

霍尔电流传感器与热量设计

摘要

结温是半导体芯片（晶圆）的最高温度。它通常高于芯片表面温度。芯片在工作过程中发热，热量累计必定导致结温的升高，随着结温升高，芯片性能会降低，温度每上升 10℃，芯片的寿命就会减为大约一半，故障率也会大约增加 2 倍，甚至直接造成芯片损害。霍尔电流传感器芯片工作在高负载情况下，发热较大，自然条件下的散热不能保证芯片的结温不超过允许工作温度，因此在进行芯片 PCB 设计时，需考虑芯片的散热问题，对于霍尔电流传感器这样的功率器件，通常以规格书里记载的最高允许温度的 80%为基准来进行热设计。

一. 热阻

半导体器件热量散发途径主要有三个：封装顶部到空气，封装底部到 PCB 板和封装引脚到 PCB 板。在进行热设计时，通常需要用到的参数为热阻。热阻是描述物质热传导特性的重要指标。热阻值通常用 θ 表示，定义如下：

$$\theta_{JX} = \frac{T_j - T_x}{P} \quad (1)$$

其中 T_j 为芯片 Die 表面的温度(结温)， T_x 为芯片传到至目标点位置的温度， P 为输入的发热功率。

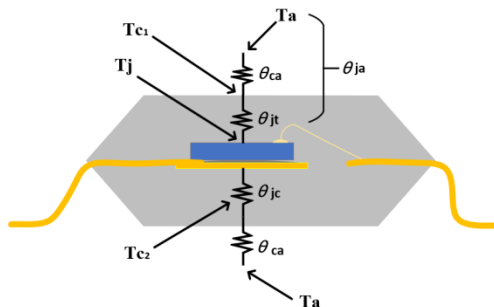


图 1 芯片热阻示意图

如下表是芯片热阻相关参数定义

参数	定义
T_j	结温
T_a	周围环境温度
T_{c1}	封装体外壳表面温度
T_{c2}	封装体外壳底面温度
θ_{ja}	结温 (T_j) 和周围环境温度 (T_a) 之间的热阻
θ_{jt}	结温 (T_j) 和封装体外壳表面温度 (T_{c1}) 之间的热阻
θ_{jc}	结温 (T_j) 和封装体外壳表面温度 (T_{c2}) 之间的热阻
θ_{ca}	封装外壳表面温度 (T_c) 和环境温度 (T_a) 之间的热阻
P	最大容许功率

热阻测量方式由 JESD51 标准给出，JEDEC 中定义的结构配置不是实际应用中的典型系统反应，而是为了保持一致性和标准型，采用标准化的热分析和热测量方法。其测试方法是将被测芯片放置于 1 立方英尺箱体中，所有接缝完全密封，保证空气的静止，并且箱体为绝缘材料。对于功率大于 3W 的高功率产品，如果环境温度高于初始环境温度 10%或以上，则应该考虑增加箱体的尺寸。标准中提到，在外部箱体尺寸做出任何变化时都应在数据报告中标记。采用标准的测试方法有助于对比不同封装产品的热性能指标。

