

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXX—XXXX

固态变压器用碳化硅半导体器件

Silicon carbide 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 次

前 言	II
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 技术要求	4
4.1 基本要求	4
4.2 失效模式与失效判据	4
4.3 环境适应性可靠性	4
4.4 电应力与电性能要求	5
4.5 热应力与热性能要求	6
4.6 机械应力与机械性能要求	7
5 测试方法	7
5.1 试验通用条件	7
5.2 寿命与失效判据测试	7
5.3 环境适应性测试	7
5.4 电性能测试	8
5.5 热性能测试	错误！未定义书签。
5.6 机械性能	10
6 检验规则	10
6.1 出厂检验	10
6.2 型式检验	11
7 标识、包装、运输与储存	11
7.1 标识	11
7.2 包装	11
7.3 运输	11
7.4 储存	11

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：。

本文件首次发布。

固态变压器用碳化硅半导体器件

1 范围

本文件规定了固态变压器（Solid State Transformer, SST）用碳化硅（Silicon Carbide, SiC）半导体器件（包括SiC MOSFET、SiC Schottky势垒二极管等）的技术要求、测试方法、检验规则、标识、包装、运输和贮存等内容。

本文件适用于中压（10kV及以下）、高压（10kV以上至110kV）固态变压器中SiC半导体器件的选型、设计、应用及验证，可供固态变压器研发、生产、测试及运维相关单位使用。

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 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 2423.10 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
- GB/T 2900.1 电工术语 基本术语
- GB/T 2900.33 电工术语 电力电子技术
- SJ/T 11465 碳化硅肖特基势垒二极管测试方法
- IEC 60747-14:2020 半导体器件 第14部分：碳化硅器件
- JEDEC JESD47 集成电路的应力测试方法
- JEDEC JESD51-1 半导体器件热阻测试方法 第1部分：稳态法
- JESD22-A108E/F：集成电路基于应力测试的鉴
- IEC 60747-17:2020 半导体器件 第17部分：分立器件 沟槽栅碳化硅场效应晶体管
- 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（Safety requirements）
- JEP183:2022 宽禁带半导体电容测试指南（Guidelines for WBG Semiconductor Capacitance）
- JEP194:2022 宽禁带半导体开关损耗与波形测试指南（Guidelines for Switching Loss and Waveforms）
- JESD24-4 半导体器件热测试环境标准（环境定义）
- AQG 324 04.1/2025 功率半导体模块的资格认证（Power Semiconductor Modules）
- AEC-Q101 分立半导体器件的应力测试标准（Stress Test Driven Qualification）

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，具备模块化、智能化、可在中高压工作等特征，能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

碳化硅半导体器件 SiC device

以碳化硅为衬底材料制造的半导体器件，包括SiC MOSFET、SiC Schottky势垒二极管（SBD）等，具有宽禁带、高击穿场强、高导热率等特性。

3.3

可靠性 reliability

SiC器件在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的能力。

3.4

应力 stress

SiC器件在工作过程中承受的电应力、热应力和机械应力的总称。

4 技术要求

4.1 基本要求

- 4.1.1 器件应符合本文件规定，并按经规定程序批准的产品图样及技术文件制造。
- 4.1.2 器件所用原材料、元器件应符合相关标准及产品技术文件规定，不得使用不合格原材料。
- 4.1.3 器件的型号、额定参数应与固态变压器的设计工况匹配，满足整机长期安全稳定运行要求。

4.2 失效模式与失效判据

4.2.1 寿命要求

在固态变压器额定工作条件下，SiC器件的平均无故障工作时间（MTBF）应不低于 1×10^5 小时；在苛刻工作条件（如高温、高电压波动）下，MTBF应不低于 5×10^4 小时。

4.2.2 主要失效模式

包括但不限于：栅极氧化层击穿、结温过高导致的热失效、雪崩击穿失效、封装失效（引脚脱落、密封失效）、电迁移导致的电极失效。

4.2.3 失效判据

4.2.3.1 SiC MOSFET

漏源极击穿电压下降超过初始值的20%，或导通电阻增大超过规格书初始值的50%，或栅极漏电流超过 $10 \mu\text{A}$ （额定栅压下），判定为失效。

4.2.3.2 SiC SBD

正向压降增大超过规格书初始值的30%，或反向漏电流增大超过初始值的10倍，判定为失效。

4.2.3.3 封装失效

器件引脚间绝缘电阻低于 $100\text{M}\Omega$ （500V DC下），或封装外壳出现裂纹、密封胶溢出，判定为失效。

4.3 环境可靠性

4.3.1 温度循环可靠性

在 $-40^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 范围内进行1000次温度循环试验（升温速率 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ，保温时间30min），试验后器件性能应符合4.2.3的要求。

