工作。EPC公司透过监视可靠性的现场数据来估计器件在客户的应用中的可靠性。在过去的6年间, 我们收集了现场数据及现场受测器件的总数量。图5显示了EPC公司对不同产品系列进行及累计的器件现场测试小时的分布图。在2016年1月发表此报告时, 共收集了170亿小时受测器件的现场数据。

在这个时间跨度内所收集的127个现场数据中, 在工作极限下, 只有3个器件失效是

与eGaN FET有关的。剩余的失效元件与eGaN FET的装配有关, 或是与PCB布局的不良设计有关(比如电路中的杂散电感可能引致电压过冲)。EPC公司拥有优秀的技术团队, 可为客户解答关于布局及组装eGaN器件的问题。

图6显示了针对在这6年间已经付运的eGaN产品可靠性的现场数据--FIT比率的趋势(10⁹小时内的失效器件)。我们假设所有产品已经被使用, 并且从最初交货日期开始就一直在操作。根据累计的器件受测

小时的总数, 以及确认了器件失效的现场数据, 这些数值代表了失效率的上限(在60%置信度下)。

总的来说, 我们所取得的现场数据大约是0.24 FIT比率, 这个比率最低限度与硅基MOSFET器件相同。此外, 趋势图中并没有证据显示在今后数年内的FIT比率会增加而代表器件会在6年期间内失效。

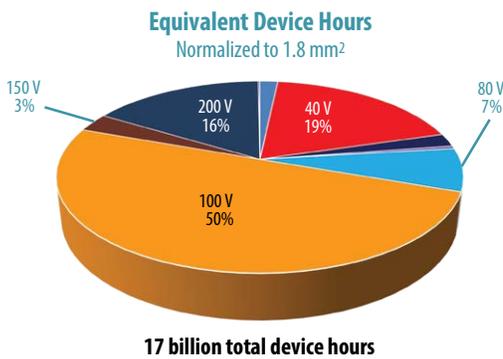


图5: 显示了不同产品系列所累计的器件受测小时的现场数据的分布图。

总结

在此第七阶段可靠性测试报告中, 我们提供了全新加大型器件及300 V产品都通过测试的数据。我们也报告了热机械可靠性的评估分析, 包括首次对所有不同尺寸的器件进行了间歇工作寿命(IOL)测试。通过采用最大数量的eGaN FET样片进行早期失效率测试, 得出ELFR失效率的上限为150 ppm, 从而展示出eGaN产品采取了严谨的工艺控制和筛选。最后, 我们报告了产品的复合0.24 FIT失效率的现场数据。这个数值与我们直至目前为止所发表的评估结果是一致的, 以及表明eGaN FET是非常可靠的器件。

参考资料:

- [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>)

Field Reliability Overall Shipped 0.24 FIT

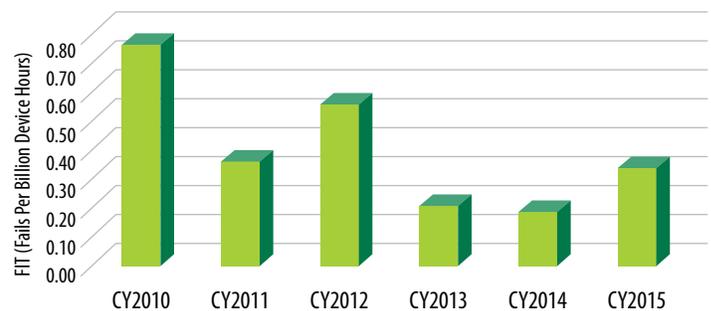


图6: 在过去6年间, 所有被使用的eGaN产品的现场可靠性测试的趋势图。FIT比率的置信度上限为60%。

在下一份(第八阶段)的可靠性报告中, 我们计划展示所有全新产品的可靠性认证结果, 包括单片半桥式产品及更多的加大型器件。此外, 我们将介绍范围更广的ELFR失效率结果, 包括加入全新的应力条件和汇集数据, 从而以非常大量的样片, 取得统计学上的“超集”数据。针对热机械可靠性测试, 我们计划构建一个经过验证的预测性模型, 让客户可以根据芯片的尺寸、锡块的配置和不同的应力条件而预测器件在多少个循环测试后会发生失效的情况。

- [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>)