

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXX—XXXX

车规级垂直结构 LED 芯片可靠性评价规范

Reliability evaluation specification for automotive-grade vertical structure LED chips

（征求意见稿）

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国西部开发促进会 发 布

目次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 可靠性分级 4

 4.1 分级要求 4

 4.2 封装方式适用性与差异 4

5 可靠性评价要求 5

 5.1 外观与结构 5

 5.2 热性能 5

 5.3 寿命要求 5

6 可靠性评价方法 6

 6.1 测试条件 6

 6.2 通用应力试验项目 6

 6.3 判定标准 7

7 评价规则 8

 7.1 综合评价 8

 7.2 失效分析与破坏性物理分析 8

 7.3 交付与判定 9

8 可靠性评价报告 10

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由江西兆驰半导体有限公司提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：（标准报批发布之前完善）。

本文件主要起草人：（标准报批发布之前完善）。

车规级垂直结构 LED 芯片可靠性评价规范

1 范围

本文件规定了车规级垂直结构LED芯片的可靠性分级、可靠性评价要求、可靠性评价方法、评价规则、可靠性评级报告等内容。
本文件适用于车规级垂直结构LED芯片。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GJB 548C 微电子器件试验方法和程序
GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限（AQL）检索的逐批检验抽样计划
GB/T 2423.1 环境试验 第2部分：试验方法 试验A：低温
GB/T 2423.2 环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温
GB/T 2423.3 环境试验 第2部分：试验方法 试验Cab：恒定湿热
GB/T 2423.22 环境试验 第2部分：试验方法 试验N：温度变化
GB 4599—2024 汽车道路照明装置及系统
GB/T 10485—2025 道路车辆 外部照明和光信号装置 环境耐久性
GB/T 28046.3—2011 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第3部分：机械负荷
SJ/T 11394 半导体发光二极管测试方法
IPC-TM-650 印制板测试方法手册（Test Methods Manual）
国标计划20252958T 车规级LED芯片可靠性评价方法（制定中）
AEC-Q102-Rev-A 基于失效机理的汽车用分立光电子半导体应力测试认证（Failure Mechanism Based Stress Test Qualification for Discrete Optoelectronic Semiconductors in Automotive Applications）
AEC-Q100-002 静电放电（HBM）敏感性分类
AEC-Q100-003 静电放电（MM）敏感性分类
AEC-Q100-011 静电放电（CDM）敏感性分类
AEC-Q101-001 晶圆目检
J-STD-020 非密封固态表面贴装器件湿度/回流焊敏感度分级（Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Nonhermetic Solid State Surface Mount Devices）
J-STD-002 元件引线、端子、接线片、端子和导线的可焊性测试（Solderability Tests for Component Leads, Terminations, Lugs, Terminals and Wires）
JESD22-A101 稳态温湿度偏置寿命（Steady-State Temperature-Humidity Bias Life Test）
JESD22-A102 加速抗潮湿高压锅试验（Accelerated Moisture Resistance -Unbiased Autoclave）
JESD22-A103 高温贮存寿命（High Temperature Storage Life）
JESD22-A104 温度循环（JESD22-A104）
JESD22-A105 功率和温度循环（Power and Temperature Cycling）
JESD22-A106 热冲击试验（Thermal Shock）
JESD22-A107 盐雾环境下的测试方法（Salt Atmosphere）

JESD22-A113 非气密性表面贴装元器件可靠性试验前的预处理 (Preconditioning of Nonhermetic Surface Mount Devices Prior to Reliability Testing)

JEDEC JESD51-1 集成电路热测量方法电气试验方法 (单半导体器件) [INTEGRATED CIRCUIT THERMAL MEASUREMENT METHOD - ELECTRICAL TEST METHOD (SINGLE SEMICONDUCTOR DEVICE)]

JEDEC JESD51-14 测量单通道热流半导体器件结-壳热阻的接口试验方法 (INTERFACE TEST METHOD FOR THE MEASUREMENT OF THE THERMAL RESISTANCE JUNCTION-TO-CASE OF SEMICONDUCTOR DEVICES WITH HEAT FLOW THROUGH A SINGLE PATH)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

