

功率半导体先进封装专题 · 发展研究报告

顶部散热功率半导体

Top-Side Cooling (TSC) Power Semiconductors

从 PCB 瓶颈到冷板直连 —— 功率封装的范式转移

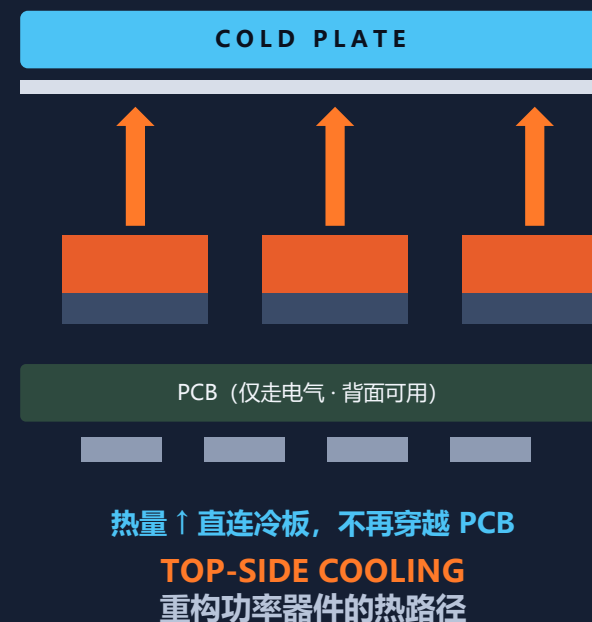
≈50%

系统热阻网络降幅

+20~50%

同封装输出功率提升

35% CAGR



目录

01

背景与驱动力

功率密度竞赛为何愈演愈烈：AI、汽车与能源的三重推力

02

技术原理

热路径重构：BSC 与 TSC 的结构对比及量化收益

03

封装家族与工程挑战

主流顶冷封装谱系；界面、公差与工艺的现实考验

04

产业格局

从英飞凌首发到全球标配，中国厂商的平台化量产

05

应用与市场

三大应用版图；GaN、SiC MOSFET 与 IGBT 的器件市场空间

06

趋势与展望

双面冷却、先进互连、宽禁带组合与下一站场景

功率密度竞赛：散热成为第一瓶颈

功率密度每上一个台阶，“**怎么把热导出去**”就取代电气性能，成为系统设计的第一约束。



AI 数据中心

- 机架功耗从 ~3kW 迈向 10kW+
GB200 NVL72 单机架达 120kW 级
- 1U 空间内做 15kW+ 液冷 PSU
功率密度竞赛直接传导至器件封装
- 48V / 800V 供电架构变革
GaN+顶冷成为高密度电源标配路径



汽车电动化

- 800V 平台放量
OBC / DC-DC 功率密度与体积约束同步收紧
- EPS、e-fuse、区域控制器
整车配电架构带来更多功率节点
- 轻量化直接挂钩续航
每减一克都要在更小体积里耗散更多热量



能源转型

- 光伏 1500V 化、储能与充电桩高功率化
效率与体积双重要求
- SiC 使逆变损耗最高降低约 70%
但热流密度同步大幅上升
- 效率红利必须靠散热兑现
否则结温抬升吃掉全部收益

Yole《功率电子行业现状》将**顶部冷却**、**铜夹互连**、**高 Tg 模塑料**列为功率器件封装革新的核心方向。

三代功率封装：插件 → 底部散热 → 顶部散热



1980s—至今

插件封装 TO-220 / TO-247

- 螺栓直锁散热器，热性能好
- 人工插装 + 波峰焊，成本高、难自动化
- 引线长，寄生电感大

正在被表贴方案加速替代



2000s—至今

底部散热 SMD (D2PAK / TOLL / DFN)

- 全自动化贴装，产能与一致性大幅提升
- 热量必须穿越 PCB：FR4 导热率仅 ~ 0.3 W/m·K (铜 ~ 400)
- 依赖热过孔与加厚铜，成本上升、背面被散热器占用

