



Power IGBT Module Reliability Design and Study IGBT模块可靠性设计与研究

罗海辉 博士 株洲中车时代半导体有限公司
2019.11.02 深圳

目录

Outlines

01

IGBT模块
可靠性要求

02

IGBT模块
可靠性设计与评估

03

中车IGBT产品
及技术平台

作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载

01

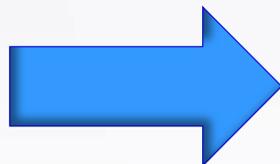
IGBT模块可靠性要求

作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载



IGBT封装可靠性要求

主要应用场景对IGBT器件性能和可靠性提出了越来越高的要求



作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载



IGBT模块可靠性要求

□ IGBT复杂的使用环境和应用工况

- 功率循环工况波动较大
- 满足极限工况条件下运行
- 长期工作在高温、高湿环境下运行
- 装配体积、重量和制造成本有严格限制
- 寿命要求越来越高：汽车IGBT长期寿命 ≥ 20 万km，或 ≥ 15 年

如何提升
IGBT可靠性？

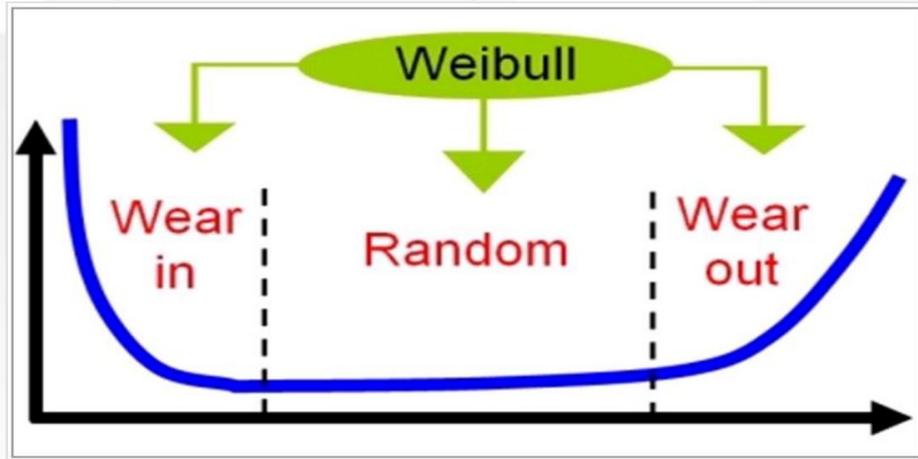


作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载



IGBT模块可靠性要求

可靠性“浴盆曲线” (Bathtub Curve)



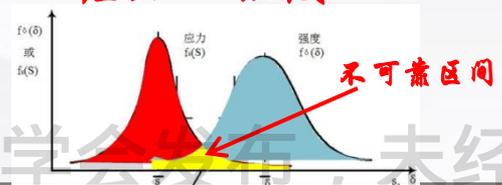
内部原因为主
(早期失效)

缺陷



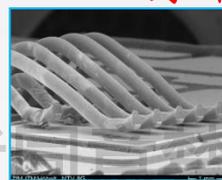
外部原因为主
(偶发失效)

应力 > 强度



内部原因为主
(损耗寿命失效)

强度退化, 寿命截止

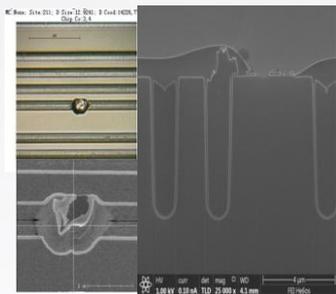


作者授权中国电源学会发布, 未经作者同意, 禁止转载

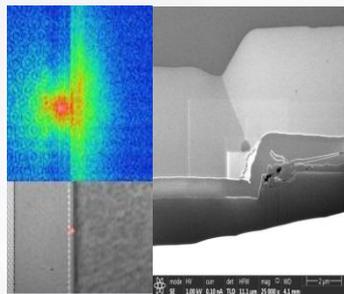


IGBT模块可靠性要求

❑ 失效模式- 早期失效 (Earlier Failures)



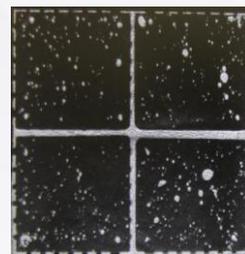
颗粒沾污



工艺不良



外观异常



焊接空洞率超标



焊料飞溅



键合点脱落



衬板破裂

芯片缺陷导致的早期失效

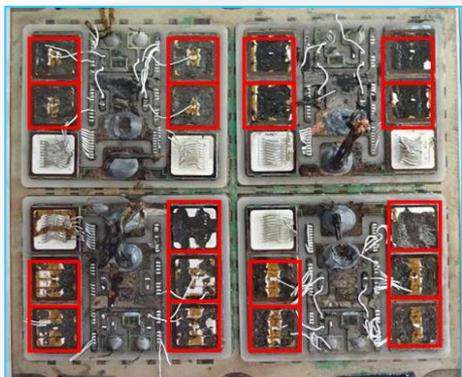
封装缺陷导致的早期失效

作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载

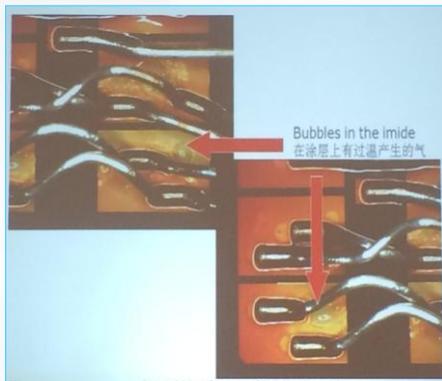


IGBT模块可靠性要求

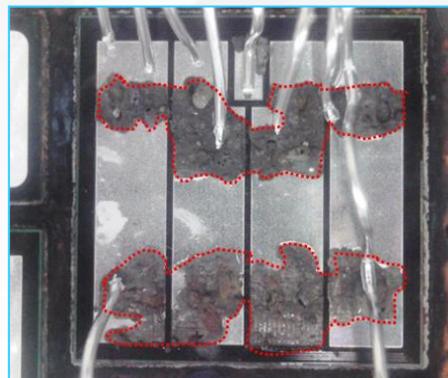
❑ 失效模式-偶发失效 (Spontaneous Failures)