垂直结构LED芯片 vertical structure LED chip

电流沿芯片外延层垂直方向 (从P面经有源区到N面) 流动的LED芯片结构。其核心工艺特征为: 通过衬底剥离技术 (激光剥离LLO或化学剥离) 去除原有蓝宝石/硅/碳化硅生长衬底, 采用底部金属键合或共晶焊接技术将外延层转移至高导热基板 (如Si、CuW、AlN等), 形成上下电极垂直分布的结构。与横向正装LED相比, 垂直结构LED具有电流分布均匀、热阻低、散热路径短、抗ESD能力强、适合大电流密度驱动等优势。

3.2

车规级 automotive grade

产品满足汽车电子委员会 (AEC) 及整车厂规定的极端环境下的可靠性要求, 设计寿命通常不低于15年或15万公里; 需通过AEC-Q102全项或对应等级组别可靠性验证, 适用于-40℃~150℃宽温域车载环境。车规级芯片须在宽温度范围、高湿度、强振动、电磁干扰等恶劣工况下保持稳定的光电性能, 失效率要求达到零缺陷 (Zero Defect) 目标。

3.3

衬底剥离 substrate removal

将LED外延层从原始生长衬底 (蓝宝石/硅/碳化硅) 上分离的工艺过程。主要技术路线包括: 激光剥离 (Laser Lift-Off, LLO), 利用紫外激光透过衬底辐照GaN/衬底界面, 使界面GaN分解为Ga和N₂实现剥离; 化学剥离, 通过选择性湿法腐蚀去除牺牲层或衬底。衬底剥离质量直接影响垂直结构芯片的成品率和长期可靠性, 剥离后外延层应无裂纹、无残余应力集中、无表面损伤。

3.4

共晶界面 eutectic bonding interface

垂直结构LED中, 通过共晶焊接 (Eutectic Bonding) 工艺在外延层底部与高导热基板之间形成的金属键合界面。常用共晶体系包括AuSn (Au80Sn20, 熔点约280℃)、AuSi、AuGe等。共晶界面是垂直结构LED的关键可靠性薄弱环节, 其质量以共晶层空洞率 (Void Ratio) 评价: 单个空洞面积不得大于键合总面积的10%, 累计空洞面积不得大于键合总面积的20%。共晶界面失效表现为分层 (Delamination)、空洞聚合并、界面氧化等。

3.5

垂直欧姆接触 vertical ohmic contact

垂直结构LED中电流从P电极经外延层流向N电极路径上的金属-半导体欧姆接触界面。包括P型GaN与金属反射镜之间的P面欧姆接触, 以及N型GaN与N电极之间的N面欧姆接触。欧姆接触质量通过比接触电阻率 ρ_c (单位: $\Omega \cdot \text{cm}^2$) 表征。垂直欧姆接触劣化 (如金属-半导体界面互扩散、氧化、电迁移) 将导致正向电压 (V_f) 异常升高和串联电阻 R_s 激增, 是本文件重点管控的垂直结构专属失效模式。

3.6

结温 junction temperature; T_j

LED芯片PN结有源区（Active Region）的实际工作温度。结温是影响芯片光效、峰值波长、正向电压、寿命及可靠性的核心热学参数。结温测量采用正向电压法（电学法），依据JEDEC JESD51-1标准，利用PN结正向电压与温度之间的线性关系（K系数法）间接测量。

注：结温计算公式： $T_j = T_a + P_d \times R_{\theta ja}$ ，其中 T_a 为环境温度， P_d 为耗散功率（ $= I_f \times V_f - P_{opt}$ ）， $R_{\theta ja}$ 为结到环境的总热阻。

3.7

L50/L70/L90寿命 L50/L70/L90 service life

指LED输出光通量或光强衰减至初始值的某一百分比时对应的工作时间：L50=50%光衰，L70=30%光衰，L90=10%光衰。L50寿命是车规级LED芯片的核心耐久性指标，本文件要求车规级垂直结构LED芯片的L50寿命不低于100000h（10万小时），对应约11.4年的连续工作时间；L50寿命由高温工作寿命试验（HTOL）通过Arrhenius加速模型外推得到。对于前照灯/ADB等严苛装车位置，建议额外考核L70（光衰30%）与L90（光衰10%）寿命，L90应不低于20000h。

3.8

高温高湿反向偏压试验 high temperature high humidity reverse bias test; H3TRB

条件为85℃/85%RH环境温度湿度下施加额定反向偏压，持续时间1000 h。本试验旨在加速考核芯片在湿热和电应力耦合条件下的抗电化学腐蚀、抗金属迁移（银迁移/铜迁移）及抗湿气渗透能力，是车规级LED最关键的环境可靠性试验项目之一。对于垂直结构LED，H3TRB重点排查垂直PN结边缘漏电和衬底界面腐蚀。

