

顶部散热封装在功率半导体中的应用

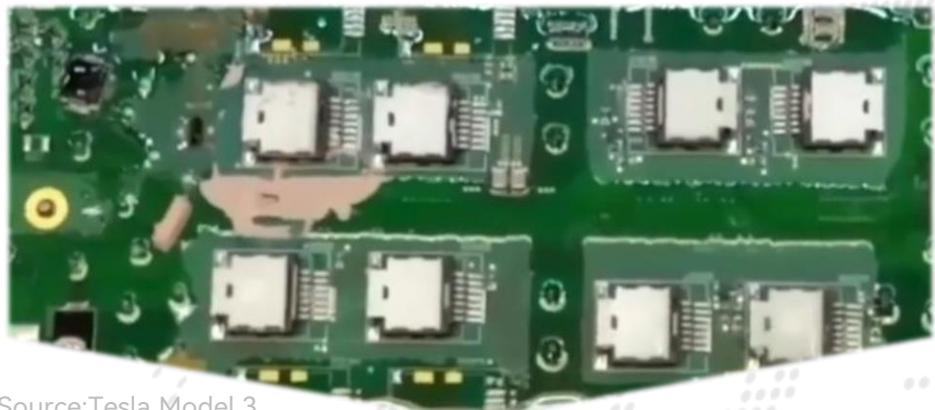
湖南三安半导体

姚晨

许亚坡 张建山

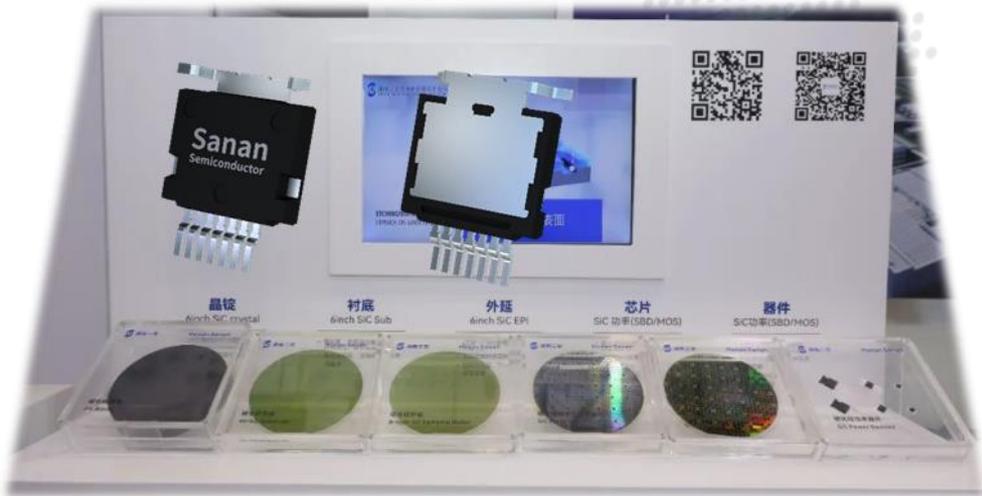
AN2025-P01 Rev1.1

2025/03/28



Source: Tesla Model 3

TSC & System



目录

01 / 功率器件的顶部散热封装方案

02 / 顶部散热器件的应用优势

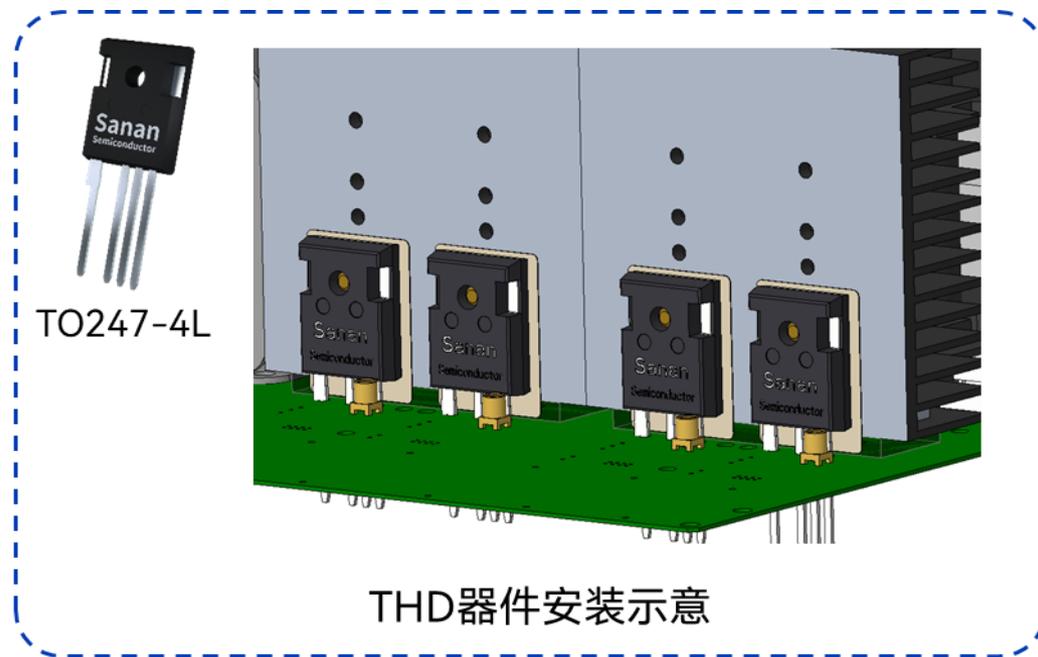
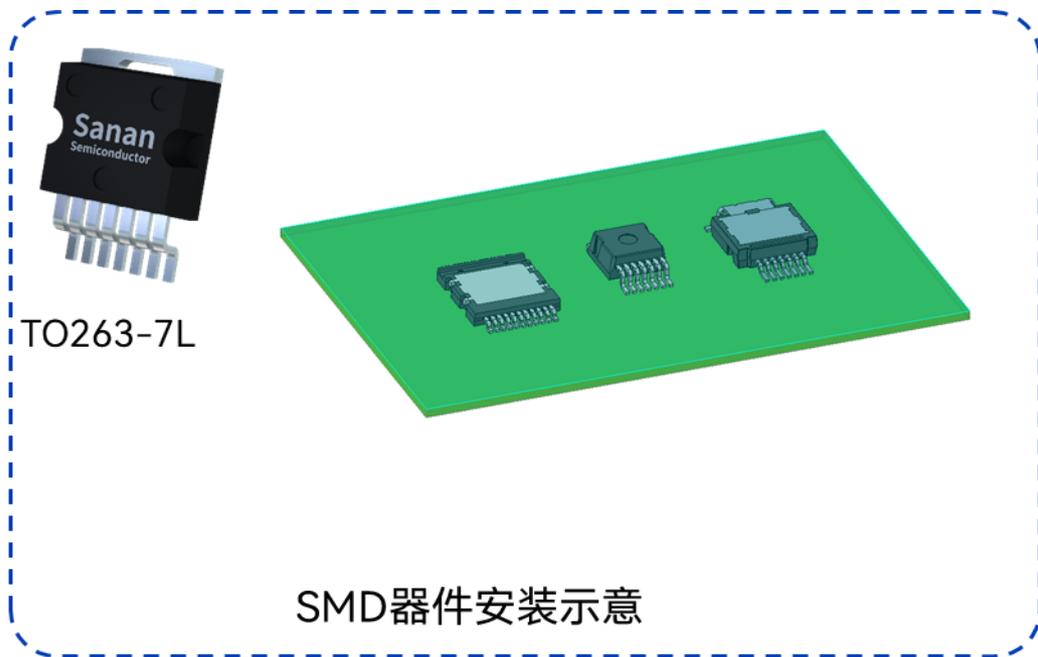
03 / 如何保证顶部散热的可靠应用

04 / 三安半导体的顶部散热器件

05 / 总结与展望

一、SMD及其优劣势

- 1. 分类：**器件一般可以通过SMT（Surface Mount Technology）表面组装技术与THT（Through-Hole Technology）孔插装技术焊接到PCB板上；对应的器件分别称为SMD（Surface Mount Device）表面贴装器件与THD（Through-Hole Device）孔插装器件。
- 2. 组装方式差异：**SMD器件的特点是其引脚直接焊接在PCB的表面上，而不需要通过孔径插入到PCB中，
- 3. 优势：**SMD具有更小的体积、更高的密度和更高的可靠性；便于SMT产线的高效自动化，从而提高生产效率和降低成本。
- 4. 劣势：**传统SMD器件一般通过引脚、PCB上的焊盘或者外加铜条散热，大功率高发热器件可能难以满足需求。



二、顶部散热的表贴器件

保持传统表贴器件的高效组装优势

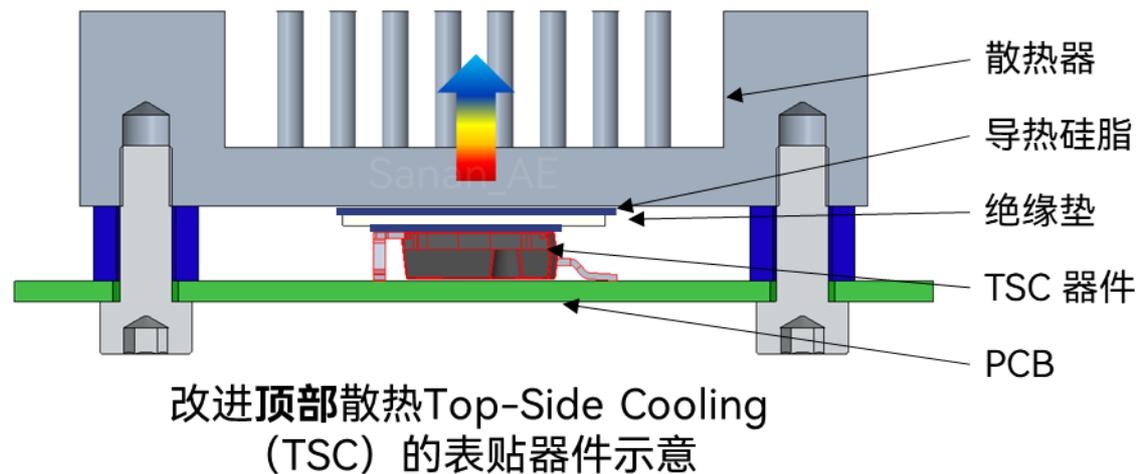
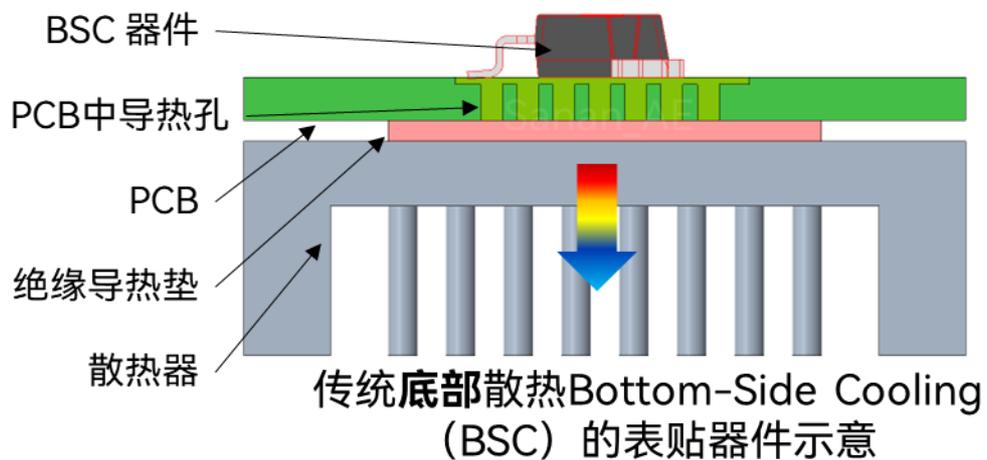
+

突破PCB板散热能力的限制

如何

器件表贴与散热→解耦设计

改变其主要散热路径，将承载芯片的铜框架背面由朝下改为朝上，同时与散热器接触，使得热传递方向背离PCB板，完全摆脱PCB材料低导热率的影响，顶置散热器可以执行**自然冷却、强迫风冷、液冷以及相变冷却**等多种散热方式；同时将引脚翻转用于与PCB焊盘的连接，继承SMD的优势。



三、常见的顶部散热应用示例

台式电脑



高功耗CPU采用冷却塔进行散热

空调电源



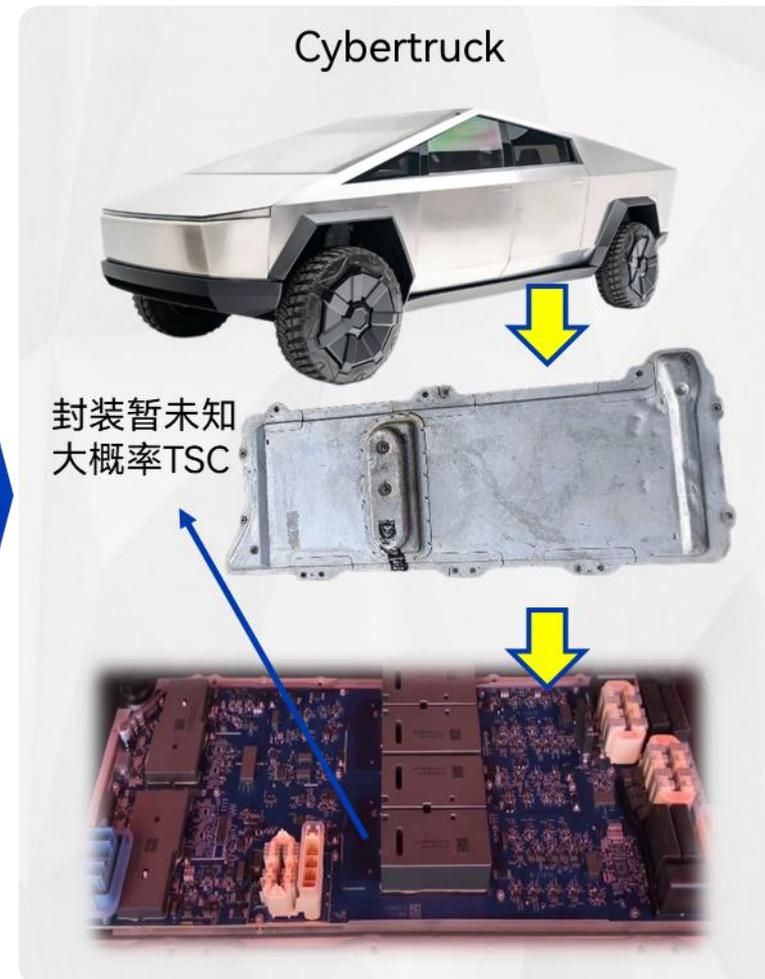
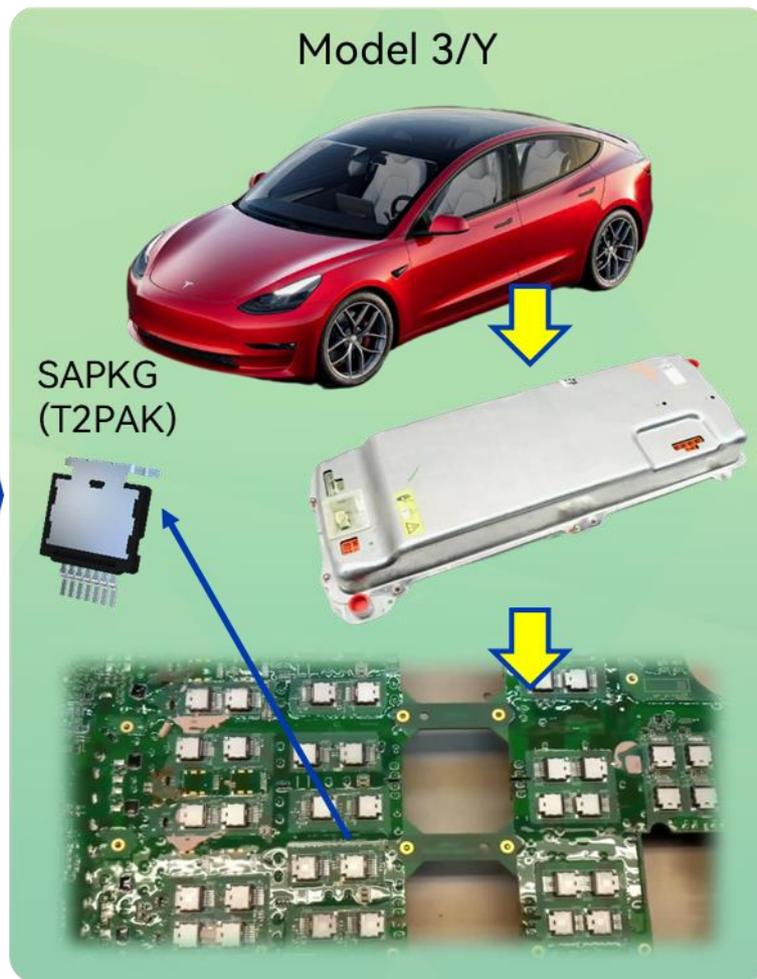
空调逆变器IPM模块采用铝合金散热器

