

## 采用LFCSP和法兰封装的RF放大器的热管理计算

作者: Eamon Nash

### 简介

射频(RF)放大器可采用引脚架构芯片级封装(LFCSP)和法兰封装,通过成熟的回流焊工艺安装在印刷电路板(PCB)上。PCB不仅充当器件之间的电气互联连接,还是放大器排热的主要途径(利用封装底部的金属块)。

本应用笔记介绍热阻概念,并且提供一种技术,用于从裸片到采用LFCSP或法兰封装的典型RF放大器的散热器的热流动建模。

## 目录

简介.....	1	器件和 PCB 环境的热模型.....	5
修订历史.....	2	系统的热阻计算.....	6
热概念回顾.....	3	热阻示例: HMC408LP3 评估板.....	6
热流.....	3	确定功耗.....	8
热阻.....	3	可靠性.....	9
温度.....	3	结论.....	10
器件的热阻.....	4		
最高结温.....	4		
工作温度范围.....	4		

## 修订历史

2019年8月—修订版0: 初始版

## 热概念回顾

### 热流

材料不同区域之间存在温度差时,热量从高温区流向低温区。这一过程与电流类似,电流经由电路,从高电势区域流向低电势区域。

### 热阻

所有材料都具有一定的导热性。热导率是衡量材料导热能力的标准。热导率值通常以瓦特每米开尔文(W/mK)或瓦特每英寸开尔文(W/inK)为单位。如果已知材料的热导率,则采用以下公式,以C/W或K/W为单位计算材料单位体积的热阻( $\theta$ ):

$$\theta = \frac{\text{Length}}{k \times \text{Area}} \quad (1)$$

其中:

*Length*表示材料的长度或厚度,以米为单位。

*k*为材料的热导率。

*Area*表示横截面积,以m<sup>2</sup>为单位。

### 温度

利用热流量等效于电流量的类比,本身具备热阻且支持热流流动的材料温差如下:

$$\Delta T = Q \times \theta \quad (2)$$

其中:

$\Delta T$ 表示材料不同区域之间的温差(K或°C)。

*Q*表示热流(W)。

$\theta$ 表示材料的热阻(C/W或K/W)。

## 器件的热阻

器件的热阻相当复杂，往往与温度呈非线性关系。因此，我们采用有限元分析方法建立器件的热模型。红外摄影技术可以确定器件连接处的温度和操作期间封装的温度。基于这些分析和测量结果，可以确定等效的热阻。在对器件实施测量的特定条件下，等效热阻是有效的，一般是在最大操作温度下。

参考表1，查看典型的RF放大器的绝对最大额定值表。

**表1. 典型的RF放大器的绝对最大额定值**

参数	额定值
漏极偏置电压( $V_{DD}$ )	60 V dc
栅极偏置电压( $V_{GG1}$ )	-8 V至0 V dc
射频(RF)输入功率(RFIN)	35 dBm
连续功耗( $P_{DISS}$ ) ( $T = 85^{\circ}\text{C}$ )	89.4 W
( $85^{\circ}\text{C}$ 以上以636 mW/ $^{\circ}\text{C}$ 减额)	
热阻，结至焊盘背面( $\theta_{JC}$ )	1.57 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$
温度范围	
存储	-55 $^{\circ}\text{C}$ 至+150 $^{\circ}\text{C}$
工作温度	-40 $^{\circ}\text{C}$ 至+85 $^{\circ}\text{C}$
保持百万小时平均无故障时间(MTTF)的 结温范围( $T_J$ )	225 $^{\circ}\text{C}$
标称结温 ( $T_{CASE} = 85^{\circ}\text{C}$ , $V_{DD} = 50\text{ V}$ )	187 $^{\circ}\text{C}$

对于LFCSP和法兰封装，假定封装外壳是封装底部的金属块。

## 最高结温

在给定的数据手册中，会在绝对最大额定值表中给出每个产品的最大结温（基于器件的半导体工艺）。在表1中，指定的维持百万小时MTTF的最大结温为225 $^{\circ}\text{C}$ 。指定的这个温度一般适用于氮化镓(GaN)器件。超过这个限值会导致器件的寿命缩短，且出现永久性的器件故障。