3.9

硫化氢腐蚀 hydrogen sulfide corrosion

LED芯片在含硫化氢（H₂S）气氛中发生的化学腐蚀现象。汽车尾气、工业排放等环境中的H₂S可与芯片电极中的银（Ag）反应生成不导电的硫化银（Ag₂S）晶须，导致电极发黑、导电性下降甚至开路失效。本文件规定H₂S腐蚀试验条件为：温度40℃、相对湿度90%RH、H₂S浓度10 ppm、试验时间96 h。试验后芯片电极不得有发黑、腐蚀痕迹，光电参数变化控制在允许范围内。

3.10

热阻 thermal resistance

表征LED芯片散热能力的热学参数，定义为芯片稳态工作时结温与环境温度的差值同耗散功率的比值，单位为℃/W（或K/W）。对垂直结构LED芯片，重点管控结到焊点热阻和结到基板热阻。热阻测量采用电学法（正向电压法），依据JEDEC JESD51-1和JESD51-14标准。可靠性试验过程中热阻增幅超过初始值的10%即判定为热性能劣化失效。

3.11

共晶封装 eutectic die attach

使用AuSn等共晶焊料将芯片焊接于基板的贴装工艺，导热导电性好、热阻低、耐温高，是大功率车灯的主流方案。共晶界面质量以空洞率与金属间化合物（IMC）生长管控，关键附加试验为剪切力/空洞率（X-Ray/C-SAM）。

3.12

银胶封装 silver epoxy die attach

使用导电银胶（Ag Epoxy/Ag Paste）将芯片粘接固定于基板/支架的贴装工艺。相较共晶焊料，银胶工艺简单、成本低、应力缓冲好，但热阻较高、耐温上限较低，需重点关注固化质量、空洞率、银迁移与硫化等失效模式。银胶层厚度建议15 μm~50 μm，固化度≥95%。

3.13

破坏性物理分析 destructive physical analysis; DPA

在不影响密封性判定前提下对样品开盖/解抛/研磨，检查内部外观、键合与焊接界面的分析方法。用于验证内部结构与工艺一致性，是应力试验后可靠性判定的重要依据，参照AEC-Q系列报告模板及GJB548要求执行。

3.14

湿度敏感等级 moisture sensitivity level; MSL

按J-STD-020分为MSL1~MSL6，表征非气密封装器件在回流焊前的吸湿敏感程度。本文件要求先完成Pre-condition（吸湿+3次回流）再判定外观与功能，前照灯/ADB组建议MSL1，信号灯/车内组MSL2~3。

3.15

样品形式 sample configuration

为便于芯片级可靠性评价，按封装完成程度分为三类：封装——已完成芯片贴装、引线键合及最终塑封/加盖/点胶保护等完整封装工序的样品；半封装——已完成芯片贴装与引线键合，但未进行最终塑封/加盖/点胶保护的样品；不封装——仅完成芯片贴装，未进行任何封装保护，可用于裸芯片或芯片+基板状态的样品。

4 可靠性分级

4.1 分级要求

根据汽车装车位置、应用场景的严苛程度以及功能安全要求，本文件不按等级符号分级，而是按装车位置直接给出对应的可靠性试验条件、样品数量与寿命要求。各装车位置对应的试验组别、样品数与核心可靠性要求见表1。

表1 分级要求

装车位置/典型应用	结温范围 T _j	试验组别	样品数量	失效判据	寿命要求	关键附加要求
前照灯（远光/近光）、ADB 矩阵光源、AFS 自适应前照灯、DRL 日间行车灯	-40℃~175℃	A+B+C+E+G 全项目	77 pcs	零失效	L50≥100000 h	ADB 矩阵场景 附加 PLT10 ⁶ 次脉冲开关 寿命
尾灯、制动灯、转向灯、高位制动灯、雾灯	-40℃~150℃	A+B+C+E	55 pcs	零失效	L50≥80000 h	—
内饰氛围灯、仪表背光、空调面板背光、按键背光、阅读灯、AR-HUD 背光	-40℃~125℃	A+C+E	33 pcs	零失效	L50≥50000 h	—
注1：试验组别按AEC-Q102典型分组（A环境应力/B加速寿命/C封装完整性/E电气验证/G特殊应用与脉冲寿命），具体试验项目见本文件第6章。 注2：ADB/AFS矩阵式像素级控光场景须追加PLT（Pulse Life Test，10 ⁶ 次脉冲开关循环）试验，详见6.2第（23）项。 注3：结温范围按各装车位置典型工作温度给出；实测结温应满足本规范第5章热性能及第6章判定标准要求。						