4.3.2 湿热可靠性

在 40°C 、相对湿度 $90\% \sim 95\%$ 的环境下放置1000小时，试验后器件绝缘性能及电性能无明显衰减。

4.3.3 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，每个轴向持续2小时，试验后器件无机械损伤且电性能正常。

4.3.4 高温可靠性

器件应通过高温栅偏（HTGB）试验。在结温 $T_j=175^{\circ}\text{C}$ 栅极电压 $V_{gs}=\pm 20\text{V}$ （或规格书最大值）条件下持续1000小时，试验后阈值电压 V_{th} 漂移量不得超过 $\pm 0.5\text{V}$ ，栅极漏电流 I_{gss} 无显著增加。

4.4 电应力与电性能要求

4.4.1 电压应力

4.4.1.1 额定电压

SiC器件的额定击穿电压应不低于固态变压器工作电压的1.2倍。

4.4.1.2 浪涌电压

器件应能承受2倍额定电压的浪涌电压冲击，持续时间 $10\mu\text{s}$ ，冲击次数100次，冲击后器件无失效。

4.4.1.3 栅极电压

SiC MOSFET的栅极驱动电压应严格控制在器件手册规定的范围内，正向栅压范围宜为 $+18\text{V}\pm 1$ ，反向栅压宜为 -5V 到 -3V ，避免栅极过电压导致氧化层击穿。

4.4.2 电流应力

4.4.2.1 额定电流

SiC器件的额定电流应不低于固态变压器额定工作电流的1.5倍，考虑到高频开关下的电流纹波，实际选用时应预留20%~30%的电流余量。

4.4.2.2 浪涌电流

器件应能承受10倍额定电流的浪涌电流冲击，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%。

4.4.3 短路耐受能力

器件应具备短路耐受能力，在额定母线电压下，器件应能承受硬短路至少 $3\mu\text{s}$ 而不发生爆炸或永久性击穿。短路试验后，器件应呈现开路失效模式，不得短路。

4.4.4 静态电性能要求

器件静态电性能应符合表1的规定。

表1 静态电性能测试

测试项目	技术要求
击穿电压（Vbr）	不低于器件额定值，偏差不得超过 $\pm 5\%$
导通电阻（Rds_on）	不大于器件额定值，偏差不得超过 $\pm 10\%$
正向压降（Vf）	不大于器件额定值，偏差不得超过 $\pm 10\%$
栅极漏电流（I _{gss} ）	栅压 $\pm 20\text{V}$ 、漏源极开路条件下，不超过 $1\mu\text{A}$

4.4.5 动态电性能要求

器件动态电性能应符合表2的规定。

表2 动态电性能测试

测试项目	技术要求
开关时间 (ton、toff)	符合器件手册规定， 偏差不得超过±20%
开关损耗 (Eon、Eoff)	不大于器件额定值， 偏差不得超过±20%
dv/dt	$dv/dt \leq 100kV/\mu s$
反向恢复电荷(Qrr)	不大于器件额定值， 偏差不得超过±15%。
体二极管正向压降 (Vf_body)	在额定电流下， Vf_body变化率不超过 ±10%。
动态导通电阻(Rds_on)	在高频开关应力后， Rds_on动态漂移量 不超过初始值的 5%。

4.5 热应力与热性能要求

4.5.1 结温范围

SiC器件的最高允许结温 (T_{j_max}) 应不低于175℃，在额定工作条件下，建议实际结温应控制在 T_{j_max} 的80%以内 (即不超过140℃)；在过载条件下 (1.2倍额定功率，持续10min)，结温不应超过 T_{j_max} 。

4.5.2 热阻

结合散热器设计，确保结温控制在器件规格允许范围内。

4.5.3 温度梯度

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。

4.6 可靠性数据要求

4.6.1 栅氧寿命数据

提供依据JEDEC JEP183进行的栅极寿命 (如HTGB、H3TRB) 测试数据与威布尔分布参数。

4.6.2 应力测试数据

鼓励提供符合AEC-Q101 RevH(2023)标准的应力测试数据及报告。

4.6.3 功率循环寿命数据

提供功率循环 ($\Delta T_j=100^\circ C$) 下的寿命曲线或目标循环次数。

4.7 模块级应用附加要求

4.7.1 热机械疲劳寿命

功率循环寿命 ($\Delta T_j=100^\circ C$) 目标 $\geq 30,000$ 次。数值与条件直接引用 AQG 324 04.1/2025(v4.1)。

