

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXXX—XXXX

固态变压器用氮化镓半导体器件

Gallium nitride semiconductor devices for solid-state transformers

(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 录

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 技术要求	2
4.1 外观	2
4.2 应力要求	2
4.3 热应力要求	2
4.4 机械应力要求	2
4.5 可靠性要求	3
5 试验方法	4
5.1 试验条件	4
5.2 外观	4
5.3 电性能测试	4
6 检验规则	5
6.1 检验分类	5
6.2 出厂检验	5
6.3 型式检验	5
7 标志、包装、运输和贮存	6
7.1 标志	6
7.2 包装	6
7.3 运输	6
7.4 贮存	6

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。

本文件由中国西部开发促进会提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

固态变压器用氮化镓半导体器件

1 范围

本文件规定了固态变压器用氮化镓半导体器件（以下简称“器件”）的技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。

本文件适用于固态变压器用氮化镓半导体器件。

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。

- 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 2423.3 环境试验 第2部分：试验方法 试验Cab：恒定湿热试验
- GB/T 2423.5 环境试验 第2部分：试验方法 试验Ea和导则：冲击
- GB/T 2423.10 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）
- GB/T 2423.22 环境试验 第2部分：试验方法 试验N：温度变化
- IEC 61800-5-1：2022 调速电气传动系统 第5-1部分：安全要求 电气、热和能量（Adjustable speed electrical power drive systems-Part 5-1: Safety requirements-electrical, thermal and energy）
- AEC-Q101-001 离散半导体元件的应力测试标准（Failure Mechanism Based Stress Test Qualification For Discrete Semiconductors）
- AQG 324 功率半导体模块的资格认证测试（Qualification of power modules for use in power electronics converter units in motor vehicles）
- IPC-A-610 电子组件的可接受性（Acceptability of electronic assemblies）
- JEDEC JESD51-1 集成电路热测方法—电测方法（单半导体器件）（Integrated circuit thermal measurement method—electrical test method（Single semiconductor device））
- JEDEC JESD51-14 单通道热流半导体器件结壳热阻瞬态双界面测试方法（Transient dual interface test method for the measurement of the thermal resistance junction to case of semiconductor devices with heat flow through a single path）
- JEDEC JEP194：2023 宽禁带半导体开关特性测试指南（Guideline for gate oxide reliability and robustness evaluation procedures for silicon carbide power mosfets）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

固态变压器 solid-state transformer; SST

采用电力电子变换技术与高频隔离技术相结合，具备耐候性、模块化、智能化特征，能够实现电能的高效变换、并网控制及电能质量综合治理的电力电子装置。

3.2

氮化镓半导体器件 gallium nitride semiconductor devices

以氮化镓为衬底/外延材料制造的功率半导体器件，包括氮化镓高电子迁移率晶体管（GaN HEMT）、氮化镓肖特基势垒二极管（GaN SBD），具备宽禁带、高电子饱和速率、低开关损耗、高频工作的特性。

4 技术要求与可靠性

4.1 外观

- 4.1.1 器件封装应完整、规整，无裂纹、缺口、凹陷、扭曲变形、鼓包、分层等缺陷。
- 4.1.2 器件标识应清晰、完整、牢固，无模糊、脱落、错印、漏印。

4.2 应力要求

4.2.1 电应力要求

4.2.1.1 电压应力

额定电压裕度：器件的额定漏源击穿电压应不低于固态变压器实际工作峰值电压的1.2倍。

浪涌电压：器件应能承受2倍额定击穿电压的浪涌电压冲击，脉冲持续时间 $10\mu\text{s}$ ，正负极性各冲击100次，冲击后器件无失效，电性能参数变化率不超过 $\pm 10\%$ 。

栅极电压：GaN HEMT的栅极驱动电压应严格控制在器件手册规定的安全范围内，正向栅极驱动电压推荐值为 $+5\text{V}\pm 0.5\text{V}$ ，反向栅极关断电压推荐值为 $-2\text{V}\sim -3\text{V}$ ，不应超出标称栅压范围，避免栅极介质击穿。

