

DOI:10.19609/j.cnki.cn10-1324/tp.2024.01.011

功率器件可靠性 试验方法分析及展望

■文 / 艾文思、高宏玲、翟腾、郭青帅*

摘要

功率器件是新能源、轨道交通、电动汽车、工业应用和家用电器等电子电力系统的核心部件。随着科技的进步和应用需求的提升，功率器件正逐渐向高频、高压、高温的方向发展，这也对器件的可靠性提出更高要求。本文聚焦功率器件，围绕测试原理、测试方法和器件失效三个方面，对高温反向偏置、高温栅极应力、温湿度偏置、高低温存储、温度循环、温度冲击、功率循环和辐照等可靠性试验方法进行深入分析，并对可靠性测试方法的未来发展提出建议。本文可以为功率器件可靠性测试技术和数据分析提供借鉴。

*通信作者 email: guoqingshuai@csct.org.cn

引言

功率器件是一种用于电力电子系统的半导体器件，包括二极管、三极管、晶闸管、MOS，以及 IGBT 等。功率器件可用于改变电压和频率，也可将交流转换为直流，或将直流转换为交流，被广泛应用于新能源、轨道交通、电动汽车、工业和家用电器等核心部件。如在电动汽车中，IGBT 被广泛应用于电机驱动、控制器、逆变器等设备。随着科技的进步和应用需求的提升，对功率器件的效率和性能要求不断提高，同时要求体积和重量不断降低，功率器件正逐渐向高频、高压、高温的方向发展。

由于功率器件在电力电子系统中扮演着至关重要的角色，因此功率器件出现故障或失效，可能会影响整个系统的稳定性和可靠性，导致系统无法正常运行。鉴于

此，有必要提前通过可靠性测试评估功率器件在不同温度、湿度、工作状态下的稳定性，发现产品在设计、制造、使用过程中可能出现的问题和缺陷。

可靠性试验的标准

功率器件可靠性测试可以依照电子产品可靠性标准开展。相关可靠性测试标准主要有国军标（GJB 548C、GJB8481）、国标（GB/T 2423）、美军标（MIL-STD-202、MIL-STD-750、MIL-STD-883）、JEDEC 标准（JESD22）等。

常见可靠性试验方法

高温反向偏置试验

高温反向偏置（High Temperature Reverse Bias, HTRB）试验用于验证器件

表 1 功率器件可靠性试验分类及相关标准

试验名称	试验目的	依照标准
高温反向偏置试验	评估功率器件在高温、反向偏置状态下漏电流是否在规定的范围内	GJB128B、AEC-Q101、JESD22-A108、MIL-STD750H M1038、GJB128 等
高温栅极应力试验	评估功率器件栅极在高温环境下对器件的控制能力	GJB128A、MIL-STD750、GB/T2423、JESD22-A108、IEC 60747-9 等
温湿度偏置试验	评估功率器件在温湿度交替变化下器件封装的可靠性	GJB 150.9A、GB/T2423.3、JESD22-A110 等
高低温存储实验	评估功率器件在高低温环境存储的性能稳定性	GJB 150.3A、GJB 150.4A、GB/T2423.1、GB/T2423.2 等
温度循环试验	评估功率器件在温度变化环境下的性能稳定性	GJB548C、GB/T2423.22 等
温度冲击试验	评估功率器件在快速温度变化和循环温度波动下的性能表现	GJB 150A、GB/T2423.1、GB/T2423.2、MIL-STD810 等
功率循环试验	评估功率器件承受结温波动的能力，模拟疲劳失效、预测寿命	GJB 150.9A、GB/T2423.3、AEC-Q100、AQG324 等
辐照试验	评估功率器件在宇宙射线影响下的性能退化情况	IEC TS/62396 等

在长期稳定状态下的泄露电流情况，是功率器件可靠性试验的重要试验项目之一。

一般在器件量产前或使用前进行 HTRB 试验。器件在高温状态下被持续施加某一规格的反向偏压，模拟器件在极限运行温度下的工作情况，测试过程一直监测器件漏电流变化，判断器件反向漏电流是否超出规定范围，排查出异常器件^[1,2]。以 MOSFET 器件为例，HTRB 测试原理如图 1 所示。HTRB 试验结果受温度、反向偏压、测试时长等三个参数影响。其中，温度主要受被测器件材料及测试依据标准影响。如酸洗芯片和玻璃钝化芯片结温分别不能超过 125℃ 和 150℃，否则容易因硅胶老化收缩，造成漏电流过大击穿；此外，各测试标准（美军标准、国家标准、JEDEC、IEC）对测试温度要求有差异，可能要求 125℃、150℃、175℃，或更高温度。反向偏压是为了让器件工作在极限状态或接近极限状态，一般施加的反向偏压为产品耐压值的 80% 或 100%。根据所施加应力条件，测试时长可选取 168h 或 500h 或 1000h 不等。通常车规类、军工类