汽车小三电



Tesla在其EV车型OBC与DC/DC中的应用

四、特斯拉PCS (Power Conversion System) 采用功率器件的演变



五、顶部散热类型封装的器件

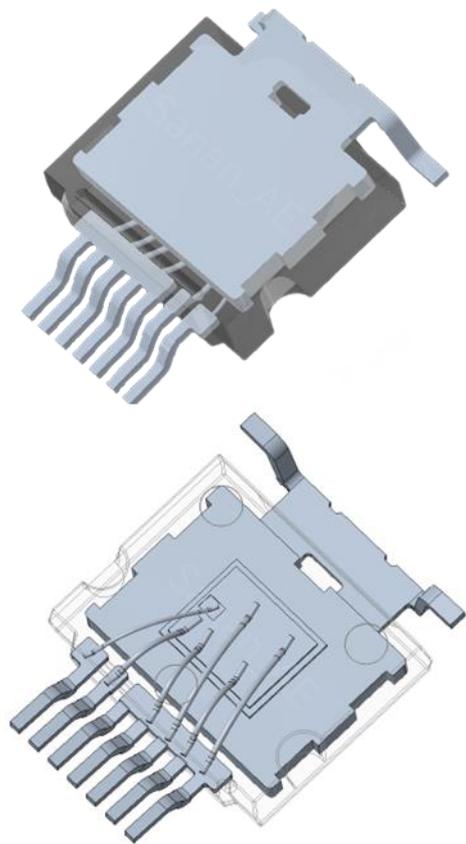
顶部散热器件广泛应用于大电流高功率密度的电力电子变换器中，表贴（SMD）与插件（THD）均有顶部散热类型的封装体。

SMD-顶部散热			THD-顶部散热	
SAPKG-9L(Sanan) T2PAK(Tesla) HU3PAK(ST) TO263-9-1(Infineon)	MO-332A (JEDEC) TOLT(Infineon)	SMIT	三相IPM	Easy1B/2B/3B

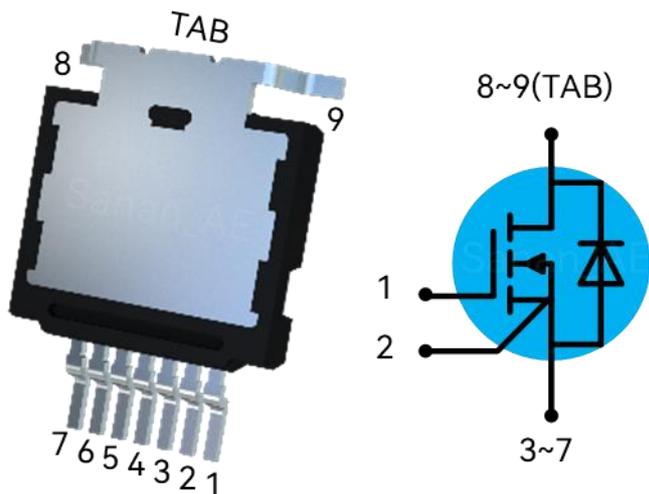
一、封装的结构与尺寸

以当前在汽车应用较多封装形式的SAPKG-9L为例

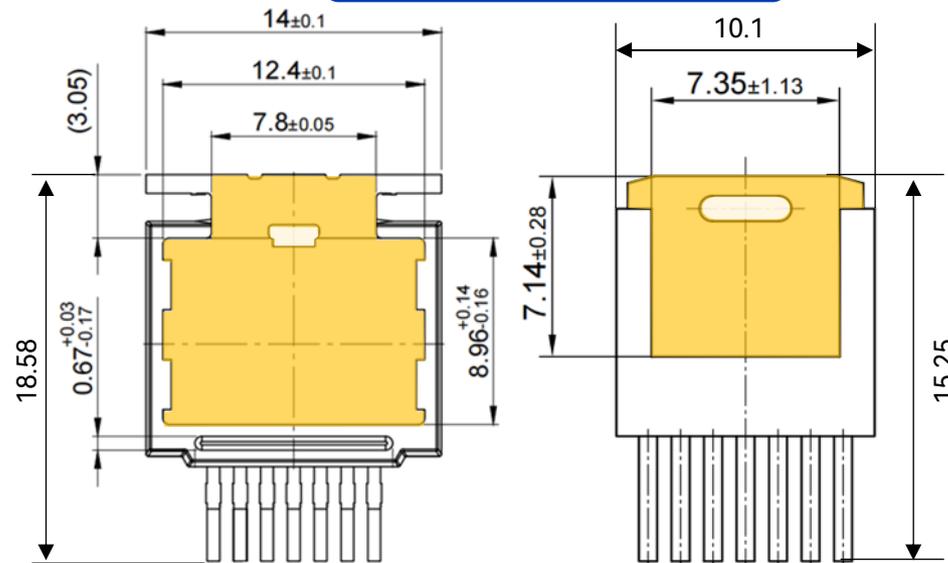
三维示意图



引脚定义



顶部散热金属面面积



备注：实际产品可能有所差异

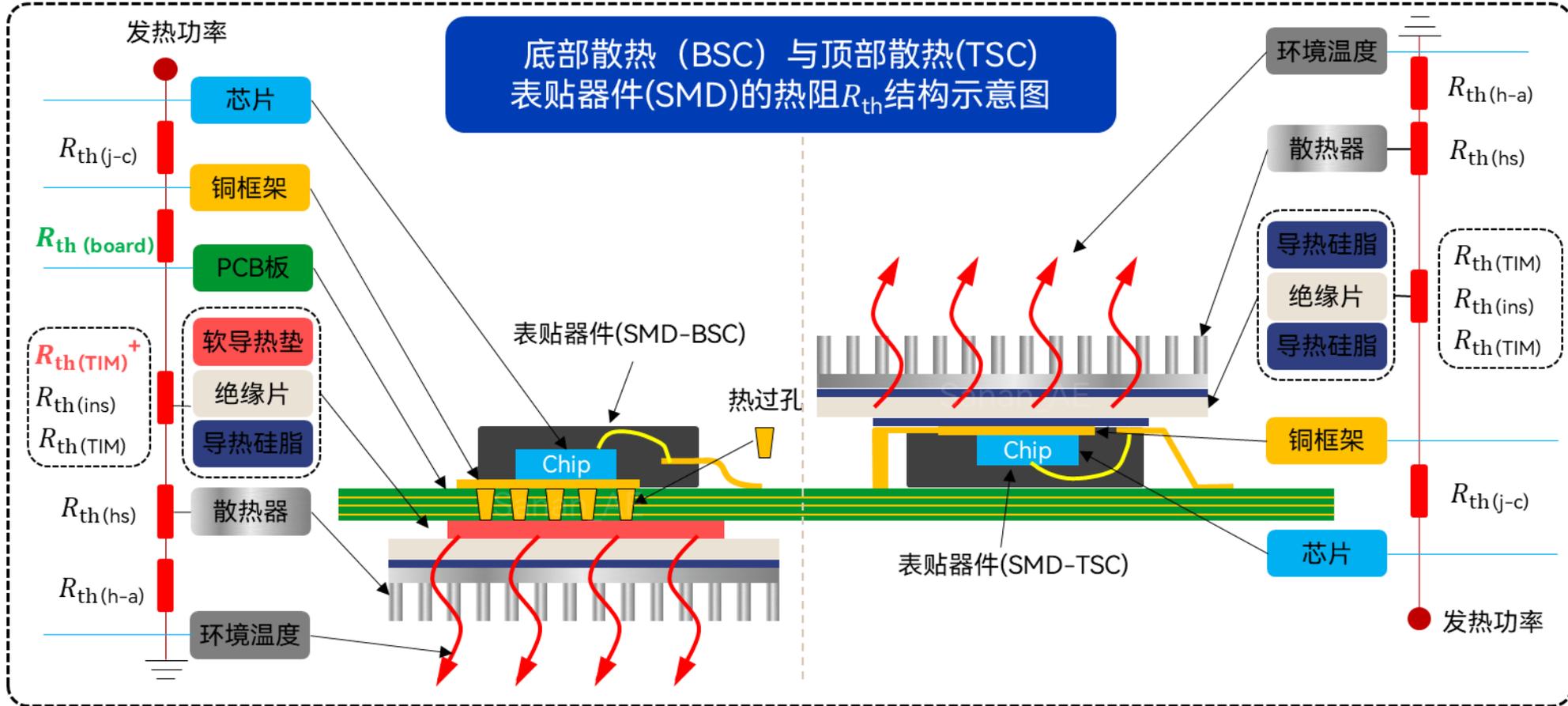
序号	定义
1	Gate
2	Kelvin Source
3~7	Source
8~9(TAB)	Drain

类型	SAPKG-9L	TO263-7L	比较
封装体外形长宽	18.58x14mm	15.25x10.1mm	约1.7倍
散热面	45.2mm²	23.8mm ²	约2倍

备注：实际产品可能有所差异

02 顶部散热器件的应用优势

二、散热能力提升



- 改变热量传递路径
向上传热
- 避免PCB热量闭塞
FR4导热率约0.3W/(m*K)
- 高性能封装拓展应用
突破TO252/TO263
- PCB设计 | 散热设计
独立
- 结到环境热阻降低

表贴器件(SMD-BSC)热阻组成

$$R_{th(j-a)} = R_{th(j-c)} + R_{th(board)} + R_{th(TIM)}^+ + R_{th(ins)} + R_{th(TIM)} + R_{th(hs)} + R_{th(h-a)}$$

表贴器件(SMD-TSC)热阻组成

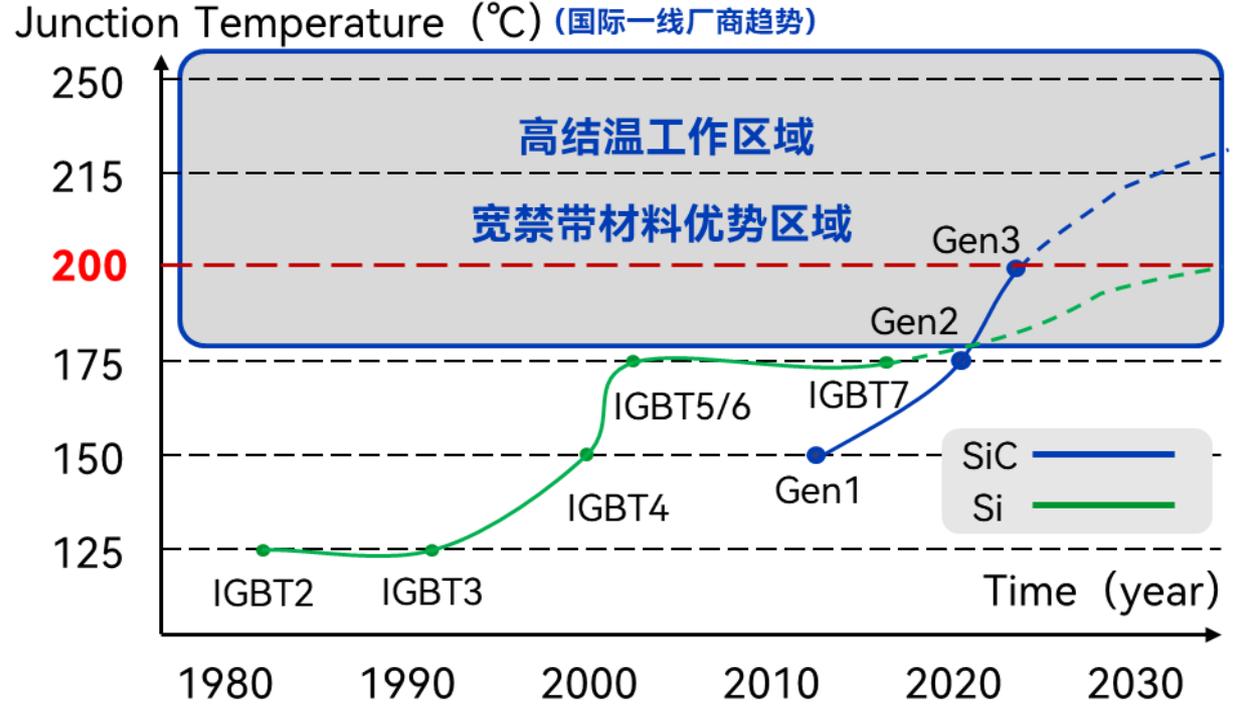
$$R_{th(j-a)} = R_{th(j-c)} + \text{[]} + R_{th(ins)} + R_{th(TIM)} + R_{th(hs)} + R_{th(h-a)}$$