PCB 成为系统散热天花板



2021—商用元年 → 主流化

顶部散热 SMD TSC

- 表贴自动化与冷板直连两者兼得
- 电 (PCB) 与热 (散热器) 彻底解耦
- 双面 PCB、免热过孔，JEDEC 标准化、多货源

当前产业主赛道

1980s

插件主导

2000s

BSC 表贴普及

2021

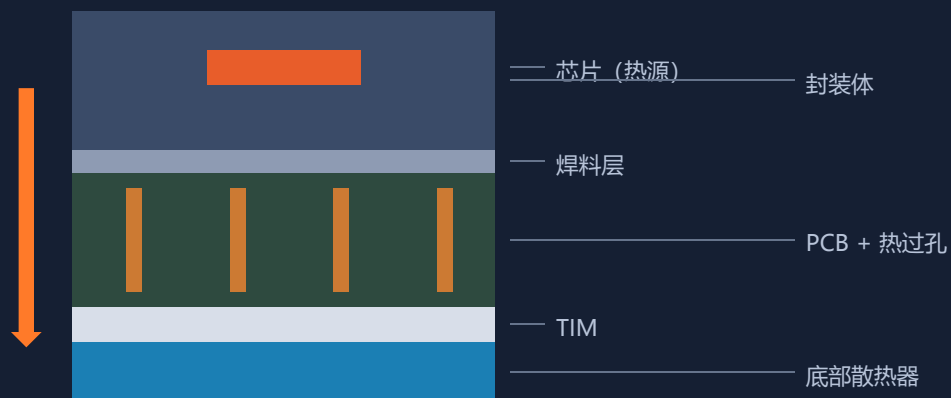
英飞凌 TOLL / QDPAK 商用

2025—26

SiC / GaN 全面顶冷化

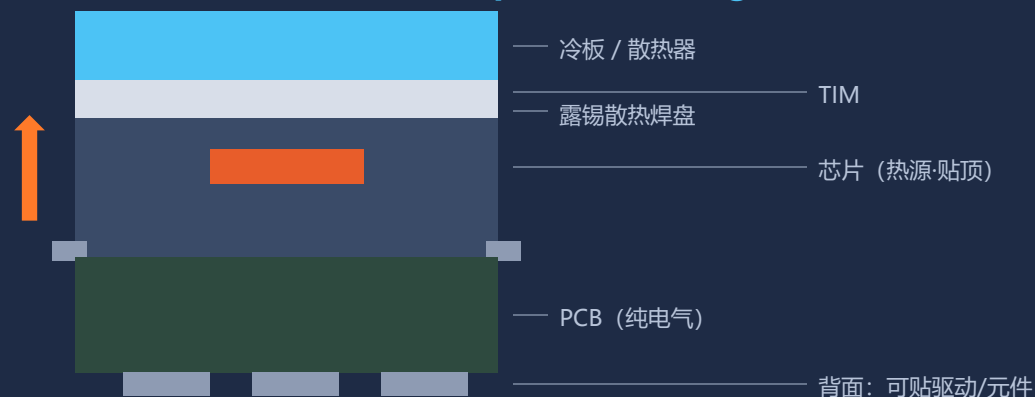
TSC vs BSC: 把 PCB 从热路径中拿掉

底部散热 BSC (Bottom-Side Cooling)



热路径: Die→焊料→PCB (过孔)→TIM→散热器, 界面多、路径长

顶部散热 TSC (Top-Side Cooling)



热路径: Die→顶部焊盘→TIM→冷板, 不经 PCB、界面少

VS

≈ -50% 系统热阻网络降幅 (Wolfspeed 1200V/40mΩ SiC 对比实验)

0.33 → 0.28 °C/W RθJC 对比: BSC vs TSC (TI 30mΩ GaN 实测)

用数据说话：顶冷带来的六个台阶

≈ -50%

系统热阻网络降幅

Wolfspeed 顶冷 vs 底冷对比实验 (1200V SiC)

-36% / -20%

RthJC / RthJA 降幅

华润微 TOLT-16L 对比传统 TOLL 封装

+20~50%

同封装输出功率

英飞凌 SSO10T TSC (5×7) 对比 SSO8 (5×6 底冷)

+3kW / +40°C

输出功率 / 热裕量

Nexperia QDPAK 对比 D2PAK-7 (1200V SiC)

>300A

持续电流能力

华润微 TOLT-16L 顶冷平台 (80/100V)