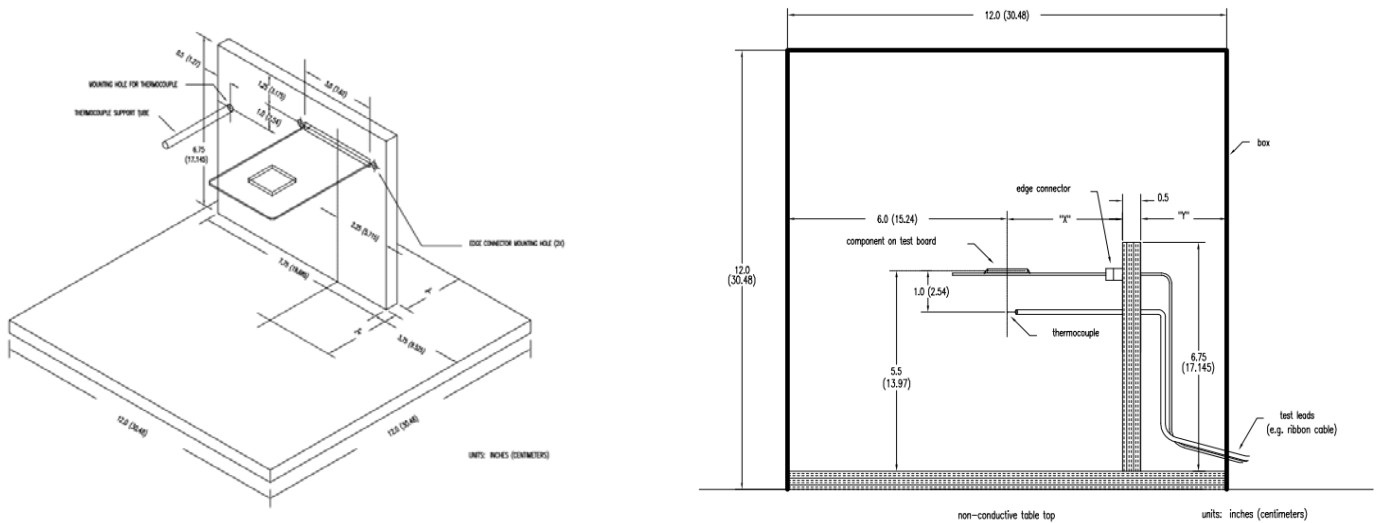


图 2 JESD51 标准芯片热阻测量环境示意图

JESD51 是一套完整的标准,

JESD51-1 Integrated Circuit Thermal Measurement Method—Electrical Test Method (Single Semiconductor Device)

芯片热测试方法--电气测试方法规定一种单结半导体器件的热特性参数测试方法

JESD51-2 Integrated Circuit Thermal Test Method Environmental Conditions—Natural Convection (Still Air)

自然散热环境下, 结空气热阻的测试方法

JESD51-3 Low Effective Thermal Conductivity Test Board for Leaded Surface Mount Packages

该标准测试结空气热阻 PCB 板的特性

二. PCB 热阻值

参考 TI 热特性—热阻文章, 标准测试为了更好的计算和理解 θ_{ja} , 一些新的参数不断被引入, θ_{CU} 是 PCB 板上铜的热阻, θ_{FR4} 板材 PCB 的热阻, θ_{VIA} 是 PCB 板上过孔的热阻, θ_{SA} 是 PCB 板表面到周围空气的热阻。下图是一个典型的 PCB 扩展热阻模型。

