

了解功率 MOSFET 雪崩操作和相关的 UIS (UIL) 数据表额定值

AND90158/D

在关断状态下，功率 MOSFET 的体二极管结构的设计是为了阻断最小漏极-源极电压值。MOSFET 体二极管的击穿或雪崩表明反向偏置体二极管两端的电场使得漏极和源极端子之间有大量电流流动。典型的阻断状态漏电流在几十皮安到几百纳安的数量级。根据电路条件不同，在雪崩、MOSFET 漏极或源极中，电流范围可从微安到数百安。额定击穿电压，也可称之为“BV”，通常是在给定温度范围（通常是整个工作结温范围）内定义的 MOSFET 器件的最小阻断电压（例如 30 V）。数据表中的 BV_{dss} 值是在低雪崩电流

（通常为 250 μA 或 1 mA）和结温 = 25°C 时测得的器件雪崩电压。数据表中通常也提供结温范围内的 BV_{dss} 数据或 BV_{dss} 温度系数。值得注意的是，功率 MOSFET 雪崩电压是结温和雪崩电流的强函数。图 1 显示了三个温度下的 BV_{dss} 值作为额定电压为 30 V 的器件的雪崩电流的函数。下面的表 1 列出了不同功率 MOSFET BV 额定值的典型雪崩电压范围——在高雪崩电流（安培）和升高的结温（处于或接近最大额定结温）下测量。