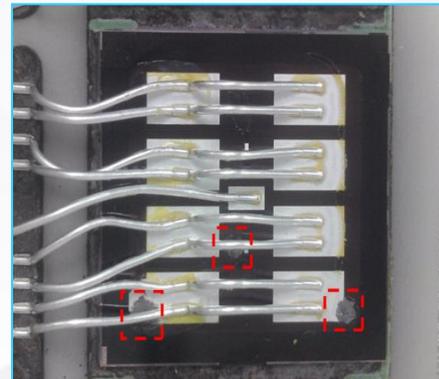
超SCSOA失效



过温失效



过流失效



过压失效

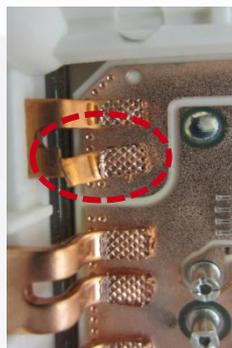
过流/过压/过热/超SOA导致的偶发失效

作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载

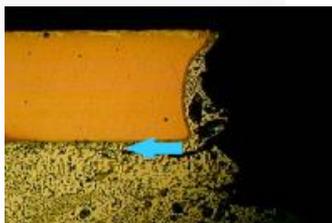


IGBT模块可靠性要求

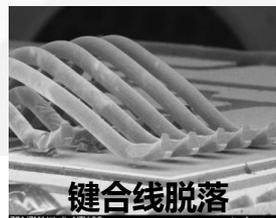
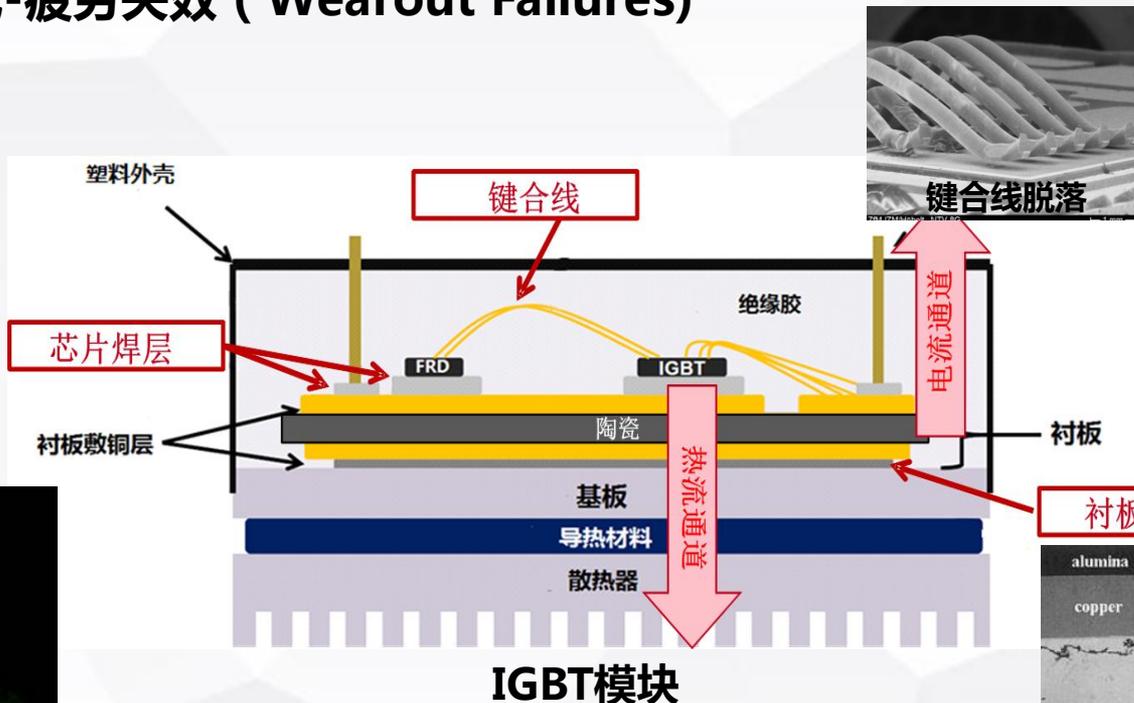
失效模式-疲劳失效 (Wearout Failures)



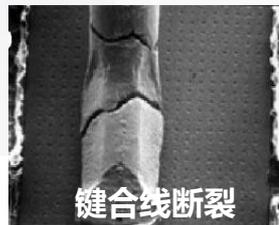
功率端子断裂



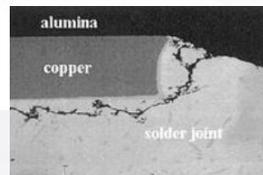
芯片焊层出现裂纹



键合线脱落



键合线断裂



焊层开裂



焊层退化

热应力/电应力/机械应力/环境应力导致的疲劳失效

02

IGBT模块可靠性设计与评估

作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载

IGBT模块可靠性

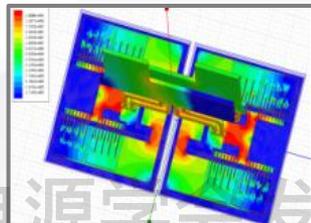
更大电流

1. 芯片结温增加
2. 键合线熔断
3. 母排端子风险增加
4. 互连界面失效



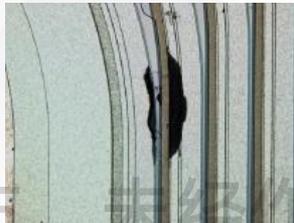
更高温度(ΔT)