$R_{th(j-a)}$ 改善约 20%
 $R_{th(j-h)}$ 改善约 50%

02 顶部散热器件的应用优势

三、充分发挥SiC芯片性能

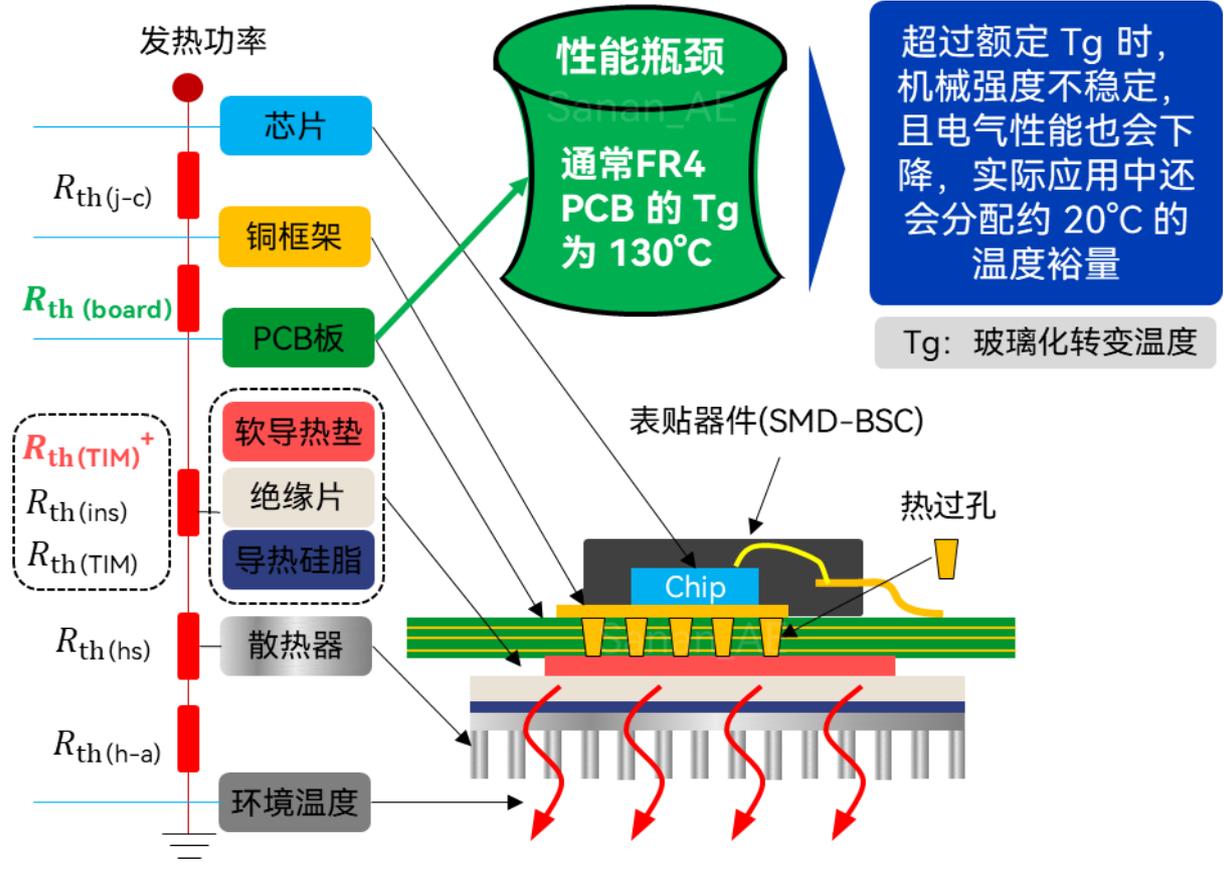
作为第三代半导体材料，工作结温高（理论400°C以上）



目前
200°C
最高允许工作结温

更强的过载能力
更高的功率密度

22kW → 22kW



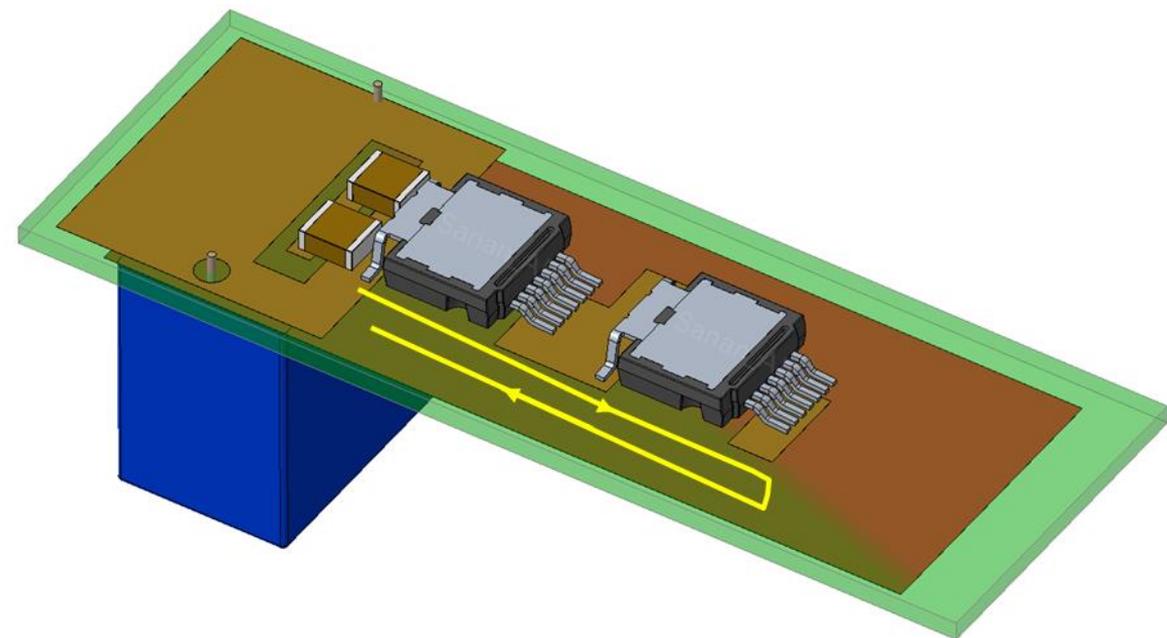
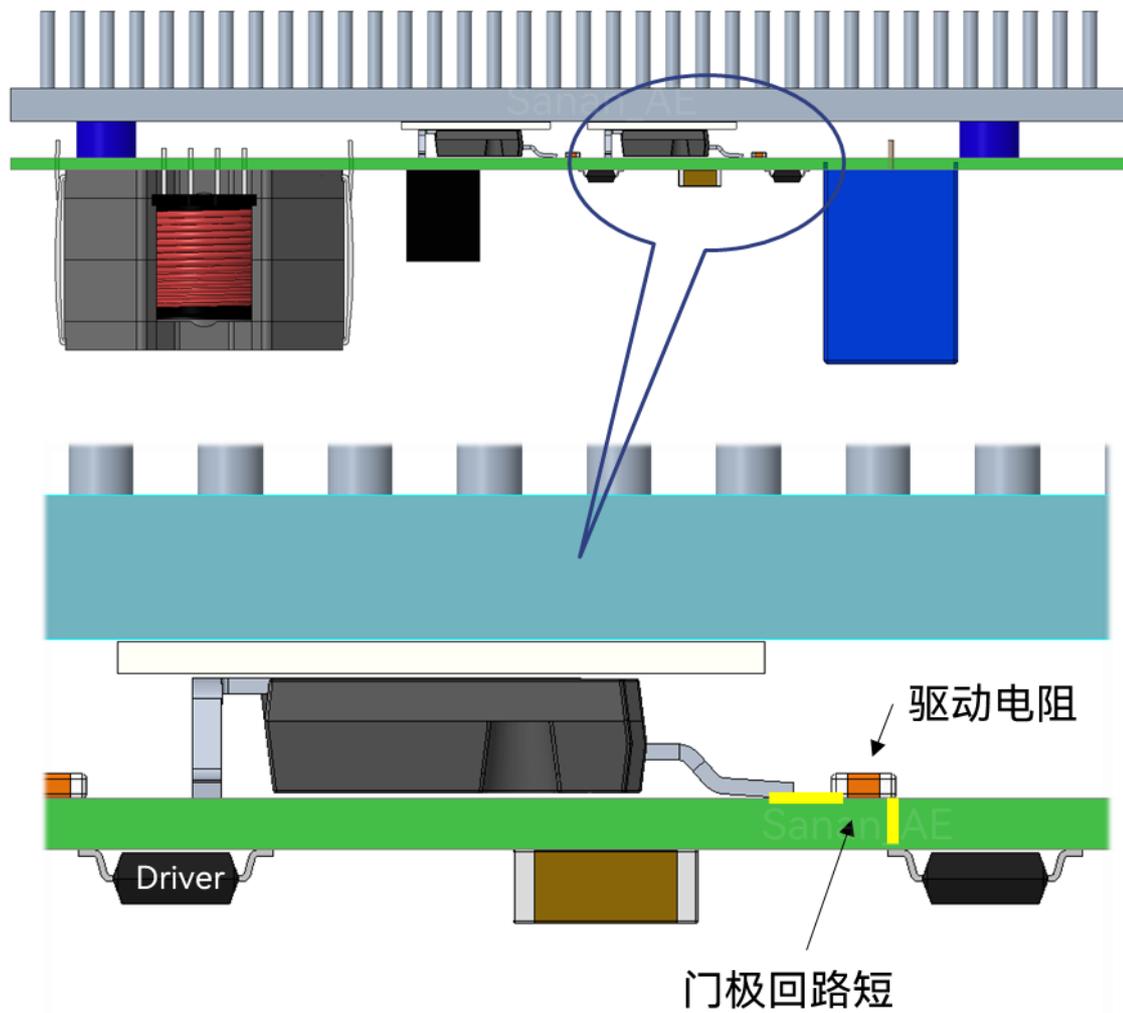
PCB board
约**110°C**
长期工作温度限制

采用TSC方案

突破PCB温度瓶颈限制
充分发挥芯片出流能力

降低对高价值芯片需求
实现功率器件选型降本

三、驱动回路短，PCB双面布局；功率回路电感小



通过下层PCB铜层返回电流路径，实现正负母线叠层效果，减小回路寄生电感，降低开关过程中的电压尖峰。

02 顶部散热器件的应用优势

四、高集成、高功率密度

车载OBC

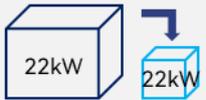
发展趋势

功率等级增加



3→6.6→11→22kW

功率密度提高



22kW → 22kW

效率要求更高



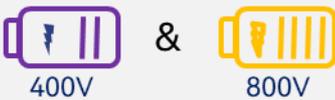
峰值 >97%

双向充放电

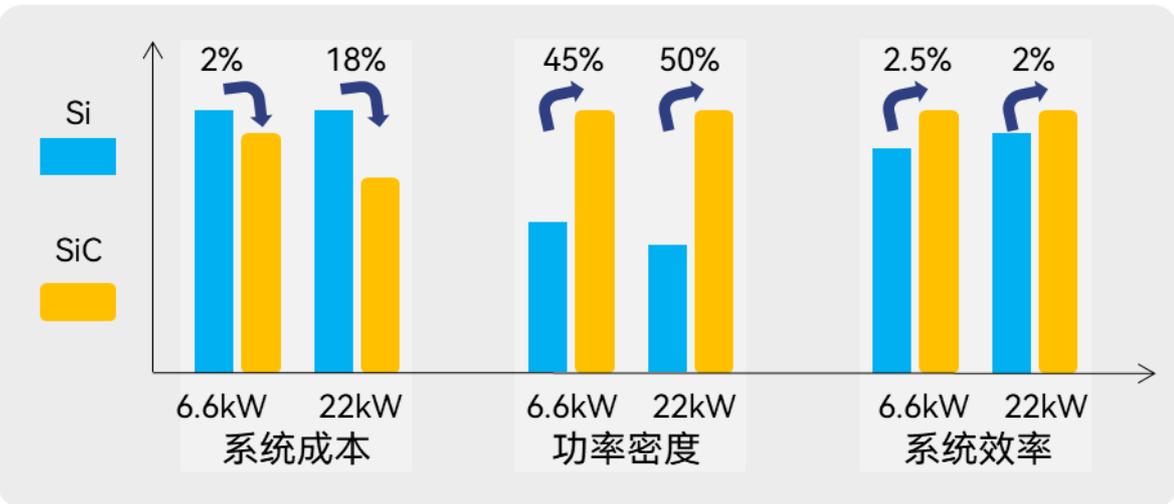


V2X (V2H, V2G, V2V...)

支持400/800V电压平台



400V & 800V



电力电子变换器始终最求的目标
更高效率、更高功率密度



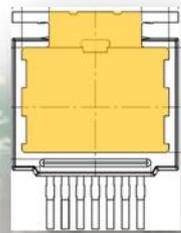
采用合理的成本方案
保持产品市场竞争力

解决器件在
紧凑空间的散热问题

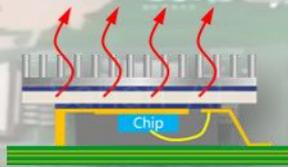
02 顶部散热器件的应用优势

五、优势总结

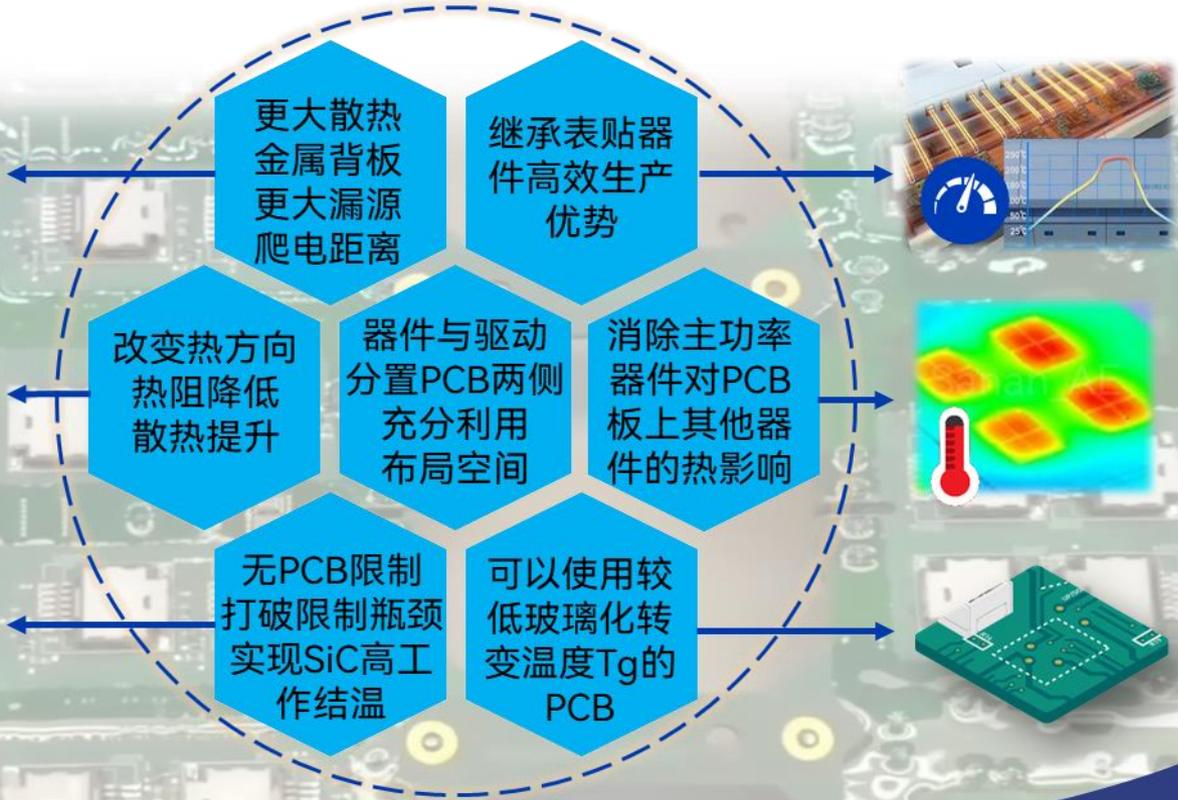
2倍于TO263-7
可承载更多/更大芯片



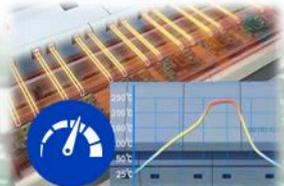
$R_{th(j-a)}$ 改善约20%
 $R_{th(j-h)}$ 改善约50%



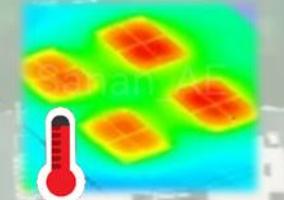
实现SiC芯片最高工作结温175~200°C



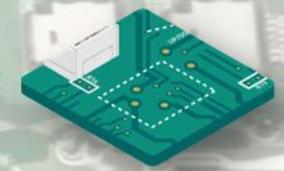
兼容
高效、高稳定性



热耦合程度
降到最低



可选PCB
Tg≈130 °C

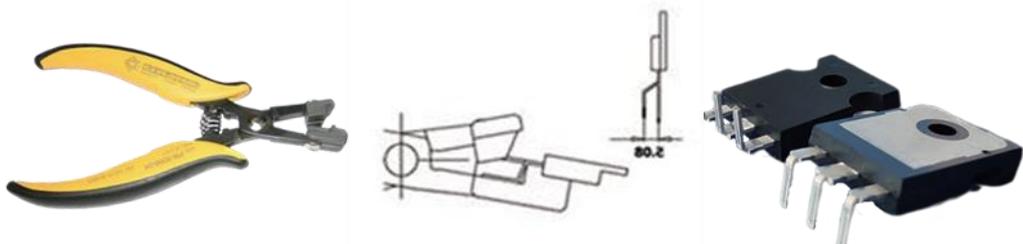


高生产效率! 高功率密度! 高产品竞争力

五、如何将传统插件类器件转变为顶部散热

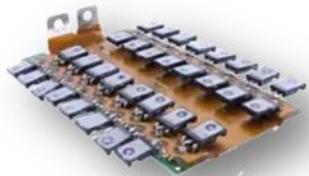
器件引脚折弯90°

TO220
TO247
TO251
KBP、KBL...