4.7.2 环境热冲击耐受

温度循环 ($-40^\circ C \sim +125^\circ C$) 目标 $\geq 5,000$ 次。数值与条件直接引用 AQG 324 04.1/2025(v4.1)。

4.7.3 电气绝缘安全等级

绝缘耐压 $\geq 4kV_{rms}/1min$ 。引用IEC 61800-5-1:2022 对绝缘系统的要求。

4.8 绝缘与安全要求

4.8.1 绝缘配合

绝缘配合 (电气间隙、爬电距离) 应满足IEC 61800-5-1:2022对相应污染等级和电压等级的规定。

4.8.2 局部放电电压等级

局部放电起始电压（PDIV）在1.5倍最大工作电压下应无放电（ $<5\text{pC}$ ）。测试方法引用IEC 61800-5-1:2022附录。

4.8.3 电气绝缘安全等级

绝缘耐压 $\geq 4\text{kVrms}/\text{lmin}$ 。引用IEC 61800-5-1:2022 对绝缘系统的要求。

4.9 机械应力与机械性能要求

4.9.1 安装应力

器件安装时，螺栓紧固力矩应符合器件手册要求，力矩偏差不超过 $\pm 10\%$ ，避免过大的安装应力导致器件衬底开裂。

4.9.2 振动应力

器件应能承受固态变压器正常运行时的振动应力，振动加速度不超过 5g ，频率范围 $10\text{Hz}\sim 500\text{Hz}$ ，长期工作无机械损伤。

5 测试方法

5.1 试验通用条件

5.1.1 除另有规定，所有试验应在标准大气条件下进行：环境温度 $15^\circ\text{C}\sim 35^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $25\%\sim 75\%$ ，大气压力 $86\text{kPa}\sim 106\text{kPa}$ 。

5.1.2 试验所用仪器、设备应经计量检定合格，量程和精度满足测试项目要求，测试回路应符合相关标准（补充具体标准）规定。

5.2 寿命与失效判据测试

5.2.1 寿命测试

按JEDEC JESD47规定的加速寿命试验方法，在高温 175°C 、1.2 倍额定电压条件下进行试验，通过威布尔分布拟合计算器件 MTBF 值，结果应符合 4.2.1 的规定。

5.2.2 失效判定测试

按本文件5.4规定的方法测试器件电性能，按 5.6 规定的方法检查器件封装完整性，测试结果按 4.2.3 的规定进行失效判定。

5.3 可靠性测试

5.3.1 温度循环测试

按 GB/T 2423.22 规定的方法进行试验，试验条件：温度范围 $-40^\circ\text{C}\sim 150^\circ\text{C}$ ，升温速率 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ，高低温端保温时间 30min ，循环次数 1000 次。试验结束后，按 5.2.2 进行失效判定，结果应符合 4.3.1 的规定。

5.3.2 热测试

按 GB/T 2423.3 规定的方法进行试验，试验条件：环境温度 40°C ，相对湿度 $90\%\sim 95\%$ ，试验持续时间 1000 小时。试验结束后，测试器件绝缘电阻和电性能，结果应符合 4.3.2 的规定。

5.3.3 振动测试

按 GB/T 2423.10 规定的方法进行试验，试验条件：频率范围 $10\text{Hz}\sim 500\text{Hz}$ ，加速度 5g ，正弦振动，X、Y、Z 三个轴向各持续 2 小时。试验结束后，检查器件机械结构，测试电性能，结果应符合 4.3.3 的规定。

5.3.4 功率循环测试

T/CWDPA XXX—XXXX

按照 IEC 60749-34-1, AEC-Q101, AQG324 中规定的方法进行试验。推荐试验条件： $\Delta T_j=100^{\circ}\text{C}$ ($T_{j\min}=50^{\circ}\text{C}$, $T_{j\max}=150^{\circ}\text{C}$)，目标寿命 $\geq 30,000$ 次。失效判据： $R_{ds(on)}$ 增长 $\geq 20\%$ 或 ΔV_f 增长 $\geq 20\%$ 。