4.2 封装方式适用性与差异

4.2.1 两种封装方式在热阻、耐温上限与工艺窗口上的差异直接影响可靠性判定，封装方式适用等级与关注点见表2。

表2 封装方式适用等级

对比项	共晶封装（Eutectic）	银胶封装（Silver Epoxy）
贴装材料	AuSn 等共晶焊料（金属键合）	导电银胶（聚合物+银填料）
热阻 R _{th}	低，导热性好	较高（约为共晶的1.2~1.5倍）
耐温上限	可长期（量化）承受150℃以上	受银胶 T _g 限制，建议≤125℃长期工作
建议装车位置	前照灯/ADB/AFS/DRL、信号灯、车内照明（全部装车位置）	信号灯、车内照明（不建议用于前照灯/ADB 严苛场景，需专项验证）

工艺要求	需控空洞率/IMC 生长	需控固化度、空洞率、胶层厚度一致性
主要失效模式	焊料疲劳、IMC 脆化、空洞	银胶老化、分层、空洞、银迁移、硫化
关键附加试验	剪切力/空洞率（X-Ray/C-SAM）	见 6.3 银胶封装补充试验

4.2.2 银胶封装用于前照灯/自适应远光系统（ADB）等高结温装车位置时，应按实测热阻核算结温，确保结温不超过银胶长期耐温上限（一般 $\leq 125^{\circ}\text{C}$ ），否则应选用共晶封装或加严寿命考核。

5 可靠性评价要求

5.1 外观与结构

5.1.1 芯片表面

无崩边、裂纹、划痕、脏污、氧化、麻点，边缘整齐；衬底剥离完整无残留，金属键合层无分层、空洞（空洞率 $< 5\%$ ）、剥离、偏移。

5.1.2 垂直结构

底部共晶焊界面连续均匀，无异常金属间化合物（IMC）生长或氧化；银胶封装应无银胶层开裂、分层与硫化变色。

5.1.3 电极材料

采用金、镍金、铝等车规级材料，电极完整、位置准确、无缺损；电极金属体系需耐受 H_2S /混合气体腐蚀。银胶封装电极应无银迁移、无硫化。

5.2 热性能

5.2.1 热阻

Grade 1 $\leq 6^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，Grade 2 $\leq 8^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，Grade 3 $\leq 10^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ；热冲击后热阻增幅 $\leq 10\%$ 。银胶封装应按实测热阻折算结温并计入银胶层热老化影响。

5.2.2 散热能力

额定电流连续工作2 h，结温稳定无过热；红外热像确认芯片表面温度分布均匀，热点温差 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 。

5.3 寿命要求

5.3.1 按应用类别区分的寿命指标

5.3.1.1 不同车灯应用的光输出累计时长与热负荷差异显著，故寿命考核指标（L50 或 L70）与最低寿命要求不同，见表 3。

表 3 寿命考核指标（L50 或 L70）与最低寿命要求

应用类别	考核指标	最低寿命要求	补充说明
前照灯（大灯）	L70	$\geq 30000\text{ h}$ （典型）/依客户规格可加严至 $\geq 50000\text{ h}$	高功率连续工作，须考核光衰 L70；可附加色坐标漂移限值
日间行车灯（DRL）	L70/L50	$L70 \geq 20000\text{ h}$ ， $L50 \geq 100000\text{ h}$	高占空比、高结温，L70 为主、L50 兜底
尾灯/刹车灯	L50	$\geq 100000\text{ h}$ （10 万小时，约 11.4 年连续工作）	工作时间短、热负荷低，L50 即可满足
转向灯	L50	$\geq 50000\text{ h}$	脉冲工作为主，累积通电时长较低
雾灯	L70	$\geq 15000\text{ h}$	高湿/振动环境，兼顾密封性
车内氛围灯/阅读灯	L50	$\geq 50000\text{ h}$	非严苛环境，关注色温一致性

