

功率 MOSFET 雪崩应用指南

AN-9034

引言

功率 MOSFET 是一种广泛用于开关电源和 DC-DC 转换器的开关器件。这些器件的工作频率不断提升，同时尺寸不断地缩小，功率密度不断地增加。其结果是器件具有高 di/dt ，增加了寄生电感的负面效应，导致关闭功率 MOSFET 时器件漏极和源极之间存在高电压尖峰。由于上电时大电容的电荷容量为空，并且电感较小(因为此时变压器初级端电感几乎达到漏电感水平)，尖峰在上电时最为明显。幸运的是，功率 MOSFET 设计为可耐受一定程度的应力，无需使用昂贵的保护电路。本指南提供了一种确定功率 MOSFET 是否适用于某个应用的有效方法。设计人员可据此权衡成本和可靠性。

1. 一套评估体系：单脉冲 UIS SOA

安森美 (onsemi) 开发了一套评估系统，用于指定功率 MOSFET 的单脉冲非钳位电感开关 (UIS) 能力^[1]。这套体系可方便地采用简单的参数确定和/或估计器件在任意应用中的可行性：雪崩时通过功率 MOSFET 的峰值电流 (I_{AS})、UIS 脉冲起始阶段的结温 (T_j) 和功率 MOSFET 保持雪崩状态的时间 (t_{AV})。通过描绘 I_{AS} 和 t_{AV} 曲线，用户便可检查器件的 UIS 能力。安森美的专用 UltraFET 和 POWER TRENCH[®] 提供这类评估图，并将于近期更新 QFET 数据手册。

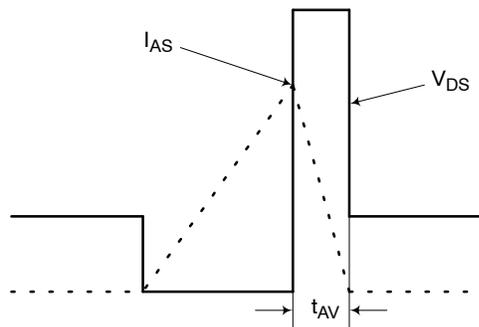


图 1. UIS 波形

2. 过压条件

实际应用中的过压条件可归类为两种情况。一种是功率 MOSFET 的漏源极电压超出指定的绝对最大额定值，但依然低于器件的击穿电压。这种情况不属于雪崩，器件的可行性可通过分析结温而确定。另一种情况是器件击穿，进入雪崩模式。该评估体系非常适合用于雪崩模式分析。

3. 雪崩模式分析

当功率 MOSFET 发生雪崩时，漏源极电压箝位至有效击穿电压，电流换向流过寄生反并联二极管。图 2 显示开关电源中的典型雪崩波形。漏源极电压超过 1 kV，MOSFET 中存在换向电流。

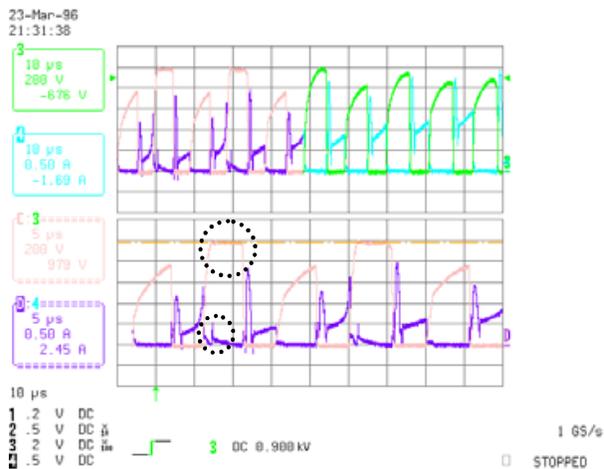


图 2. 器件击穿，800 V 额定值 MOSFET

UIS 评估体系处理雪崩情况时非常有用。如图 3 所示，UIS SOA 图形中存在三个区域：(1) 25 °C 线的上方和右方、(2) 最大结温线的下方和左方、(3) 以及两条线的中间部分。(1) 和 (2) 很容易确定：器件位于 UIS 额定值内 ((2))，或者超出额定值 ((1))。但是，若要确定 (3)，则需 UIS 脉冲起始时刻的功率 MOSFET 结温数据。后文将详细讨论结温的分析方法。