1. 键合线熔断
2. 灌封材料失效
3. 热应力增大
4. 焊层退化



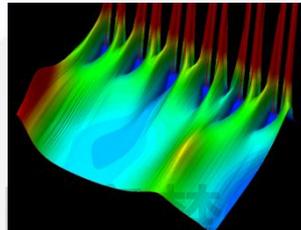
更恶劣环境

1. 芯片SOA不足
2. 芯片场环失效
3. 灌封材料失效
4. 结构件断裂



更复杂工况

1. 芯片SOA不足
2. 寿命退化加速
3. 多应力因素



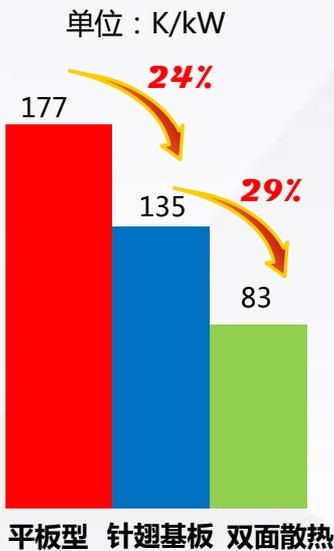
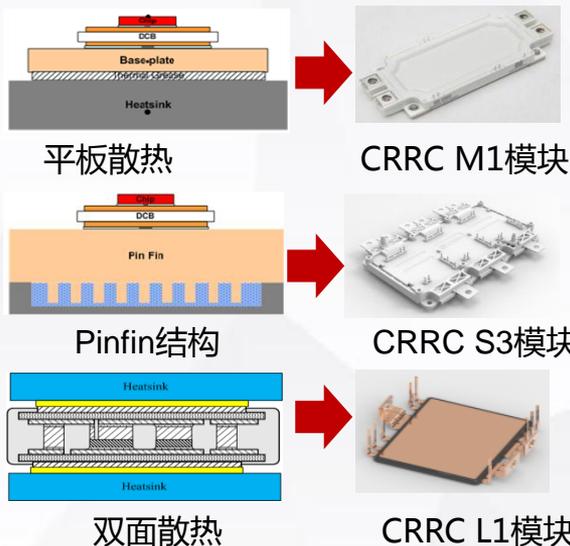
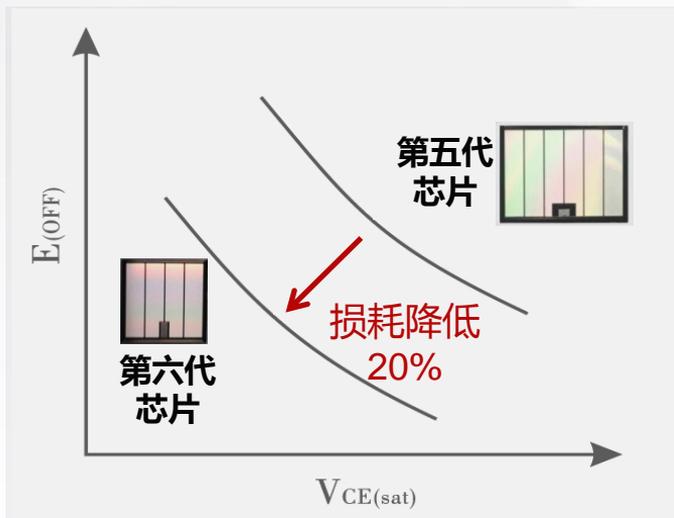


作者授权中国电源学会发布，未经许可禁止转载



高功率密度模块：低损耗+高效散热

- 第六代芯片技术：损耗比第五代降低20%，工作结温从150°C提升到175°C
- 增强型散热技术：pinfin结构/双面散热，热阻比传统标准封装热阻大幅降低



作者授权中国电源学会发布

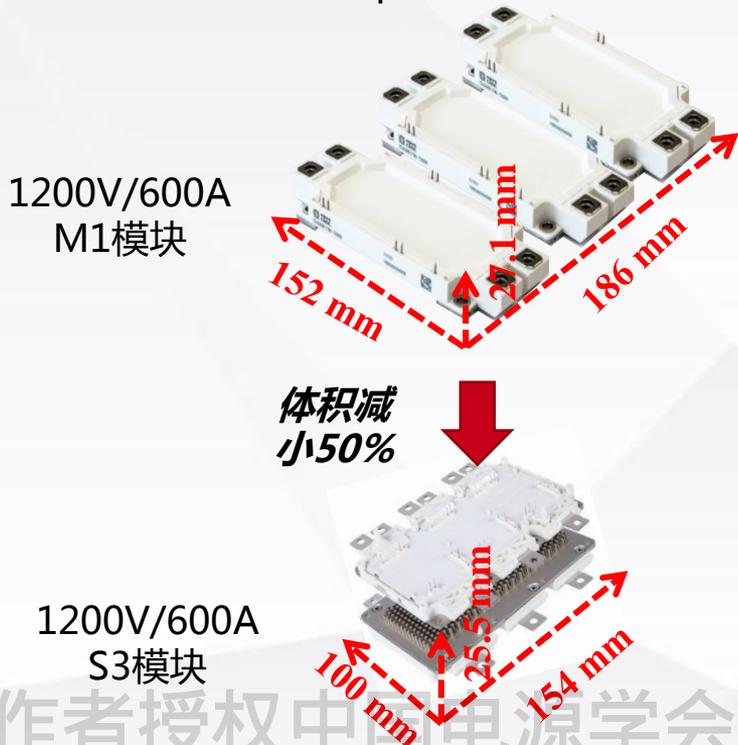
散热结构域典型模块

热阻对比图(R_{thJF_IGBT})

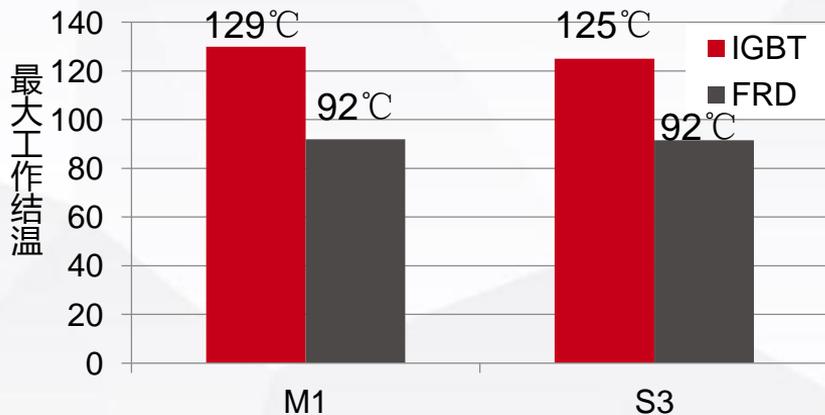


1200V 6in1 S3模块

- 第六代芯片 + pinfin结构，1200V S3模块功率密度较1200V M1增加95%



1200V/600A M1和S3模块温升仿真对比



仿真工况：710V，260A，8kHz

作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载

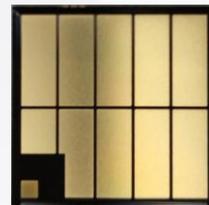


IGBT模块可靠性设计与评估

高功率密度模块

750V 双面散热系列模块

- 芯片表面可焊金属化，实现双面散热封装，进一步降低热阻
- 已开发出750V系列化双面散热模块



双面可焊芯片



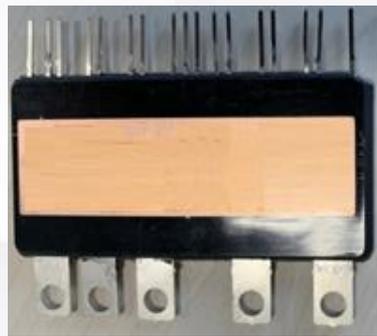
750V/600A L1 (2in1)

