

# 评估 MOSFET 在重复性未钳位感应开关/短路条件下的瞬态结温

安森美半导体公司 David Lee

功率MOSFET数十年以来一直是电子设计的基础，为多种应用提供开关功能，并替代了简单的晶体管器件。在大多数情况下，它们用于对系统设计的大功率电路进行控制及稳压。技术进步及商业压力已经使市场上出现更紧凑、更高密度、更低噪声及更高性价比的MOSFET，替代过去的大尺寸、低能效MOSFET。对于相同的导通电阻而言，基于沟槽拓扑结构的功率MOSFET要求的尺寸与利用传统平面型拓扑结构的器件相比小了一半。能效及成本方面的改善支持采用更小的封装及实现更高的利润率。这表示产品可以组装在更时髦的外壳中，因此对消费者更具吸引力。然而，对某些工程师而言，裸片尺寸减小为他们的设计带来了问题。下文将审视如何评估可能出现的风险。

在直流-直流(DC-DC)转换器、不间断电源(UPS)及运动控制系统等大多数MOSFET应用中，散热性能都是重要参数。在UPS或电机应用中，均要求MOSFET在故障条件下处理大电流突发浪涌。如果没有测量功率器件瞬态结温的方法，设计人员就只能推测出现散

热故障的风险大小。

结温(如图1)指的是功率器件的内部温度。使用热电耦或红外相机来进行热测量仅可以估计出平均外壳温度。了解施加在MOSFET上的功率就能够推导出峰值结温——这将确定故障点，帮助预测MOSFET在故障条件下的存续时间。器件数据表上显示的最大值针对的是特定温度范围，不适用于实际应用环境。

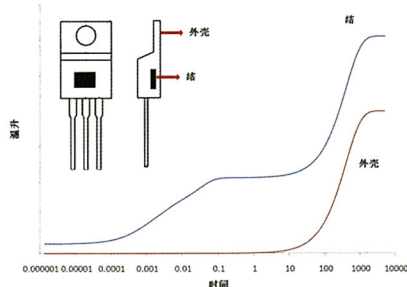


图1 典型TO-220封装的结温及外壳温度瞬态

一般来讲，器件的额定重复性雪崩能量( $E_{AR}$ )跟各种各样的散热片类型有关。在实际应用中，重复性大功率会显著增加平均功率耗散，提高外壳温度。此外，数据表上的值是假定能量为矩形功率脉冲、使用额定温度推导出来的，但在重复性雪崩条件下，时域脉冲本质上呈现三角形。

有不同的方法来创建大功率耗散条件下的瞬态温升曲线：1.采用Cauer/Foster模型来进行SPICE建模，包括散热片/电路板；2.使用电子表格来进行散热网络建模。

这两种方法都要求并非所有时候都具备的工具/软件及信息，且要求大量的处理时间来延长稳态。这将增加设计项目的总体成本，延缓上市进程。

可以基于MOSFET数据表的热阻抗图来使用一种简化的方法。使用单事件(single event)瞬态温度及平均温度上升模型，有可能评估总体瞬态特性。必须清楚大功率单事件的特性以计算结温度上升。对于未钳位感应开关(UIS)而言，功率脉冲的波形将恰好是三角形。