4.2.1.2 电流应力

额定电流裕度：器件的额定连续漏极电流应不低于固态变压器额定工作电流的1.5倍。

浪涌电流：器件应能承受10倍额定电流的浪涌电流冲击，脉冲持续时间10ms，冲击次数10次，冲击后导通电阻变化率不超过10%，无永久失效。

di/dt管控：器件开关过程中的电流变化率应控制在器件手册允许范围内，避免过冲电流导致的器件失效。

4.2.2 局部放电绝缘要求

局部放电起始电压(PDIV)：在1.5倍器件最大工作电压下，局部放电量应 $< 5\text{pC}$ 。

绝缘耐压：考虑到高频振荡，绝缘耐压测试电压应提高至额定电压的2.5倍，持续时间1分钟，无闪络或击穿。

4.3 热应力要求

4.3.1 结温管控：器件的最高允许结温(T_{j_max})应不低于 150°C ；在固态变压器额定工作条件下，实际工作结温应控制在 T_{j_max} 的80%以内（即不超过 120°C ）；在1.2倍额定功率过载工况下（持续时间10min），结温不应超过器件标称的 T_{j_max} 。

4.3.2 热阻要求：器件结壳热阻(R_{th_jc})应符合器件规格书标称值，偏差不超过 $\pm 10\%$ ；结合固态变压器散热器设计，确保器件结壳热阻、壳-散热器热阻、散热器热阻的总热阻满足结温管控要求。

4.3.3 温度梯度要求：器件工作过程中，结温与壳温的温差避免过大的温度梯度导致封装材料老化开裂。

4.3.4 瞬态热阻抗要求：器件瞬态热阻抗应符合器件规格书标称值，满足高频开关工况下的瞬态热冲击管控要求，避免脉冲功率导致的结温尖峰超标。

4.4 机械应力要求

4.4.1 安装应力：表面贴装器件焊接应符合IPC-A-610的规定，通孔器件螺栓紧固力矩应符合器件手册规定，力矩偏差不超过 $\pm 10\%$ ，避免过大安装应力导致器件衬底开裂、焊料层疲劳。

4.4.2 振动应力：器件应能承受固态变压器正常运行时的持续振动应力，振动加速度不超过5g，频率范围10Hz~500Hz，长期工作无机械损伤、无焊接点脱落。

4.4.3 冲击应力：器件应能承受固态变压器运输、安装过程中的机械冲击，峰值加速度不低于30g，无结构损伤、无电性能失效。

4.5 可靠性要求

4.5.1 寿命要求

- 4.5.1.1 在固态变压器额定工作条件下，器件的平均无故障工作时间（MTBF）应不低于 1×10^5 h。
- 4.5.1.2 在苛刻工作条件（高温、额定电压上限、满功率连续工作）下，器件的 MTBF 应不低于 5×10^4 h。
- 4.5.1.3 器件设计使用寿命应不低于 15 年，匹配固态变压器整机设计寿命要求。

4.5.2 失效模式与失效判据

4.5.2.1 失效模式

器件在固态变压器应用中的失效模式包括。

- 栅极氧化层/钝化层击穿、栅极阈值电压漂移失效。
- 动态导通电阻异常漂移、电流崩塌导致的热失效。
- 结温过高导致的热疲劳、键合线脱落失效。
- 封装失效：引脚脱落、密封失效、焊料层开裂、衬底开裂。
- 电迁移导致的电极、键合线失效。

4.5.2.2 失效判据

器件出现以下任意一项情况，判定为失效。

- GaN HEMT 失效判据：
 - 漏源极击穿电压下降超过初始值的 20%；
 - 静态导通电阻增大超过规格书初始值的 50%；
 - 栅极阈值电压漂移量超过 $\pm 20\%$ 初始标称值；
 - 额定栅压下，栅极漏电流超过 $10 \mu\text{A}$ ；
 - 关断状态下，漏源极反向漏电流增大超过初始值的 10 倍；
 - 开关损耗增大超过规格书初始值的 50%。
- GaN SBD 失效判据：
 - 正向压降增大超过规格书初始值的 30%；
 - 反向漏电流增大超过初始值的 10 倍；
 - 反向击穿电压下降超过初始值的 20%。
- 封装失效判据：
 - 器件引脚间绝缘电阻低于 $100\text{M}\Omega$ （500V DC 测试条件下）；
 - 封装外壳出现裂纹、密封胶溢出、引脚脱落、焊料层开裂；
 - 气密性封装器件漏率超过 $1 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