## 工作温度范围

器件的工作温度( $T_{CASE}$ )已在封装底座上给出。 $T_{CASE}$ 是封装底部金属块的温度。工作温度不是器件周围空气的温度。

如果已知 $T_{CASE}$ 和 $P_{DISS}$ ，则很容易计算得出结温( $T_J$ )。例如，如果 $T_{CASE}=75^{\circ}\text{C}$ ， $P_{DISS}=70\text{ W}$ ，则可以使用以下公式计算 $T_J$ ：

$$\begin{aligned} T_J &= T_{CASE} + (\theta_{JC} \times P_{DISS}) \\ &= 75^{\circ}\text{C} + (1.57^{\circ}\text{C}/\text{W} \times 70\text{ W}) \\ &= 184.9^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

考量到器件的可靠性时， $T_J$ 是最重要的规格参数，决不能超过此数值。相反，如果可以通过降低 $P_{DISS}$ ，使 $T_J$ 保持在最大可允许的水平之下，则 $T_{CASE}$ 可以超过指定的绝对最大额定值。在此例中，当外壳温度超过指定的最大值85 $^{\circ}\text{C}$ 时，可使用减额值636 mW/ $^{\circ}\text{C}$ 来计算最大可允许的 $P_{DISS}$ 。例如，使用表1中的数据，当 $P_{DISS}$ 的限值为83 W时，可允许的最大 $T_{CASE}$ 为95 $^{\circ}\text{C}$ 。 $P_{DISS}$ 可使用以下公式计算：

$$\begin{aligned} P_{DISS} &= 89.4\text{ W} - (636\text{ mW}/^{\circ}\text{C} \times 10^{\circ}\text{C}) \\ &= 83\text{ W} \end{aligned}$$

使用此 $P_{DISS}$ 值，可以计算得出225 $^{\circ}\text{C}$ 结温，计算公式如下：

$$\begin{aligned} T_J &= T_{CASE} + (\theta_{JC} \times P_{DISS}) \\ &= 95^{\circ}\text{C} + (1.57^{\circ}\text{C}/\text{W} \times 83\text{ W}) \end{aligned} \quad (3)$$

## 器件和PCB环境的热模型

为了充分了解器件周围的整个热环境，必须对器件的散热路径和材料进行建模。图1显示了安装在PCB和散热器上的LFCSP封装的截面原理图。在本例中，裸片生热，然后经由封装和PCB传输到散热器。要确定器件连接处的温度，必须计算热阻。利用热阻与热流，可计算得出结温。然后将结温与最大指定结温进行比较，以确定器件是否可靠地运行。

在图1中，器件连接处到散热器的散热路径定义如下：

- $\theta_{JA}$ 是器件连接处到封装顶部周围空气的热阻。
- $\theta_{JC}$ 是连接处到外壳（封装底部的金属块）的热阻。
- $\theta_{SN63}$ 是焊料的热阻。
- $\theta_{CU}$ 是PCB上镀铜的热阻。
- $\theta_{VIACU}$ 是通孔上镀铜的热阻。
- $\theta_{VIASN63}$ 是通孔中填充的焊料的热阻。
- $\theta_{PCB}$ 是PCB层压材料的热阻。