5.3.1.2 基准要求（沿用原规范）：车规级垂直结构 LED 芯片 L50 寿命不低于 100000 h（对应约 11.4 年连续工作）。对前照灯/自适应远光系统（ADB）等严苛装车位置，建议额外考核 L90 寿命，不低于 20000 h。

5.3.1.3 高功率/长点亮应用（前照灯、DRL）应以 L70 为主考核，避免以 L50 掩盖光衰问题；低占空比应用（尾灯、转向灯）以 L50 考核。

5.3.1.4 银胶封装寿命说明：银胶封装热阻高于共晶，相同功率下结温更高，光衰速率相应加快。寿命推算应按银胶封装实测热阻折算结温，并计入银胶层热老化影响；在满足封装方式适用性约束的前提下，寿命指标按表 3 执行。对高结温工况，宜同时考核银胶剪切强度随时间的退化。

5.3.2 寿命试验与推算

5.3.2.1 采用高温工作寿命（HTOL，见 6.2）加速，结合阿伦尼乌斯（Arrhenius）模型与光衰外推至正常使用条件。

5.3.2.2 寿命推算应给出置信水平（建议 90%/60% B 寿命）及失效判据（L70/L50 光衰或参数越界）。

5.3.2.3 推算寿命应覆盖各应用类别的最低寿命要求，并按最严苛装车位置（前照灯/ADB 组）验证。

6 可靠性评价方法

6.1 测试条件

6.1.1 标准环境：温度 $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 45%~75%，大气压 86 kPa~106 kPa。

6.1.2 测试样品：同批次、外观合格、光电参数符合要求；

6.1.3 预处理：参照 JESD22-A113 中的相关要求， $125^{\circ}\text{C}/24\text{ h}$ 除湿+3 次 260°C 回流焊。

6.1.4 测试设备：光电参数测试仪（积分球+光谱仪）。

6.1.5 试验设备：满足标准要求的试验设备、检查设备。

6.2 通用应力试验项目

6.2.1 以下试验项目尽可能覆盖 AEC-Q102 完整应力测试序列，并补充 MSL、耐焊接热、ESD 分级、DPA 等要求，对所有装车位置（前照灯/ADB 组、信号灯组、车内照明组）均适用；具体试验组别（A/B/C/E/G）与样品数量按本文件第 4 章各装车位置选取。试验顺序参考 AEC-Q102 推荐流程。

6.2.2 为便于芯片级评价实施，表 4 增加“样品形式”列，明确各试验可接受的样品封装状态（封装、半封装、不封装）。

表 4 评价实施

序号	试验项目	标准依据	主要试验条件（示例）	判定要求	样品形式	DPA	适用范围
1	预处理 PC	JEDEC JESD22-A113	电性能全参数测试+ 基准建立	Δ 在 6.4 判定标准 限值内	已封装/半 封装/不封 胶	不需要	全部装车 位置
2	温度循环 TC	JESD22-A104	$-40^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$ ，500~ 1000 cycles	参数漂移 $\leq$ 规格，无 开裂	封装	建议	全部装车 位置
3	功率温度循环 PTC	JEDEC JESD22-A105	-40°C $T_s = 125^{\circ}\text{C}$ ，加 电（额定 IF），转换 $<10\text{ s}$ ，500~1000 cycles	无参数漂 移，无开裂	封装，加电	建议	全部装车 位置
4	高温高湿工作 寿命 WHTOL1	JEDEC JESD22-A101	$85^{\circ}\text{C}/85\%\text{RH}$ ，1000 h， 大电流（ $0.7 \sim 1.0 \times$ 额定 IF）	IR/光衰合 格，无腐蚀	半封装/封 装，加电	建议	全部装车 位置
5	高温高湿工作 寿命 WHTOL2	JEDEC JESD22-A101	$85^{\circ}\text{C}/85\%\text{RH}$ ，1000 h， 小电流（ $1\text{mA} \sim 1\% \times$ 额 定 IF）	IR/光衰合 格，无腐蚀	半封装/封 装，加电	建议	全部装车 位置
6	高压蒸煮 AC	JESD22-A102 (PCT)	121°C ，100%RH，2 atm， 96~168 h	无分层/腐 蚀，参数合 格	封装	建议	全部装车 位置
7	高温工作寿命 HTOL-1	JEDEC JESD22-A108	最大电流- T_s ：IFmax， $T_s = 125^{\circ}\text{C}$ ，1000 h	L50/L70 达标，无早 期失效	封装/半封 装，加电	建议	全部装车 位置
8	高温工作寿命 HTOL-2	JEDEC JESD22-A108	额定电流-最高结温： IFrated， $T_j = T_{j\text{max}}$ ， 1000 h	L50/L70 达标，无早 期失效	封装/半封 装，加电	建议	全部装车 位置