4.5.3 环境适应性可靠性

器件应能承受固态变压器工作环境下的各类环境应力，试验后器件性能应符合 5.2.2 的失效判据要求，无机械损伤、无功能失效，具体要求如下。

- 温度循环可靠性：在 $-40^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$ 范围内进行 1000 次温度循环试验，升温/降温速率 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ，高低温端保温时间各 30min，试验后器件电性能无不可逆衰减；
- 湿热可靠性：在 40°C 、相对湿度 90%RH~95%RH 的环境下放置 1000h，试验后器件绝缘性能及电性能无明显衰减；
- 振动可靠性：在 10Hz~500Hz 频率范围内，承受加速度 5g 的正弦振动试验，X、Y、Z 三个轴向各持续 2h，试验后器件无机械损伤且电性能正常；
- 冲击可靠性：承受半正弦波冲击，峰值加速度 100g、脉冲持续时间 2ms，三个轴向各冲击 3 次，试验后器件无结构损伤、无电性能失效。
- 高温反偏 (HTRB)：依据 AEC-Q101 测试方法，温度 125°C ，偏置电压 $1.1 \times V_{\text{DS}}$ ，持续时间 1000h。
- 无偏高加速应力测试 (BHAST)：依据 AEC-Q101 测试方法，温度 130°C ，湿度 85%RH，持续时间 96h。
- 功率循环 (PC)：依据 AQG 324 测试方法（针对模块或高功率分立器件）， $\Delta T_j \geq 100^\circ\text{C}$ ， $> 10,000$ 次循环。

h) 机械冲击与振动：依据 AEC-Q101 随机振动谱及板级跌落要求进行测试。

5 试验方法

5.1 试验条件

5.1.1 标准测试环境条件。

- a) 环境温度 $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。
- b) 相对湿度 45%RH~75%RH。
- c) 大气压力 86kPa~106kPa。
- d) 无强电磁干扰、无机械振动。

5.1.2 测试所用仪器设备应经过法定计量机构校准。

5.1.3 测试前，样品应在标准测试环境中静置 24h，确保器件温度与环境温度平衡，测试前应完成初检，确认器件无外观损伤、无功能异常。

5.1.4 所有测试项目应在器件标称工作条件下进行，特殊测试项目的环境条件应在测试方法中明确规定。

5.2 外观

正常光照条件下，以目视检查。

5.3 电性能测试

5.3.1 静态电性能测试

静态电性能测试方法见表1。

表 1 静态电性能测试

测试项目	测试方法	合格判据
漏源击穿电压 (V_{br_dss})	栅源极短路,施加反向漏源电压至漏电流达到规格书规定值,记录击穿电压值	不低于器件额定值,偏差不超过 $\pm 5\%$
栅极阈值电压 (V_{th})	漏源电压为规定值,漏极电流达到规格书规定值,测量对应的栅源电压	符合器件标称范围,偏差不超过 $\pm 10\%$
导通电阻 (R_{ds_on})	栅极施加额定正向驱动电压,漏极电流为额定值,测量漏源极电压,计算 $R_{ds_on}=V_{ds}/I_d$	不大于器件额定值,偏差不超过 $\pm 10\%$
栅极漏电流 (I_{gss})	施加标称极限栅压,漏源极开路,测量栅极电流	不超过 $1\mu\text{A}$
体二极管正向压降 (V_{sd})	栅极施加-5V负压确保关断,源漏极施加额定正向电流 I_F ,测量源漏电压	不大于器件额定值,偏差不超过 $\pm 10\%$
动态导通电阻 (R_{ds_on}) (5.3.2)	采用双脉冲测试法,漏源极钳位测量	较初始值增加不超过20%

5.3.2 动态电性能测试

动态电性能测试方法见表2。

表 2 动态电性能测试

测试项目	测试方法	合格判据
开关时间 (t_{on} 、 t_{off})	双脉冲测试电路中,测量器件开通时间(t_{on})、关断时间(t_{off})	符合器件手册规定,偏差不超过 $\pm 20\%$
开关损耗 (E_{on} 、 E_{off})	双脉冲测试中,积分计算开通损耗(E_{on})、关断损耗(E_{off})	不大于器件额定值,偏差不超过 $\pm 20\%$
dv/dt耐受能力	调整测试电路参数,设定不同dv/dt值,测试器件开关过程的稳定性	额定工作dv/dt下无异常导通、无参数漂移
di/dt耐受能力	调整测试电路参数,设定不同di/dt值,测试器件开关过程的稳定性	额定工作di/dt下无过冲损坏、无参数漂移

5.3.3 热性能测试

5.3.3.1 结温测试：采用红外热像仪法或电气参数法（温敏参数法），在额定功率下连续工作 1 h 后，测量器件芯片结温，应符合 4.2.1 的结温管控要求；测试方法符合 JEDEC JESD51-14 的规定。