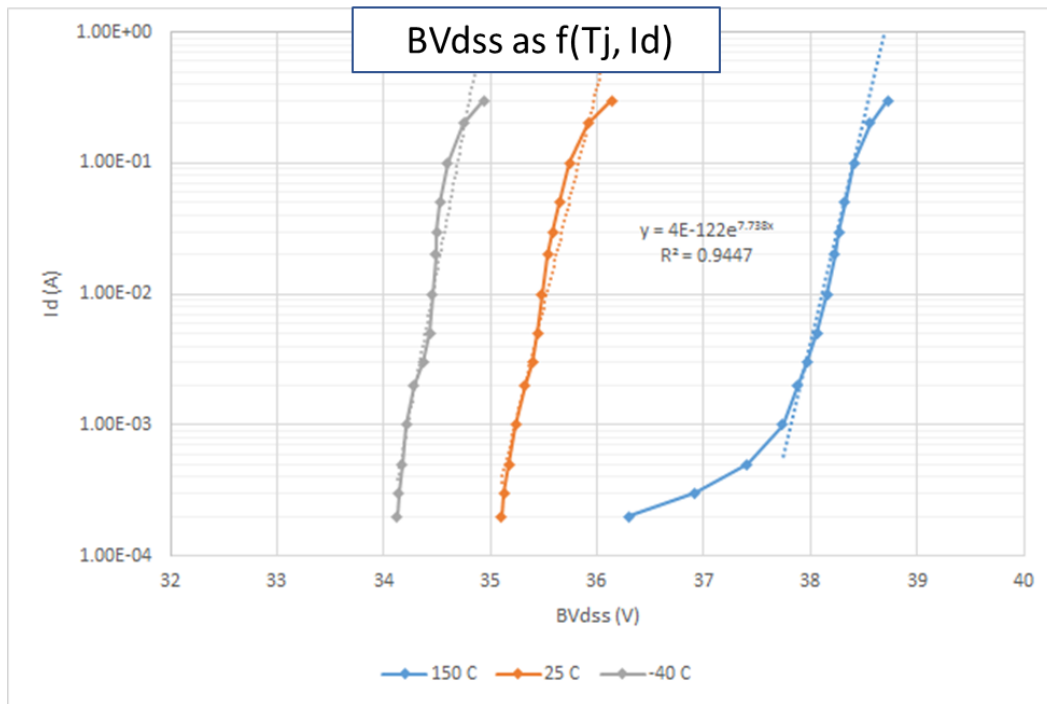


图 1. 额定电压为 30 V 的 MOSFET 器件的雪崩电压与结温和雪崩电流的关系

表 1. 不同 BV 等级的高 Tj 和高 Iav 条件下的典型雪崩电压范围

额定 (V)	Vav (V)
30	44-47
40	55-59
60	85-90
80	115-120
100	140-150

在雪崩工作状态下的 MOSFET 的功率函数 (雪崩电压 * 雪崩电流) 可以具有任何形式。本应用笔记介绍了一个特定的雪崩功率函数, 它构成了功率 MOSFET 数据表中雪崩额定值的基础。MOSFET 数据表通常在同义术语 “UIS” 或 “UIL” 下指定雪崩额定值, “UIS” 和 “UIL” 分别指 “非钳位电感开关” 和 “非钳位电感负载”。也就是说, 当驱动未钳位负载的 MOSFET 关断时, 功率 MOSFET 雪崩额定值适用于由此产生的 Vds 和 Id (这些术语假定为 n 沟道 MOSFET, 否则 Vsd 和 Is 适用于 p 沟道 MOSFET) 波形。图 2 显示了基础电路, 图 3 显示了器件波形。接着, 我们继续假设一个 n 沟道 MOSFET 并定义如下术语:

Iav = 雪崩电流

Ipk = 最大雪崩电流 = MOSFET 关断时的值

Ipk (fail) = MOSFET 失效时的最大雪崩电流 (漏极到源极到栅极短路)

Jpk, Jpk (fail): Ipk 值与管芯有源面积成比例, 单位为 A/面积²

管芯有源面积: 包含有源 MOSFET 结构的 MOSFET 管芯面积; 占总管芯面积的某个百分比

Vav = 雪崩电压 (Vds)。Vav 在雪崩期间通常不是恒定的 (因为 Iav 和 Tj 会发生变化); Vav 通常是在雪崩期间测得的平均 Vds 幅度

tav = 雪崩时间, 通常定义为 Iav 从 Ipk 降至零所需的时间; 即电感中存储的能量减少到零的时间。

Tj = MOSFET 结温, 通常简称为管芯表面或附近的最高温度。

Tj (intrinsic) = 器件结变成导体时的 MOSFET 结温 (热产生的载流子淹没掺杂载流子); 在此温度下, MOSFET 通常会失效, 并具有漏极到源极到栅极永久短路的特性。