9	短时高结温 HTOL-3	JEDEC JESD22-A108	前照灯/DRL： Tj=170℃，168 h	无参数失 效，无结构 损伤	封装/半封 装，加电	建议	前照灯 /DRL
10	低温工作寿命 LTOL	JEDEC JESD22-A108	-40℃，额定 IF，1000 h，开关时间 5min 或 30min	光/电参数 合格	封装，加电	建议	全部装车 位置
11	静电释放人体 模型-HBM	ANSI/ESDA/JE DEC JS-001	±2000 V（前照灯 /ADB）/±1000 V（信 号灯/车内）	试验后功 能正常	不封胶/封 装	不需要	全部装车 位置
12	静电放电带电 器件模型-CDM	AEC-Q101-005 ANSI/ESDA/JE DEC JS-002	±500 V（前照灯/ADB） /±250 V（信号灯/车 内）	试验后功 能正常	不封胶/封 装	不需要	全部装车 位置
13	湿度敏感等级 MSL	J-STD-020 (Pre-con/Ref low)	MSL1（前照灯/ADB） /MSL2~3（信号灯/车 内），3×回流	回流后无 分层/爆米 花，参数合 格	封装	建议	全部装车 位置
14	可焊性 SD	JEDEC J-STD-002 or IEC 60068-2-58 (SMD)	常规：回流焊峰值 260℃/10 s；金锡等 客户自定义：浸焊 260℃/10 s 或客户指 定回流曲线	无分层，参 数合格	封装	建议	全部装车 位置
15	焊球推力 WBS	JESD22-B116	推刀速度 0.5mm/s；焊 球最大剪切力	无芯片脱 落、分层、 基底损伤	半封装	不需要	全部装车 位置
16	焊线拉力 WBP	MIL-STD-750- 2 Method 2037	按线径对应最小拉力	无颈缩断 裂，达力值	封装	不需要	全部装车 位置
18	芯片剪切 DS	MIL-STD-750- 2 Method 2017	按芯片尺寸对应最小 剪力	无界面断 裂，达力值	不封胶/半 封装	不需要	全部装车 位置
19	热阻 TR	JEDEC JESD51-50 JESD51-51 JESD51-52	Rth/热瞬态测试	Rth≤规格 上限	不封胶/半 封装	不需要	全部装车 位置
20	破坏性物理分 析 DPA	AEC-Q102 Appendix 6	解抛+内部目检+推 力+研磨	见 7.3 判 定	封装	—	全部装车 位置
21	脉冲寿命 PLT （ADB 矩阵附 加）	JEDEC JESD22-A108	10 ⁶ 次脉冲开关循环	无光学/电 学失效，参 数合格	封装/半封 装	建议	ADB/AFS 矩 阵光源
注1：AEC-Q102推荐以HTOL进行寿命外推；MSL须先做Pre-condition（吸湿+3次回流）再判外观与功能。 注2：耐腐蚀试验（盐雾/混合气体/外部介质）因行业争议较大、当前多数产品难以通过，本版暂不作为强制项；建议根据实际装车环境由客户自定义条件后作为型式检验建议项执行。 注3：WHTOL1/WHTOL2条件分别对应高温高湿大/小电流单流要求；WHTOL2为正向小电流，非反向偏压。							

6.3 判定标准

表5为芯片关键光电/电学参数的验收限值。按最新要求，判定标准聚焦IR、开启电压（Vf1）、工作电流下正向电压（Vf4，即额定IF下Vf）、光通量/光强与峰值波长五项核心参数；热阻、击穿电压等纳入规格书或工艺文件管控，不在表5重复判定。反向漏电流（IR）收紧为最大1 μA。

表 5 芯片关键光电/电学参数的验收限值

参数	符号	前照灯/ADB 组 限值	信号灯组限值	车内照明组限 值	测试条件	说明
----	----	-----------------	--------	-------------	------	----