在典型电路板中，包含多个通孔和多个PCB层。在计算系统截面的热阻时，会使用热电路计算各个热阻，并将串联热阻与并联热阻结合起来，以此确定器件的总热阻。

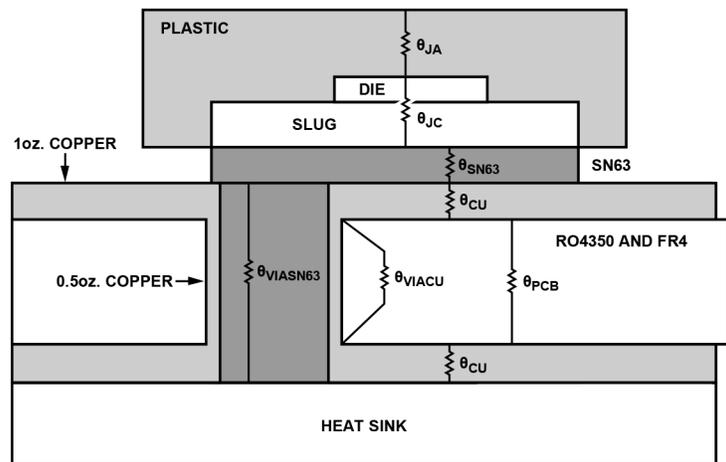


图1. 安装在PCB和散热器上的LFCSP封装的热模型

17331-001

## 系统的热阻计算

对于每个散热路径，都使用公式1来计算其热阻。要计算得出各个热阻值，必须已知材料的热导率。参见表2，查看PCB总成中常用材料的热导率。

表2. 常用PCB材料的热导率

材料	热导率(W/inK)
铜(Cu)	10.008
铝(Al)	5.499
Rogers 4350 (RO4350)	0.016
FR4或G-10层压材料	0.008
氧化铝(Al2O3)	0.701
SN63焊料	1.270
导热环氧树脂	0.020
砷化镓(GaAs)	1.501
模塑料	0.019

图2基于图1中所示的热模型，显示等效的热电路。 $T_{PKG}$ 表示封装底部的温度， $T_{SINK}$ 表示散热器的温度。在图2中，假设封装( $T_A$ )周围的环境空气温度恒定不变。对于外层包有外壳的真实总成， $T_A$ 可能随着功耗增加而升高。本分析忽略了散热路径至环境空气的温度，因为对于具有金属块的LFCSP和法兰封装， $\theta_{JA}$ 要远大于 $\theta_{JC}$ 。

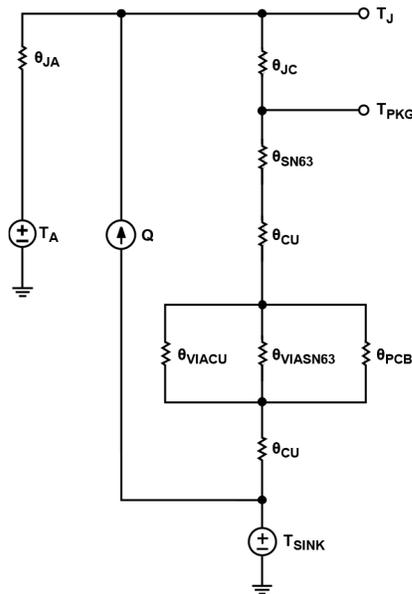


图2. 等效的热电路

### 热阻示例：HMC408LP3评估板

HMC408LP3功率放大器采用一块0.01英寸厚，由Rogers RO4350层压板构成的评估板。图3所示的接地焊盘面积为 $0.065 \times 0.065$ 英寸，上有5个直径为0.012英寸的通孔。电路板顶部和底部分别有1盎司镀铜（0.0014英寸厚）。通孔采用 $\frac{1}{2}$ 盎司铜进行镀层（0.0007英寸厚）。装配期间，会在通孔中填塞SN63焊料。分析显示，几乎所有的热流都会流经焊料填充的通孔。因此，在本分析中，余下的电路板布局都可忽略。

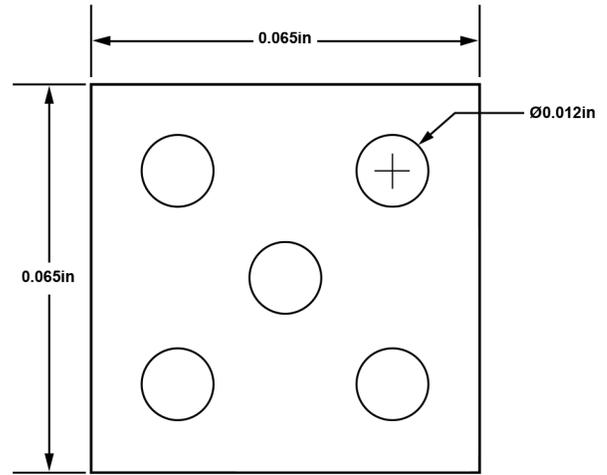


图3. 接地焊盘布局

各个热阻都使用公式1计算得出。计算 $\theta_{SN63}$ 时，采用的SN63焊料的热导率为1.27 W/inK，长度（或者焊接点的厚度）为0.002英寸，焊接面积为0.004225英寸（ $0.065$ 英寸 $\times$   $0.065$ 英寸）。

