

在功率 MOSFET 的数据表中，通常包括单脉冲雪崩能量 EAS，雪崩电流 IAR，重复脉冲雪崩能量 EAR 等参数，而许多电子工程师在设计电源系统时，往往只关注 MOSFET 的功率，而忽略了 MOSFET 的雪崩能量。如何在实际的应用中评定这些参数对其的影响，以及在哪些应用条件下需要考虑这些参数。本文将论述这些问题，同时探讨功率 MOSFET 在非饱和区的工作特性。

EAS，IAR 和 EAR 的定义及测量

MOSFET 的雪崩能量与器件的热性能和工作状态相关，其最终的表现就是温度的上升，而温度上升与功率水平和硅片封装的热性能相关。功率 MOSFET 的雪崩能量 EAS 的定义如下：

$$\Delta T_{\max}(t)=\frac{1}{A\cdot K}\int_0^t\frac{P(t-\tau)}{\sqrt{\tau}}d\tau \tag{1}$$

其中，A 是硅片面积，K 常数与硅片的热性能相关。由式(1)得：

$$E=\frac{1}{2}P_0\cdot t_{av}=\frac{A^2\Delta T_{\max}^2}{2P_0\cdot K'^2} \tag{2}$$

其中，tav 是脉冲时间。当长时间在低电流下测量雪崩能量时，消耗的功率将使器件的温度升高，器件的失效电流由其达到的峰值温度所决定。在此过程内，结温通常从 25℃ 增加到 TJMAX，外部环境温度为 25℃，电流通常设定在 ID 的 60%。雪崩电压 VAV 大约为 1.3 倍器件额定电压。

雪崩能量通常在非钳位感性开关 UIS 条件下测量。其中，有两个值 EAS 和 EAR，EAS 为单脉冲雪崩能量，定义了单次雪崩状态下器件能够承受的峰值电压和起始的电流值。

图 1 为 VDD 去耦的 EAS 测量电路及波形。其中，驱动 MOSFET 为 Q1，待测量的 MOSFET 为 DUT，L 为电感，D 为续流管。待测量的 MOSFET 在 VDD 上施加电压，其电流线性上升，经导通时间 tp 后，电感电流达到最大值；然后待测量的 MOSFET 和驱动 MOSFET 同时关断，由于电感的电流不能突变，电感电流通过续流管 D 续流。

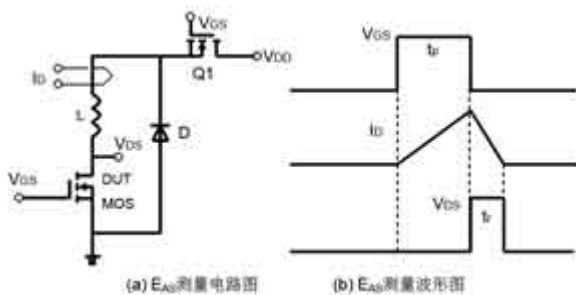


图 1 VDD 去耦的 EAS 测量图

由于 MOSFET 的 DS 之间有寄生电容，因此，在 D 导通续流时，电感 L 和 CDS 形成谐振回路，L 的电流降低使 CDS 上的电压上升，直到 MOSFET 进入雪崩区。

如果电感 L 为 0.1mH，IAS=10A，CDS=1nF，理论上，电压 VDS 为

$$CDSVDS2=LIAS^2 \tag{3}$$

$$VDS=3100V$$

这样高的电压值是不可能的，那么为什么会有这样的情况？从实际的波形上看，MOSFET 的 DS 区域相当于一个反并联的二极管。由于这个二极管的存在，当 VDS 增加，增加到接近于对应稳压管的钳位电压也就是 V(BR)DSS 时，VDS 的电压就不会再明显的增加，而是维持在 V(BR)DSS 值基本不变，因此，对于单次脉冲，加在 MOSFET 上的能量即为雪崩能量 EAS：

$$EAS=LIAS^2/2 \tag{4}$$

同时，由于雪崩电压是正温度系数，当 MOSFET 内部的某些单元温度增加，其耐压值也增加，因此，那些温度低的单元自动平衡，流过更多电流，而在去磁期间，雪崩电压将随温度的增加而变化。

在上述公式中，有一个问题，那就是如何确定 IAS？当电感确定后，是由 tp 来确定的吗？事实上，对于一个 MOSFET 器件，要首先确定 IAS。

完全损坏，然后将此时的电流值除以 1.2 或 1.3，即降额 70%或 80%，所得到的电流值即为 IAS。注意到 IAS 和 L 固定后，tp 也是确定的。

过去，传统的测量 EAS 的电路图和波形如图 2 所示。注意到，VDS 最后的电压没有降到 0，而是 VDD，也就是有部分的能量没有转换到雪

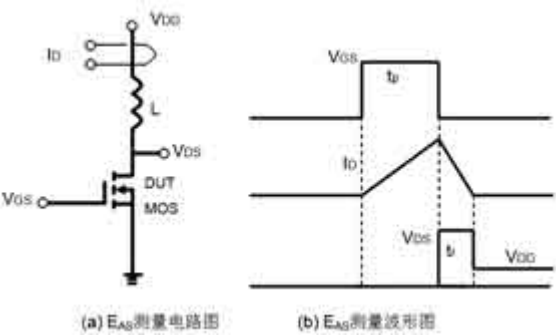


图 2 传统的 EAS 测量图

在关断区，图 2（b）对应的三角形面积为能量，不考虑 VDD，去磁电压为 VDS，实际的去磁电压为 VDS-VDD，因此雪崩能量为

$$E_{AS} = \frac{L \cdot I_{ds}^2}{2} \cdot \frac{V_{DS}}{V_{DS} - V_{DD}} \quad (5)$$