$$\text{单事件功率损耗} = P_{\text{single}}$$

$$\text{正常工作功率损耗} = P_{\text{d-avg}}$$

不同功率脉冲波形的峰值温升将不同。单事件的瞬态温升可以这样计算：

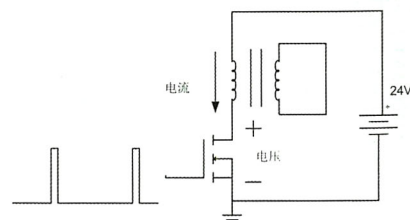


图2 UIS故障条件下的电机钻孔电路

平均瞬态温度= $R_{thJA}(t) \cdot (P_{single} + P_{d-avg})$

总体瞬态=平均瞬态+单事件

在钻孔(drill)反激电路(见图2)等单MOSFET触发器应用中,可能出现重复性UIS。当钻孔阻塞时,MOSFET可能遭受过大应力。在这种环境下,钻孔将存续的周期数量或时间至关重要。当钻孔阻塞时,电流跃升,在导通时间出现寄生电感。这就会在寄生电感中存储能量,可能导致MOSFET在关闭期间雪崩。由于器件发热,雪崩击穿电压( $V_{BD}$ )将在额定电压基础上增加30%。最后,在另一个周期开始之前,MOSFET漏极电压将逐渐下降至电池电压( $V_{Battery}$ )。雪崩时间( $t_{AV}$ )是 $I_{peak}$ 在关闭时间期间下降至零所要求的时长。

重复性UIS功率的推导过程如下(参见图3):

$$I_{peak} = \frac{V_{Battery} \cdot D}{(F_{SW} \cdot L)} = \frac{24 \cdot 0.1}{5000 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 96 A$$

$$V_{BD} = \sim 1.3 \cdot 60 V \cdot 1.1 = 86 V$$

$$t_{AV} = L \cdot I_{peak} / (V_{BD} - V_{Battery}) = 7.74 \mu s$$

$$Energy_{dissipated} = \frac{1}{2} \cdot V_{BD} \cdot I_{peak} \cdot t_{AV}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{peak}^2 \cdot \frac{V_{BD}}{V_{BD} - V_{Battery}} = 32 mJ$$

$$Power_{UIS} = 32 mJ \cdot 5000 Hz = 160 W$$

$$Power_{normal} = 10 W$$

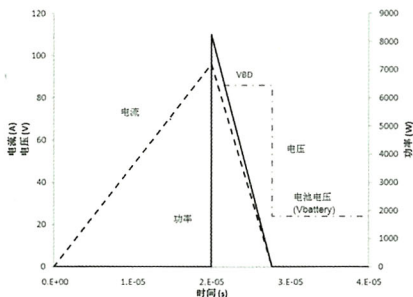


图3 UIS波形

单UIS温度瞬态如图4所示。可以参考MOSFET的热响应图(见图5)并拟合快速瞬态(时长达最低 $t_{AV}$ )的线路公式,它与时间 $t$ 开平方( $\sqrt{t}$ )成正比关系。MOSFET的裸片厚度决定快速瞬态的周期。

$$Fitted Fast R_{thJA} = K \cdot \sqrt{t} = 13 \cdot \sqrt{t} \left[ \frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

这拟合的快速瞬态 $R_{thJA}$ 将帮助创建单UIS温度瞬态。单UIS事件的功率脉冲转换为10个均等的离散功率脉冲,见下述等式。

$$Temperature Rise = R_{thJA}(t) \cdot Power(t)$$

$$Po = Peak Power = 86 V \cdot 96 A = 8256 W$$

$$T_{rise} @ \frac{t_{AV}}{10}$$

$$= \left[ \frac{Po \cdot K}{10} \cdot \sqrt{\frac{t_{AV}}{10}} \cdot \left[ 10 \cdot \sqrt{n} - \sum_{i=1}^n \sqrt{i} \right] \right] \quad n \leq 10$$

$$= \left[ \frac{Po \cdot K}{10} \cdot \sqrt{\frac{t_{AV}}{10}} \cdot \left[ 10 \cdot \sqrt{n} - \sum_{i=9}^n \sqrt{i} \right] \right] \quad n > 10$$

利用上述公式,并绘制瞬态曲线,在 $n=5$ 时就出现峰值温度。

$$T_{rise} @ \frac{t_{AV}}{2} = \frac{8256 \cdot 13}{10} \cdot \sqrt{\frac{7.74E-6}{10}} \cdot [10 \cdot \sqrt{5} - \sqrt{1} - \sqrt{2} - \sqrt{3} - \sqrt{4} - \sqrt{5}] = 131 ^{\circ}C$$

