

具备出色稳定性的 CoolSiC™ MOSFET M1H

近期推出的 1200 V CoolSiC™ MOSFET M1H 有多种新特性，以及可让目标应用从中受益的改进。其一大亮点是，在实际应用条件下，栅极阈值电压的稳定性大幅提高。

文：André Lenze 与 Paul Salmen 博士，英飞凌科技股份有限公司（德国瓦尔施泰因）

引言

过去几年，实际应用条件下的阈值电压漂移 ($V_{GS(th)}$) 一直是 SiC 的关注重点。

英飞凌率先发现了动态工作引起的长期应力下 $V_{GS(th)}$ 的漂移现象，并提出了工作栅极电压区域的建议，旨在最大限度地减少使用寿命内的漂移。[1]。

经过不断研究和持续优化，现在，全新推出的 CoolSiC™ MOSFET M1H 在 $V_{GS(th)}$ 稳定性方面有了显著改善，几乎所有情况下的漂移效应影响，都可以忽略不计。

现象描述

$V_{GS(th)}$ 漂移现象通常是通过高温栅极偏置应力测试 (DC-HTGS) 来进行描述的，该测试遵循 JEDEC 等标准定义的测试准则进行。

近期的研究结果表明，与相应的静态栅极应力测试 (DC-HTGS) 相比，包括 $V_{GS(off)} < 0V$ 在内的正负电源驱动，交流 AC 栅极应力引起的阈值电压漂移更高，这一发现为 SiC MOSFET 器件的可靠性带来了新视角 [1,3]。

图 1 显示了交流 (AC) 和直流 (DC) 应力条件下的不同影响。 $V_{GS(th)}$ (ΔV_{th}) 的数据变化是使用数据表[1]中的最大条件得出的。

图中可以看到两个不同的斜率，第一个对应的是典型的类似直流 DC 的漂移行为（“直流拟合”）；第二个更大的斜率对应的是正负电源的交流 AC 应力效应（“交流拟合”），也称栅极开关不稳定性 (GSI)。

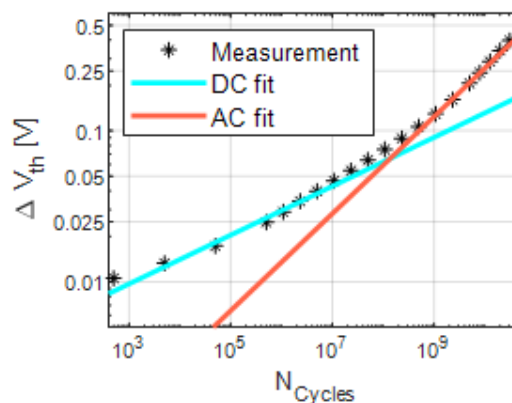


图 1：连续栅极开关应力期间的漂移： $V_{GS(on)} = 20 V$ ； $V_{GS(off)} = -10 V$ ； $T_{vj,max} = 150 ^\circ C$ and $f = 500 kHz$. [1]

我们的结论是：开关周次数超过 10^8 的应力条件下，交流漂移是造成应力的主要原因；开关周次数较少时，直流漂移是造成应力的主要原因。

数据显示，开关应力会导致 $V_{GS(th)}$ 随时间缓慢增加。由于阈值电压 $V_{GS(th)}$ 增加，可以观察到沟道电阻 (R_{ch}) 的增加。这种现象由等式 (1) 描述，式中， L 是沟道长度， W 是沟道宽度， μ_n 是电子迁移率， C_{ox} 是栅极氧化层电容， $V_{GS(on)}$ 是导通状态栅极电压， $V_{GS(th)}$ 是器件的阈值电压[1]。

$$R_{ch} \approx \frac{L}{\mu_n \cdot C_{ox} \cdot W \cdot (V_{GS(on)} - V_{GS(th)})} \quad (1)$$

总 $R_{DS(on)}$ 是由各电阻的总和决定的，即沟道电阻 (R_{ch})、结型场效应晶体管电阻 (R_{JFET})、漂移区的外延层电阻 (R_{epi}) 和高掺杂 SiC 衬底的电阻 (R_{Sub})。等式 (2) 描述了总 $R_{DS(on)}$ 的整个组成。