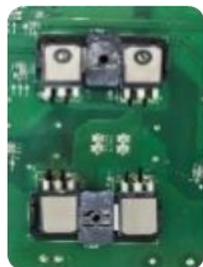


器件引脚的折弯应用

Source: Tesla Model S Gen1



汽车逆变器中

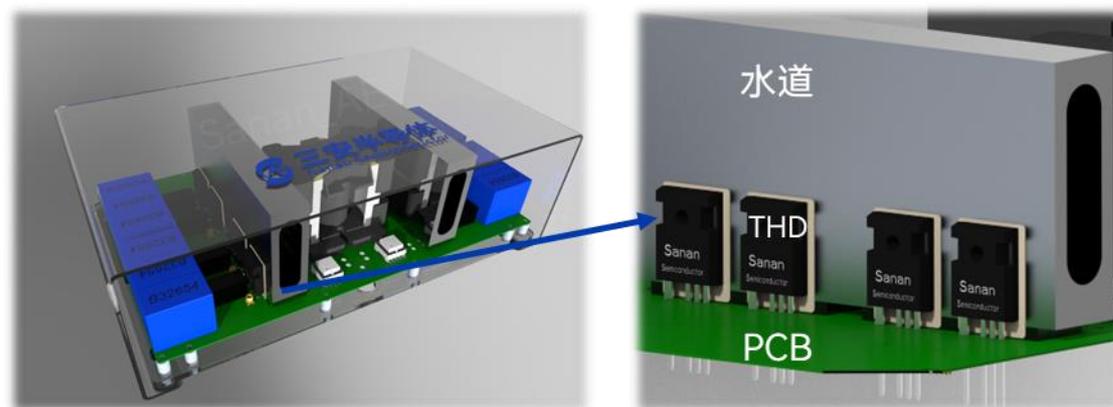


光伏逆变器中



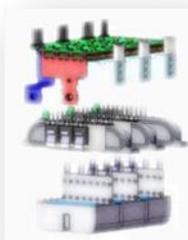
空调PFC中

冷却水道/散热器与PCB垂直



器件垂直插入冷却壁面的应用

Source: Tesla Gen2



汽车主驱逆变器中

Source: 英博尔

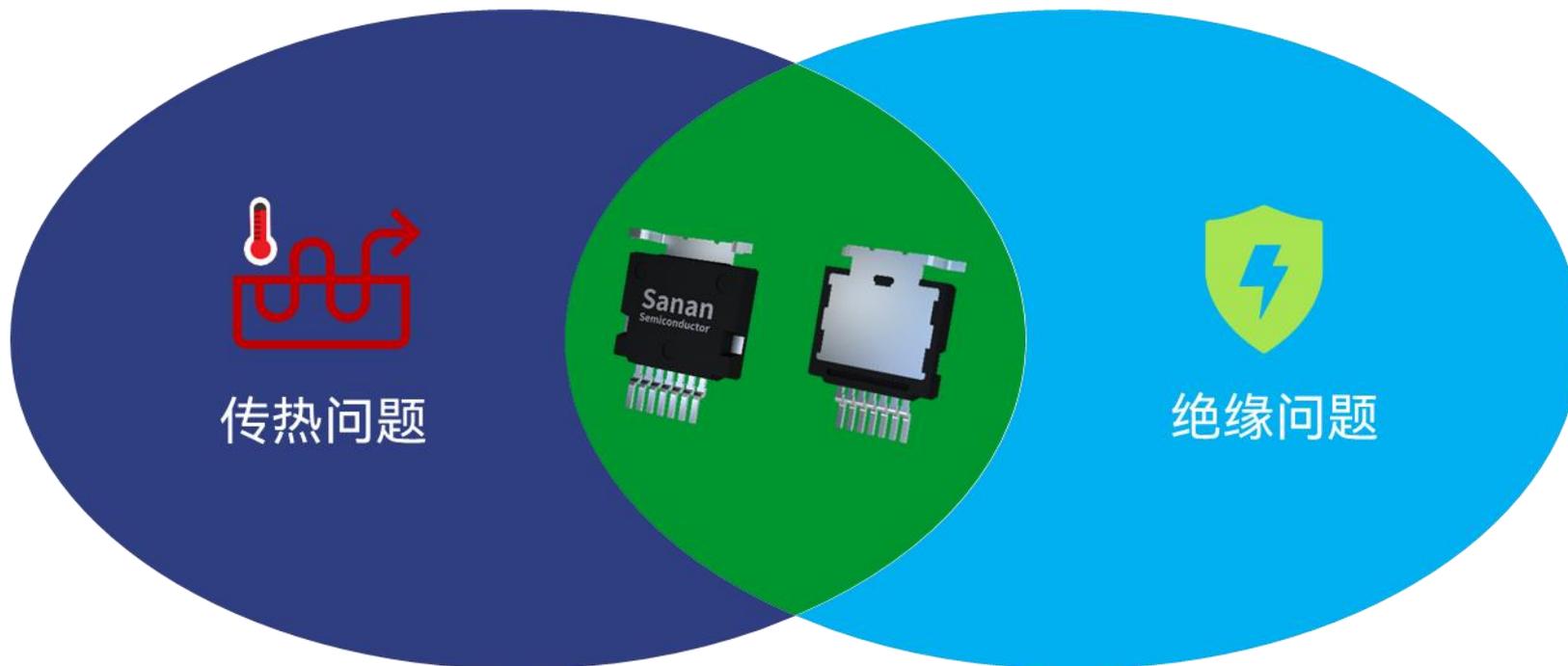


Source: Vmax



车载充电机中的应用

一、为何要强调去保证可靠应用

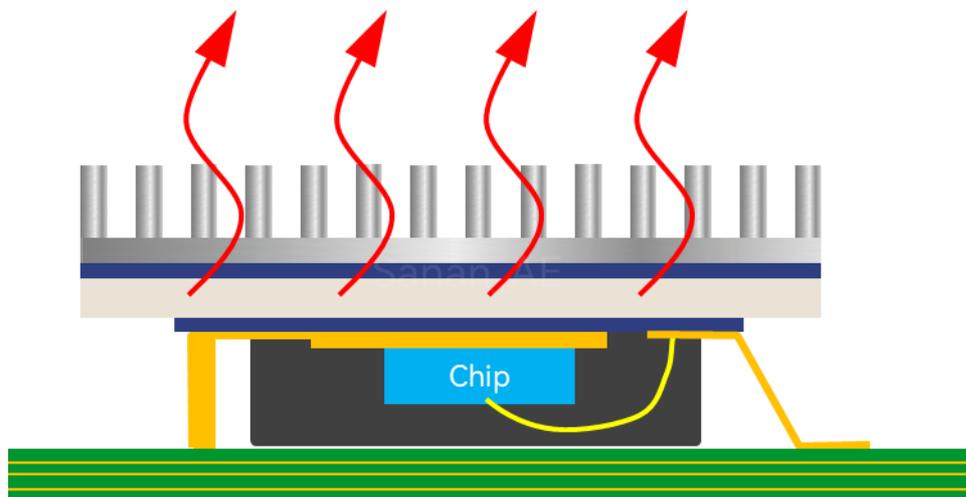


需要重点关注实际产品应用过程中的2点问题

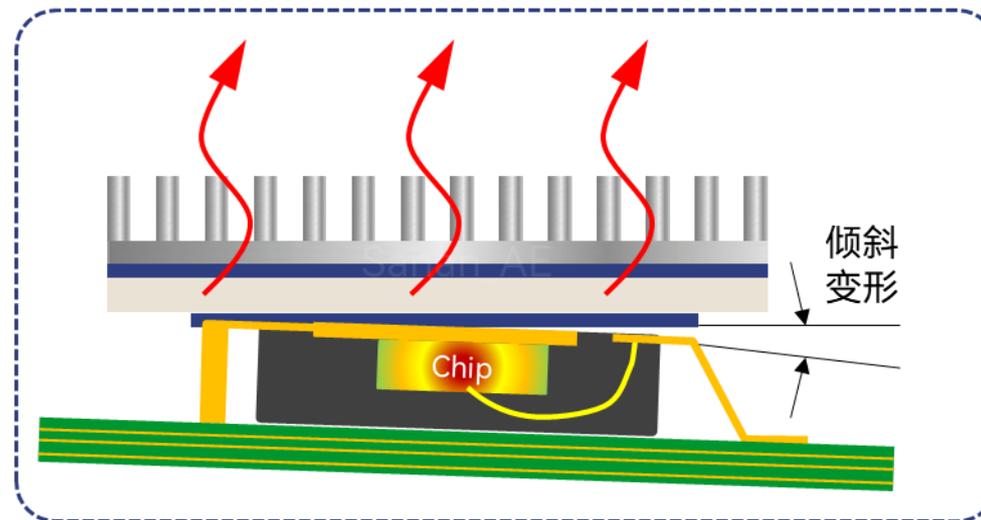
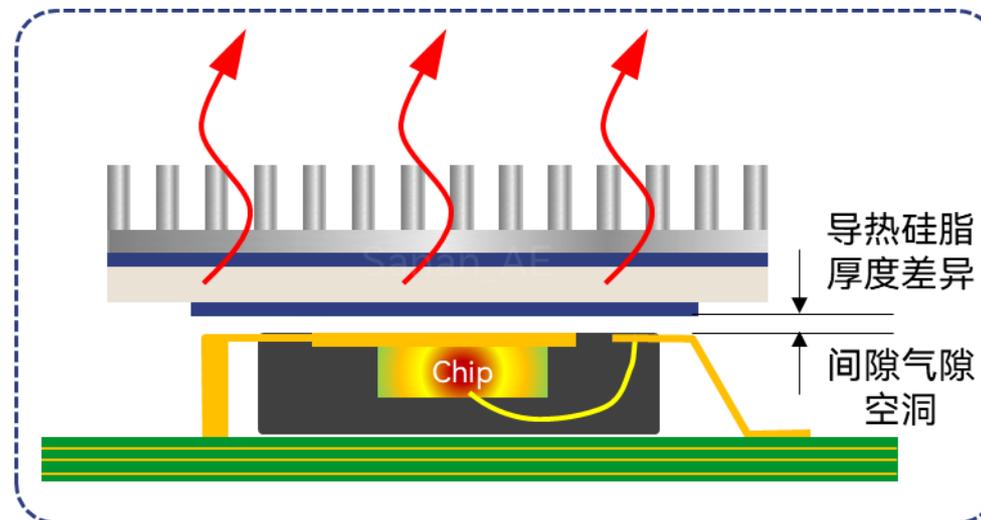
二、传热问题的产生原因



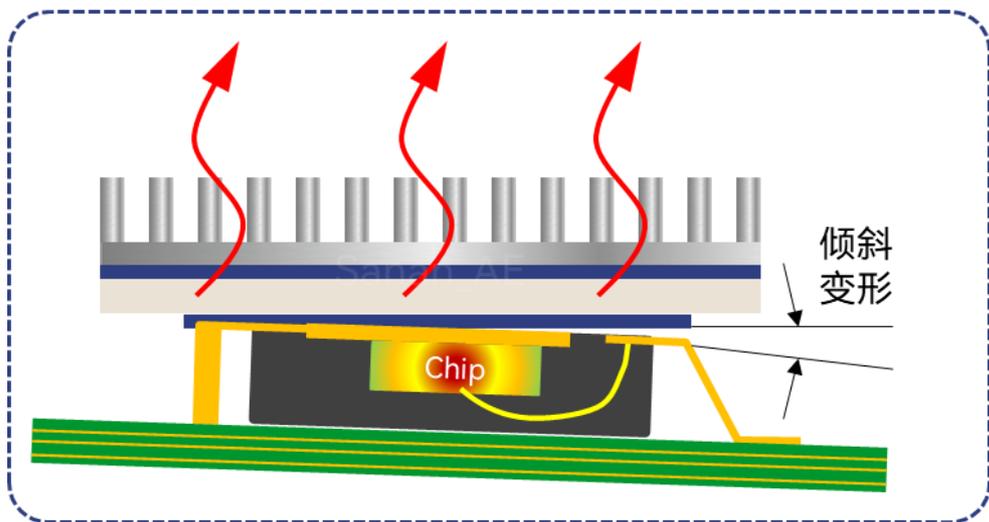
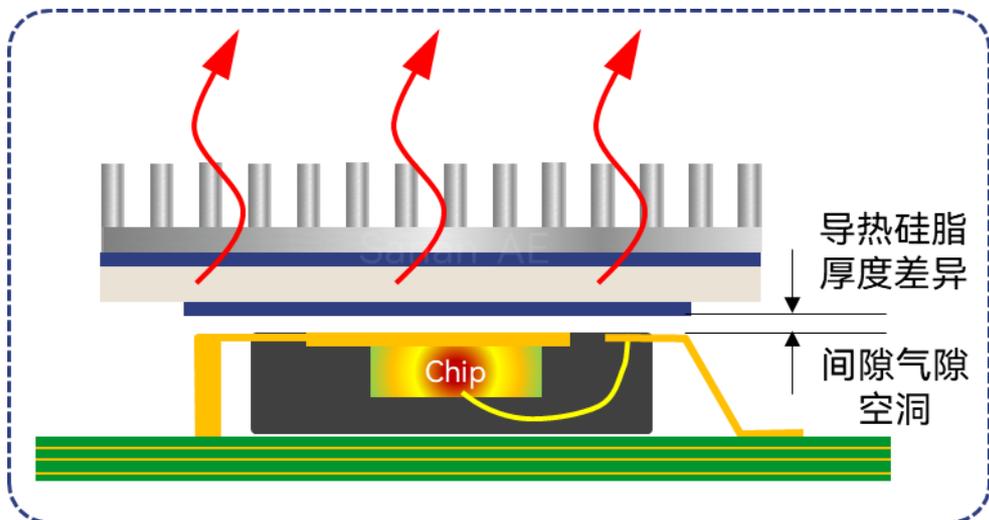
理想接触