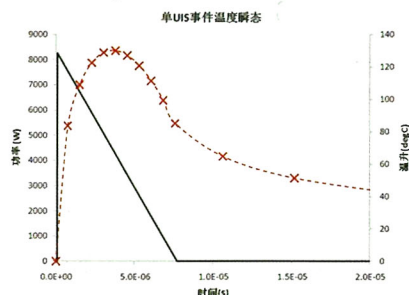


图4 UIS瞬态升温曲线

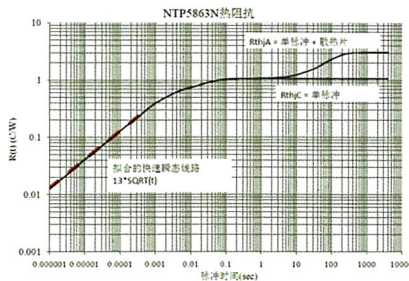


图5 安森美半导体NTP5863N的热阻图

可以获得包含散热片的热阻抗(如图5所示) $R_{thJA}(t)$ 。材料( $C_{HS}$ )的发热量及散热片供应商提供的热阻抗( $R_{HS}$ )构成了 $R_{thJC}(t)$ 的 $R_{HS} C_{HS}$ 网络。

$$R_{thJA}(t) = R_{thJC}(t) + R_{HS} \cdot (1 - e^{-t/(R_{HS} \cdot C_{HS})})$$

$$Average temperature transient = R_{thJA}(t) \cdot (Power_{UIS} + Power_{d-avg}) = R_{thJA}(t) \cdot 170 W$$

$$Peak single UIS temperature = \max(T_{rise} \text{ in } t_{AV}) = 131 ^{\circ}C$$

$$Peak junction temperature transient = 131 ^{\circ}C + R_{thJA}(t) \cdot 170 W$$

上述峰值温度等式忽略了大功率事件期间的瞬态。大多数情况下,忽略与不忽略的结果极为接近,但在大功率事件间隔时间较长的频率低得多的情况下,就需要顾及大功率事件期间的温度瞬态。

Example junction temperature at 10 s + 10 us:

$$T_{rise} @ (10 + 10 \mu s) = R_{thJA}(10 s) \cdot 170 W + \frac{8256 \cdot 13}{10} \cdot \sqrt{\frac{7.74E-6}{10}} \cdot [10 \cdot \sqrt{13} - \sqrt{4} - \sqrt{5} - \sqrt{6} - \sqrt{7} - \sqrt{8} - \sqrt{9} - \sqrt{10} - \sqrt{11} - \sqrt{12} - \sqrt{13}] = 1.25 \cdot 170 + 69.4 = 281.9 ^{\circ}C$$

上述温度计算指的是温升。此温升与环境温度相加,将得到实际结温。

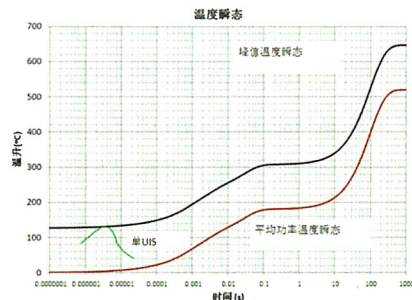


图6 总体瞬态升温

## 本征温度

硅MOSFET结温受其本征(Intrinsic)温度限制。据显示,在本征温度时出现本地热点(mesoplasma)。

所示的MOSFET的理论本征温度为370℃，在前述规定的重复应UIS条件下会在大约10s时( $T_{rise}=345^{\circ}\text{C}$ )失效。如果峰值温度在稳态条件下从未达到本征温度，MOSFET器件在重复性雪崩条件下将可存续。

## 重复性短路

所有不间断电源系统都要求在输出端进行短路测试。在输出(变压器的次级端)短路条件下，初级端H桥/推挽MOSFET以极低阻抗导通，重复流过极大电流。这将在短期内出现极大的功率损耗，直到微控制器关闭。低导通阻抗器件常被使用，使开关损耗在所有功率损耗中占主导位置。