- $R_{thJC_IGBT} : 0.06K/W$
- $R_{thJF_FRD} : 0.08K/W$
- 寄生电感：10nH



750V/400A L2 (2in1)

- $R_{thJC_IGBT} : 0.075K/W$
- $R_{thJF_FRD} : 0.095K/W$
- 寄生电感：10nH



750V/275A L3
(6in1)

- $R_{thJC_IGBT} : 0.1K/W$
- $R_{thJF_FRD} : 0.2K/W$
- 寄生电感：20nH

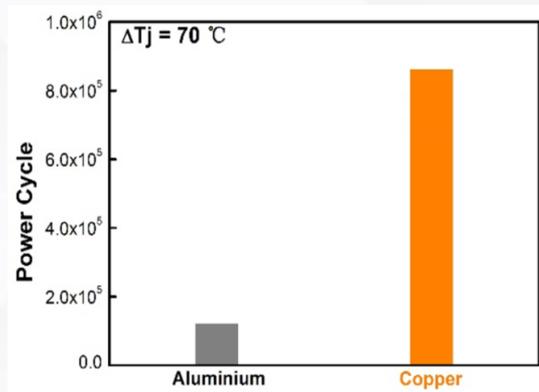
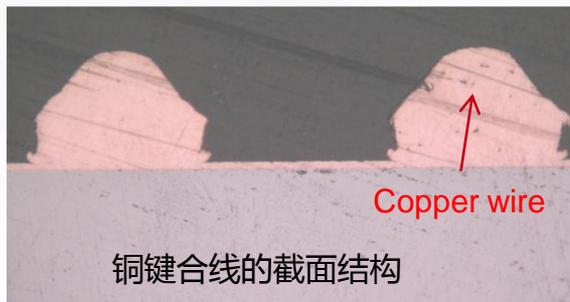
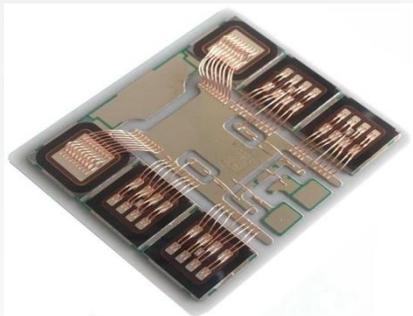


750V/900A HIPA2
(6in1)

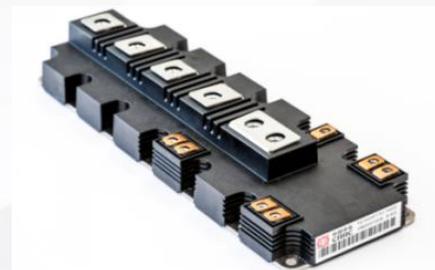
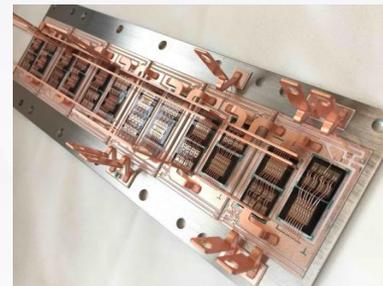
- $R_{thJF_IGBT} : 0.09K/W$
- $R_{thJF_FRD} : 0.15K/W$
- 寄生电感：12.5nH

铜线键合

- 铜工艺互连技术具有优良的电导率和热导率，超过10倍的功率循环能力提升



功率循环能力对比: Al Vs Cu



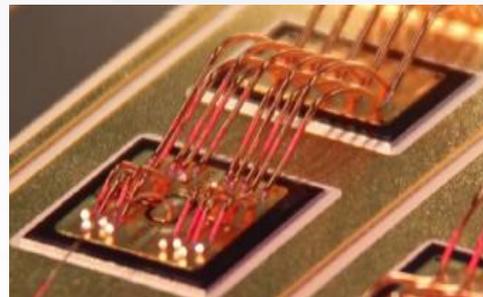
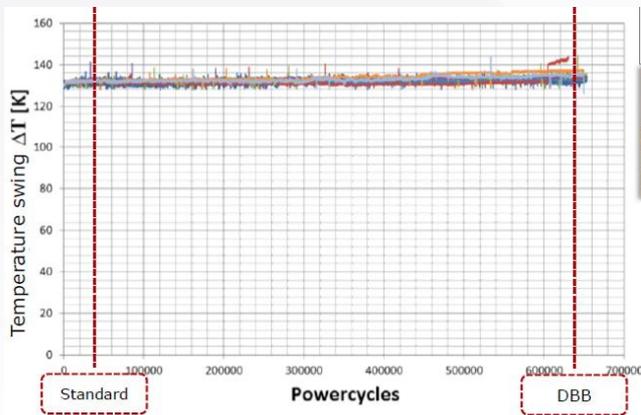
中车1700V/1400A H1模块

Maolong, Haihui Luo, Guoyou Liu et al., PCIM Europe 2015



Die top system(DTS)技术

- DTS：通过烧结+金属铜片+铜线键合工艺有效提升功率循环能力
- 功率循环能力提升15倍



Assembly type	Cycles, avg. all DUTs (with factor)	EOL criteria
Soldered	14,300 (ref.)	$\Delta T_{vj} + 20\%$
Sintered	19,200 (x1.34)	$V_{ds} + 5\%$
DBB	39,000 (x2.73)	$V_{ds} + 5\%$

$\Delta T=130^{\circ}\text{C}$ 下功率循环能力可达63万次 (标准WB为3万次)