产品，由于对产品的可靠性要求更高，一般测试温度更高、测试时间更长。

高温栅极应力试验

栅极氧化层是功率器件最容易出现失效的位置。高温栅极应力（High Temperature Gate Bias, HTGB）试验用于测试器件栅极在高温、偏置状态下漏电流的稳定性^[3]。以 MOSFET 器件为例，HTGB 试验的原理图如图 2 所示。业内普遍测试条件为 150℃、100% 栅偏压、测试 168 小时或 500 小时或 1000 小时。由于栅极一般最大允许的电压为 $\pm 20V$ ，对于 IGBT 和 MOSFET 器件而言，栅极氧化层厚度一般仅为百纳米，甚至更低。当 20V 偏压施加到栅极时，栅极氧化层的电场强度高达 2 MV/cm。当栅极氧化层存在较大缺陷时，极易产生较大漏电流，导致栅穿。

此外，由于功率器件的栅极主要控制器件的开启和关断，阈值电压漂移会影响整个电子系统的开关转化效率，尤其当功率器件应用到汽车上时，还会严重影响到汽车的续航。对于 MOSFET 及 IGBT 器

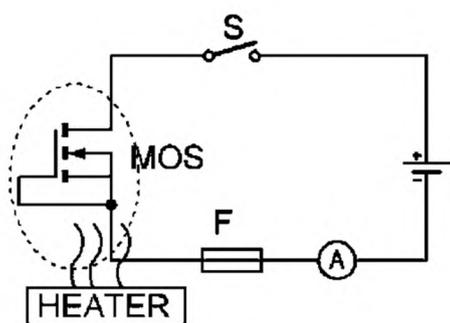


图 1 MOSFET 的 HTRB 试验原理图

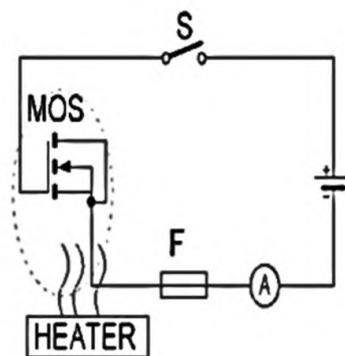


图 2 MOSFET 器件正向高温栅极偏压测试原理图

件而言，Si 基器件制备工艺比较成熟，在栅极应力实验中表现比较稳定。但是，在 SiC 领域有很多明显的阈值电压漂移现象。

温湿度偏置试验

温湿度偏置 (Temperature Humidity Bias, THB) 试验是将器件置于高温、高湿环境中，检测器件封装体对湿气的抵抗能力。THB 试验通过提供高温、高湿环境，增加器件内部与周围环境的水蒸气差，加剧水汽扩散和吸收。这种环境对分立器件封装树脂材料及晶片表面钝化层具有较大考验，湿气可能会沿着器件胶体缝隙或引脚接缝渗入产品内部，使器件产生短路或漏电流现象。如封装环氧胶吸湿水解导致封装体机械性能下降、封装材料出现分层，或环氧胶吸水膨胀引发的湿应力导致引线连接失效。此外，不同功率的器件施加偏置电压的方式存在差别。对于小功率器件，施加稳态电压偏置；对于高功率器件，一般施加间歇电压偏压，以避免高功率下芯片发热对芯片周围材料产生烘干作用，降低试验效果。

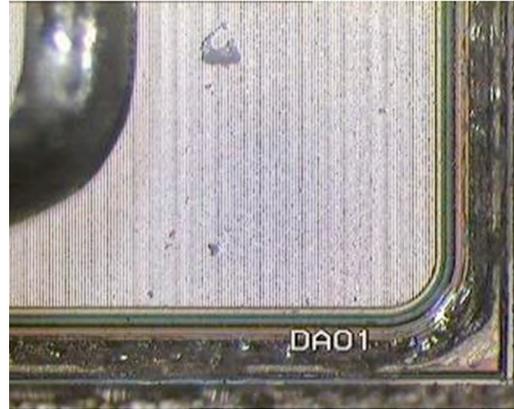


图 3 650V 二极管在 THB 试验 (R.H.85%、85°C、80% 额定电压、168h) 后的光学照片^[4]