## 单次短路温度瞬态

在短路条件下获得峰值温度的过程与前述重复性UIS示例类似。但短路功率脉冲 $t_{sc}$ 将不同。因此，前述 $T_{rise}$ 等式(针对直角功率脉冲)将不适用。具体的功率脉冲取决于电路应用参数，如MOSFET的饱和电流和寄生电感。

$$\text{Fitted Fast } R_{thJA} = K \cdot \sqrt{t} = 17 \cdot \sqrt{t}$$

图7显示了等边三角形及矩阵功率

脉冲的温升示例。靠边三角形分成了10分相等的功率，且时间除以20，从而推导出下面的离散温度瞬态公式。

$$T_{rise(\text{rectangular})} = \begin{cases} P_o = K \cdot \sqrt{t} & t \leq t_{sc} \\ P_o = K \cdot [\sqrt{t} - \sqrt{t - t_{sc}}] & t > t_{sc} \end{cases}$$

$$T_{rise(\text{iso. triangle}) @ n \frac{t_{sc}}{20}} = \begin{cases} \frac{P_o \cdot K}{10} \cdot \sqrt{\frac{t_{sc}}{20}} \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{i} & n \leq 10 \\ \frac{P_o \cdot K}{10} \cdot \sqrt{\frac{t_{sc}}{20}} \cdot \left[ \sum_{i=9}^n \sqrt{i} - \sum_{i=1}^{n-10} \sqrt{n-10} \right] & 10 < n \leq 20 \\ \frac{P_o \cdot K}{10} \cdot \sqrt{\frac{t_{sc}}{20}} \cdot \left[ \sum_{i=9}^n \sqrt{i} - \sum_{i=19}^{n-10} \sqrt{n-10} \right] & n > 20 \end{cases}$$

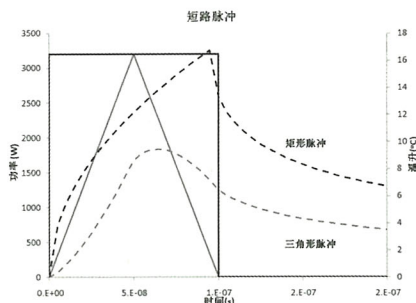


图7 不同功率脉冲波形的瞬态温度

MOSFET的本征温度会因技术的不同而有异。击穿电压较高的MOSFET器件通常比击穿电压较低的MOSFET器件拥有更低的硅掺杂浓度。掺杂浓度越高，就会使本征温度越高。安装条件也对热阻抗有很大影响。当使用了热焊盘或硅脂时，应当顾及它们的热阻抗。由于它们的热量与散热片相比微不足道，就不需要增加RC散热

网络了，简单地将阻抗值增加到 $R_{HS}$ 中就足够了。

## 结论

快速瞬态等式中使用的K项也提示了相同MOSFET封装系统中的裸片尺寸。

$$K = \frac{2}{A \sqrt{\rho n k c}}$$

$A$  = area,  $\rho$  = density,  $k$  = thermal conductivity,  $c$  = thermal capacity of silicon

显而易见的是，快速瞬态(时长小于约1ms)取决于裸片尺寸，慢瞬态(时长为约1ms至1s)取决于封装类型，而稳态瞬态取决于安装条件。如果采用相同的封装，裸片越大，快速瞬态中的峰值结温就越低，相同功率脉冲的稳态温升就越小。虽然较低的热阻抗表示散热能力越高，不同器件之间的击穿电压差异会影响UIS脉冲时间及能量。此外，裸片越大，输入电容也越大，导致开关功率损耗越高。因此，在MOSFET选择方面，计算功率损耗并推导瞬态结温将是更好的确定因素。这表示设计人员可以根据热阻抗特性来指定使用满足他们具体应用要求的最佳MOSFET，而非依靠试错法来确定。