因此， $V_{GS(th)}$ 的增加会导致沟道电阻略有提高，从而造成 $R_{DS(on)}$ 提高，以及久而久之产生的导通损耗。

$$R_{DS(on)} = R_{ch} + R_{JFET} + R_{epi} + R_{Sub} \quad (2)$$

栅极开关应力

为了确保和预测我们的 CoolSiC™ MOSFET 在典型开关工作期间电气参数的长期稳定性，我们开发并采用了一种新的应力测试：栅极开关应力测试（GSS）。该测试可以让您直接确定电气参数漂移，这些漂移通常在正负驱动电压模式下运行（正 $V_{GS(on)}$ ：导通；负 $V_{GS(off)}$ ：关断）。该测试可以让开发人员量化上述新的失效机制，因此，是鉴定 SiC MOSFET 的必要条件。GSS 测试涵盖了所有重要的漂移现象，包括在器件正常工作期间发生的漂移现象。除了缺失的负载电流（它本身不会改变我们所观察到的漂移行为）[3]，我们通过保持与典型应用条件相似的栅极开关特性（例如，电压斜率），尽可能地模拟应用（参见 **Error! Reference source not found.**）[1]。为了涵盖在实际 SiC MOSFET 应用中非常常见的栅极信号过冲和下冲的潜在影响，我们通过在数据表所允许的最大栅极电压和最大静态结温 ($T_{vj,op}$) 下施加应力，来实现最坏情况。

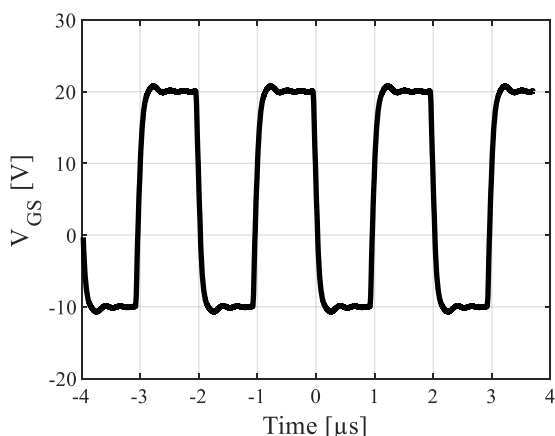


图 2：频率 $f = 500\text{kHz}$ 时，典型的 GSS 栅源应力信号。[1]

在最坏情况下进行测试，可以让客户确信自己能够在整个规格范围内使用该器件，而不会超过漂移极限。因此，这种方法保证了器件的出色可靠性，同时也便于安全裕度的计算。

除了 $V_{GS(th)}$ ，栅极漏电流 I_{GSS} 等其他参数也得到了测量，并在被测硬件上保持一致[1]。

最坏情况的寿命终止漂移评估及其对应用的影响

在开发逆变器过程中，一大任务就是预测设备的使用寿命。因此，必须提供可靠的模型和信息。在各种工作条件下，进行了大量的测试后，我们就能开发出一个预测性的半经验性模型，该模型描述了阈值电压随任务曲线参数的变化，例如：应力时间 (t_s)、栅极偏置低电平 ($V_{GS(off)}$)、栅极偏置高电平 ($V_{GS(on)}$)，开关频率 (f_{sw}) 和工作温度 (T) ($\Delta V_{GS(th)}(t_s, V_{GS(off)}, V_{GS(on)}, f_{sw}, T)$) [3]。

基于该模型，我们建立了一种评估阈值电压漂移的方法，使用最坏情况寿命终止曲线（EoAP）来计算相对 $R_{DS(on)}$ 漂移。在应用中，以任意频率运行一定时间，我们可以计算出至 EoAP 之前的开关周期总数 (N_{Cycle})。然后，使用 N_{Cycle} 读出相对 $R_{DS(on)}$ 漂移。

周期数取决于开关频率和工作时间。典型的硬开关工业应用（例如，太阳能组串逆变器）使用 16-50 kHz 的开关频率。使用谐振拓扑的逆变器的开关速度通常超过 100 kHz。这些应用的目标寿命通常在 10-20 年，而实际工作时间通常在 50%-100%。

以下示例提供了一个样品评估：

- 目标寿命[年]：20
- 实际工作时间[%]：50% => 10 年
- 实际工作时间[s]：315,360,000 s (10 年)
- 开关频率 [kHz]：48
- 周期持续时间[s]：1 / 开关频率 = 0.0000208
- 寿命终止时的周次数= **-1.52E+13**