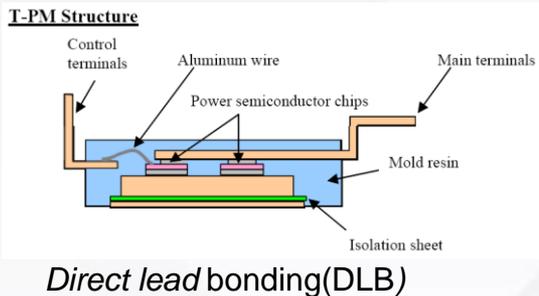
DANFOSS Automotive Traction Power Modules DCM1000-1000X, 2018

A. Streibel. PCIM Europe 2019

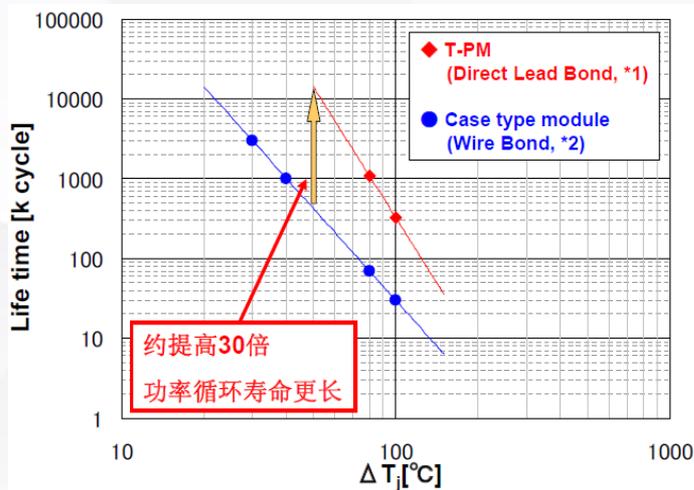
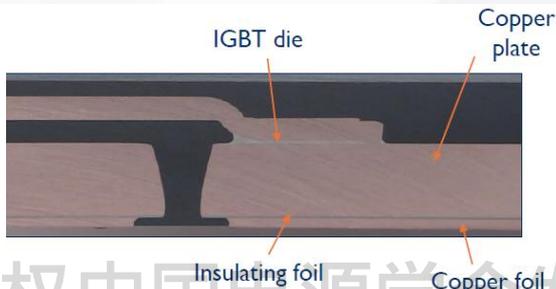


❑ 端子直接键合 (DLB)

- DLB：取代芯片表面键合线，提升功率循环能力
- 直接键合电路结构，免除键合线，增加互连可靠性



三菱J系列模块

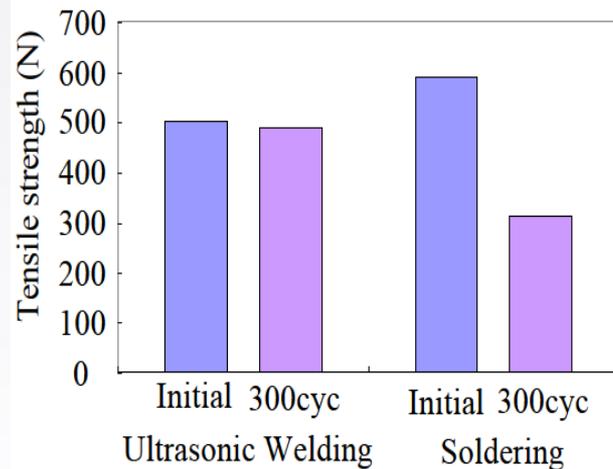
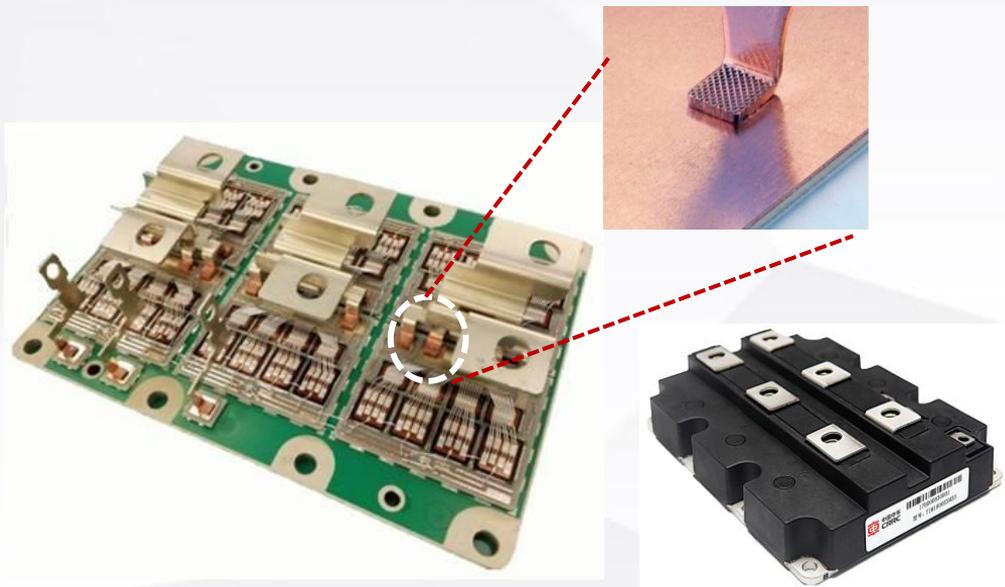


功率循环寿命对比(DLB vs WB)

H. Ishibashi, PCIM Europe 2018, pp1459

功率端子超声键合 (USW)

- 采用超声波能力实现功率端子与DBC的可靠连接
- 具有大电流承载能力，高抗机械振动和冲击能力



超声键合与焊接工艺在300次温度冲击 (-40~150C) 下的强度对比

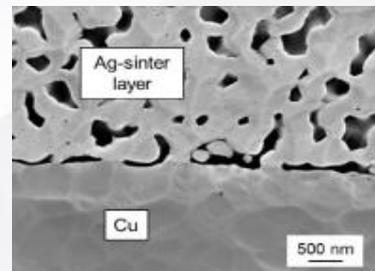
Yoshitaka Nishimura, Development of Ultrasonic Welding for IGBT Module Structure