5.3.3.2 热阻测试：按照 JEDEC JESD51-1 的规定，采用稳态法测量器件的结壳热阻（ R_{th_jc} ），测试结果应不大于器件规格书标称值，偏差不超过 $\pm 10\%$ 。

5.3.3.3 温度循环测试：按照 GB/T 2423.22 规定的方法进行温度循环试验，试验后测量器件电性能，应符合 4.2.3 的要求。

5.3.3.4 瞬态热阻抗测试：按照 JEDEC JESD51-14 的规定，采用瞬态法测量器件的瞬态热阻抗曲线，测试结果应符合器件规格书标称范围。

5.3.4 可靠性测试

5.3.4.1 寿命测试：采用加速寿命试验方法，在高温（ T_{j_max} ）、1.2 倍额定电压条件下进行长期加速试验，通过威布尔分布拟合计算器件 MTBF，应符合 5.1 的寿命要求；试验方法符合 JEDEC JESD47 标准。

5.3.4.2 温度循环试验：按照 GB/T 2423.22 规定的方法，完成 1000 次温度循环，试验后器件无机械损伤、无封装失效、无电性能失效。

5.3.4.3 湿热试验：按照 GB/T 2423.3 规定的恒定湿热试验方法，在 40℃、相对湿度 93% 环境下放置 1000 小时，试验后器件绝缘性能及电性能符合 5.3 的要求。

5.3.4.4 振动与冲击试验：按照 GB/T 2423.10 进行正弦振动试验，按照 GB/T 2423.5 进行机械冲击试验，试验后器件无机械损伤、引脚脱落，电性能正常。

5.3.5 动态与高频特性测试

5.3.5.1 开关特性测试：按照 JEDEC JEP194 进行双脉冲测试试验，在双脉冲测试电路中，测量开通/关断损耗 E_{on} 和 E_{off} 。

5.3.5.2 反向恢复特性：按照 JEDEC JEP194 进行反向恢复电荷试验，测量体二极管的反向恢复电荷 Q_{rr} 及峰值电流 I_{rr} 。

5.3.5.3 局部放电测试：按照 IEC 61800-5-1 进行局部放电试验，采用高频耦合电路测量局部放电初始电压 PDIV。

6 检验规则

6.1 检验分类

检验分为出厂检验和型式检验两类。

6.2 出厂检验

6.2.1 出厂检验项目包括：外观、封装完整性、静态电性能测试，检验合格后方可出厂。

6.2.2 出厂检验抽样方案应按照 GB/T 2828.1 的规定，抽样比例不低于每批产品数量的 5%，每批抽样数量不少于 10 件。

6.3 型式检验

6.3.1 出现下列情况之一时，应进行型式检验，检验项目包含本文件规定的所有测试项目。

- a) 新产品试制定型鉴定时。
- b) 产品芯片设计、封装结构、材料、生产工艺发生重大变更，可能影响产品性能时。
- c) 正常量产时，每年至少进行一次型式检验。
- d) 产品停产 6 个月以上，恢复生产时。
- e) 出厂检验结果与上次型式检验结果出现重大偏差时。
- f) 国家市场监督管理总局提出型式检验要求时；

6.3.2 所有抽样样品的检验项目全部合格，判定该批次产品出厂检验合格；若出现不合格样品，应加倍抽样对不合格项目进行复检；复检全部合格，判定该批次合格；复检仍有不合格品，判定该批次产品

型式检验不合格。

7 标志、包装、运输和贮存

7.1 标志

7.1.1 每个器件应清晰标识以下内容。

- a) 型号。
- b) 额定电压。
- c) 额定电流。
- d) 生产厂家。
- e) 生产日期及批号。

7.1.2 外包装应标识以下内容。

- a) 产品名称。
- b) 规格。
- c) 数量。
- d) 生产厂家、地址及联系方式。

7.2 包装

器件应采用防静电包装，单个器件独立包装后放入防静电托盘，托盘外包裹气泡膜，再装入瓦楞纸箱，箱内填充缓冲材料，防止运输过程中碰撞损伤。包装应具备防潮、防尘功能。

7.3 运输

7.3.1 运输过程应确保器件不受到激烈振动、冲击、挤压，防止雨淋、暴晒及高温高湿环境。

7.3.2 运输工具应具备防静电、防潮措施。

7.4 贮存

器件应储存在清洁、干燥、通风的环境中，避免与腐蚀性气体、易燃易爆物品混存。储存期限自生产之日起不超过2年，超过储存期限应重新进行检验，合格后方可使用。