能量 (E, 或有时称为 Eav 或 Eas) = 雪崩功率函数的时间积分; 对于雪崩中的纯三角函数,

$$E = 1/2 * Vav * Ipk * tav$$

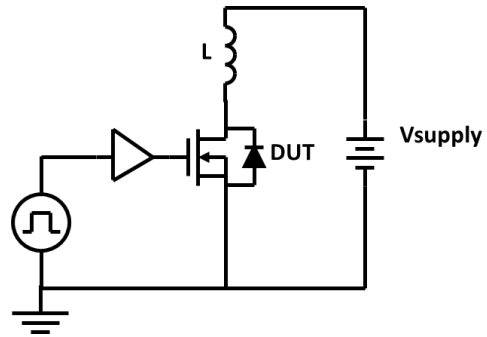


图 2. 基本的非钳位电感开关关断电路。DUT (被测器件) 是功率 MOSFET 器件。三角形表示栅极驱动电路。

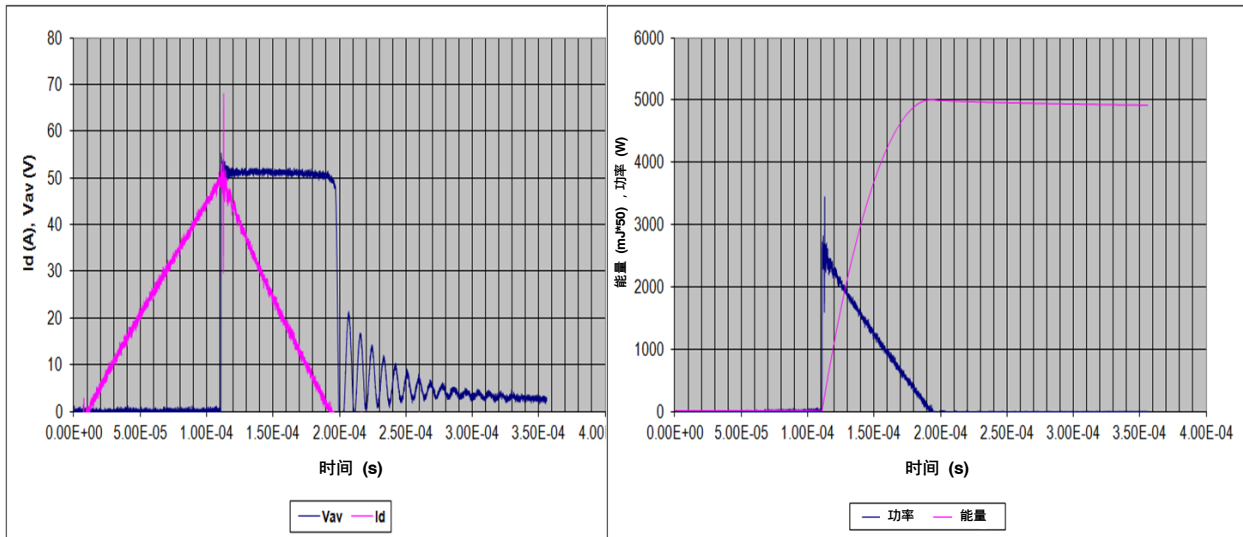


图 3. MOSFET DUT 的非钳位电感关断波形。能量函数是功率函数的积分。

配置为高边配置的功率 MOSFET (见图 4) 可能会发生雪崩, 具体取决于栅极驱动条件。如果关断时的栅极驱动器将栅极和源极电位放在一起, 使 $V_{gs} \ll V_{th}$, 则源极电位可能会下降到器件雪崩所需的负值。然而, 如果关断时的栅极驱动器使栅极电位为零, 则源极电位只能降低到负值, 直到器件重新导通。也就是说, V_{gs} 变为正值并达到当器件处于饱和状态时雪崩电流流动所需的值 (通常略大于 V_{th} , 具体取决于 I_{av} 大小和器件增益)。在这种情况下, MOSFET 在钳位期间工作在饱和状态 (因为电感存储的能量减少到零)。这种“自激活”钳位操作模式造成了一个潜在的问题, 即热失控 (本应用笔记中未涵盖这一主题)。

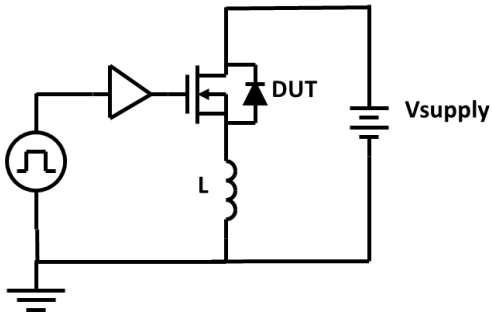


图 4. 基本高边配置的非钳位电感负载关断电路

大多数应用在设计上通常不会将 MOSFET 关断到未钳位负载。但是, 有些应用在设计上确实会切换未钳位的电感负载。例如一些燃油喷射系统、ABS 转储线圈和低成本、低功率螺线管负载, 在这些负载中可以省去钳位二极管的成本。更常见的是, 应用雪崩问题和可能导致的器件失效是由 PCB 迹线和电缆布线的未钳位杂散电感、电阻器和电容器的 ESL 以及晶体管和