$$\theta_{SN63} = \frac{0.002}{1.27 \times 0.004225} = 0.32^\circ\text{C/W} \quad (4)$$

接下来，以相似方式计算PCB顶部的铜镀层的值。铜镀层的热导率为10.008 W/inK，长度为0.0014 英寸（1盎司铜），镀层面积为0.00366平方英寸(in<sup>2</sup>)。

$$\theta_{CU} = \frac{0.0014}{10.008 \times 0.00366} = 0.038^{\circ}\text{C/W} \quad (5)$$

对于通孔上铜镀层的面积，采用以下公式进行计算

$$\text{面积} = \pi \times (r_o^2 - r_i^2) \quad (6)$$

其中：

$r_o$ 表示外径。

$r_i$ 表示内径。

外径为0.006英寸，内径为0.0053英寸时，计算得出的面积为0.00002485 in<sup>2</sup>。通孔的长度为板的厚度（0.01英寸），铜的热导率为10.008 W/inK。

$$\theta_{VIACU} = \frac{0.010}{10.008 \times 0.00002485} = 40.23^{\circ}\text{C/W} \quad (7)$$

因为并排存在5个通孔，所以热阻要除以5。所以， $\theta_{VIACU} = 8.05^{\circ}\text{C/W}$ 。

以相似方式计算得出通孔的填塞焊料的值。

$$\theta_{VIASN63} = \frac{0.010}{1.27 \times 0.0000882} = 89.27^{\circ}\text{C/W} \quad (8)$$

因为存在5个填塞通孔，所以等效热阻为 $\theta_{VIASN63} = 17.85^{\circ}\text{C/W}$ 。

接下来，使用0.01英寸长度、0.016 W/inK的Rogers RO4350热导率，以及0.00366 in<sup>2</sup>面积计算PCB的热阻。

$$\theta_{PCB} = \frac{0.010}{0.016 \times 0.00366} = 170.7^{\circ}\text{C/W} \quad (9)$$

在图2所示的等效热电路中，三个热阻( $\theta_{PCB}$ 、 $\theta_{VIACU}$ 和 $\theta_{VIASN63}$ )并联组合之后为5.37<sup>°</sup>C/W。在通孔中填塞焊料之后，热阻从8.05<sup>°</sup>C/W降低至5.37<sup>°</sup>C/W。最后，加上热阻串联的值，可以得出整个PCB总成的热阻。

$$\theta_{ASSY} = \theta_{SN63} + \theta_{CU} + \theta_{EQUIV} + \theta_{CU} = 0.372 + 0.038 + 5.37 + 0.038 = 5.81^{\circ}\text{C/W} \quad (10)$$