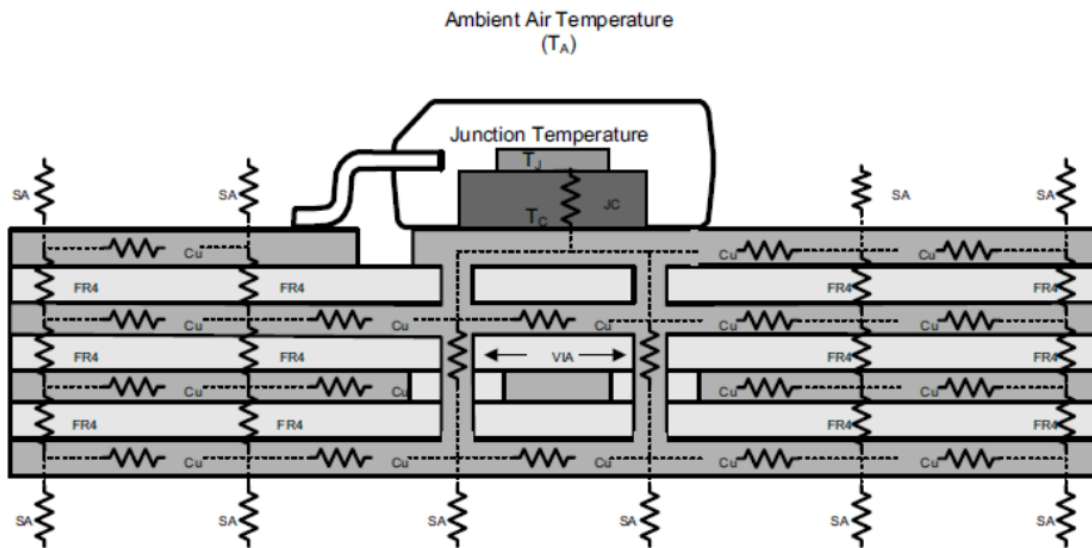


图 3 典型的 PCB 扩展热阻模型图

名称	值(°C/W)	描述	公式	备注
θ_{CU}	71.4	铜平面热阻	$\theta_{CU} = \frac{1}{\lambda_{CU}} * \frac{L}{S}$	单位面积(1cm ²), 1盎司铜厚度为0.0035cm, 铜的热导率 λ 为4W/(cm*°C)。L为长度, S为面积
θ_{FR4}	13.9	FR4 板材热阻	$\theta_{FR4} = \frac{1}{\lambda_{FR4}} * \frac{L}{S}$	单位面积(1cm ²)FR4 厚度12.6mil, FR4 热导率 λ 为0.0023W/(cm*°C)
θ_{VIA}	261	过孔热阻 (12mil)	$\theta_{VIA} = \frac{1}{\lambda_{CU}} * \frac{L}{\pi[R^2 - (R-l)^2]}$	过孔高度65mil, 0.5盎司铜厚0.00175, 孔半径6mil, L为孔长度, R为过孔半径, l为铜厚度
θ_{SA}	1000	PCB 到空气热阻	$\theta_{SA} = \frac{1}{h}$	单位面积(1cm ²), 自然散热, 热导率近似为0.001W/(cm*°C)

三. 电流传感器热设计经验法则

霍尔电流传感器由于封装设计的特殊性, 所以在进行 PCB 设计时需要特别考虑散热问题, 下图以 SC840 为例, 说明了在不同温度下, 芯片的性能会有不同表现, 在高温下性能往往恶化。因此在设计系统时必须关注芯片的工作温度, 轻者会影响系统的性能, 重者可能会造成芯片损坏。

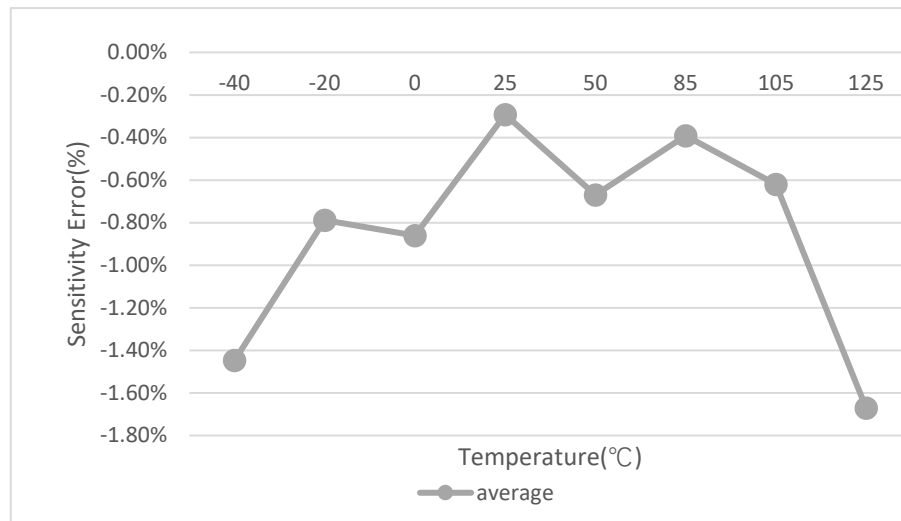


图 4 SC840DFT-100F5 在不同温度下特性

3.1 选择合适的封装

从芯片手册上可以知道封装的热阻, 然后根据给定的耗散功率和环境温度估算芯片的工作结温。以 SC840DFT-100F5 为例, 器件的发热主要来自于原边电流导线, 副边静态功耗为 20mA, 产生的热量可以忽略不计, 所以在进行热设计时可以忽略其影响, 而只需考虑由于被测电流流过原边导线产生的功率损耗热量。