二极管的封装互连电感的关断引起的。例如因短路失效 (通常由于非常高 I_{pk} 值和低 t_{av} 值) 而关断, 以及转换器和逆变器拓扑结构中的开关节点过冲。MOSFET 上的雪崩事件也可能由电源线上的瞬变引起 (例如交流发电机负载突降); 雪崩操作不一定需要关断未钳位的电感负载。然而, 根据雪崩功率函数的组成, 功率 MOSFET 数据表中的 UIS (UIL) 数据通常可用于评估这些雪崩事件。

通常, MOSFET UIS 的性能是通过使器件样品经受雪崩脉冲直至失效来确定的。大多数情况下, 选择一个固定的电感值, 并增加通过电感的峰值电流, 直到 DUT (被测器件) 失效 (表现为漏极到源极到栅极短路)。在每个 I_{pk} 增量之间允许有足够的时间, 以确保 DUT 结温在下一个雪崩脉冲之前返回到初始条件。初始结温由烘箱、强制通风或加热块控制。通常, UIS 数据是在 $T_j(\text{initial}) = 25^\circ\text{C}$ 和至少一个升高的初始结温 (例如 100°C) 时收集的。可以配置测试电路, 以便 DUT 用于使电感负载的电流上升或连接为二极管 ($V_{gs} = 0\text{ V}$), 并且更高的雪崩开关用于上升和关断电感电流。比较图 5 中的电路。在将 DUT 用作 MOSFET 开关以使电流流入导体时, 需要考虑两个潜在问题。首先, 在电流增加到 I_{pk} 的过程中, MOSFET 器件正在消耗功率 (通常等于 $I^2 \cdot R_{ds(\text{on})}$), 因此该器件可能会自发热, 从而增加了关断时的初始结温 $T_j(\text{initial})$ 。要缓解这一问题, 可以施加足够的 V_{gs} 栅极电压来降低 $R_{ds(\text{on})}$, 并使用尽可能高的电源电压以最小化达到 I_{pk} 所需的时间 (从 0 A 到 I_{pk} 的时间 $= L \cdot I_{pk} / V_{\text{supply}}$)。第二个问题是关断期间的栅极驱动灌电流能力。如果器件缓慢关断, 一些存储的电感能量会在开关转换过程中消耗掉。如果关断速度足够慢, 则可以避免雪崩。一般来说, 功率 MOSFET 数据表 UIS 规范假定硬关断事件, 确保几乎所有电感器存储的能量都被雪崩操作中的 MOSFET 耗散。

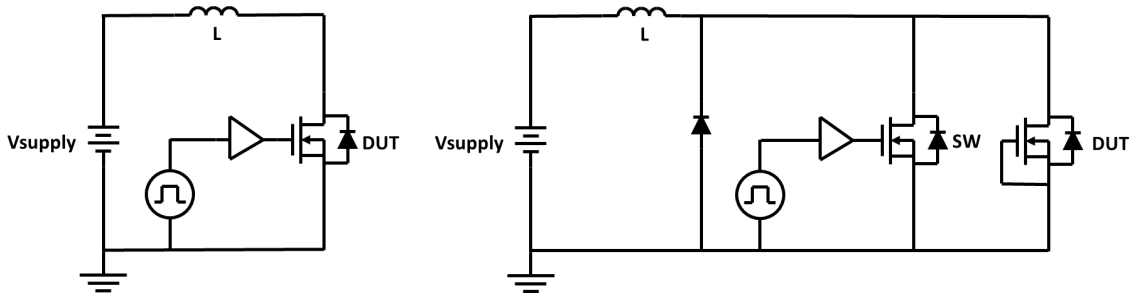


图 5. 左侧电路是基本自驱动 UIS 测试电路。右侧电路是另一种测试电路, 其中 DUT 配置为二极管, 次级开关 (SW) 控制电感器电流。 $V_{av}(\text{SW}) \gg V_{av}(\text{DUT})$ 。