2.3mm

统一封装高度

QDPAK / DDPACK 标高一致，单冷板共面贴合

四项隐性红利

● 免热过孔

PCB 层数与铜厚需求下降，板材成本直降

● 双面贴装

背面释放，驱动与无源器件贴近开关管

● 低寄生电感

Kelvin 源 + 短环路，开关损耗与 EMI 双降

● 标准生态

JEDEC 认证、免专利费，多货源无忧

主流顶部散热封装家族一览

封装	代表厂商	形态与要点	典型应用
TOLT	英飞凌 / 华润微 / onsemi	鸥翼引脚 + 顶部露锡；散热面积 >45mm²；内置 Kelvin 源	服务器与通信电源、工业电源
DDPAK	英飞凌	DPAK 派生双管顶冷；2.3mm 标高，与 QDPAK 共面	OBC、DC-DC 转换器
QDPAK	英飞凌 / Nexperia / 华润微	15×15.4mm、22pin；散热片 >120mm²；爬电距离较 JEDEC +1mm	充电桩、光伏逆变、AI 服务器电源
SSO10T TSC	英飞凌	5×7mm 小型顶冷；基于 SSO8 5×6 平台；JEDEC 认证	EPS、电子保险丝、BLDC 驱动
HU3PAK	意法半导体	覆盖 650-1200V：SiC / IGBT / SJ MOS 全系	OBC、空调压缩机、主动悬挂
TSC3PAK	罗姆	宽爬电距离设计；与 HU3PAK 生态兼容	车载与工业高压系统
TCPAK 5×7	华润微	5×7mm 紧凑顶冷；顶部热焊盘 16.5mm²	开关电源、数据中心、充电桩
TSC263-4L	海明微	外形与 TO263/D²PAK 完全一致；替换 TO247/TO220；核心 IGBT 内置 ESD 防护	白电、伺服、变频器、光伏储能
PowerPAK LR	威世 Vishay	8×8 / 5×7 / 10×15 三尺寸；鸥翼引脚缓冲应力	高功率模块、服务器电源

注：TOLT = TO-Leaded Top-side cooling；QDPAK = Quadruple Discrete Package；顶冷封装普遍采用芯片倒装（reverse lead bending）工艺实现 die 贴顶。

顶冷不是免费午餐：四大现实考验与对策



界面工程

最关键的环节

传统“TIM + 绝缘片 + TIM”三明治结构界面多、瞬态热响应慢、公差敏感，BOM 与装配成本持续上升。

对策 新一代导热绝缘涂层：厚度 100-250 μ m，耐压 3-6kV，界面热阻低至 0.16 K·cm²/W，材料成本约 -40%



公差与压力管理

机械设计的精度课

Z 高度公差沿“封装-焊膏-PCB-散热器”链条累积；散热器夹持压力过大或不足都会改变界面热阻。

对策 公差链分析 + 受控夹持（弹簧/卡扣）纳入设计流程；Wolfspeed 已发布系统级装配应用指南



工艺兼容性

产线改造门槛低

顶冷器件能否沿用既有 SMT 产线，决定导入速度；鸥翼引脚的应力缓冲与焊点可检测性影响良率。

对策 意法半导体已验证：焊接工艺与传统表贴完全兼容；鸥翼引脚缓冲机械应力，外露焊点目检/AOI 友好



设计思维转变

机会而非负担

散热器从“板底”移到“板上”，布板逻辑、维护方式、结构设计都需要重新学习。

对策 解耦带来回报：驱动器贴近开关管、环路寄生更小；PCB 与散热各自独立优化，设计自由度反而提升

五年时间：从独门绝技到行业标配

2021 年英飞凌首批 TSC 封装商用 → 2026 年，顶冷已成为欧美日功率大厂的“标配武器”，并沿 SiC / GaN 全面铺开。

英飞凌

生态发起者

- TSC 家族最全：SSO10T / TOLT / DDPK / QDK
- JEDEC 认证 + 免专利费，培育第二货源生态
- OptiMOS / CoolMOS / CoolSiC / CoolGaN 全覆盖

Nexperia

SiC 顶冷先锋

- 1200V SiC QDK: 17-80mΩ, 车规 + 工业双版本
- 对比 D2PK-7: +3kW 输出、+40°C 热裕量
- 650V GaN 阵容扩展至 TOLT 顶冷封装

onsemi

双面冷却布局者

- GaNEXUS GaN 40-650V: TOLL / TOLT / 双冷封装
- 3.3×3.3 与 5×6 双面冷却封装已入列产品线
- 650/950V SiC 顶冷器件已向客户出货

意法半导体

车规全谱系

- HU3PAK 顶冷覆盖 650-1200V SiC / IGBT / SJ MOS
- ACEPACK SMITe 顶冷功率模块同步推出
- 验证顶冷器件与传统 SMT 焊接工艺完全兼容

罗姆 ROHM

可靠性专长

- TSC3PAK 宽爬电顶冷，兼容 HU3PAK 生态
- TO-247 铜夹键合：功率循环寿命提升 10 倍
- SiC SBD / MOS 全系配套封装方案