反向漏电流	IR	$\leq 0.5 \mu A$	$\leq 1 \mu A$	$\leq 1 \mu A$	额定反向电压 VR	缺陷筛选
开启电压（小 电流 Vf）	Vf1/Vf_start	Vf @1 μA 偏差 $\leq \pm 0.10 V$	Vf @1 μA 偏差 $\leq \pm 0.10 V$	Vf @1 mA 偏差 $\leq \pm 0.15 V$	IF=1 μA	用于启动一致 性与缺陷筛选
正向电压（额 定 Vf）	Vf4/Vf Rated	标称值 ± 0.10 V	标称值 ± 0.10 V	标称值 ± 0.15 V	额定 IF	—
光通量/光强	Φ_v/I_v	标称值 $\pm 10\%$	标称值 $\pm 10\%$	标称值 $\pm 12\%$	额定 I, 25℃	—
峰值波长	λ_p	标称值 $\pm 3 nm$	标称值 $\pm 5 nm$	标称值 $\pm 5 nm$	额定 IF	—

说明：本表作为本文件第6章全部可靠性项目及本文件第7章综合评价的判定依据。任一参数超出表中限值即判定该样品对应项目不合格。

7 评价规则

7.1 综合评价

7.1.1.1 同时满足以下全部条件，判定为对应等级合格：

- 本文件第5章外观与结构、热性能全部指标合格，本文件第6章判定标准全部参数合格；
- 环境可靠性、机械可靠性、寿命可靠性三项单项评价全部合格；
- 符合各装车位置（前照灯/ADB组、信号灯组、车内照明组）对应的全部特定要求（见表1）；
- 批次样品数量满足要求，零失效原则：任一试验项目中任何1 pcs出现失效，即判定该批次整批拒收，不得降级放行。

7.1.1.2 任一条件不满足，判定该批次不合格。不合格批次应出具失效分析报告，锁定根因后整改重测。同一型号连续两批次不合格，暂停供货并启动专项工艺审查。

7.2 失效分析与破坏性物理分析

失效分析（FA）与破坏性物理分析（DPA）关注点相近，均用于定位芯片内部界面、键合、封装及腐蚀类失效；失效分析（FA）侧重失效样品的根因追溯与改进闭环，破坏性物理分析（DPA）侧重试验后批量一致性抽样解剖与内部结构验证。两者可共用解封、内部目检、截面制备、扫描电子显微镜（SEM）/能量色散X射线光谱仪（EDX）等分析手段，并共享判定标准。

7.2.1 失效分析流程

按三阶段递进分析：

- 第一阶段（非破坏性）：外观显微镜检查→IV曲线测试→X-Ray透视等，初步定位失效位置；
- 第二阶段（半破坏性）：微光显微、红外热像定位热点→聚焦离子束（FIB）截面制备→SEM形貌观察；
- 第三阶段（破坏性）：金相剖切→EDX成分分析→共晶层空洞率统计→衬底界面TEM观察。银胶封装另需截面SEM+EDS确认银胶层老化、分层与硫化（Ag₂S）产物。

7.2.2 失效模式判定

按表6典型失效模式进行分类判定：共晶空洞分层、衬底剥离裂纹、垂直电极硫化腐蚀、PN结垂直漏电击穿、湿热边缘漏电、混合气体腐蚀、电极疲劳断裂共7类。

表6 典型失效模式进行分类判定

编号	失效模式	失效现象	关联试验	失效机理	分析方法	判定标准	改进方向
1	共晶空洞分层	底部共晶层出现空洞（面积>10%），SAM	TC、PTC、TS、HTOL	共晶焊工艺不良、CTE失配、热应	金相剖切→SEM→EDX成分→空洞率	空洞面积 $\leq 10\%$ ，无贯穿性分层	优化共晶温度曲线、增加助焊剂活