导通电压为 18 V 时，预计 25°C 时的 $R_{DS(on)}$ 的相对变化小于 6%，175°C 时小于 3%，见图 3（图 3 中的绿点）。

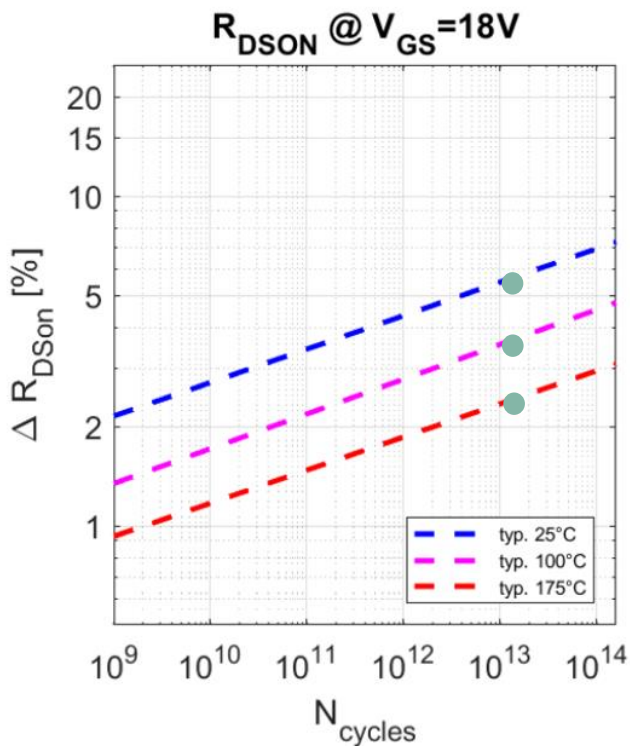


图 3: $V_{GS(on)} = 18\text{ V}$ 、 $T_{vj,op} = 25^\circ\text{C}$ 、 125°C 和 175°C [2] 时的相对 $R_{DS(on)}$ 变化

Error! Reference source not found.示例
基于最近推出的 EasyPACK™

FS55MR12W1M1H_B11 (DC-AC 逆变器中的三相逆变器桥配置)，说明了 $R_{DS(on)}$ 预测变化的影响[4]。这个例子是在损耗分布中，传导损耗 (P_{con}) 占比很大的应用。 $T_{vj,op}$ 从最初的 148°C 到 150°C 的最坏情况 EoAP 仅上升 2 K。结果证明，哪怕是使用了 20 年后， $R_{DS(on)}$ 的轻微变化导致的 $T_{vj,op}$ 增加也可以忽略不计。

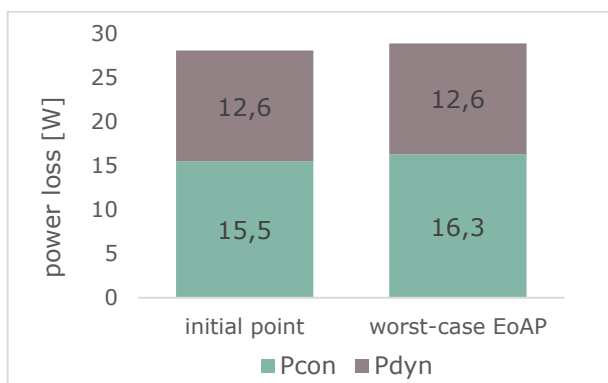


图 4 最坏情况 EoL 评估: V_{dc} : 800 V, I_{rms} : 18 A, f_{out} : 50 Hz, f_{sw} : 50 kHz, $\cos(\varphi)$: 1, $T_h = 80^\circ\text{C}$ 。
图中文字:

Power loss: 功率损耗

Initial point: 初始点

Worst-case EoAP: 最坏情况 EoAP

这种方法意味着，最大漂移应当是在所描述的最坏情况下出现的。借助全新的 M1H 芯片，客户将能从数据表的规格范围中，选择最适用于其应用的参数。栅极信号中的寄生过冲和下冲不会影响漂移，无需从应用的角度考虑。因此，可以节省时间和精力。

请注意：在控制良好的栅极偏置电平下运行的应用，远低于数据表的最大限制，例如， $+18\text{ V} / -3\text{ V}$ ，在相同的开关周期数下， $R_{DS(on)}$ 的变化幅度甚至更小。

结论

我们通过各种开关条件下进行长期的测试，研究了在实际应用条件下的阈值电压特性。我们开发并采用了一种应力测试程序，来确定在现实的应用开关条件下，最坏情况 EoAP 参数漂移，为我们的客户提供了可靠的预测模型。

除了其他关键的改进外，最近推出的 1200 V CoolSiC™ MOSFET，即 M1H，还显示出了出色的稳定性，并降低了漂移现象的影响。

参考文献

- [1] 英飞凌应用说明 2018-09
- [2] P. Salmen, M. W. Feil, K. Waschneck, H. Reisinger, G. Rescher, T. Aichinger: 一种新的测试程序，可实际评估 SiC MOSFET 在开关运行中的寿命终止电气参数稳定性；2021 IEEE 国际可靠性物理研讨会 (IRPS) (2021 年)
- [3] 英飞凌：白皮书 08-2020：英飞凌如何控制和确保 SiC 基功率半导体的可靠性，第 11–21 页；
- [4] 数据表 FS55MR12W1M1H_B11