采用叠加技术，该 UIS 评估体系还可用于重复脉冲。每个 UIS 脉冲单独进行评估，与单脉冲情况相同。通常一系列脉冲中的最后一个发出时，器件具有最高的结温，从而此时的应力最大。若功率 MOSFET 位于最终脉冲的 UIS 额定值内，那么可以肯定针对先前结温较低时的脉冲，器件必然位于 UIS 额定值之内^[2]。

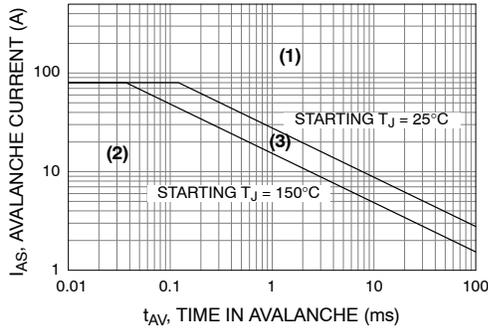


图 3. UIS 能力 (FDP050AN06A0)

4. 结温分析

通常很少发生功率 MOSFET 击穿的情况，哪怕漏源极电压超过绝对最大额定值。功率 MOSFET 的 BV_{DSS} 具有正温度系数，如图 4 所示。本例中，它在 120° 时达到约 990 V。因此，在较高的温度下，需要更高的电压才能导致器件击穿。在很多情况下，功率 MOSFET 工作时的环境温度超过 25°C ，并且功率损耗导致功率 MOSFET 的结温上升至环境温度以上。

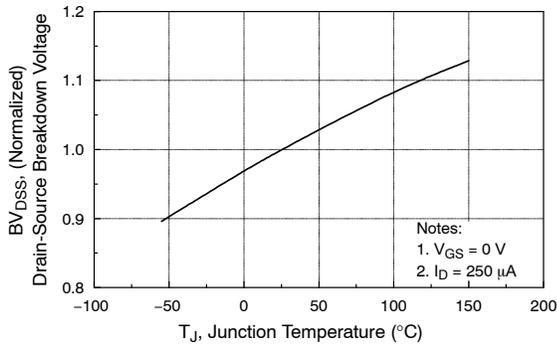


图 4. 标准化 BV_{DSS} 与 T_J 的关系 (FQA11N90C)

此外，还需注意图 4 中的 BV_{DSS} 在 $250\ \mu\text{A}$ 的漏电流下进行测量。在真实的击穿情况下，漏电流水平远高于此，且击穿电压甚至比上述值还要高。

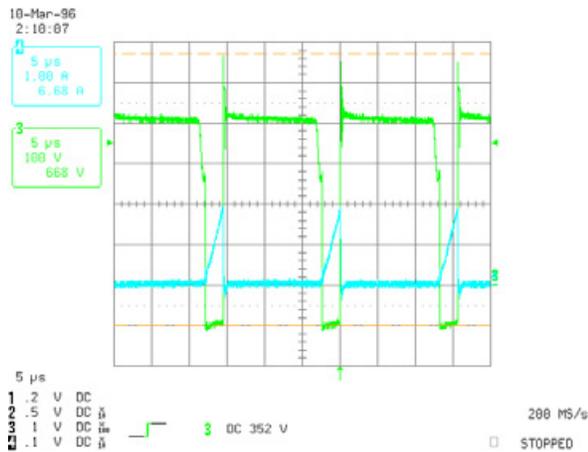


图 5. 开关电源的波形，600 V 额定值 MOSFET

出于实际考虑，应用中真实击穿电压选为额定低电流击穿电压的 1.3 倍^[1]。图 5 显示了一个非击穿示例，数值超出绝对最大额定值。峰值漏源极电压为 668 V，但未发生击穿。