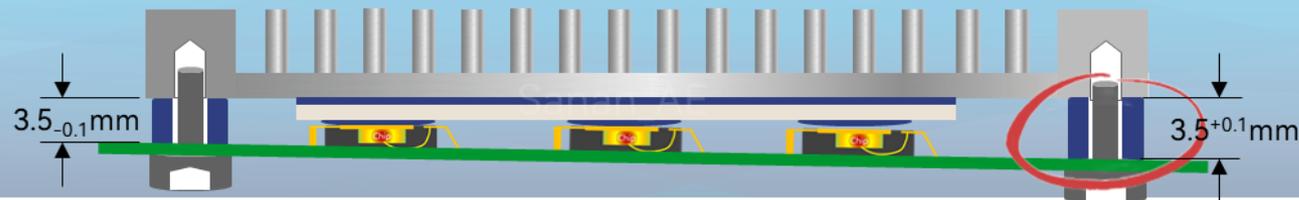
实际应用可能问题



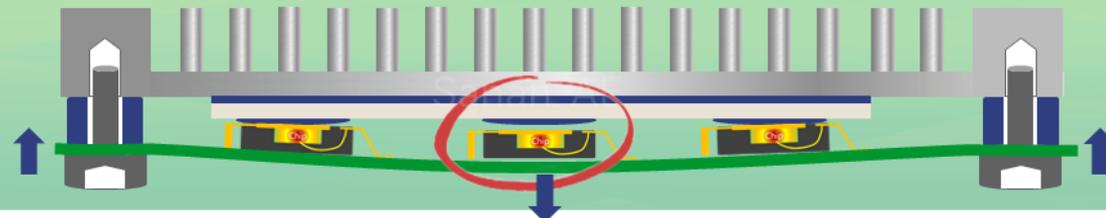
二、传热问题的产生原因



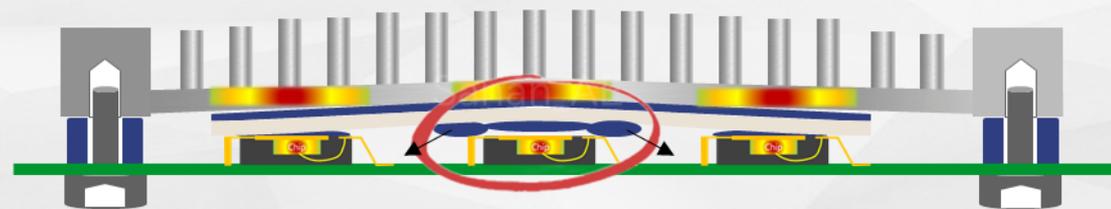
回流焊后再二次装配去散热面贴合，各零部件的累积尺寸公差导致接触不良



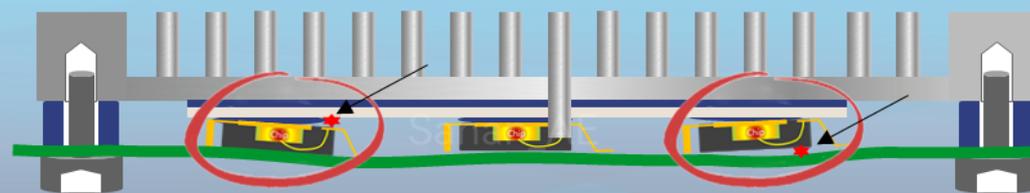
为了使得器件散热面紧贴导热部件，采用螺钉紧固PCB板时会使得其变形弯曲



器件/磁件发热导致PCB/散热器面产生热变形，在功率循环过程中还可能致硅脂泵出



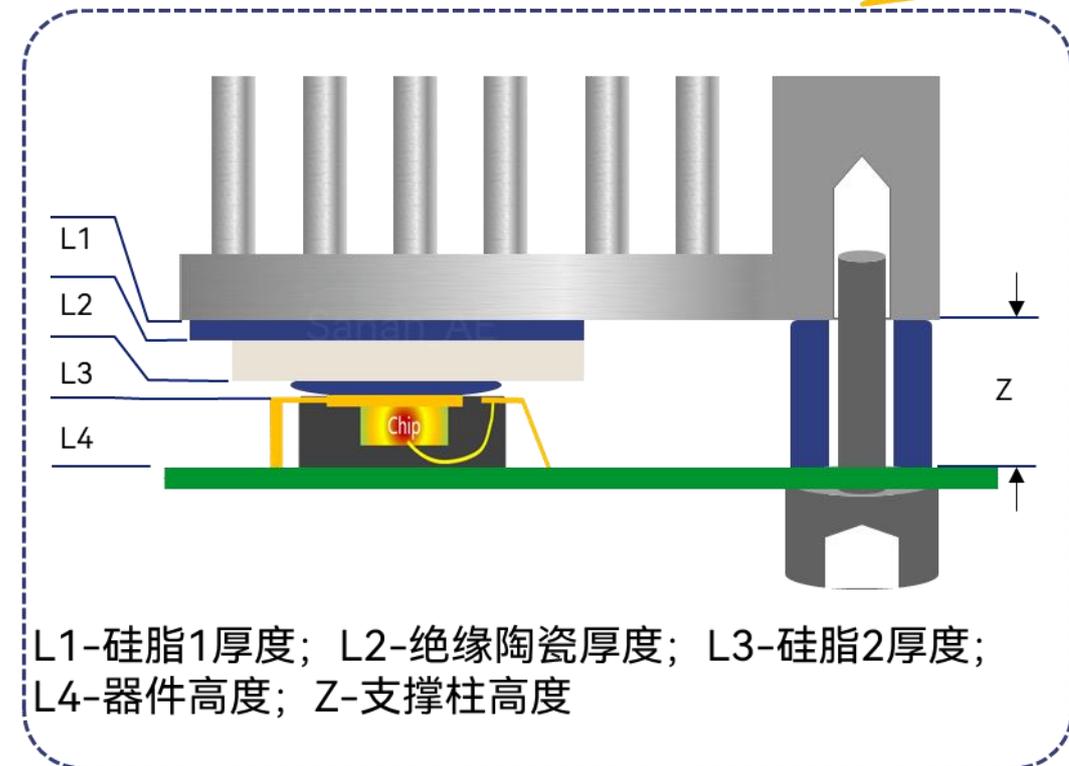
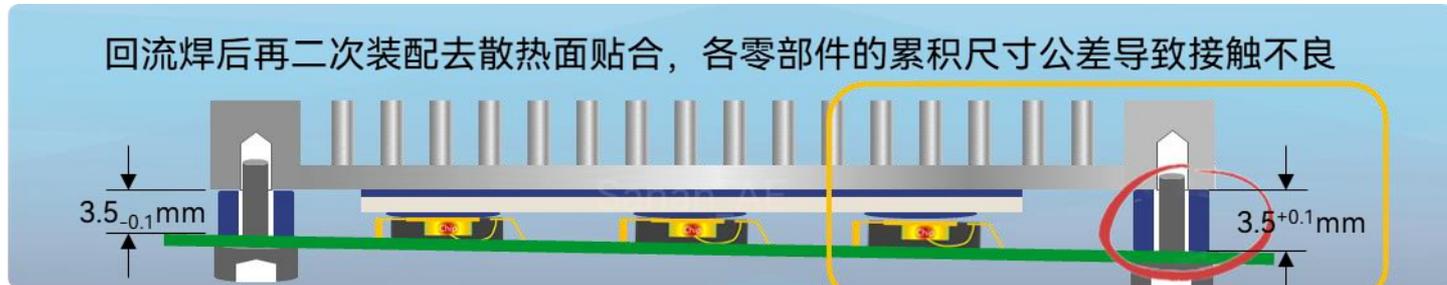
器件回流焊面/导热接触面存在大颗粒污物导致器件倾斜



03 如何保证顶部散热的可靠应用

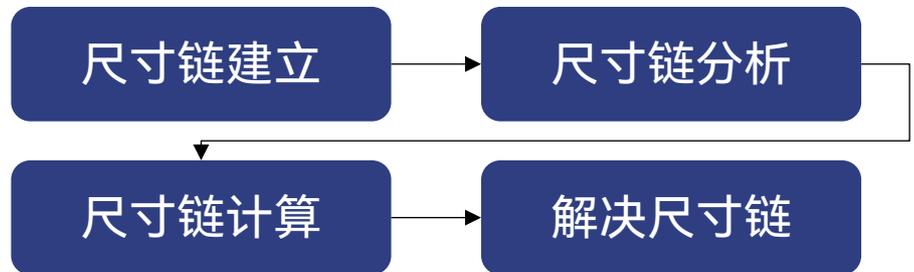
三、传热问题的处理办法

回流焊后再二次装配去散热面贴合，各零部件的累积尺寸公差导致接触不良



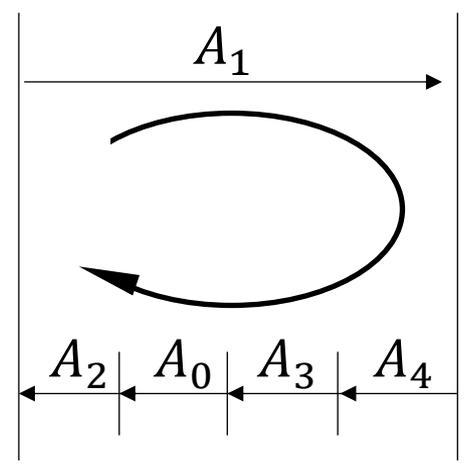
进行关键零部件的公差控制与尺寸链计算

目标:
仔细管理和最小化机械公差，以达到最佳的热性能。



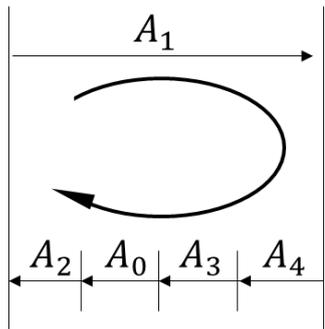
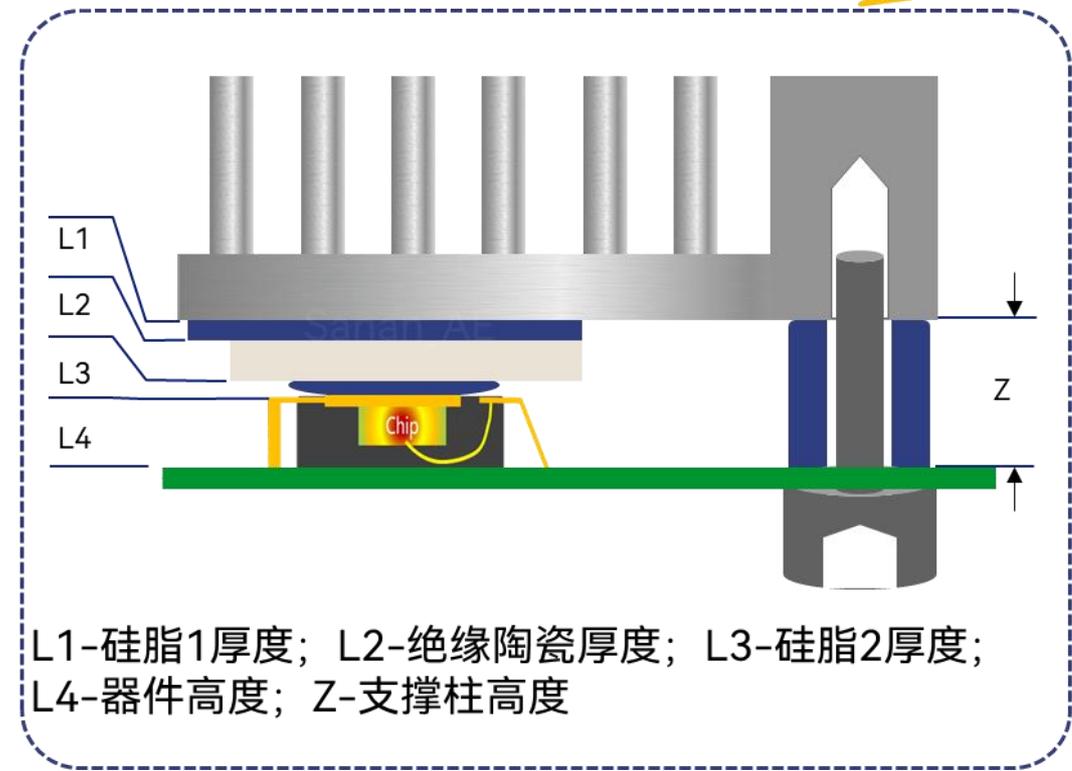
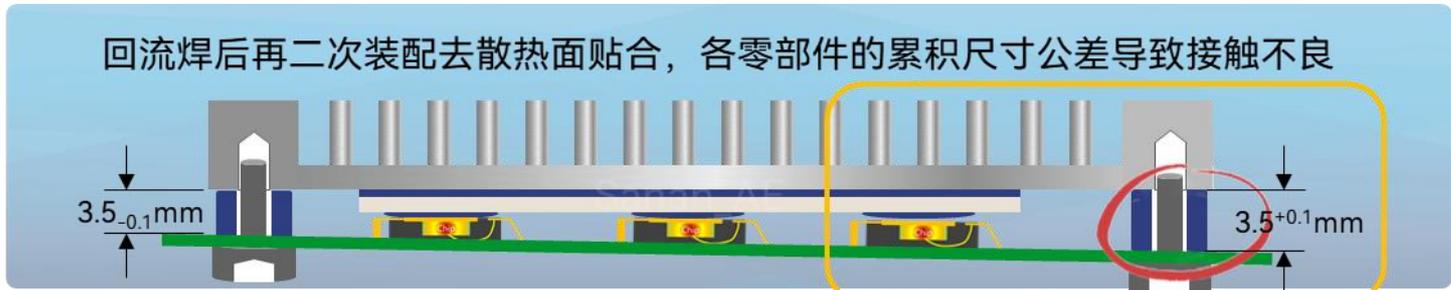
尺寸链的定义: 是由一组相互连接的尺寸形成的封闭尺寸组。在工程设计和制造中经常用尺寸链来进行工艺尺寸换算，控制关键尺寸的公差，从而保证产品的制造精度。

- 环:** 尺寸链中每一个尺寸都叫做一环。
- 封闭环:** 加工或装配过程中最后自然形成的尺寸叫做封闭环，记为 A_0 。
- 判断封闭环是尺寸链分析的最重要一步。
- 组成环:** 除封闭环以外的其他环叫做组成环，根据对封闭环的影响不同，分为增环和减环。
- 增环:** 与封闭环同向变动的组成环称为增环。即其他组成环不变,该组成环尺寸增大,封闭环尺寸随之增大，记为 \vec{A} 。
- 减环:** 与封闭环反向变动的组成环称为减环。即其他组成环不变,该组成环尺寸增大,封闭环尺寸随之减小，记为 \hat{A} 。



三、传热问题的处理办法

进行关键零部件的公差控制与尺寸链计算



封闭环的基本尺寸: $A_0 = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{A_i} - \sum_{i=1}^n \overleftarrow{A_i}$

封闭环的最大极限尺寸: $A_{0max} = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{A_{imax}} - \sum_{i=1}^n \overleftarrow{A_{imin}}$

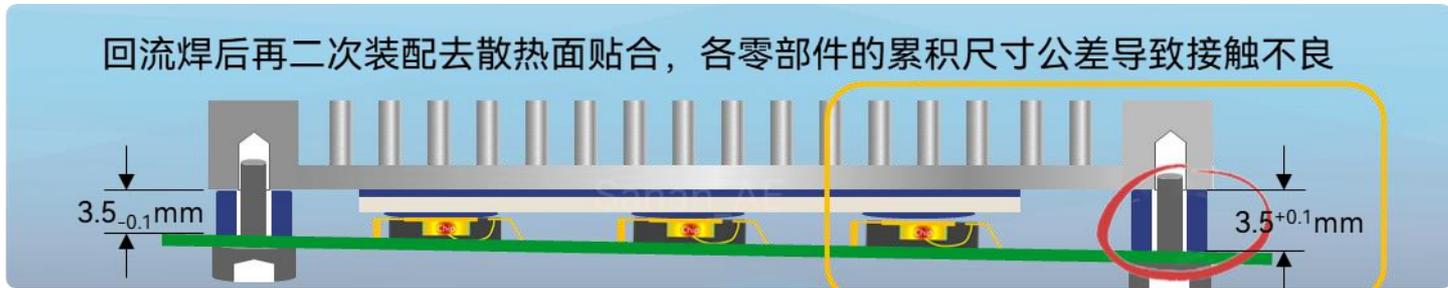
封闭环的最小极限尺寸: $A_{0min} = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{A_{imin}} - \sum_{i=1}^n \overleftarrow{A_{imax}}$

式中: m表示增环数目, n表示减环数目

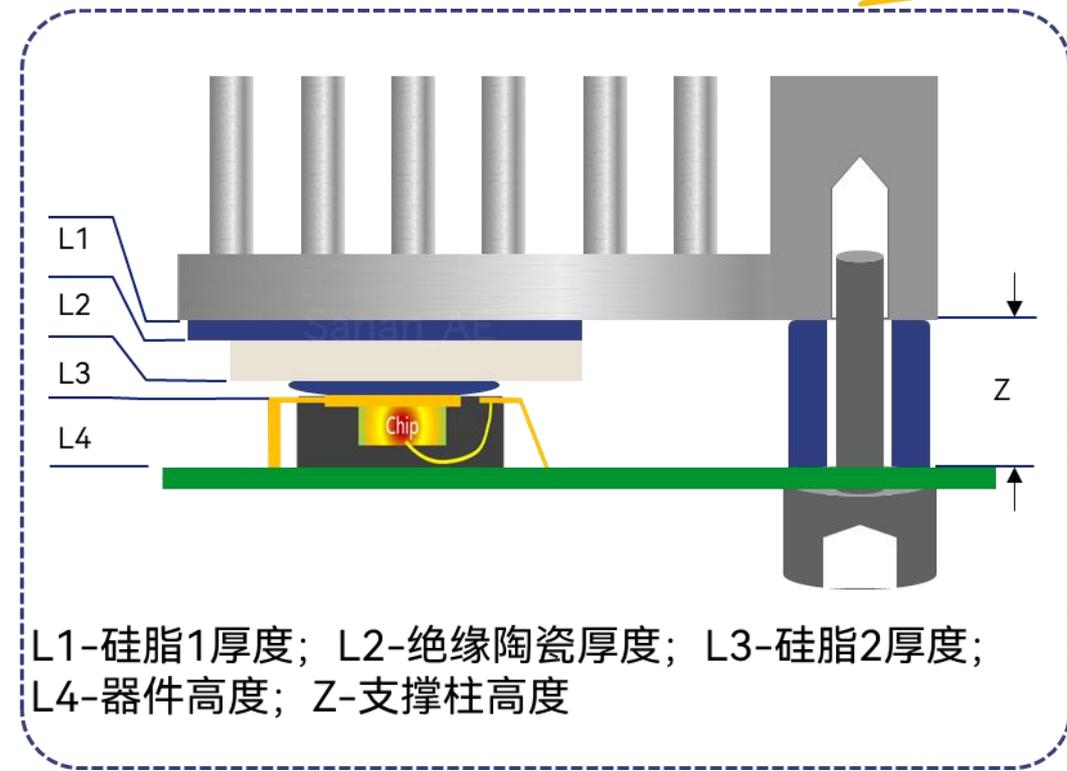
[1]黄伟. 面向装配的计算机辅助公差分析及优化设计[D]. 安徽农业大学.
[2]秦家爱, 张顺法. CETOL 6σ公差分析软件在电器产品设计中的应用[J]. 上海电器技术, 2009(1):5.
[3]GB/T 5847-2004 《尺寸链计算方法》