收集的 UIS 数据是一组 $I_{pk}(fail)$ 和几个不同电感值的相关 t_{av} 工作点。根据这组数据，可以生成给定 $T_j(initial)$ 下的 $I_{pk}(fail)$ vs t_{av} 曲线 (见图 6)。数据应该很好地拟合 $I_{pk} = A * t_{av}^{-\alpha}$ 形式的功率函数，其中 A 是常数， α 指数幅度通常约为 0.5。这很重要，因为它表明 I_{pk} 失效操作点可能代表基于热的失效。功率函数 $I_{pk} = A * t_{av}^{-\alpha}$ 可以改写为 $A^{(1/\alpha)} = I_{pk}^{(1/\alpha)} * t_{av}$ 。如果 $\alpha = 0.5$ ，我们得到结果 $I_{pk}^2 * t_{av} = \text{常数}$ 。这是对机械保险丝 (由于材料达到熔点而断开的保险丝) 电流和断开 (熔化) 时间特性建模的典型表达式。从这个意义上说，功率函数 $I_{pk} = A * I_{pk}^{-\alpha}$ 可以指示热失效机制。关于功率 MOSFET UIS 能力作为热基失效的重要性的作用将在后面讨论。

$I_{pk}(fail)$ vs t_{av} 数据被降低额定值以生成数据表图，可以将其视为功率 MOSFET 未钳位电感关断雪崩操作的 SOA (安全工作区) (见图 7)。如果应用 I_{pk} 和 t_{av} 工作点低于 I_{pk} vs t_{av} 曲线和曲线的初始 T_j ，则器件可以安全运行。从热管理角度来看，如果每个脉冲一开始的结温状态等于或低于规定的 $T_j(initial)$ 值，则可以对任意数量的雪崩脉冲执行此操作。然而，由于 HCI (热载流子注入) 机制，重复的雪崩脉冲可能会导致 MOSFET 参数偏移，具体取决于器件技术和操作条件。本应用笔记稍后将讨论“重复雪崩”。