其中， $\theta_{ASSY}$ 表示总成的热阻。

## 确定功耗

热阻值确定后，必须确定热流(Q)值。对于RF器件，Q的值表示输入器件的总功率和器件输出的总功率之间的差值。总功率包括RF功率和直流功率。

$$Q = P_{INTOTAL} - P_{OUTTOTAL} = (P_{INRF} + P_{INDC}) - P_{OUTRF} \quad (11)$$

其中：

$P_{INTOTAL}$  表示直流功率和RF输入功率之和。

$P_{OUTTOTAL}$  表示器件输出的功率，与 $P_{OUTRF}$ 相同。

$P_{INRF}$  表示RF输入功率。

$P_{INDC}$  表示直流输入功率。

$P_{OUTRF}$  表示传输至负载的RF输出功率。

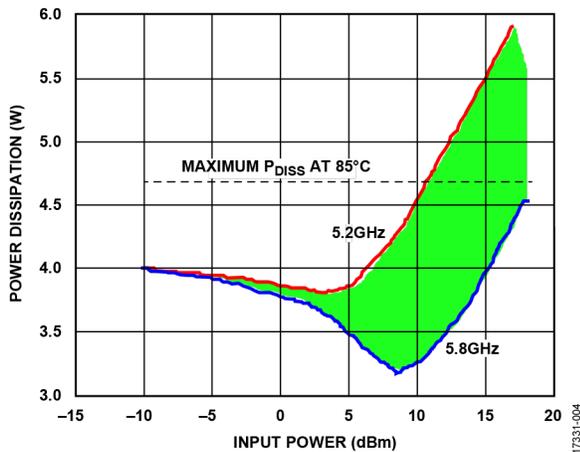


图4. HMC408LP3 功耗与输入功率

表3. 热工作数据表

描述	值	单位	注释
散热器最高温度	70	°C	
$\theta_{ASSY}$	5.81	°C/W	从等效热电路计算得出
$\theta_{JC}$	13.79	°C/W	来自数据手册
$\theta_{TOTAL}$	19.6	°C/W	添加 $\theta_{ASSY}$ 和 $\theta_{JC}$
Q	4.0	W	
得出的结温	148.4	°C	散热器最高温度 + ( $\theta_{TOTAL} \times Q$ )；不超过数据手册中列出的最大通道温度

对于HMC408LP3功率放大器，使用公式11来计算图4中所示的 $P_{DISS}$ 的值。图4显示了放大器的以下特性：

- 器件消耗约4 W功率，无RF输入信号。
- 采用RF信号时， $P_{DISS}$ 的值由频率决定。
- 存在某一个输入功率，器件的功耗最低。

根据等效热阻、 $\theta_{TOTAL}$ 和Q，可以使用以下公式计算得出结温

$$\Delta T = Q \times \theta_{TOTAL} \quad (12)$$

$$\theta_{TOTAL} = \theta_{ASSY} + \theta_{JC} = 5.81 + 13.79 = 19.6^\circ\text{C/W} \quad (13)$$

对于无RF输入功率的静止状态， $Q = 4 \text{ W}$ ，且

$$\Delta T = 4.0 \times 19.6 = 78.4^\circ\text{C} \quad (14)$$

因为指定的HMC408LP3的最大结温为 $150^\circ\text{C}$ ，所以在 $P_{DISS} = 4 \text{ W}$ 时，散热器的温度必须 $\leq 71.6^\circ\text{C}$ （也就是说， $78.4^\circ\text{C} + 71.6^\circ\text{C} = 150^\circ\text{C}$ ）。

HMC408LP3功率放大器正常运行时（例如，输入功率 $\leq 5 \text{ dBm}$ ），功耗小于4 W，这表示散热器的温度可以稍微高于 $71.6^\circ\text{C}$ 。但是，如果放大器在深度压缩环境中工作，且输入功率等效于 $15 \text{ dBm}$ ，则 $P_{DISS}$ 升高，且要求散热器的温度低于 $71.6^\circ\text{C}$ 。

## 可靠性

组件的预期寿命与工作温度密切相关。在低于最大结温的温度下运行可以延长器件的使用寿命。超过最大结温会缩

短使用寿命。因此，实施热分析可以确保在预期的操作条件下不会超过指定的最大结温。

## 结论

使用采用LFCSP和法兰封装的低结温表贴RF功率放大器来围装热阻迫使PCB不仅要充当器件之间的RF互连，还要用作导热路径以导走功率放大器的热量。

因此， $\theta_{JC}$  取代 $\theta_{JA}$ ，成为衡量LFCSP或法兰封装的重要热阻指标。

在这些计算中，最关键的指标是RF放大器的结温或通道温度( $T_j$ )。只要不超过最大结温，那么其他标称限值，例如 $T_{CASE}$ ，则可以高于限值。