采用母排超声键合技术的中车3300V/1800A E2模块

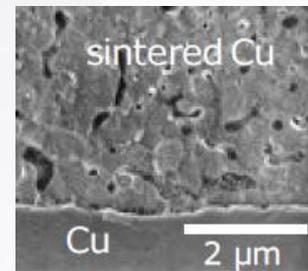


银/铜烧结技术

- 超高的熔点
- 优良的热导率
- 热疲劳循环能力有效提升3-5倍

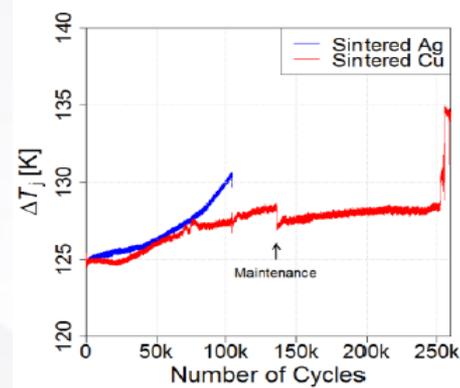


sintered Ag layer



sintered Cu layer

Material Properties	Ag sinter layer	Sn-Pb	Sn-Ag
Processing temp. (°C)	<300	217	260
Max. use temp. (°C)	710	183	221
Melt temp. (°C)	961	183	221
Electrical conductivity γ (MS/m)	41	6.8	7.8
Thermal conductivity κ (W/mK)	250	51	70
CTE (ppm/K)	19	25	28



功率循环能力对比

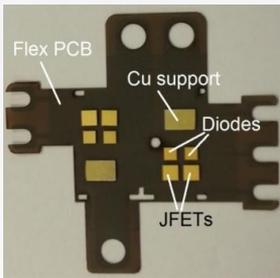
Kan Yasui, et al. ISPSD 2018, pp455-458

作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载

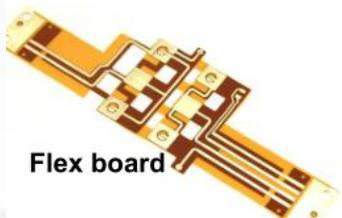


□ 振动——高可靠互连技术

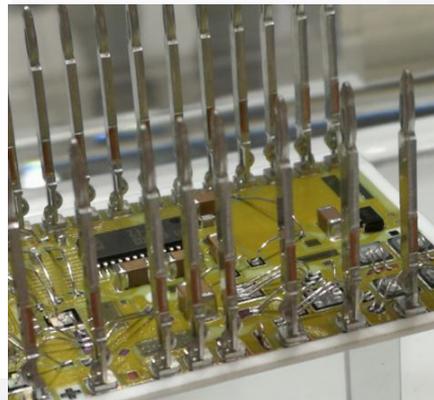
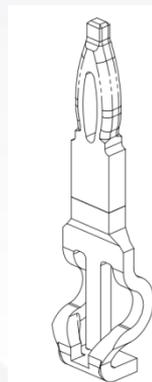
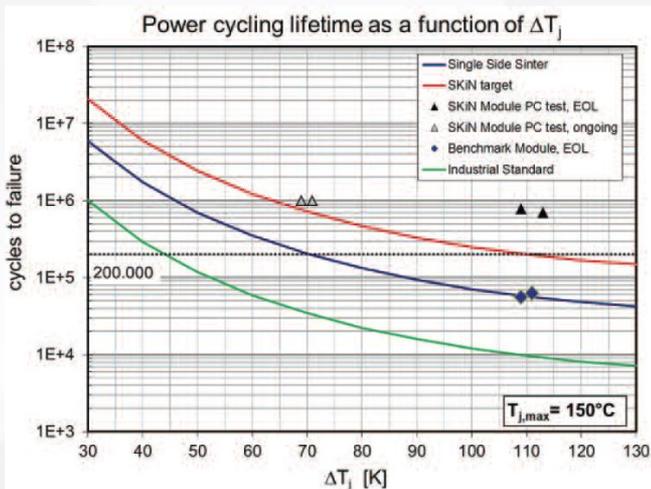
- 柔性PCB互连：实现了辅助端子柔性连接，有效提升可靠性
- 柔性Pressfit：解决了汽车IGBT模块高振动环境下可靠性问题



中车柔性PCB互连样品



Flex board



柔性Pressfit

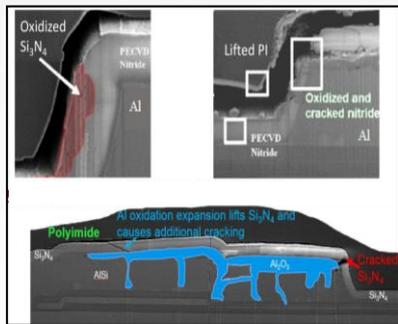
作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载



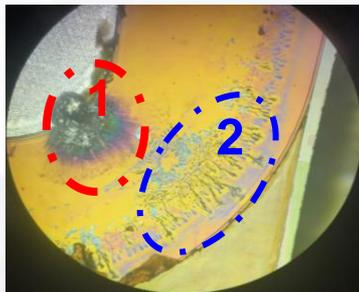
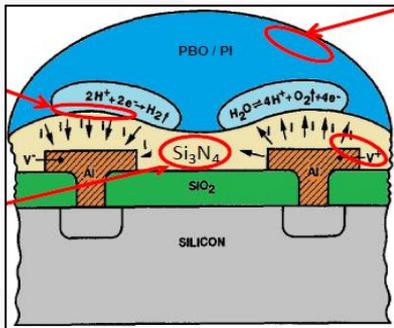
耐湿性能——湿气对模块耐压性能影响



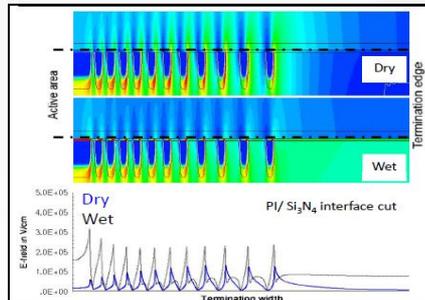
- 终端钝化技术：阻挡水汽，良好的致密性，与水不发生反应
- 终端电场优化技术：终端电势均匀分布设计，降低湿气下终端的最高电场峰值