SC840DFT 的典型原边导通阻抗为 $0.2\text{m}\Omega$ ，最大容许结温为 165°C 。以最大工作电流 100A 计算，功耗可以表示为： $P=R*I^2=0.2*10^{-3}*100^2=2\text{W}$ ，对于具体的 IC， J_A 值与 PCB 板的尺寸、散热方式（风冷还是自然冷却）、板的层数、每层板的铜的厚度以及芯片周边是否存在别的发热量很高的器件相关。通常我们可以根据热成像图片做实际热阻计算：比如根据热成像图片得到该器件的最高发热区域并且读出温度变化，然后根据在该芯片上的电流电压得到它的功耗即可得出实际的热阻参数。

3.2 尽可能大面积的 PCB 覆盖以及覆铜厚度

以 SC840DFT-100F5 为例。PCB 的铜厚度增加，系统组件的热性能也就越高。当无 PCB 覆铜时，管芯散热路径如下图所示

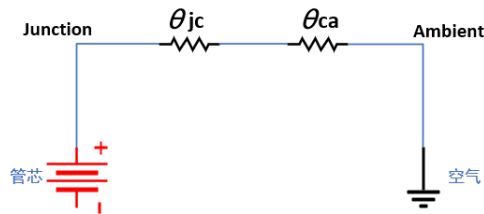


图 5 SC840DFT-100F5 无覆铜散热路径示意图

通过 Anasys 软件仿真得到 SC840DFT 无覆铜热阻：

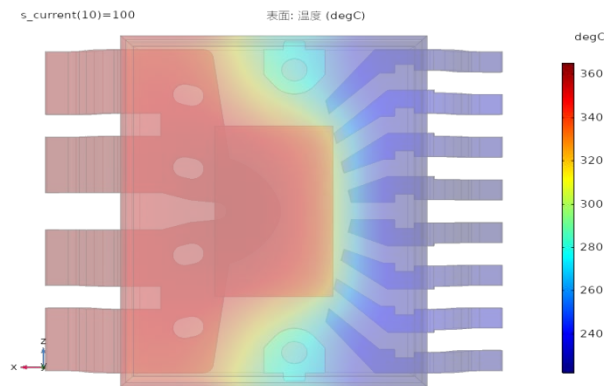


图 6 SC840DFT-100F5 无覆铜热仿真模型

无覆铜（圈内焊接）					
电流 (A)	Heat (°C)	TOP (°C)	P(W)	$\theta_{ja}(\text{°C/W})$	$\theta_{jc}(\text{°C/W})$
0	20.0	20.0	0.000		
10	23.4	22.9	0.020	169	26
20	33.6	31.6	0.080	171	26
30	50.7	46.1	0.180	171	26

40	74.6	66.3	0.320	171	26
50	105.4	92.5	0.500	171	26
60	142.9	124.4	0.720	171	26
70	187.3	162.1	0.980	171	26
80	238.6	205.5	1.280	171	26
90	296.6	254.8	1.620	171	26
100	361.5	309.9	2.000	171	26

根据仿真模型，可以得出，SC840DFT-100F5 的 $\theta_{jc}=26^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

当进行覆铜设计时，需要考虑覆铜的热阻，以及覆铜本身功率损耗所带来的热量累积。当引入覆铜后，在散热路径上热阻 θ_{ca} 将并联覆铜热阻 θ_{CU} 和 θ_{VIA} 以及 θ_{SA} 进行计算。