威世 / Wolfspeed / TI

多点开花

- Vishay PowerPAK LR: 8×8 / 5×7 / 10×15 系列
- Wolfspeed 顶冷 SiC + 系统级装配应用指南
- TI LMG35xx GaN 顶冷: RθJC 低至 0.28°C/W

国产顶冷封装：从跟随到平台化量产

华润微（封测事业群 ATBG） 三大顶冷平台 • 重庆润安 + 东莞杰群双基地量产

TOLT-16L

- RthJA -20% / RthJC -36% (vs TOLL) ; 80/100V、>300A; 温度循环寿命 ×2
- 应用：电动两轮车、BMS、电动工具、移动机器人

QDPAK

- 散热片 >120mm²; Kelvin 源 + 低寄生电感; TCOB >2000 循环; 热性能可比 TO- 247
- 应用：OBC、充电桩、储能、AI 服务器电源

TCPAK5X7-10L

- 5×7mm 紧凑顶冷; 顶部热焊盘 16.5mm²; 杰群工厂已量产
- 应用：开关电源、数据中心、UPS

SJ G4 / SiC G2 芯片 + 顶冷封装组合, 已进入 OBC 与 AI 服务器电源供应链



产业链协同升级

顶冷封装带动上游协同：导热绝缘材料、冷板散热器、SMT 装配工艺同步迭代;
海明微 TSC263-4L、AOS GTPAK 等同形态产品持续丰富国产生态。



全球坐标

Yole 2024 全球功率器件 Top20 中,
华润微、士兰微、比亚迪、中车
四家中国厂商在列;
以顶冷为代表的先进封装, 正成为国产功率器件高端化与差异化竞争的抓手。

海明微 TSC263-4L：尺寸同源的顶冷国产化方案

塑封外形与 D²PAK / TO263 完全一致 —— 存量产品“零重构”升级顶部散热：替换 TO247 / TO220，降规格替换 TO263。



温升优化 10°C+

热量自芯片直达顶部金属散热面，较同规格 TO263 温升降低 10°C 以上；10A 规格可稳定替换 TO263 的 15A、15A 替换 20A



直接替换插件封装

Pin-to-Pin 替换 TO247 / TO220：核心电路无需大改，仅适配贴片布局，选型与物料成本双降



差异化路线

- 对比 HU3PAK / QDPAK / TOLT 等非标顶冷封装：PCB、结构与散热工装无需全盘重构
- 核心 IGBT 型号（HE10R065H6DEHW 等）内置 ESD 防护，免外加保护器件
- SiC MOS 采用无开尔文脚设计：面向小功率电源的务实选择，为客户设计减负



一片散热器覆盖全系统

整流 + PFC + 逆变 + 变压器顶部共用一片散热器，散热物料与 PCB 空间双省，助力小型化集成



SMT 自动化量产

四引脚贴片 + 卷带包装，告别插件人工插装与波峰焊；已实现 KK 级月出货，规模供货能力获验证



产品与应用矩阵

- 7 大品类 44 款标准化产品：IGBT / 快恢复 / SiC MOS / SGT MOS / Planar MOS / 二极管
- 顶冷 SiC MOS 率先落地小功率电源：PD 快充、TV / LED 电源、适配器
- 应用：白电全功率链路、伺服驱动、变频器、光伏储能、车载电源

海明微的启示：“顶部散热 + 尺寸同源”组合拳，让白电与工业存量市场以最低切换成本迈入顶冷时代。

三大战场：汽车、AI 数据中心、工业能源



汽车电动化

顶冷渗透最早、最深的腹地

■ OBC / DC-DC

SiC 顶冷主战场，800V 平台功率密度关键

■ EPS / 制动 / ABS

SSO10T TSC 的目标场景（英飞凌定义）

■ e-fuse / 区域控制器

整车配电架构演进带来的新增功率节点

■ BLDC 驱动

压缩机、主动悬挂、水泵油泵



AI 数据中心

增长最快的新引擎

■ 液冷 PSU (GB200 级)

1U 内 15kW+，单面冷板压制数十颗开关管

■ 48V IBC / BBU

GaN 顶冷 + 双面冷却封装的规模化入口

■ 800V→48V 供电架构

顶冷 SiC / GaN 需求随 AI 机架功率放大

■ 人形机器人 (2030+)