在 650V SiC 二极管器件的 THB 试验中^[4]，将器件置于相对湿度 85%、环境温度 85°C，施加 80% 额定电压，在 168h 后监测到漏电流增加，器件性能退化。通过光学显微镜进一步分析，可以发现器件边缘的二次钝化层出现抬升。进一步结合 SEM 和 FIB 结果，证实电阻层和氧化层界面的电迁移产生的气泡，导致芯片二次钝化层升高并出现漏电流增加。

高低温存储试验

高低温存储 (High-low Temperature



图 4 高低温存储试验示意图

Storage) 试验通常由恒温恒湿试验箱或高低温试验箱等设备提供稳定的特定温度环境(通常为 $-40^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$), 功率器件在不加电状态下经过长时间存储(通常不少于168h), 之后对器件进行电性能测试, 验证性能的变化。

高低温存储试验可用于验证功率器件封装中使用塑封材料、钝化材料、胶水等材料在整个存储温度范围内的完整性, 同时对存在表面污染、引线键合不良和氧化层缺陷的器件具有很好的筛选作用。高温会对所有热塑性外壳材料的机械强度产生影响, 而长期低温存储可能使塑性材料和橡胶材料的柔软剂失效, 破坏塑料材料的弹性。标准的存储温度为 $-40^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$, 这个温度范围可以满足大部分材料的稳定性。

温度循环和温度冲击试验

温度循环(Temperature Cycling, TC)和温度冲击(Temperature Shock Test, TST)是模拟器件在温度波动环境下稳定性的常用方法。

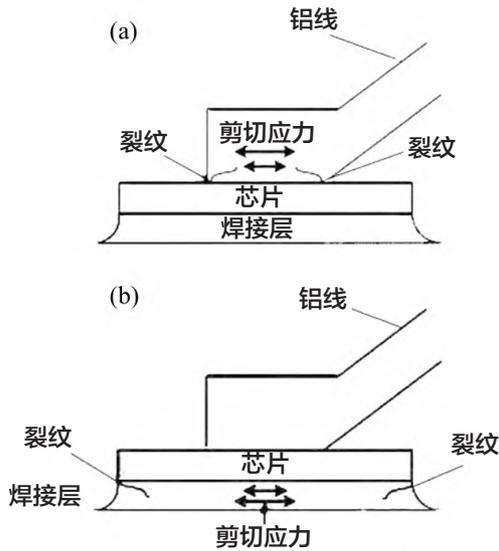
TC试验和TST试验的显著差别之一是温度变化率不同。TC试验温度变化率比较低, 一般为 $10^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。TST试验的温度变化比较快, 温度变化时间一般小于1min。对于功率器件, 温度变化可以由双槽试验装置实现。将装置两个腔室的空气分别加热/冷却到最大/最小试验温度, 在小于1min时间间隔内, 器件在两个腔室之间传送。由于气体环境的热交换率很低, 根据器件热容的不同,

器件内温度达到平衡所需的时间一般为30min ~ 2h。如果需要加速器件的温度平衡, 或进行极端温度的实验, 可以采用液体-液体热冲击实验。通过石油或液氮, 实现 150°C 高温或 -196°C 低温。液体环境中热传导比气体快, 相比气体需要几小时的温度平衡, 液体环境仅数分钟内就可以实现温度平衡。

TC试验和TST试验测试关注的位置也存在差别。TC试验主要模拟外界温度变化对功率器件的影响, 一般关注芯片与DCB、DCB与基板连接的位置^[5,6]; TST试验主要模拟功率器件在被动温度变化的情况下对机械应力的抵抗能力, 一般关注功率器件封装、基板与陶瓷基覆铜板(DCB)的连接位置^[6]。功率器件受热和冷却时, 容易出现由于膨胀系数不同, 在功能层和互联层产生对方机械应力, 使器件分层、断裂、焊点疲劳等, 导致最终失效。超声波扫描显微镜(SAM)可以无损检测器件内部的结构变化, 是检测功率器件分层的有效方法。