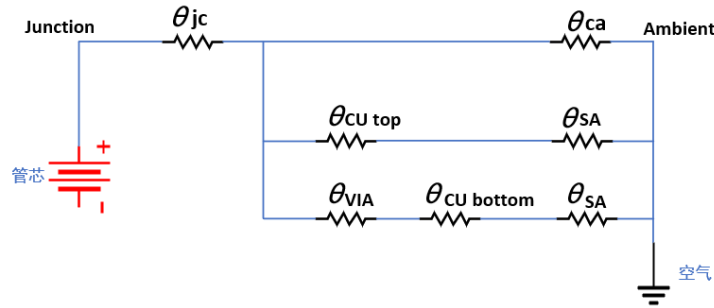


图 7 SC840DFT-100F5 覆铜散热路径示意图

铜平面，典型 1 盎司的单位面积（ 1cm^2 ）热阻 $\theta_{CU} = \frac{1}{\lambda_{CU}} * \frac{L}{S} = \frac{0.25^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}}{1\text{cm} * 0.0035\text{cm}} = 71.4^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。当采用 2 盎司铜时，单位面积的热阻就降低为 $35^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。在进行测试 DEMO 设计时，兴工微采用的是 2 盎司覆铜设计，单 IP 电流端覆铜 $L=2.1\text{cm}$ ，宽度为 $W=2.6\text{cm}$ ，根据公式计算 $\theta_{CU} = \frac{1}{\lambda_{CU}} * \frac{L}{S} = \frac{0.25^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}}{2.1\text{cm} * 0.007\text{cm}} = 44.2^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，

IP 总覆铜有四块相同覆铜组成，热阻总计为 $11.05^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，过孔阵列热阻公式 $\theta_{VIA} = \frac{1}{\lambda_{CU}} * \frac{L}{S} * \frac{1}{n_1 * n_2} =$

$\frac{0.25^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}}{3.14(0.3^2\text{cm}^2 - (0.3 - 0.007)^2\text{cm}^2)} * \frac{1}{122 * 122} = 2.13 * 10^{-4}^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，所以过孔热阻在进行热计算时可忽略不计，在 20 摄氏度下，铜的电导率 ρ 为 $0.0178\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ，根据铜的电阻公式 $R = \rho \frac{L}{S} = 0.0178 * \frac{0.021}{26 * 0.007 * 4} = 0.51\text{m}\Omega$ ，

100A 下，覆铜热量损耗 $T_{CU} = 0.51 * 10^{-3} * 100^2 * 11.05 = 56.355^{\circ}\text{C}$ ，芯片功率 $P = I^2 * R = 100\text{A}^2 * 0.2\text{m}\Omega = 2\text{W}$ ，所以理论上 100A 结温为 $T_j = 25^{\circ}\text{C} + 56.355^{\circ}\text{C} + 2 * 26^{\circ}\text{C} + 2 * 11.05^{\circ}\text{C} = 155.36^{\circ}\text{C}$ ， $T_C = 25^{\circ}\text{C} + 56.355^{\circ}\text{C} + 2 * 26^{\circ}\text{C} = 133.26^{\circ}\text{C}$ 。