		显示分层信号		力累积致界面剥离	统计		性、管控衬底平整度
2	衬底剥离裂纹	硅/GaAs 衬底与外延层界面剥离, SEM 可见微裂纹	TC、TS、DEW	衬底剥离工艺残留应力、热胀系数差异、湿气侵入界面	X-Ray→截面 FIB→EDX	无裂纹、无界面剥离	优化衬底减薄工艺、增加应力释放退火、改进钝化层
3	垂直电极硫化腐蚀	底部金属电极变色发黑, EDX 检出 S 元素, Ir 异常增大	H ₂ S、F 组 MFG	H ₂ S/含硫气体渗透封装, 与 Ag/Cu 电极反应生成硫化物	外观检查→EDX→截面 FIB→XPS	无明显变色, Ir≤规范值、EDX 未检出 S	电极金属体系升级 (Au/Pt 替代)、封装气密性提升
4	PN 结垂直漏电击穿	IV 曲线异常, 反向 Ir 骤增, EL 发光不均或暗点	ESD、WHTOL2、HTOL	垂直 PN 结更薄, 静电/过压致结区局部击穿, 缺陷辅助漏电通道	IV 曲线测试→EMMI 热点定位→FIB 截面→TEM	IV 曲线正常, 无热点, Ir≤规范值	优化外延生长质量、增加 ESD 保护结构、管控缺陷密度
5	湿热边缘漏电	芯片边缘或台面处 Ir 增大, 光学显微镜可见边缘腐蚀痕迹	WHTOL1/WHTOL2	钝化层缺陷致水汽沿芯片边缘侵入, 形成漏电通道	光学显微镜→IV 测试→SEM 台面观察→FIB 截面	无边缘腐蚀, Ir≤10 μA	优化台面钝化工艺 (SiNx/SiO ₂ 叠层)、增加边缘密封环
6	混合气体腐蚀	电极表面变色、键合点脆化、光衰加速	MFG (建议项)	NO ₂ /Cl ₂ /SO ₂ 协同作用, 金属电极电化学腐蚀	外观→EDX→拉伸/剪切力测试→SEM	无变色、键合强度不下降、光衰≤规范值	封装材料抗腐蚀升级、增加气体阻隔层
7	电极疲劳断裂	金线/电极根部断裂, 开路或 Vf 骤增, 多见于 PLT 后	PLT、振动、TC	脉冲电流热机械应力、振动疲劳累积致金属疲劳断裂	光学显微镜→SEM 断口分析→拉力测试	无断裂、拉力≥规范值、Vf 无突变	优化金线弧高/线径、改进电极焊盘设计、增加应力缓冲结构

7.2.3 失效根因定位与改进闭环

7.2.3.1 定位根本原因 (工艺/材料/设计), 提出针对性改进措施, 执行 8D 闭环: D1 组建团队→D2 问题描述→D3 临时措施→D4 根因分析→D5 永久对策→D6 实施验证→D7 预防再发→D8 总结关闭。改进后重新抽样送检, 全项合格后方可恢复供货。

7.2.3.2 银胶封装典型失效模式及分析要点: ①银胶老化——长时间高温下银胶基体硬化、剪切强度下降, 表现为热阻升高、Vf 漂移; ②界面分层——湿热/热循环下银胶与芯片、基板脱粘, 导致局部过热烧毁; ③银迁移——温湿+偏置条件下银离子沿树脂/表面迁移形成漏电通道; ④硫化——车外含硫环境 (尾气、硫化橡胶) 使银层硫化发黑 (Ag₂S), 导电性与附着力恶化。分析时优先使用 X-Ray/C-SAM 定位空洞与分层, 再以截面 SEM+EDS 确认硫化与迁移产物。

7.2.4 DPA 流程与判定

7.2.4.1 DPA 在试验后按抽样进行: 解封/开盖→内部目检→键合推力/拉力→芯片剪切→研磨截面 (IMC/空洞/银胶层)→拍照归档。

7.2.4.2 判定要求: 内部外观无裂纹/分层/迁移/腐蚀; 键合强度≥线径对应最小值; 芯片剪切非界面脆断; 焊接界面 IMC 连续、空洞率≤10%; 银胶层厚度 15 μm~50 μm、空洞率≤10%、无分层/硫化。DPA 不合格批次判为不通过, 并启动失效分析。

7.3 交付与判定

T/CWDPA XXX—XXXX

7.3.1.1 可靠性鉴定交付物应包含：试验计划、原始数据记录、参数漂移曲线、寿命推算报告、DPA报告（含截面照片）、失效分析报告（如适用），格式参考 AEC-Q102 鉴定报告模板。

7.3.1.2 全部试验项目、分级要求、判定标准与 DPA 判定均满足本文件时，方可判定为通过车规级可靠性评价。

8 可靠性评价报告

可靠性评价报告应至少包含以下信息：试验计划、样品与批次信息、测试依据与设备、测试条件、原始数据记录、参数漂移曲线、寿命推算报告、DPA报告（含截面照片）、失效分析报告（如适用）、判定结论，关键金相/DPA照片分辨率 $\geq 300\text{dpi}$ 。