水汽导致金属场版与钝化膜层发生腐蚀



电场不均匀在湿气条件下失效的表现



M. Rahimo 29th ESRED 2018

作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载



耐湿性能——封装抗湿气技术

- 高性能灌封类材料如硅胶、环氧树脂等有效提升湿热疲劳寿命
- 中车压接IGBT采用陶瓷密封管壳，隔绝湿气侵入路径

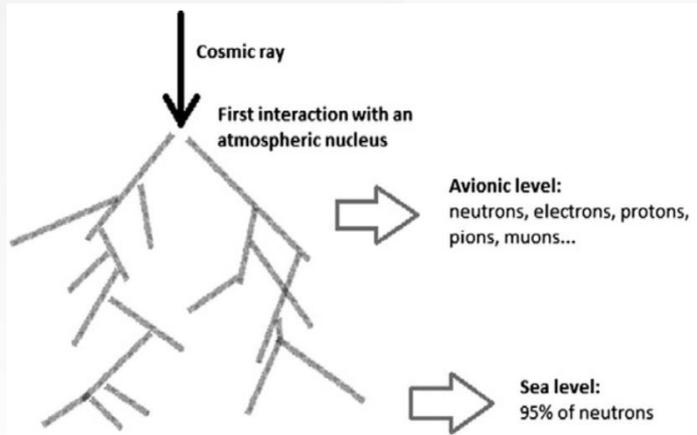
序号	试验项目	参考标准	评估项点	试验条件
1	稳态湿热 (THB)	GB/T 2423.50-1999 IEC-60749-5-2003	评估塑封材料、芯片终端保护胶的耐湿热老化能力。	85°C,85%RH, $V_{CE}=80V,1000h$
2	高加速湿热试验 (HAST)	IEC68-2-66	等同于稳态湿热，高加速应力。	130°C,85%RH,96H (典型条件)
3	高压反偏湿热 (HV-H3TRB)	暂无标准	模拟工作环境应力，评估封装结构、塑封材料、芯片终端绝缘老化能力。	85°C,85%RH, 60-80% $V_{CES},1000h$



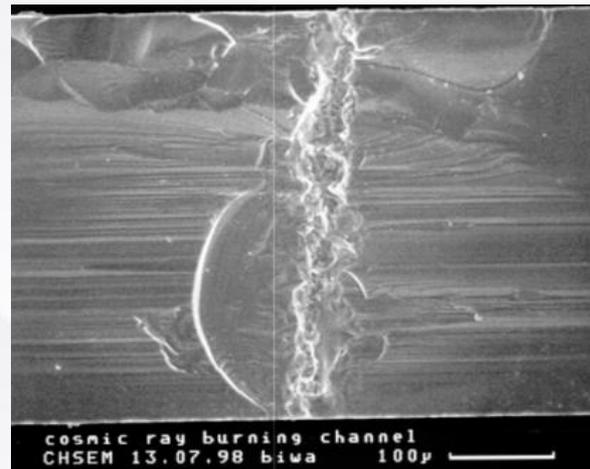
作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载

宇宙射线——失效机理研究

- 宇宙射线损伤的主要类型：位移效应、电离效应和表面效应
- 宇宙射线失效的加速因子：温度、电场、海拔高度



大气环境下的宇宙射线浴流示意图



宇宙射线失效器件剖面图^[2]

[1]A.D. Touboul, Microelectronics Reliability 52 ,2012,P.124-129

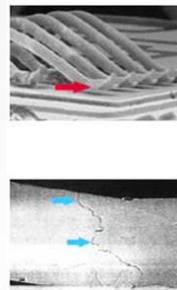
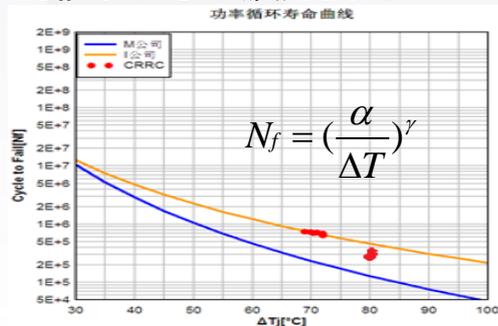
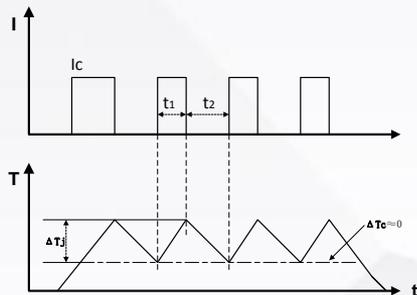
[2]C.Findeisen, Microelectronics Reliability 38, 1998, P. 1335 - 1339



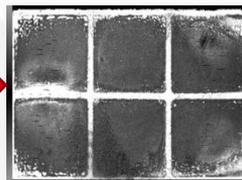
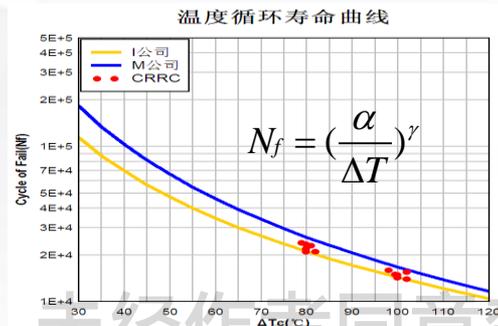
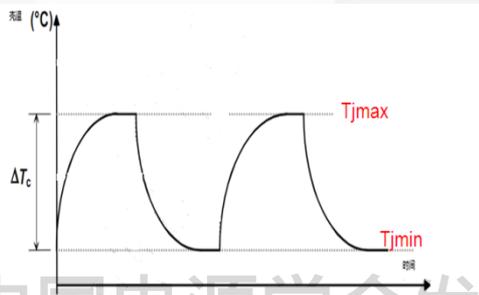
寿命试验——PC/TC

- 功率循环试验 (PC) : 键合线、芯片焊层等热疲劳能力
- 温度循环试验 (TC) : 衬板焊层、芯片焊层、母排焊点等热疲劳能力

功率循环试验
Power cycling test



温度循环试验
Thermal cycling test



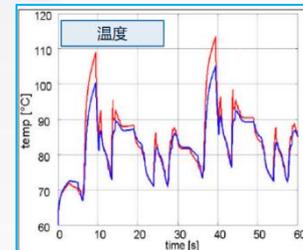
作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载