虽然异常电压峰值未导致器件击穿，但应保持功率 MOSFET 的结温低于指定的最大结温，确保器件的可靠性。稳态结温可表述如下

$$T_J = P_D R_{\theta JC} + T_C \quad (\text{eq. 1})$$

其中，

- T_J : 结温
- T_C : 壳温
- P_D : 结点功耗
- $R_{\theta JC}$: 稳态热阻从结至外壳的

然而，在许多应用中，功率 MOSFET 的功耗为脉冲形式，而非直流形式。当功率脉冲施加于器件时，峰值结温随峰值功率和脉冲宽度的变化而改变。特定时间的热阻称为瞬态热阻，表述如下

$$Z_{\theta JC}(t) = r(t) \times R_{\theta JC} \quad (\text{eq. 2})$$

其中， $r(t)$ 是和时间有关的系数，表示热容量。对于时间极短的脉冲， $r(t)$ 值非常小，但对于时间长的脉冲，该值接近 1，且瞬态热阻接近稳态热阻。大部分安森美的功率 MOSFET 数据手册具有与图 6 相似的图形。

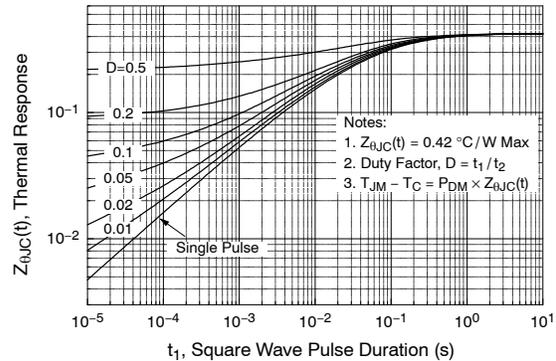


图 6. 瞬态热响应 (FQA11N90C)

根据这条曲线，结温可通过下列方式获得：

$$T_J = P_D Z_{\theta JC}(t) + T_C \quad (\text{eq. 3})$$

例如，由 $1\ \mu\text{s}$ 期间施加于 FQA11N90C 的单个 2 kW 功率脉冲导致的温度上升值，可如下计算：

$$T = P_D Z_{\theta JC}(1\ \mu\text{s}) = 2000 \times 1.49 \times 10^{-3} \approx 3^\circ\text{C} \quad (\text{eq. 4})$$

施加的功率值非常高，但温度仅上升 3 度。请注意，数据手册中给出的功耗额定值为稳态时的数值，且在相对较短的时间内功率 MOSFET 甚至能耐受更大的功率脉冲。

然而，在上例中，1 μs 瞬态热阻未在图 6 中提供。万一给定的时间太短且超出该图范围，则单脉冲瞬态热阻与时间的平方根成比例。从而 $Z_{\Theta JC}(1 \mu s)$ 变为

$$\begin{aligned} Z_{\Theta JC}(1 \mu s) &= Z_{\Theta JC}(10 \mu s) \times \sqrt{\frac{1 \mu s}{10 \mu s}} = \\ &= 4.72 \times 10^{-3} \times \sqrt{0.1} = 1.49 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (\text{eq. 5})$$

其中，

$Z_{\Theta JC}(10 \mu s)$ ：来源于图 6

上述热响应基于矩形功率脉冲。任意波形都有可能获得响应。然而，由于数学解决方案太过复杂，将其转换为等效矩形脉冲则最为简便。图 7 显示三角波和正弦波功率脉冲的一些示例。

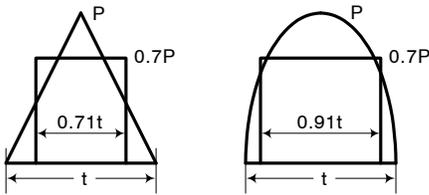


图 7. 功率脉冲的转换

公式 3 还可用于重复脉冲应用。重复脉冲的瞬态热阻近似值可计算如下^[3]

$$\begin{aligned} Z_{\Theta JC}(t) &= \left[\frac{t_1}{t_2} + \left(1 - \frac{t_1}{t_2} \right) r(t_1 + t_2) + r(t_1) - r(t_2) \right] R_{\Theta JC} = \\ &= \frac{t_1}{t_2} R_{\Theta JC} + \left(1 - \frac{t_1}{t_2} \right) Z_{\Theta JC}(t_1 + t_2) + Z_{\Theta JC}(t_1) - Z_{\Theta JC}(t_2) \end{aligned} \quad (\text{eq. 6})$$