执行器驱动：严苛重量与热预算下的高功率密度



工业与能源

基本盘与稳定增量

■ 充电桩 / 储能 PCS

高功率、高环境温度、高可靠性要求

■ 光伏逆变器

1500V 平台 + SiC（损耗最高 -70%）

■ UPS / 电机驱动 / 伺服

工业自动化电源长期升级需求

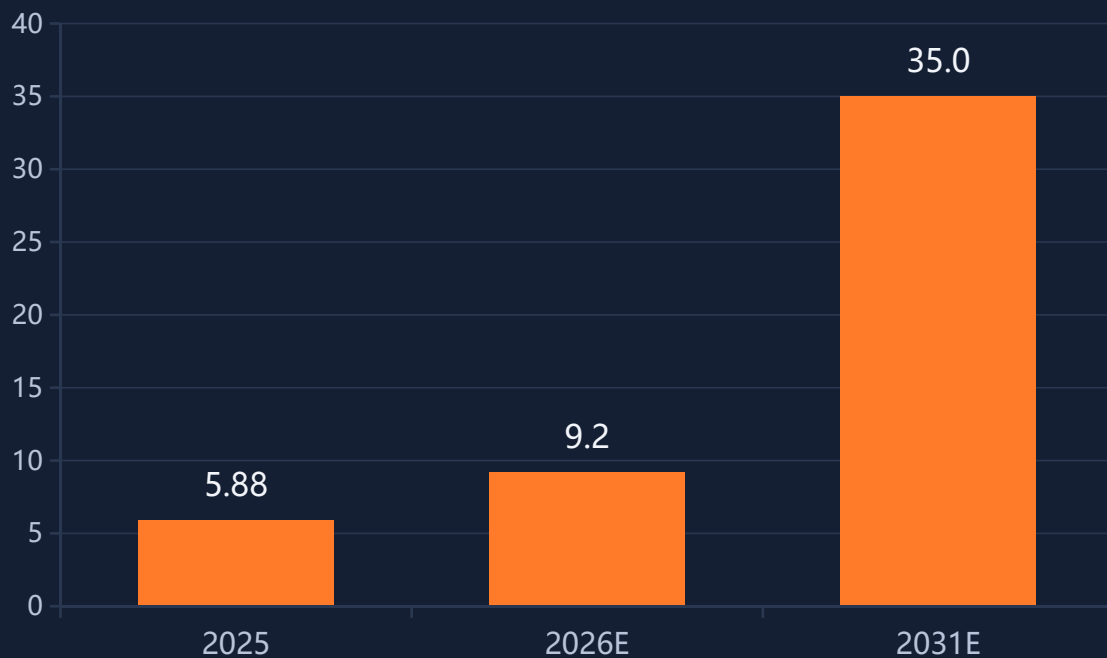
■ 通信电源

5G/6G 基站与服务器电源迭代

共同逻辑：“单位体积功率密度”竞赛 —— 顶冷让电源在更小的空间里，跑更大的电流。

增长曲线：AI 与电动化双引擎

功率 GaN 器件市场规模 (亿美元)



2025→2031 CAGR ≈ 35% (Yole Group 《Power GaN 2026》)

57% CAGR

汽车 (OBC / 48V 架构)

2025-2031 增速最快的细分市场 (Yole)

45% CAGR

电信与基础设施

AI 数据中心电源驱动, 2031 年达 7.5 亿美元

8.7% CAGR

功率电子整体

2024-2030, 2030 年规模超 150 亿美元 (分立器件口径)