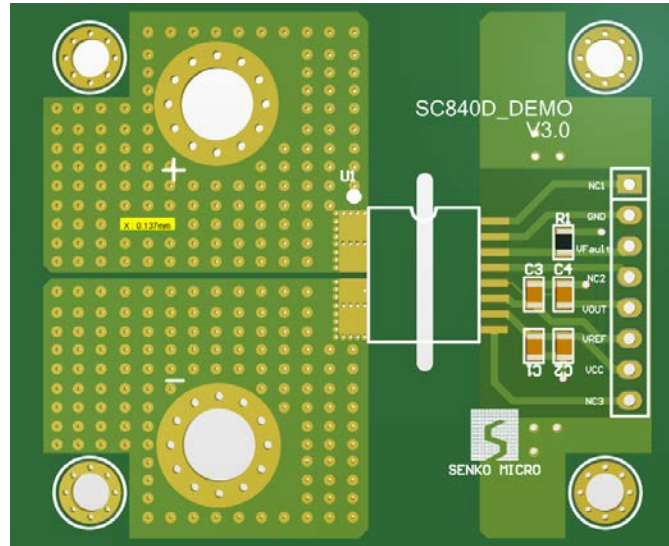


图 8 SC840DFT-100F5 DEMO 设计

通过 Ansys 软件仿真建立 SC840DFT 在基于兴工微 SC840DFT_DEMO_V3.0 覆铜下的热仿真模型：

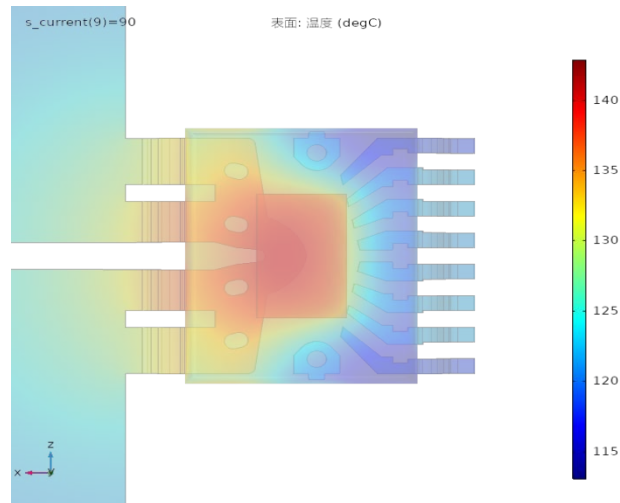


图 9 基于 SC840DFT_DEMO_V3.0 覆铜热仿真模型

基于 SC840DFT_DEMO_V3.0 覆铜热仿真模型数据			
电流 (A)	Heat (°C)	TOP (°C)	TOP_Max (°C)
0	25.0	25.0	25.0
10	26.2	26.1	26.2
20	29.8	29.3	29.7
30	35.9	34.8	35.7

40	44.4	42.4	44.0
50	55.3	52.2	54.8
60	68.7	64.2	67.9
70	84.4	78.3	83.3
80	102.7	94.7	101.3
90	123.4	113.3	121.6
100	146.4	134.0	144.2

基于仿真模型，可得出在 100A 下结温 $T_j=146.4^{\circ}\text{C}$ 。 T_c 平均温度为 134°C ， T_c 最大值 144.2°C ，所以在进行温升测试时，可将 $T_c \text{ max}$ 等效于 T_j 。

对比热成像仪实测温升数据，如下图所示

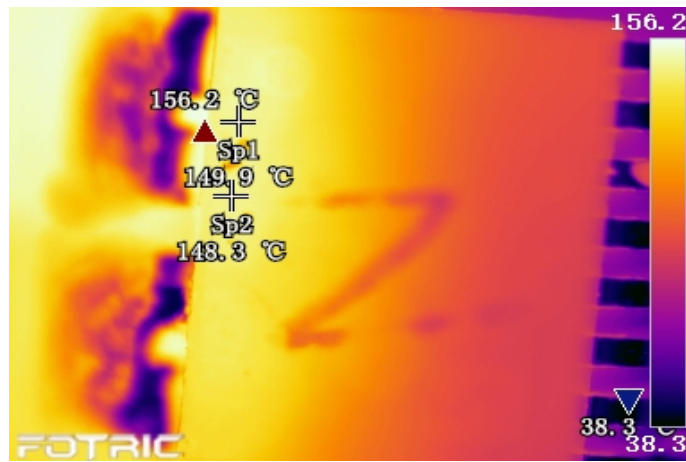
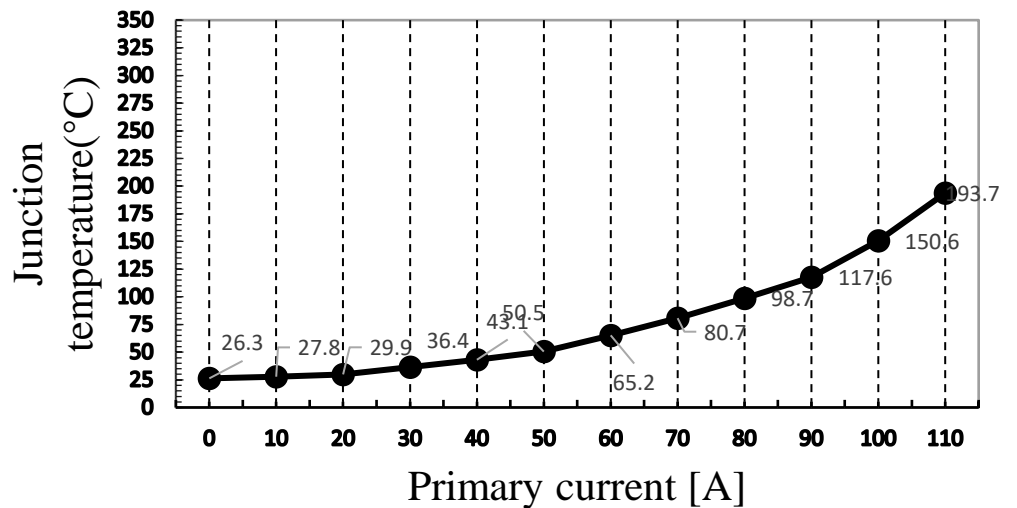