其中，

t1：功率脉冲的脉冲宽度

t2：功率脉冲的周期

公式 6 适用于无限脉冲序列。若功率脉冲仅持续一段有限的时间，则第一项中的 $R_{\Theta JC}$ 应替换为 $Z_{\Theta JC}(t)$ 。

假设如下场景：进行短路测试时，功率 MOSFET 施加于开关电源的漏源极电压在保护功能激活的延迟时间内超出数据手册中指定的最大额定值。特定条件如下：FQA9N90C 开关器件，100 ns t_{AV} ，9.2 μs 周期，20 ms 延迟时间。在这种情况下，瞬态热阻变为

$$\begin{aligned} Z_{\Theta JC}(t) &= 0.01 \times Z_{\Theta JC}(20 \text{ ms}) + (1 - 0.01) \times \\ &\times Z_{\Theta JC}(9.3 \mu s) + Z_{\Theta JC}(100 \text{ ns}) - Z_{\Theta JC}(9.2 \mu s) = 0.00274 \end{aligned} \quad (\text{eq. 7})$$

假设雪崩期间功耗为 5 kW，由此导致的结温上升值为

$$\Delta T = 5 \text{ kW} \times 0.00274 \text{ } ^\circ\text{C/W} = 13.7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{eq. 8})$$

这是由于雪崩而引起的额外结温上升。因此，系统设计人员应首先计算正常工作时的结温，然后加入上述数值以获得雪崩时的瞬态结温。应当保持该温度低于最大允许的结温值，并根据设计人员的选择，留有一定安全裕量。

5. 结论

系统设计人员经常不得不确定功率 MOSFET 在应用中的适用性。可以通过极为实用的雪崩模型分析和/或结温分析解决这个问题。

参考文献

- [1] “单脉冲非箝位感性开关：一套评估体系”，安森美应用笔记 [AN-7514](#)
- [2] “单脉冲和重复 UIS 混合评估体系”，安森美应用笔记 [AN-7515](#)
- [3] Rudy Severns 1984, “MOSPOWER 晶体管的安全工作区和散热设计”，MOSPOWER 应用手册，Siliconix

POWERTRENCH is a registered trademark of Semiconductor Components Industries, LLC dba “**onsemi**” or its affiliates and/or subsidiaries in the United States and/or other countries.

onsemi, **Onsemi**, and other names, marks, and brands are registered and/or common law trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba “**onsemi**” or its affiliates and/or subsidiaries in the United States and/or other countries. **onsemi** owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of **onsemi**'s product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf. **onsemi** reserves the right to make changes at any time to any products or information herein, without notice. The information herein is provided “as-is” and **onsemi** makes no warranty, representation or guarantee regarding the accuracy of the information, product features, availability, functionality, or suitability of its products for any particular purpose, nor does **onsemi** assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using **onsemi** products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by **onsemi**. “Typical” parameters which may be provided in **onsemi** data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including “Typicals” must be validated for each customer application by customer’s technical experts. **onsemi** does not convey any license under any of its intellectual property rights nor the rights of others. **onsemi** products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use **onsemi** products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold **onsemi** and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that **onsemi** was negligent regarding the design or manufacture of the part. **onsemi** is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

ADDITIONAL INFORMATION

TECHNICAL PUBLICATIONS:

Technical Library: www.onsemi.com/design/resources/technical-documentation
onsemi Website: www.onsemi.com

ONLINE SUPPORT: www.onsemi.com/support

For additional information, please contact your local Sales Representative at www.onsemi.com/support/sales