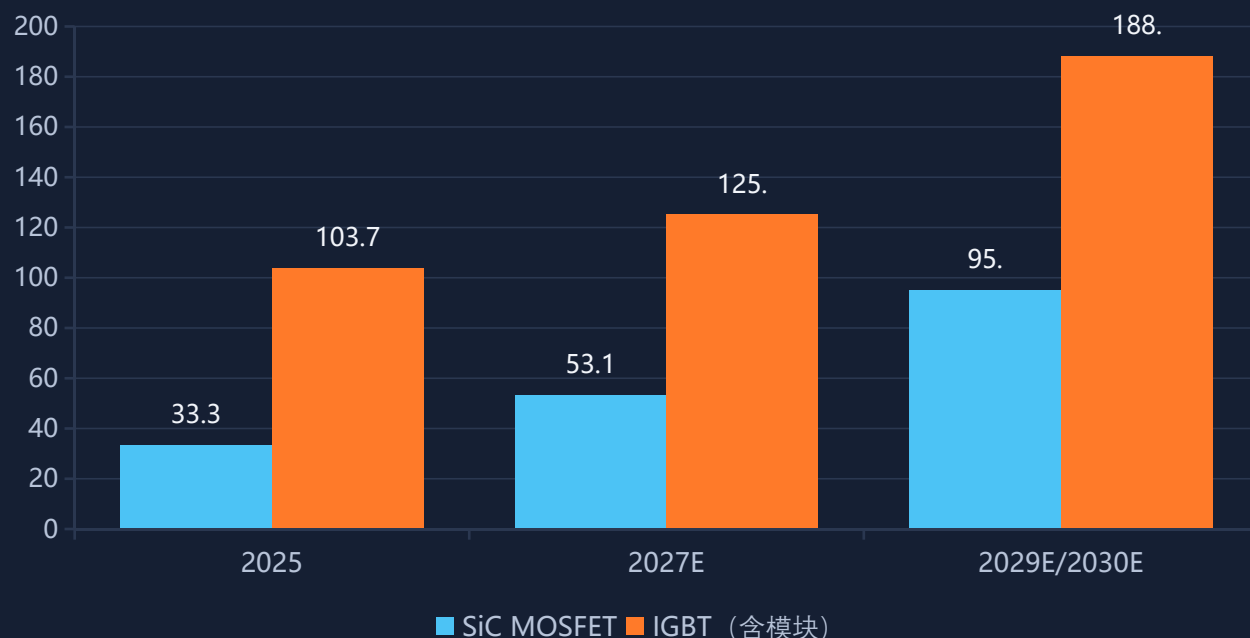
SiC 在 EV 主驱渗透率: 2022 15% → 2024 28% → 2030E 40%+

顶冷封装渗透率与高压器件用量同步爬升

数据来源: Yole Group 《Power GaN 2026》《功率电子行业现状 2025》、Elektor 报道

两大主力器件：SiC MOSFET 与 IGBT 市场规模

全球市场规模对比（亿美元）



注：SiC MOSFET 口径为 Yole 器件市场；IGBT 为 Research and Markets / 中商产业研究院全球口径（含模块）

SiC MOSFET

33.3 亿美元 (2025)

2029E 规模 **80.6 亿美元 (Yole)**

CAGR **25.9% (2023-2029)**

关键驱动 **800V 主驱逆变器、光储、AI 电源**

IGBT (单管 + IPM + 模块)

103.7 亿美元 (2025)

2030E 规模 **188 亿美元, CAGR 12.6%**

主战场 **新能源车 42.1%、工业驱动**

格局 **亚太占 55%+, 国产替代加速**

对顶冷的含义：IGBT 仍是规模最大的存量基本盘，SiC MOSFET 是增速最快的高压增量——两者都在向 1200V 及以上、更高功率密度演进，封装热管理从“配套环节”升级为“价值定义环节”。

顶冷之后的四条演进路线



双面冷却 DSC

封装再进化

- 顶冷之上继续叠加：正反两面同时导热
- onsemi 已推出 3.3×3.3 / 5×6 双冷 GaN
- 目标：把热阻网络再砍一刀



先进互连组合拳

材料革命

- 铜夹取代铝线：功率循环寿命提升 10 倍（罗姆）
- 烧结银工艺：模块热阻降低约 40%（英飞凌 M1H）
- 顶冷 + 先进互连 = 高可靠高密度双保险



宽禁带 × 顶冷

器件全覆盖

- SiC 1200V QDPAK、GaN TOLT 均已量产就位
- 800V EV 平台与 AI 机架架构是需求放大器
- 电压与频率越高，封装热管理价值越大



下一站场景

需求外溢

- 人形机器人执行器：2030 后的潜在增长引擎（Yole）
- eVTOL、AI 电源持续向更高功率密度堆叠
- 顶冷是“封装定义功率密度”时代的入场券

散热路径的重构，正在重新定义 功率半导体的竞争格局

技术维度

TSC 将 PCB 移出热路径，系统热阻网络降约 50%，同封装功率提升 20-50%；瓶颈转移到界面材料与装配公差——工程红利依然丰厚。

产业维度

五年内从英飞凌独有技术演变为全球标配；中国厂商（华润微、海明微等）完成平台化量产，顶冷成为国产功率器件高端化抓手。

市场维度

AI 数据中心与汽车电动化双引擎：功率 GaN 市场 2031 年达 35 亿美元（CAGR 35%）；顶冷封装渗透率随高压器件用量同步爬升。

资料来源：Yole Group、英飞凌、Nexperia、onsemi、意法半导体、罗姆、华润微、海明微、Wolfspeed、TI 等公开资料