三、传热问题的处理办法

进行关键零部件的公差控制与尺寸链计算



尺寸链的定义：是由一组相互连接的尺寸形成的封闭尺寸组。在工程设计和制造中经常用尺寸链来进行工艺尺寸换算，控制关键尺寸的公差，从而保证产品的制造精度。



判断

A_0 封闭环为：L3-硅脂2厚度;
 \vec{A} 增环为：Z-支撑柱高度;
 \tilde{A} 减环为：L1-硅脂1厚度; L2-绝缘陶瓷厚度; L4-器件高度;

一般情况下，各环的基本尺寸及公差为：
 L1-硅脂1厚度：0.075±0.025mm
 L2-绝缘陶瓷厚度：1±0.1mm
 L4-器件高度：3.5±0.1mm
 Z-支撑柱高度：4.725±0.05mm

封闭环的基本尺寸

$$L3 = A_0 = \sum_{i=1}^m \vec{A}_i - \sum_{i=1}^n \tilde{A}_i = 0.15\text{mm}$$

封闭环的最大极限尺寸： $A_{0max} = \sum_{i=1}^m \vec{A}_{imax} - \sum_{i=1}^n \tilde{A}_{imin} = 0.425\text{mm}$

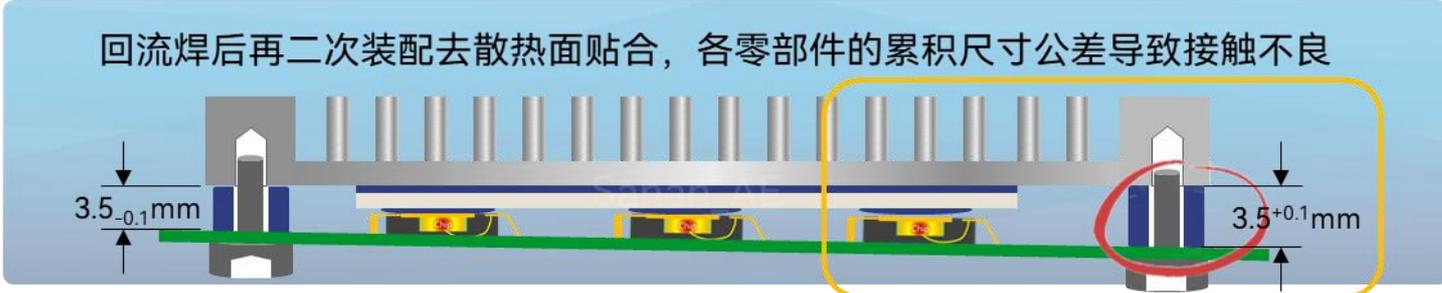
封闭环的最小极限尺寸： $A_{0min} = \sum_{i=1}^m \vec{A}_{imin} - \sum_{i=1}^n \tilde{A}_{imax} = -0.125\text{mm}$

出现了负尺寸，显然在一般情况的公差控制是有问题的

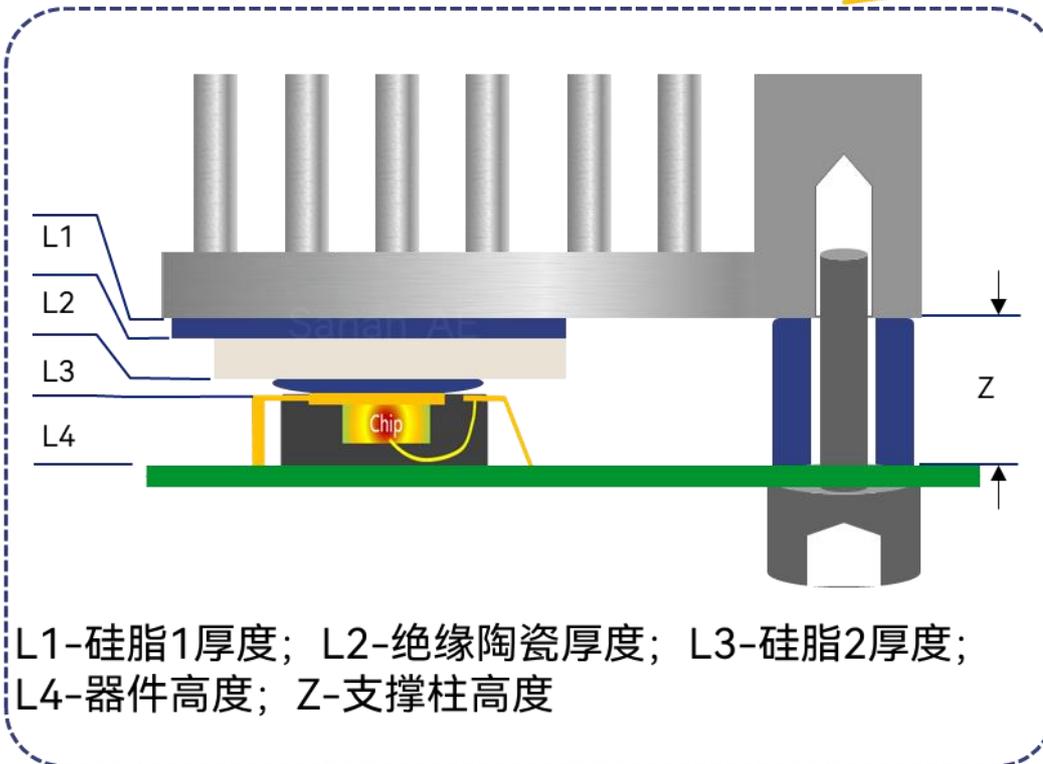
03 如何保证顶部散热的可靠应用

三、传热问题的处理办法

进行关键零部件的公差控制与尺寸链计算



尺寸链的定义：是由一组相互连接的尺寸形成的封闭尺寸组。在工程设计和制造中经常用尺寸链来进行工艺尺寸换算，控制关键尺寸的公差，从而保证产品的制造精度。



若**加强**各环的公差控制为：
L1-硅脂1厚度：0.075±0.025mm
L2-绝缘陶瓷厚度：1±**0.05**mm
L4-器件高度：3.5±**0.06**mm
Z-支撑柱高度：4.725±**0.02**mm

$$A_{0max} = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{A_{imax}} - \sum_{i=1}^n \overleftarrow{A_{imin}} = 0.295\text{mm}$$

$$A_{0min} = \sum_{i=1}^m \overleftarrow{A_{imin}} - \sum_{i=1}^n \overrightarrow{A_{imax}} = \mathbf{0.005\text{mm}}$$

若采用**概率法**：
置信水平取99.73% (±3δ) 视为“几乎一定”。

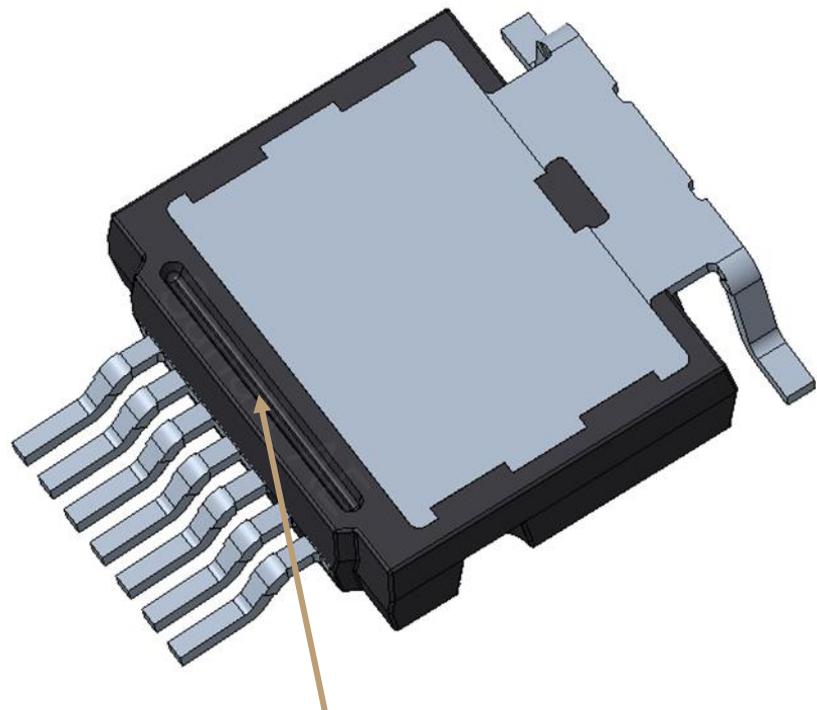
极值法：L3-硅脂2厚度=0.15_{-0.145}^{0.145}mm

L3-硅脂2厚度=0.15_{-0.0826}^{0.0826}mm

实际尺寸计算过程中还要考虑表层铜箔与阻焊层的高度差以及其他在高度方向有影响的尺寸环

问：实际硅脂要涂多厚才能确保良好的热传递？

三、传热问题的处理办法



凹槽中还需约7.2mg

总量至少为137.2mg,合计约0.043mL, 约为一颗绿豆大小。

备注：
实际应用过程中为了较大余量。一般会大于该值。

硅脂用量的计算

- $M_{TIM} = S_{TIM} \times T_{TIM} \times \rho_{TIM}$
- 硅脂质量 = 涂覆面积 × 涂覆理想厚度 × 硅脂密度
- $130\text{mg} = 1.72\text{cm}^2 \times 0.02326\text{cm} \times 3.2\text{g/cm}^3$ (以信越G-777参数为例)

散热器平面度粗糙度要求

- ✓ 粗糙度 $Ra < 10\mu\text{m}$ (半精铣)
- ✓ 平面度 $FZ < 10\mu\text{m}/100\text{mm}$

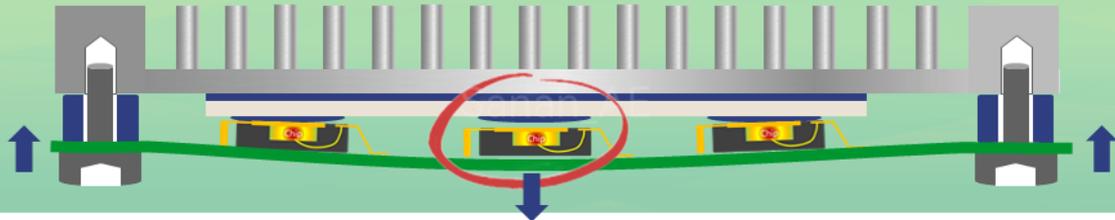
点胶方式对比

Reference: 2022电子智造学术技术研讨会论文集

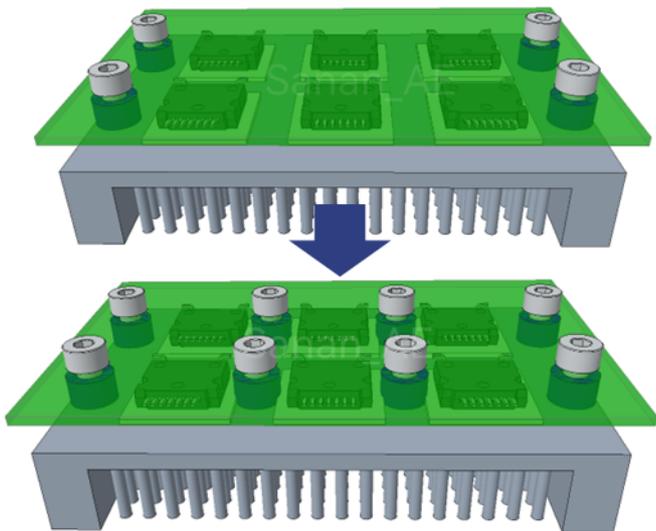
	气动点胶阀	柱塞阀	螺杆阀	定量柱塞阀
点胶效果				
特点	气压决定点胶量 易断胶堵胶头	气压影响点胶量 配件磨损低	末端定量 阀昂贵配件磨损高	末端定量 阀昂贵 配件磨损低

三、传热问题的处理办法

为了使得器件散热面紧贴导热部件，采用螺钉紧固PCB板时会使得其变形弯曲

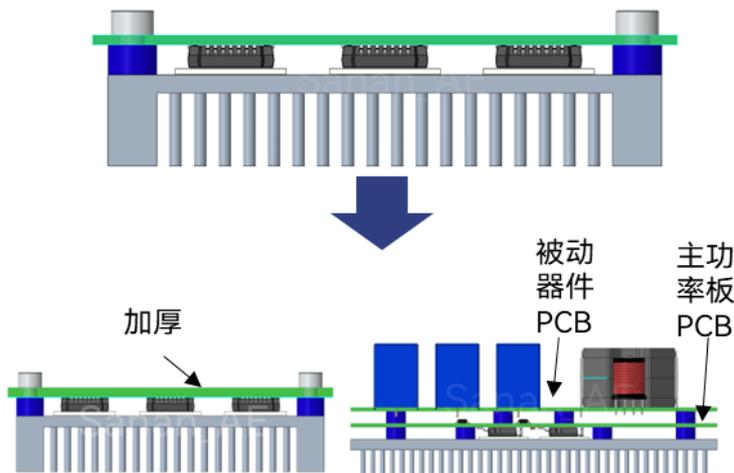


锁紧螺钉均匀布置分布受力



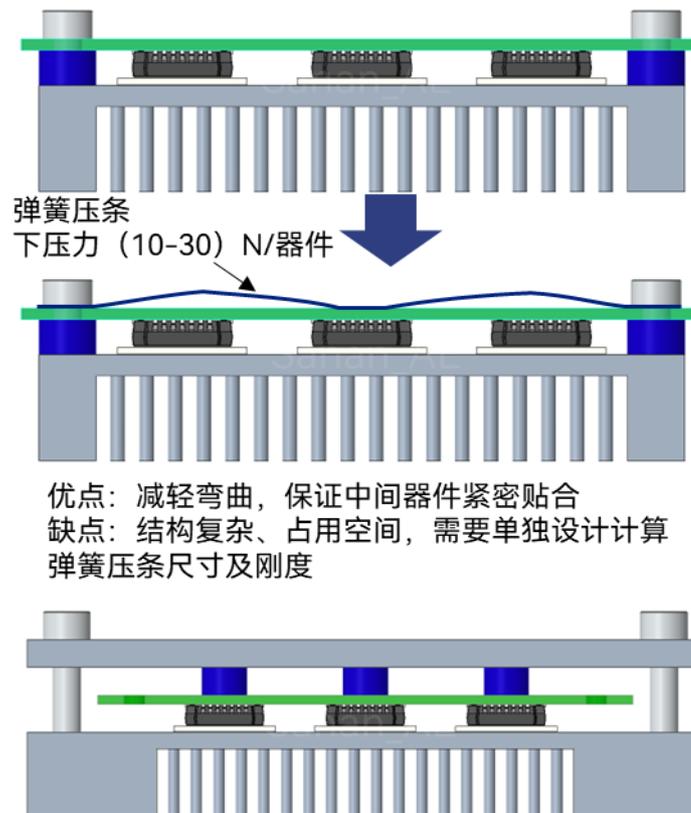
优点：各器件受力均匀
缺点：结构复杂、占用空间

增加PCB板的厚度或者双层PCB布局提升刚度



优点：节省空间，利于布局
缺点：加厚PCB成本增加，双层要求系统布局能力

在器件另一侧设置反向支撑

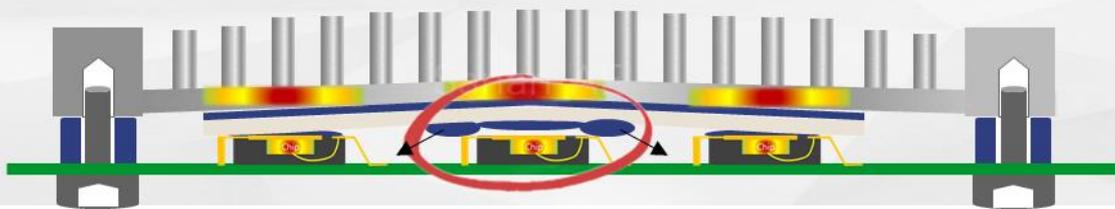


优点：减轻弯曲，保证中间器件紧密贴合
缺点：结构复杂、占用空间，需要单独设计计算弹簧压条尺寸及刚度

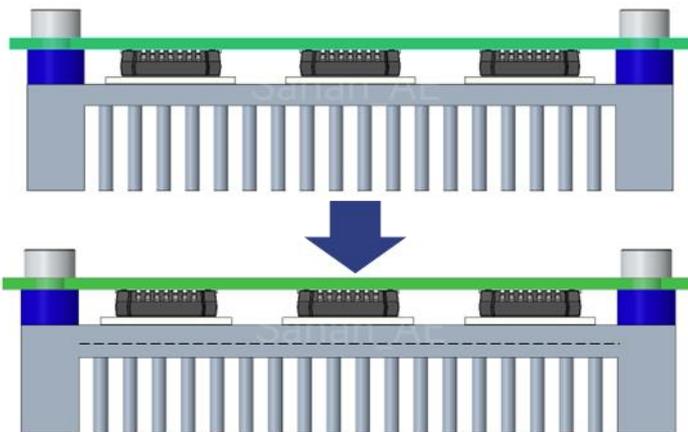
优点：各器件受力均匀
缺点：结构复杂、占用空间，需要支撑侧有较大强度结构便于借力。