图 10 基于 SC840DFT_DEMO_V3.0 覆铜 100A 热成像图示

SC840 (0.2mΩ)	
输入电流 A	T_j ($^{\circ}\text{C}$)
0	26.3
10	27.8
20	29.9
30	36.4
40	43.1
50	50.5
60	65.2
70	80.7
80	98.7
90	117.6
100	150.6
110	193.7



实测数据 100A 下结温近似于 150.6°C 与仿真模型相差 4°C 左右。

3.3 用散热焊盘和过孔将多层 PCB 连接

合理安排 PCB 多层的堆叠关系和布线，也会增加用于热传导的铜的总比重。芯片下方的 PCB 上的散热过孔有助于热量进入到 PCB 内部各层，并传导至电路板的背部。因此在热焊盘下面用尽可能多的过孔形成矩阵。这些过孔尽可能的连接多的 PCB 铜层，可以有效的进行散热，将大大提高散热效率。以 SC840DFT 为例，手册上为大家提供了参考的过孔设计方案。允许在热焊盘下面以 69mil 为间隔，铺设 122 个过孔，通过过孔和接地层连接在一起。122*122 的矩阵的过孔的热阻约为： $2.13 \times 10^{-4} \text{C/W}$ 。

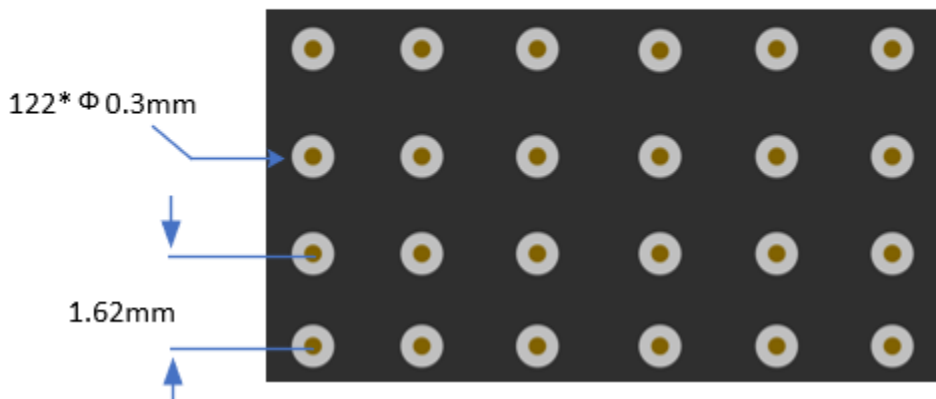


图 11 SC840DFT 建议过孔方案

3.4 散热焊盘阻焊层开窗

在进行热设计时，为了更好的散热，建议将 IP 电流线上的阻焊层开窗，增加 PCB 散热面积。

3.5 增加空气流动

在设备运行中，设备中产生的热量不能及时通过空气流通排出，就会在设备内部形成高温环境，导致芯片初始工作温度高，芯片无法进行有效散热，建议在条件允许的情况下，通过风扇或散热排等方式形成空气对流，将多余的热量散发出去。

四. 总结

设备运行中，在进行功率器件热设计时，应该充分考虑芯片散热问题，本文针对兴工微霍尔电流传感器的热设计及参数进行详细的描述，希望对应用该产品的工程师有所帮助，解决相关系统性散热问题。