对于一些低压的器件，VDS-VDD 变得很小，引入的误差会较大，因此限制了此测量电路的在低压器件中的使用。

目前测量使用的电感，不同的公司有不同的标准，对于低压的 MOSFET，大多数公司开始趋向于用 0.1mH 的电感值。通常发现：如果电感值增加，电流上升的速度变慢，这样芯片就有更多的时间散热，因此最后测量的雪崩能量值会增加。这其中存在动态热阻和热容的问题。

雪崩的损坏方式

图 3 显示了 UIS 工作条件下，器件雪崩损坏以及器件没有损坏的状态。

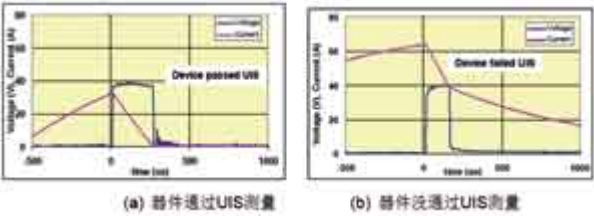


图 3 UIS 损坏波形

事实上，器件在 UIS 工作条件下的雪崩损坏有两种模式：热损坏和寄生三极管导通损坏。热损坏就是功率 MOSFET 在功率脉冲的作用下，效率将发生。

寄生三极管导通损坏：在 MOSFET 内部，有一个寄生的三极管（见图 4），通常三极管的击穿电压通常低于 MOSFET 的电压。当 DS 的反向电压 VDS 超过寄生三极管 BJT 的 VBEon。由于局部单元的不一致，那些弱的单元，由于基极电流 IB 增加和三极管的放大作用促使局部的三极管 BJT 导通，从而导致器件损坏。

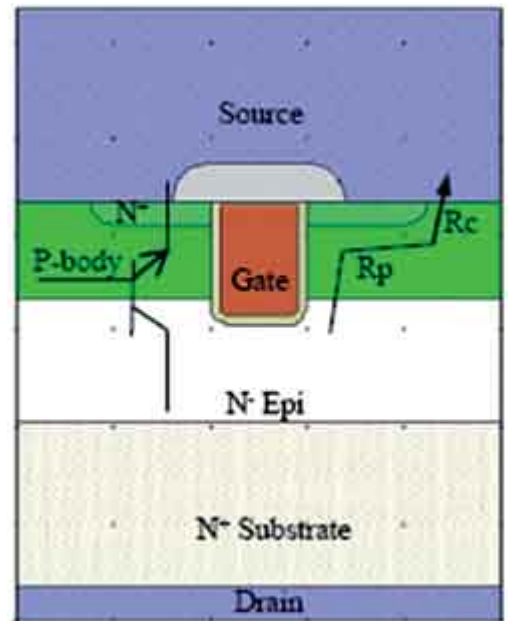


图 4 寄生三极管导通

在图 4 中， R_p 为源极下体内收缩区的电阻， R_c 为接触电阻， R_p 和 R_c 随温度增加而增加，射极和基极的开启电压 V_{BE} 随温度的增加而降低。

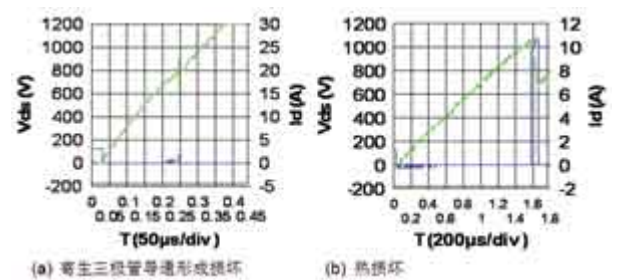


图 5 UIS 损坏模式（ $V_{DD}=150V$ ， $L=1mH$ ，起始温度 $25^{\circ}C$ ）

在什么的应用条件下要考虑雪崩能量

从上面的分析就可以知道，对于那些在 MOSFET 的 D 和 S 极产生较大电压的尖峰应用，就要考虑器件的雪崩能量，电压的尖峰所集中的能量会产生较大的电压尖峰。通常的情况下，功率器件都会降额，从而留有足够的电压余量。但是，一些电源在输出短路时，初级中会产生较大的电压尖峰，就要考虑器件的雪崩能量。

另外，由于一些电机的负载是感性负载，而启动和堵转过程中会产生极大的冲击电流，因此也要考虑器件的雪崩能量。