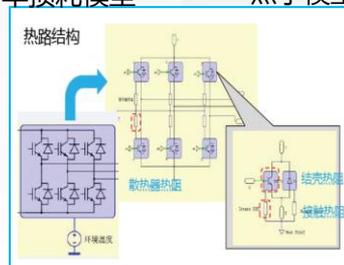
IGBT模块可靠性设计与评估

寿命模型及预测

寿命预测——应用寿命评测方法



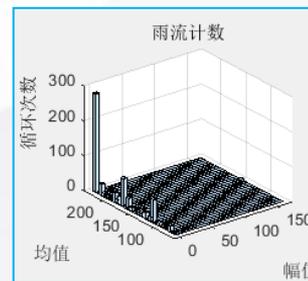
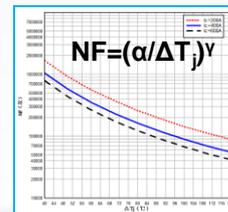
功率损耗模型 热学模型



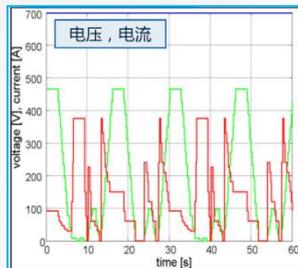
温度变化曲线

雨流计数法

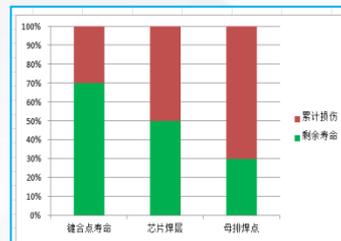
电热模型仿真



雨流计数分布



任务曲线 (客户提供)



任务曲线下的寿命损耗

03

中车IGBT产品与技术平台

作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载

检测试验平台

常规测试平台



芯片静态参数测试台



IGBT静态参数测试台



IGBT综合参数测试台



模块静态参数测试台



IGBT动态参数测试台



绝缘局放测试台

可靠性及型式试验平台



C-E阻断测试台



G-E阻断测试台



功率循环测试台



被动热循环测试台



温度冲击试验箱



稳态湿热试验箱



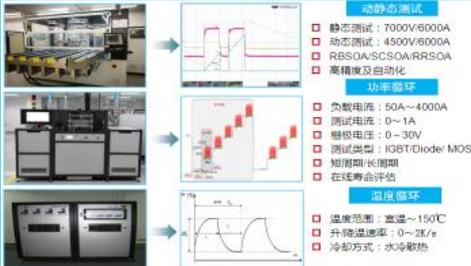
老化试验台



机械冲击试验台

具备完整的IGBT模块测试及试验能力

失效分析平台



动静态测试

- 静态测试：7000V/6000A
- 动态测试：4500V/6000A
- RBSOA/CSOA/RRSOA
- 高精度及自动化

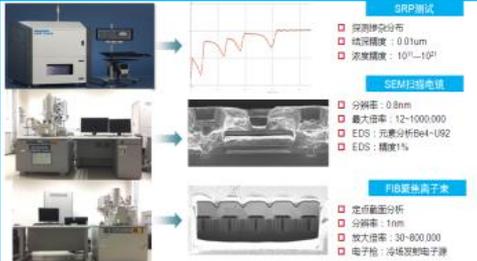
功率循环

- 负载电流：50A~4000A
- 测试电压：0~1A
- 栅极电压：0~30V
- 测试类型：IGBT/Diode/MOS
- 短周期/长周期
- 在线寿命评估

温度循环

- 温度范围：高温~150℃
- 升降温速率：0~2K/s
- 冷却方式：水/液氮

- 参数测试（静态/动态/绝缘/热阻测试等）
- 可靠性测试（功率循环/温度循环等）



SRP测试

- 探测深度分布
- 精度精度：0.01um
- 测量精度：10¹⁰~10²¹

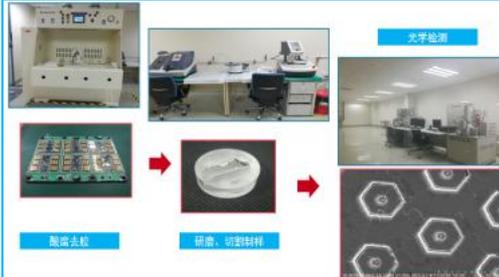
SEM扫描电镜

- 分辨率：0.8nm
- 最大速率：12~1000,000
- EDS：元素分析Be4-U92
- EDS：精度1%

扫描电镜离子束

- 定点定量分析
- 分辨率：1nm
- 放大速率：30~900,000
- 电子枪：冷场发射电子枪

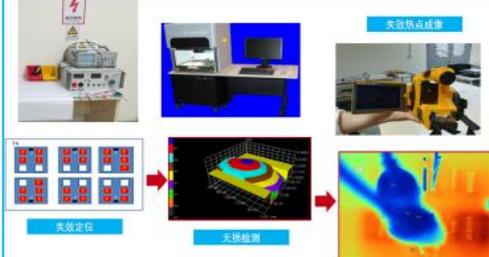
- 电性/光学分析（OM、X-RAY、Probe、EMMI等）
- 物理分析（SEM、FIB、SRP、EDX等）

光学检测

制备去胶 → 研磨、切割材料 → 光学检测

- 制样（酸腐去胶、研磨、切割等）
- 光学检查（金相显微镜、高倍显微镜等）



失效点成像

失效定位 → 无损检测 → 失效点成像

- 电、热测试（阻断测试仪、热成像仪等）
- 无损检测（C-SAM、X-RAY）

具有较全面的芯片和器件级失效分析能力



中车IGBT产品开发进展

IGBT封装平台



高压标准模块



H系列模块



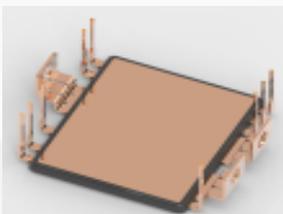
M系列模块



压接式模块



S系列模块



双面散热系列模块



基于应用需求，推出六大产品系列，批量、稳定、可靠运行

- 复杂的应用环境和严苛的应用工况对IGBT模块可靠性提出了很高的要求
- 过程缺陷、芯片性能、抗热疲劳能力、环境适应能力等是决定IGBT模块可靠性的重要因素。通过降低芯片损耗、提升散热能力、采用先进封装技术等，可实现高可靠的高功率度模块产品
- 依托完备的产业平台，针对客户需求，中车推出六大产品系列，在轨道交通、输配电、电动汽车、新能源发电、高端工业装备等领域已大批量应用并稳定、可靠运行

作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载



感谢观看、欢迎交流！

作者授权中国电源学会发布，未经作者同意禁止转载