功率循环试验

功率循环(Power Cycling, PC)试验是功率器件封装可靠性中重要的可靠性测试之一。在车规芯片测试领域, PC试验也是AEC-Q101的必测项目。在PC测试中, 器件被加载恒定的直流电流, 器件运行过程的功率损耗会导致芯片升温。当器件升温至最高目标温度时, 关断负载电流并使器件冷却至最低温度, 以此为周期模拟器件工作过程中的结温波动, 来评估



■ 图5 功率器件PC测试常见失效原因
(a)为键合线失效, (b)为焊料失效

器件封装的可靠性^[7]。测试过程中,实时监测被测器件的正向或饱和压降 V_{ce} ,通过计算得到器件内部芯片的结温差 ΔT_{vj} 和热阻 R_{th} 。当 R_{th} 或 V_{ce} 增大20%时,判断器件失效。

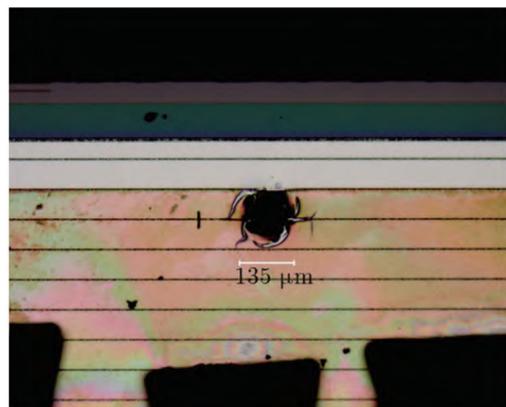
功率器件常见的失效原因有键合线失效、焊料失效和表面金属化重构。其根本原因是功率器件的铜绑定线与芯片表面铝层,以及芯片与DBC板之间的热膨胀系数不同,在器件中产生热机械应力导致的^[8]。

辐照试验

功率器件在太空或地面应用时,需要考虑由宇宙射线引起的失效。宇宙射线的粒子来源包括银河宇宙射线、太阳宇宙射线和地球辐射带三种。其中银河宇宙射线由85%的质子、13%的 α 粒子、1%

的重离子等构成。银河宇宙射线具有极大的动能,会对航天器造成瞬态或永久的损伤。太阳宇宙射线中包含质子、电子、重离子和 α 离子。太阳宇宙射线具有能量高、强度大等特点。地球辐射带也是范艾伦辐射带,指地球近地磁层内高强度、高能量带电离子的捕获区域,主要由质子、电子等离子组成,这些离子沿地磁场力线螺旋运动,在地磁两极间来回震荡并伴随东西方向飘逸,目前的航天器大多处于地球俘获带内。中子在宇宙射线中的含量非常少,但是由于中子不带电,使其能逃地球辐射带到达地面,因此地面辐射主要以中子为主。

粒子加速器装置可以模拟电子器件的辐射环境,开展辐照试验。功率器件应用在空间辐射环境时,受器件内部材料、集成度、工作模式及所处环境不同,器件的辐射响应也存在差异^[9]。通常,辐射环境下的损伤效应主要有总剂量效应、单粒子效应、位移损伤效应等。其中位移损伤效应主要指中子、质子、 α 离子、重离子等



■ 图6 Ta离子辐照SiC肖特基二极管发生单粒子烧毁(SEB)时,器件表面留下的熔坑形貌图^[9]

入射半导体材料中，破坏材料原子晶格排列状态。通常这种损伤会增加器件中的复合中心，减少少数载流子数量，影响依靠少数载流子工作的双极类器件性能。总剂量效应会造成长期在轨运动接受累计辐射器件的性能出现退化。对于 MOS 结构器件，辐射环境中的带电粒子与器件内部氧化物作用，在氧化物中产生电荷，导致器件电学性能退化甚至完全失效。单粒子效应是指具有足够 LET 值的单个高能离子入射到器件内部，在离子路径上电离出大量电子-空穴对，在电场作用下被收集，导致器件功能异常或失效。常见的单粒子效应有单粒子翻转（SEU）、单粒子锁定（SEL）、单粒子烧毁（SEB）等。EC TS/62396 技术规范给出了航空器电子设备可能遭遇的电离辐射环境理性、大气中子诱导航空电子设备单粒子效应敏感度测试方法、辐射环境对电子设备潜在影响，以及处理这些影响的方法。