三、传热问题的处理办法

器件/磁件发热导致PCB/散热器面产生热变形，在功率循环过程中还可能导致硅脂泵出

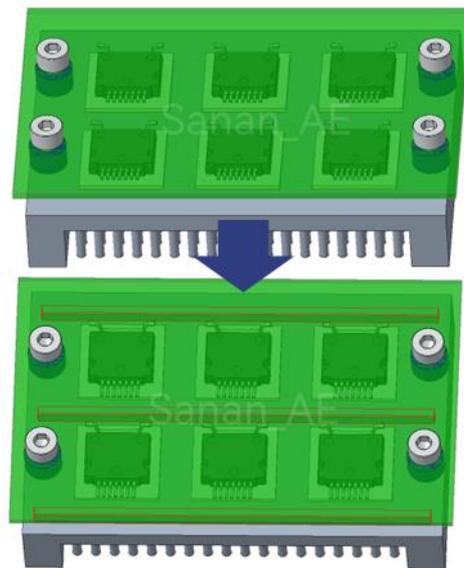


略微增加散热器基板厚度提升刚度



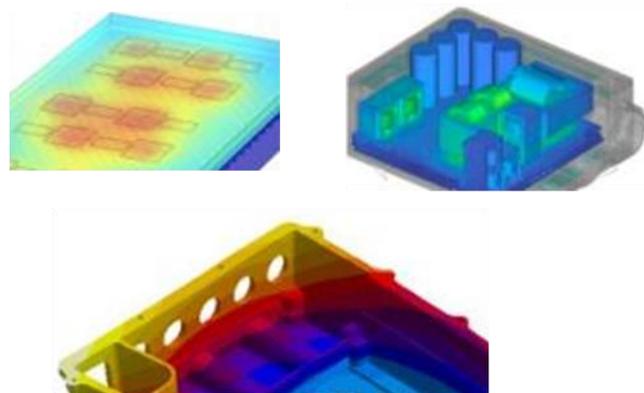
优点：操作简单，节省空间，利于布局
缺点：散热器成本增加，散热效果降低

在变形处增加加强筋/肋板形成骨架



优点：操作简单，不影响散热
缺点：突出筋/肋板侵入器件布局空间，注意绝缘

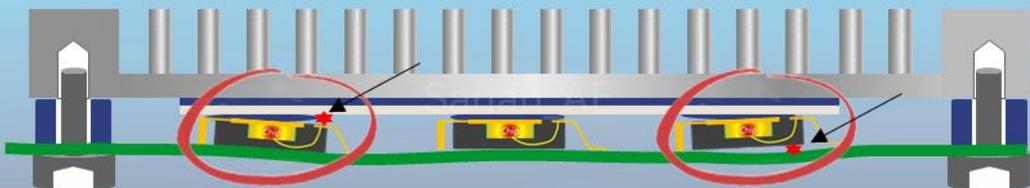
采用有限元仿真模拟提前识别热变形再优化器件分布与温度控制



优点：提前正向设计与优化，难以仿制，具备技术门槛。
缺点：需要工程师相互传递损耗、变形量控制信息，专业度要求较高。

三、传热问题的处理办法

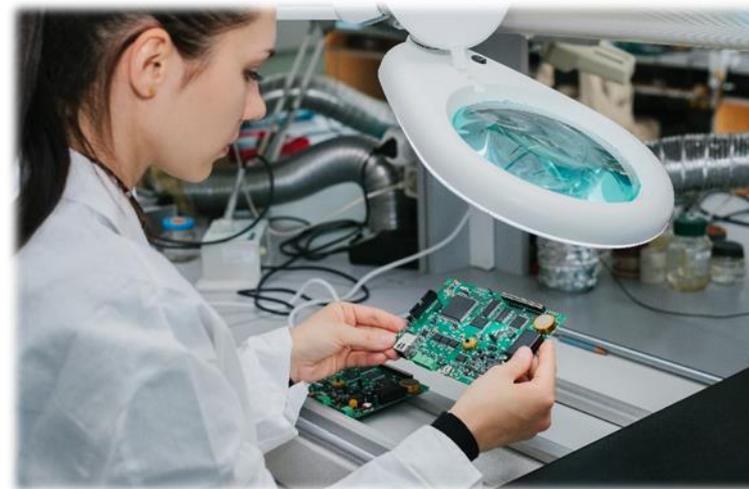
器件回流焊面/导热接触面存在大颗粒污物导致器件倾斜



回流焊、二次装配要求6S洁净车间



提前进行回流焊面/导热接触面的吸尘清扫擦拭以及视觉检查

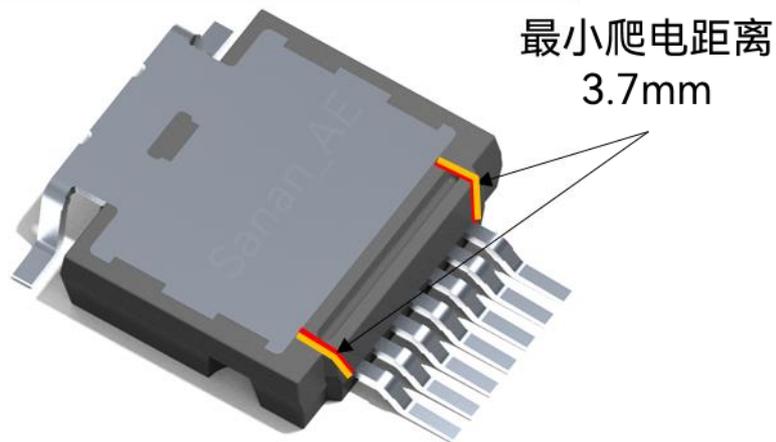
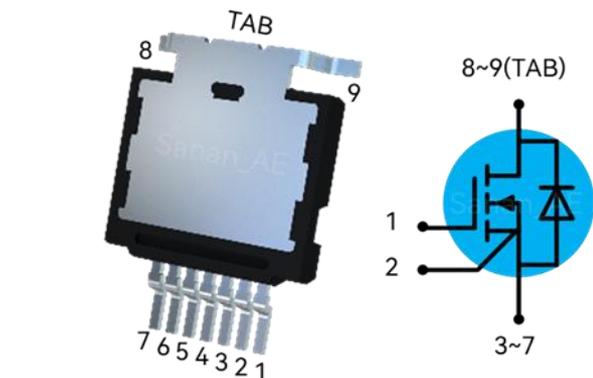


03 如何保证顶部散热的可靠应用

四、绝缘问题的产生原因



SAPKG-9L封装的爬电距离



最小爬电距离
3.7mm

IEC 60664-1:2020 低压供电系统内设备的绝缘配合-
第1部分：原则、要求和试验

电压 RMS V	最小爬电距离								
	印制线路材料			污染等级					
	所有材料组	所有材料组, 除了III	所有材料组	1			2		
				材料组I	材料组II	材料组III	材料组I	材料组II	材料组III
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
10	0.025	0.04	0.08	0.4	0.4	0.4	1	1	1
12.5	0.025	0.04	0.09	0.42	0.42	0.42	1.05	1.05	1.05
16	0.025	0.04	0.1	0.45	0.45	0.45	1.1	1.1	1.1
20	0.025	0.04	0.11	0.48	0.48	0.48	1.2	1.2	1.2
25	0.025	0.04	0.125	0.5	0.5	0.5	1.25	1.25	1.25
32	0.025	0.04	0.14	0.53	0.53	0.53	1.3	1.3	1.3
40	0.025	0.04	0.16	0.56	0.8	1.1	1.4	1.6	1.8
50	0.025	0.04	0.18	0.6	0.85	1.2	1.5	1.7	1.9
63	0.04	0.063	0.2	0.63	0.90	1.25	1.6	1.8	2
80	0.063	0.1	0.22	0.67	0.95	1.3	1.7	1.9	2.1
100	0.1	0.16	0.25	0.71	1	1.4	1.8	2	2.2
125	0.16	0.25	0.28	0.75	1.05	1.5	1.9	2.1	2.4
160	0.25	0.4	0.32	0.8	1.1	1.6	2	2.2	2.5
200	0.4	0.63	0.42	1	1.4	2	2.5	2.8	3.2
250	0.56	1	0.56	1.25	1.8	2.5	3.2	3.6	4
320	0.75	1.6	0.75	1.6	2.2	3.2	4	4.5	5
400	1	2	1	2	2.8	4	5	5.6	6.3
500	1.3	2.5	1.3	2.5	3.6	5	6.3	7.1	8.0 (7.9) ⁽⁴⁾
630	1.8	3.2	1.8	3.2	4.5	6.3	8.0 (7.9) ⁽⁴⁾	9.0 (8.4) ⁽⁴⁾	10.0 (9.0) ⁽⁴⁾
800	2.4	4	2.4	4	5.6	8	10.0 (9.0) ⁽⁴⁾	11.0 (9.6) ⁽⁴⁾	12.5 (10.2) ⁽⁴⁾
1000	3.2	5	3.2	5	7.1	10	12.5 (10.2) ⁽⁴⁾	14.0 (11.2) ⁽⁴⁾	16.0 (12.8) ⁽⁴⁾
1250			4.2	6.3	9	12.5	16.0 (12.8) ⁽⁴⁾	18.0 (14.4) ⁽⁴⁾	20.0 (16.0) ⁽⁴⁾
1600			5.6	8	11	16	20.0 (16.0) ⁽⁴⁾	22.0 (17.6) ⁽⁴⁾	25.0 (20.0) ⁽⁴⁾
2000			7.5	10	14	20	25.0 (20.0) ⁽⁴⁾	28.0 (22.4) ⁽⁴⁾	32.0 (25.6) ⁽⁴⁾
2500			10	12.5	18	25	32.0 (25.6) ⁽⁴⁾	36.0 (28.8) ⁽⁴⁾	40.0 (32.0) ⁽⁴⁾
3200			12.5	16	22	32	40.0 (32.0) ⁽⁴⁾	45.0 (36.0) ⁽⁴⁾	50.0 (40.0) ⁽⁴⁾

根据IEC 60664-1:2020

污染等级若为 1

材料分组为 2 II

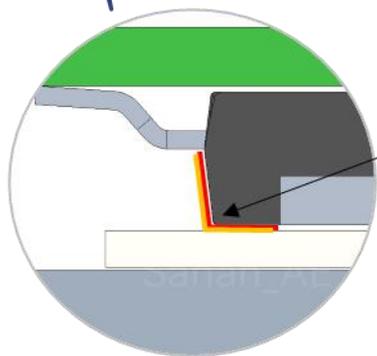
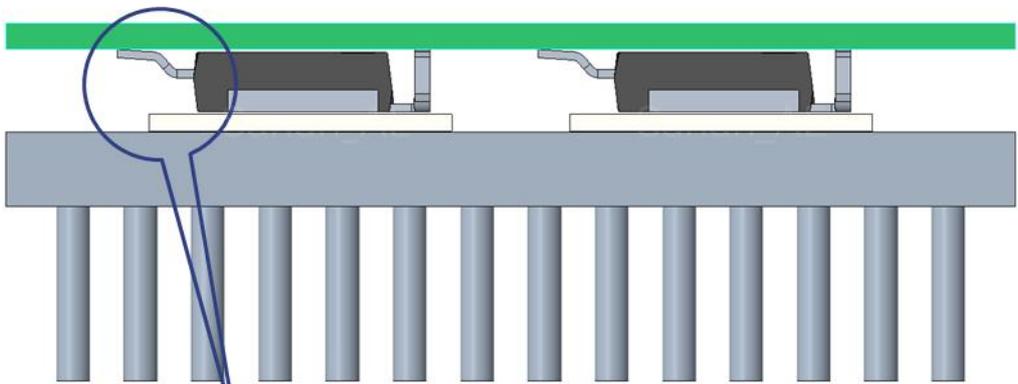
耐压 RMS 1000V