测试方法：通过电流加热芯片，使结温在 $T_{j\min}$ 到 $T_{j\max}$ 之间循环，单次通电时间分为秒级 ($t_{on}<5s$) 和分钟级 ($t_{on}>15s$)，试验结束后，检查器件机械结构，测试电性能。

5.3.5 栅氧可靠性测试

按照 JEDEC JEP183:2022 及 AEC-Q101 中规定的方法进行试验。推荐试验条件及测试方法：高温栅偏 (HTGB)：在 $T_j=150^{\circ}\text{C}$, $V_{gs}=+18\text{V}/-5\text{V}$ 下应力 1000 小时，阈值电压漂移 $\leq \pm 15\%$ ；高湿高温反偏 (H3TRB)：在 $85^{\circ}\text{C}/85\%RH$, $V_{ds}=80\%V_{br}$ 下应力 1000 小时。补充 DHTGB 的要求。

5.4 电性能测试

5.4.1 电压应力测试

5.4.1.1 额定击穿电压测试

按 SJ/T 11465 规定的方法执行，施加反向电压至漏电流达到 1mA 时，记录击穿电压值，结果应符合 4.4.1.1 的规定。

5.4.1.2 浪涌电压测试

采用浪涌发生器对器件施加 2 倍额定电压的浪涌冲击，冲击持续时间 $10\mu\text{s}$ ，冲击次数 100 次。冲击完成后，按 5.2.2 进行失效判定，结果应符合 4.4.1.2 的规定。

5.4.1.3 栅极电压耐受性测试

按器件手册规定的栅极电压极限值，对 SiC MOSFET 施加正向、反向栅极电压，持续 1000 小时后，测试栅极漏电流及击穿电压，结果应符合 4.4.1.3 及 4.2.3 的规定。

5.4.1.4 体二极管反向恢复测试

按照 JEDEC JESD24-4, IEC 60747-17, JEDEC JEP194 中规定的方法进行试验。推荐试验条件及测试方法：采用双脉冲测试法，在规定的电流、电压变化率及温度条件下，测量体二极管反向恢复电荷、峰值电流及恢复时间。

5.4.2 电流应力测试

5.4.2.1 额定电流通态测试

在额定工作温度、额定栅压条件下，对器件施加额定持续电流，测试导通电阻 / 正向压降，结果应符合 4.4.2.1 的规定。

5.4.2.2 浪涌电流测试

采用浪涌发生器对器件施加 10 倍额定电流的浪涌冲击，冲击持续时间 10ms，冲击次数 10 次。冲击完成后，测试导通电阻 / 正向压降变化率，结果应符合 4.4.2.2 的规定。

5.4.3 静态电性能测试

静态电性能测试应按照表3的要求执行。

表 3 静态电性能测试

测试项目	测试方法
击穿电压 (V_{br})	按照 SJ/T 11465 规定，施加反向电压至漏电流达到 1mA 时，记录电压值
导通电阻 ($R_{ds(on)}$)	栅压 18V，漏极电流为额定值，测量漏源

	极电压，计算 $R_{ds_on}=V_{ds}/I_d$
正向压降 (V_f)	正向电流为额定值， 测量漏极与源极之 间的电压
栅极漏电流 (I_{gss})	栅压 $\pm 20V$ ，漏源极 开路，测量栅极电流

5.4.4 动态电性能测试

动态电性能测试应按照表4的要求执行。双脉冲测试推荐条件： $V_{ds}=80\% V_{br}$ ， I_d =额定值， $T_j=25^\circ C$ & $175^\circ C$ ，栅极电阻 R_g 按规格书推荐。

表 4 动态电性能测试

测试项目	测试方法
开关时间 (t_{on} 、 t_{off})	采用双脉冲测试电路，测量器件从截止到导通 (t_{on})、导通到截止 (t_{off}) 的时间
开关损耗 (E_{on} 、 E_{off})	双脉冲测试中，积分计算开关过程的能量损耗
dv/dt	通过高速示波器测量开关过程中电压的变化率
短路耐受时间	在 $V_{bus}=50\% V_{br}$ ，栅压 $=+15V$ 条件下的短路，耐受时间 $\geq 5 \mu s$ 。
体二极管正向压降 (V_f)	在确保MOSFET沟道完全关断（通常需施加负栅压）的前提下，施加规定的正向脉冲电流，测量体二极管两端的电压降。