可靠性试验展望

开展组合测试，提高功率电子元器件的可靠性

对于标准化的可靠性测试，虽然每种测试都有规范的测试流程，但每个试验都是使用全新的器件进行测试，其测试结果仅能表征单一测试环境的影响。但器件在实际使用过程中，可能出现多种因素叠加作用的情况，如高温和宇宙射线。因此，通过对功率器件连续开展不同测试项的测试或同时开展多测试项的测试，对提高器

件可靠性具有一定的意义。

利用人工智能技术，推动测试自动化和智能化

人工智能和大数据的发展将会推动可靠性测试朝着自动化、智能化方向发展。人工智能可以在数据收集、结果预测、自动化测试、异常检测等环节发挥作用。如通过收集和分析大量测试数据，建立数据模型，可以用于预测产品的性能变化。通过深度学习技术，还可以对测试数据进行学习和分析，提高预测的准确性。

聚焦宽禁带半导体，完善测试标准

在宽禁带功率器件领域，可靠性测试标准相对缺乏，此外新兴材料和工艺也需要更加细致和全面的测试标准来评估其可靠性。由于 SiC 等宽禁带功率器件在高压、高频、高温等极端工作条件下的特殊性，传统的半导体器件测试标准可能无法完全适用于宽禁带功率器件。因此，需要针对宽禁带功率器件的特殊性，制定更为完善的可靠性测试标准。

总结

可靠性测试是验证功率器件可靠性能力的重要环节，对于提高功率器件乃至整个电力系统可靠性至关重要。目前，功率器件可靠性试验技术已在国内外得到大范围推广和应用，并有一系列试验技术标准作为依据，功率器件可靠性测试日趋成熟。同时，随着器件性能提升、集成度升高，

以及应用环境更加复杂，对器件可靠性的指标也逐渐严苛，亟需可靠性试验新技术来突破瓶颈。同时，需要可靠性测试人员开展更加深入的研究，提升国内可靠性测试领域的实验技术水平。围绕功率器件，本文阐述了几种常用的可靠性试验方法，并展望了可靠性测试的未来发展情况，期望可以为功率器件可靠性测试和数据分析提供借鉴。

参考文献:

[1] 胡敏, 彭俊睿. 肖特基二极管高温反向偏置失效分析与改善 [J]. 电子与封装, 2022. 22(3): 5.
[2] Sheng Li, Chi Zhang, Siyang Liu, Jiaying Wei, Long Zhang, Weifeng Sun, Youhua Zhu, Tingting Zhang, Dongsheng Wang, Yinxia Sun, Reliability concern of quasi-vertical gan schottky barrier diode under high temperature reverse bias stress[J]. Superlattices and Microstructures, 2019. 130:233.
[3] 邓二平, 孟鹤立, 王延浩, 吴宇轩, 赵志斌, 黄永章. 高压大功率器件用高温栅偏测试装置研制 [J]. 中国电力, 2021. 54(2): 7.
[4] Cimmino, D., Busca, R., Ferrero, S., Pirri, F., Carta, R.. High Voltage Temperature Humidity Bias

Test (THB) customized system and methodologies for reliability assessment of power semiconductor devices[J]. Microelectronics Reliability, 2019. 100-101: 113319.
[5] 何延强. 功率 VDMOS 器件失效分析与可靠性研究 [D]. 哈尔滨理工大学. 2023.
[6] 杨凯龙. 功率分立器件封装热阻与热可靠性试验数值模拟研究 [D]. 上海交通大学. 2023.
[7] 黄东巍, 吕贤亮, 李旭. VDMOS 功率循环试验中结温在线监测方法研究 [J]. 国外电子测量技术. 2020. 39(7): 5.
[8] 邓二平, 严雨行, 陈杰, 谢露红, 王延浩, 赵雨山, 黄永章. 功率器件功率循环测试技术的挑战与分析 [J]. 中国电机工程学报. 2023. 043(013): 5132.
[9] 闫晓宇, 胡培培, 艾文思, 翟鹏飞, 赵培雄, 李宗臻, 刘杰. 重离子在 SiC、GaN、Ga2O3 宽禁带半导体材料及器件中的辐照效应研究 [J]. 现代应用物理. 2022. 13(1): 010603.

作者信息:

- 艾文思** 中国软件评测中心集成电路与可靠性研究测评事业部技术副总监
高宏玲 中国软件评测中心集成电路与可靠性研究测评事业部总经理
翟腾 中国软件评测中心集成电路与可靠性研究测评事业部技术总师
郭青帅 中国软件评测中心集成电路与可靠性研究测评事业部技术副总监



在线阅读(节选)