耐压 RMS 500V

四、绝缘问题的产生原因



在无粘接性能的界面材料情况



TIM可能不能完整地填充、覆盖封装体的散热面，其最小爬电距离即为3.7mm。

对于液体类的界面材料固化后的情况

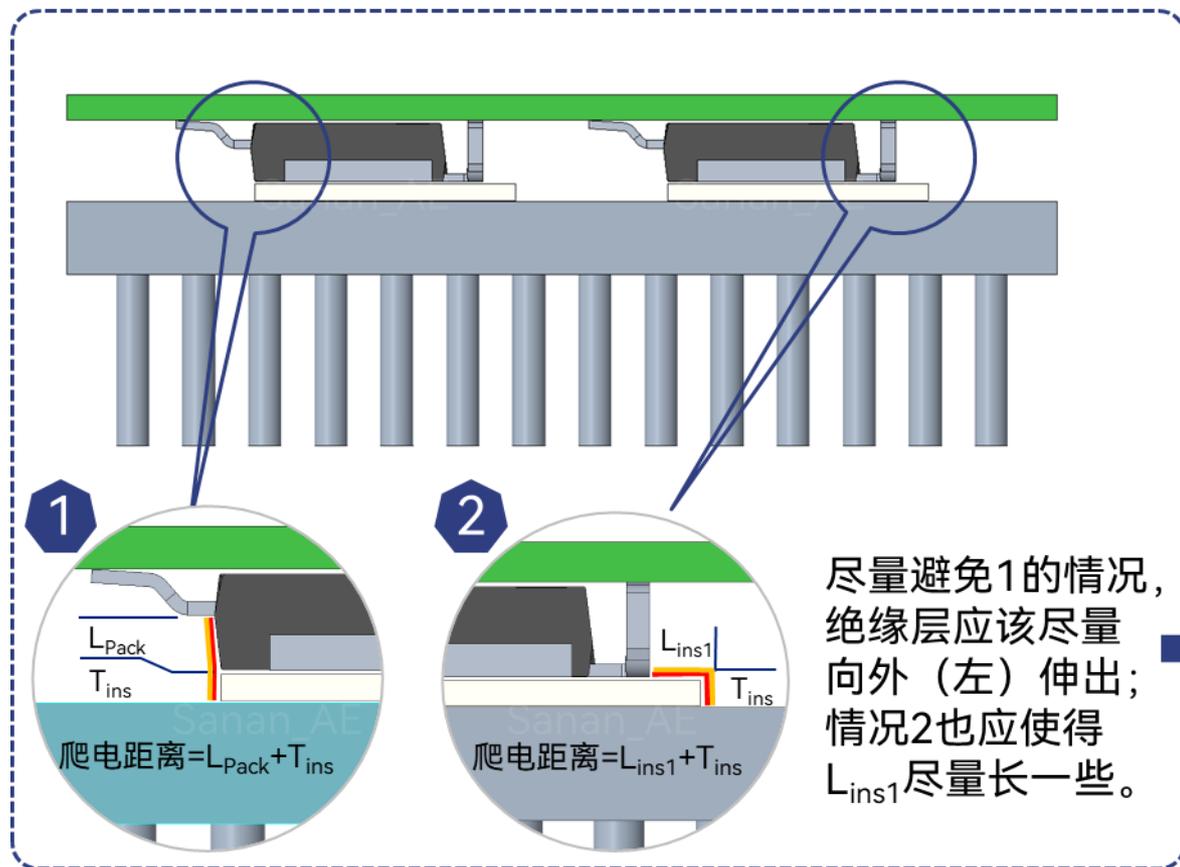


- 固化过程中可能会收缩，保证器件与散热面贴合的锁紧螺钉，可能需要重新紧固来确保良好的热接触。
- 带弹性压片的情况可以忽略，因为压力会自动补偿。

四、绝缘问题的产生原因

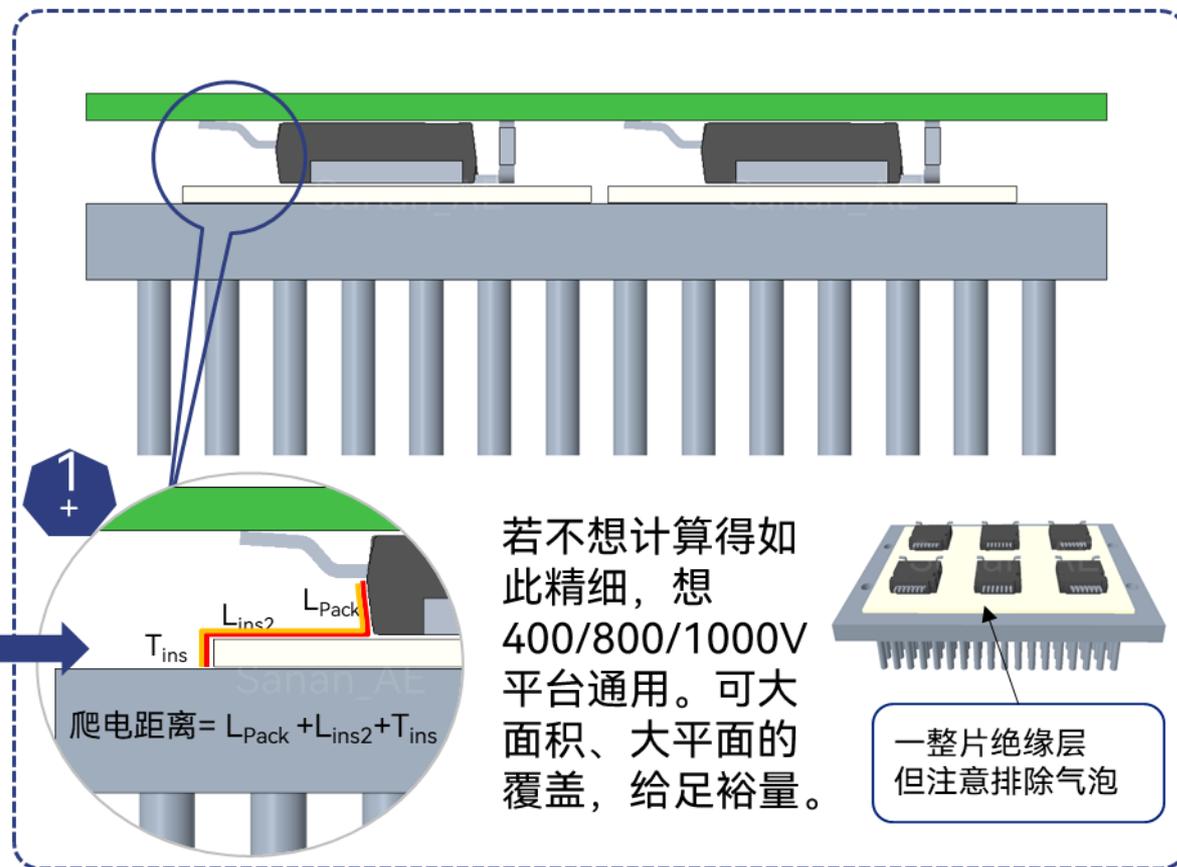


在有粘接性能的界面材料情况



尽量避免1的情况，绝缘层应该尽量向外（左）伸出；情况2也应使得 L_{ins1} 尽量长一些。

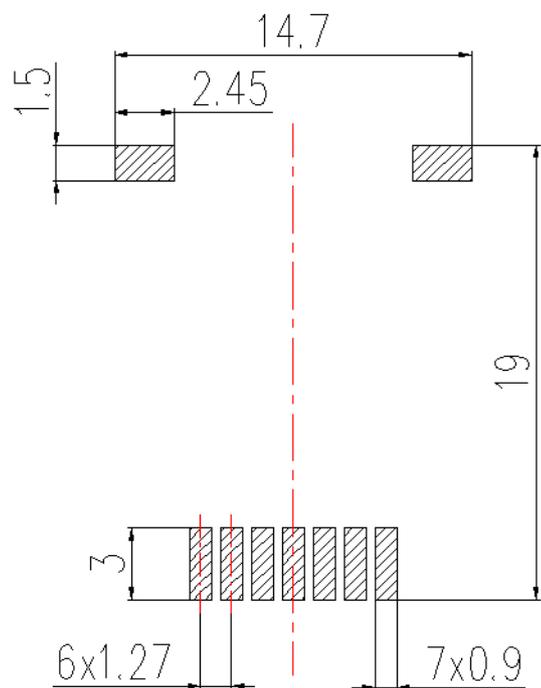
刻意增加爬电距离增加绝缘



若不想计算得如此精细，想400/800/1000V平台通用。可大面积、大平面的覆盖，给足裕量。

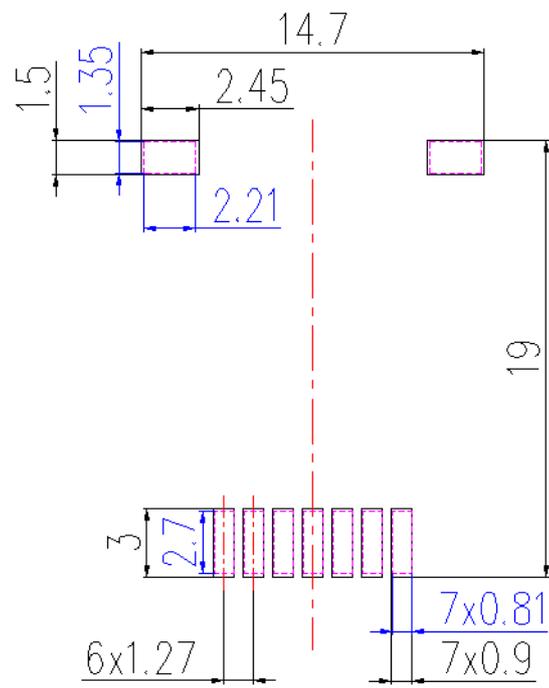
五、顶部散热器件的焊接注意事项

焊盘尺寸推荐 (单位mm)



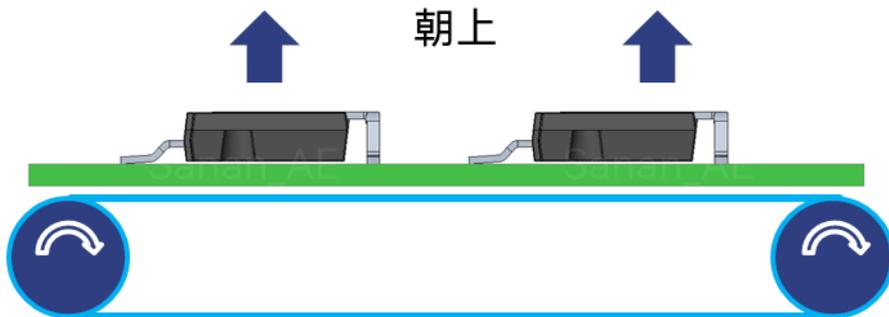
也可参见Datesheet

锡膏钢网开孔尺寸推荐 (单位mm)



可采用150um厚度的不锈钢薄钢板, 开孔建议为焊盘大小的90%

双面回流焊顺序

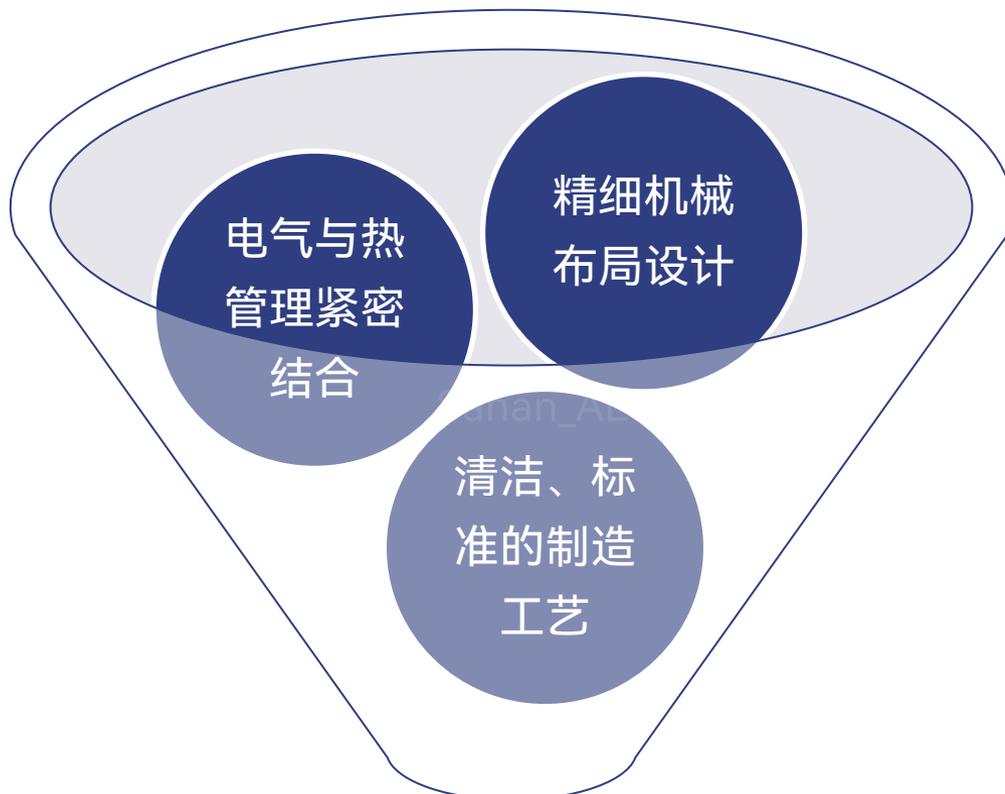
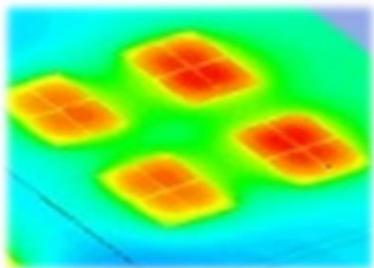
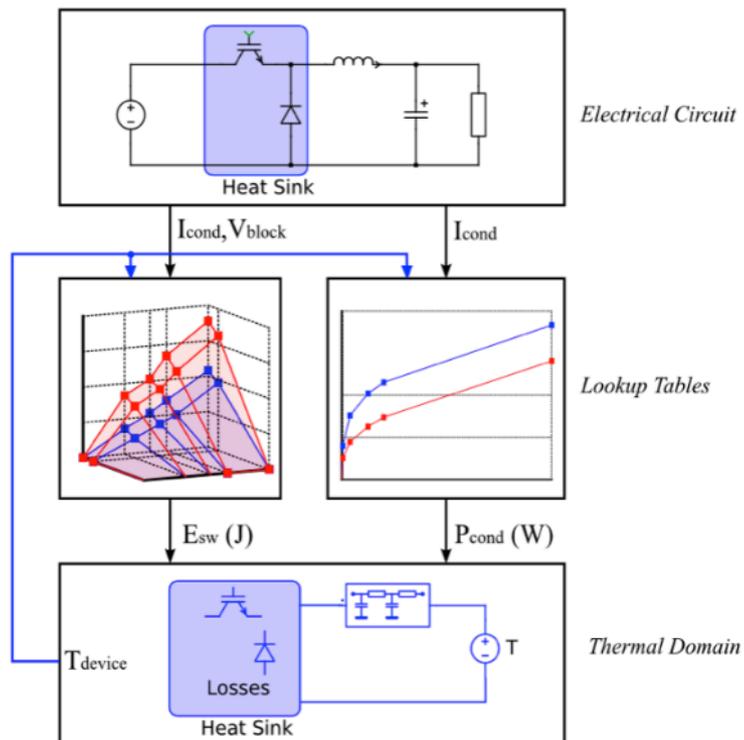


- 若设计的PCB板在双面都布置有器件, 对于安装有SAPKG器件的一侧, 必须在最后一次 (第二次) 进行回流焊接, 否则二次受热可能导致器件轻微位移甚至掉落, 影响后续热接触的一致性表现。
- 对于在焊接SAPKG器件时PCB底部可能掉落的器件建议进行预涂粘接红胶处理。
- 对于该顶部带有传热面的表贴器件, 不建议采用波峰焊焊接, 避免顶部沾锡影响散热接触。

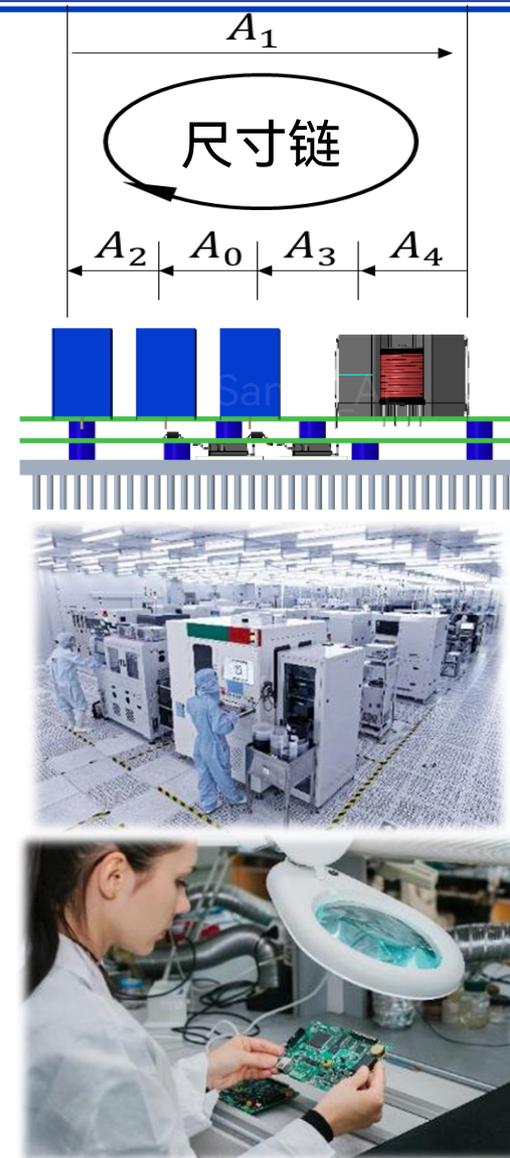
序号	型号	电压规格	电流/电阻规格	封装	图示
1	ADS065J020V4	650V	20A	SAPKG-9L	
2	ADS120J050V3	1200V	50A		
3	AMS0650027V2	650V	27mΩ		
4	AMS0650035V	650V	35mΩ		
5	AMS0650050V2	650V	50mΩ		
6	AMS0750011V	750V	11mΩ		
7	AMS1200013V3	1200V	13mΩ		
8	AMS1200020V2	1200V	20mΩ		
9	AMS1200032V2	1200V	32mΩ		
10	AMS1200040V2	1200V	40mΩ		
11	AMS1200060V2	1200V	60mΩ		

➤ 持续更新中，有需要请联系三安半导体的销售或者登录官网确认。<https://www.sanan-semiconductor.com/>

一、总结



成功的TSC应用设计



二、展望

材料与技术创新

- ✓ **纳米银烧结**：热阻降低40%（芯片与铜框架；铜框架与散热器）。
- ✓ **散热材料**：研发出热导率更高的新型材料用于散热结构，如金刚石(理论导热率2000W/mK)、石墨烯(理论导热率5000W/mK)，采用纳米结构的散热涂层或散热片，增加散热面积和散热效果。
- ✓ **与先进封装技术融合**：与三维封装、多芯片集成等先进封装技术深度融合。如通过在封装内部集成微流道散热结构、散热翅片等，将热量快速从芯片导出，满足高集成、高性能芯片的散热需求。

智能化热管理

- ✓ **嵌入式温度传感器**： $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 精度，响应时间 $< 10\mu\text{s}$ 。
- ✓ **AI驱动的动态热控制**：根据负载情况自动调节散热策略，如动态调整散热风扇转速、改变散热通道流量、热阻等，采用AI算法执行智能化的热管理策略，实现散热功率与器件损耗的最佳平衡点。



请关注三安半导体公众号
获取三安规划与产品动态

感谢您的聆听

顶部散热封装在功率半导体中的应用

致力于成为世界级半导体研发、制造与服务平台

姚晨
许亚坡 张建山