5.4.5 短路耐受测试

采用红外热像仪或结温估算方法（根据器件温度系数计算），在额定功率下连续工作1小时后，测量器件结温，应符合5.2.1的要求。

5.4.5.1 测试电路

采用非钳位感性负载短路测试电路。

5.4.5.2 测试步骤

- 一、设置母线电压为器件额定电压的80%；
- 二、驱动栅极施加额定驱动电压，使器件完全导通；
- 三、闭合短路开关，使器件进入短路状态；
- 四、监测漏极电流，维持短路状态 $3 \mu s \sim 5 \mu s$ 后关断；
- 五、重复上述步骤10次。

5.4.5.3 失效判定

试验后按5.2.2进行失效判定，且器件外壳不得有裂纹或封装爆裂。

5.4.6 局部放电电压测试

5.4.6.1 测试条件

测试需在背景噪声低于2pC的受控环境中进行，优先采用模拟实际工况的重复脉冲电压（或工频电压），以准确反映高频下的绝缘特性。

5.4.6.2 测试步骤

测试方法引用IEC 61800-5-1:2022。校准系统后，将电压升至1.5倍最大工作电压并维持至少60秒，期间实时监测局部放电信号，记录其起始点与幅值。

5.4.6.3 判定标准

在此电压下，视在放电量必须严格小于5pC，以确保绝缘系统具备抵御高频过冲及长期老化的足够安全裕度。

5.5 热性能测试

5.5.1 结温测试

采用红外热像仪或结温估算方法（根据器件温度系数计算），在额定功率下连续工作1小时后，测量器件结温，应符合5.2.1的要求。

5.5.2 热阻测试

按照JEDEC JESD51-1标准，采用稳态法测量器件的结壳热阻（Rth_jc），测试结果应不大于5.2.2的规定值。

按照 JEDEC JESD51-14 标准，采用结构函数法（Structure Function Method）测量器件的瞬态热阻抗曲线（Zth）。应提供从 1ms 到 100s 时间尺度的热阻抗数据，以支持固态变压器的热仿真设计。

5.5.3 温度循环测试

按照GB/T 2423.22-2012进行温度循环试验，试验后测量器件电性能，应符合4.2.2的要求。

5.6 机械性能

5.6.1 安装应力测试

按器件手册规定的紧固力矩上限值安装器件，保持 24 小时后，拆解检查器件衬底、封装外观，测试电性能，结果应符合 4.6.1 的规定。

5.6.2 运行振动应力测试

按 5.3.3 规定的方法进行长期振动试验，累计振动时长不低于 1000 小时，试验结束后检查器件机械结构、测试电性能，结果应符合 4.6.2 的规定。

6 检验规则

6.1 出厂检验

6.1.1 每批器件应经生产厂质量检验部门检验合格，并附产品质量合格证明文件后方可出厂。

6.1.2 出厂检验项目为：

- a) 4.4.3 静态电性能要求；
- b) 封装完整性及外观检查；
- c) 产品标识符合性检查。

6.1.3 出厂检验抽样比例应不低于每批产品数量的 5%，且每批抽样数量不少于 10 件。

6.1.4 判定规则

抽样样品全部检验项目合格，则判定该批产品出厂检验合格；若出现不合格项，应加倍抽样复检，复检仍有不合格项，则判定该批产品出厂检验不合格。

6.2 型式检验

6.2.1 当出现下列情况之一时，应进行型式检验，检验项目包括本规范中所有测试项目：

- a) 新产品研发定型时；
- b) 产品结构、材料或工艺发生重大变化时；
- c) 出厂检验结果出现重大偏差时；
- d) 用户提出型式检验要求时。

6.2.2 型式检验项目为本文件第 4 章规定的全部技术要求项目，对应第 5 章全部测试方法。

6.2.3 型式检验抽样数量不少于 30 件，应从出厂检验合格的批次中随机抽取。

6.2.4 判定规则

全部检验项目均合格，则判定型式检验合格；若出现不合格项，应加倍抽样复检，复检仍不合格，则判定型式检验不合格。

7 标识、包装、运输与储存

7.1 标识

每个SiC器件应清晰标识以下内容：型号、额定电压、额定电流、生产厂家、生产日期及批号。外包装应标识产品名称、规格、数量、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

运输过程中应避免剧烈振动、冲击、挤压，防止雨淋、暴晒及高温高湿环境。运输工具应具备防静电、防潮措施，符合危险品运输规定（若适用）。

7.4 储存

器件应储存在清洁、干燥、通风的环境中，储存温度范围为 $-20^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不大于60%，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。