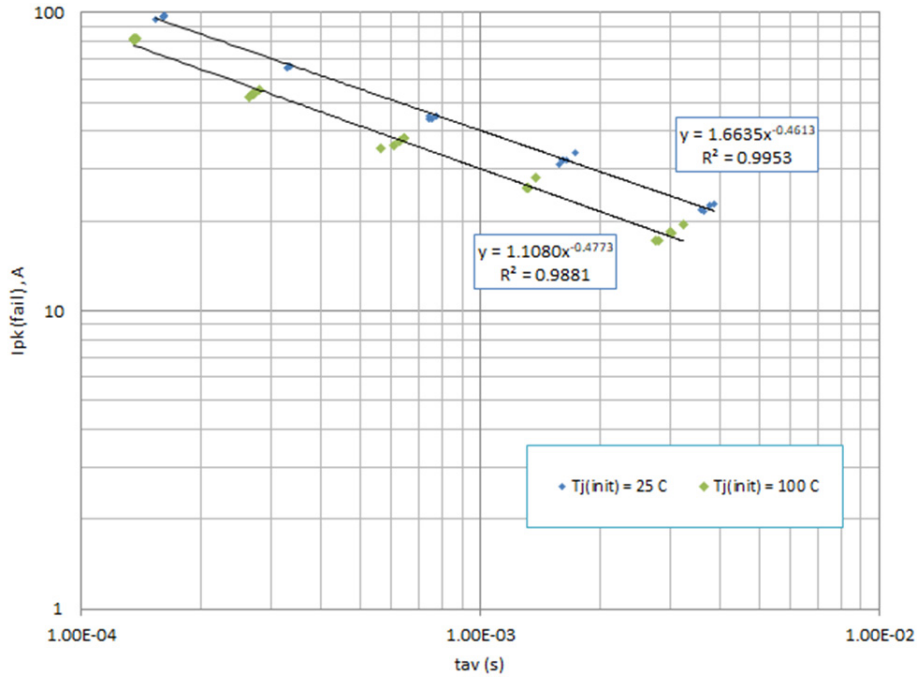


图 6. $I_{pk}(fail)$ 数据作为两个初始结温下雪崩时间的函数

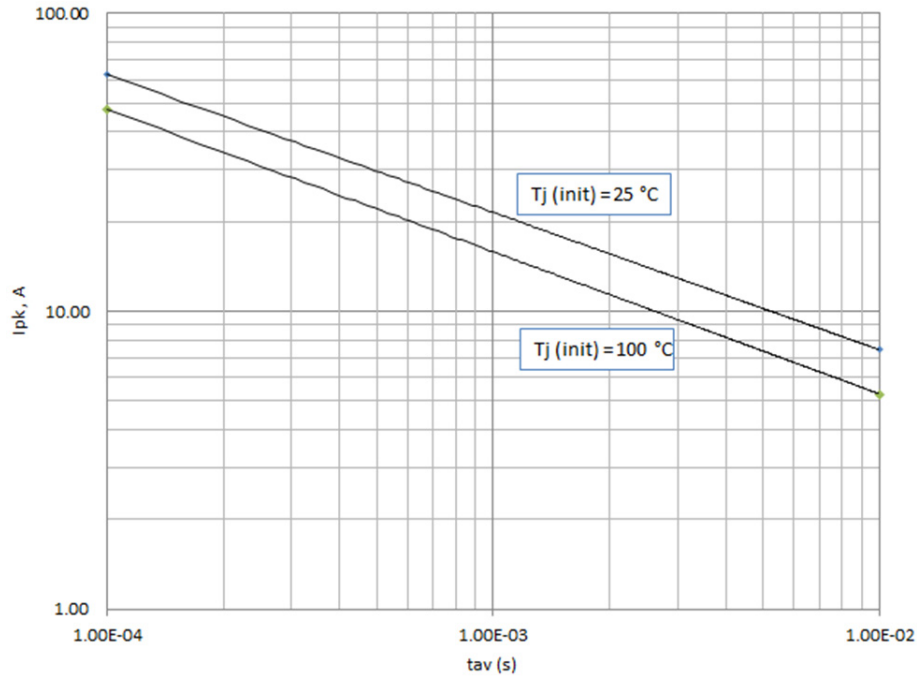


图 7. 图 6 的 $I_{pk}(fail)$ vs t_{av} 数据被降低额定值以形成数据表 I_{pk} vs t_{av} SOA 图

为了降低 $I_{pk}(fail)$ 数据的额定值， $I_{pk}(fail)$ 值降低到原始值的某个百分比 (X)，并且针对 $I_{pk}(fail)$ 测量中使用的电感值的新 I_{pk} 值进行调整。调整后的 t_{av} 由以下公式给出： $t_{av}(de-rated) = L * I_{pk}(fail) * X / V_{av}$ 。降低额定值的 I_{pk} 函数由 $I_{pk} = B * t_{av}^{-\alpha}$ 给出，其中新的降额系数 B 可通过以下方式计算： $B = A * X * (1/X)^{-\alpha}$ ，其中 X 是降额百分比。 X 值通常是保守的，业内通常为大约 50%–75% 之间。

除了 I_{pk} vs t_{av} 图之外，大多数功率 MOSFET 数据表还包含一个 UIS 能量额定值，通常列在最大值表中。这有点误导，因为很明显 ($E = 0.5 V_{av} * I_{pk} * t_{av}$) 功率 MOSFET 理论上可以具有无限大的能量额定值，如

果用无限小的电感器 (t_{av} 接近零) 和无限大的电感 (t_{av} 接近无穷大) 进行测量的话。功率 MOSFET 的 UIS 雪崩脉冲中消耗的能量随着 t_{av} 的增加而增加。(见图 x8)。对于某些给定的 $T_j(initial)$ 值，任何单个 UIS 雪崩额定值都可以作为位于 I_{pk} vs t_{av} SOA 曲线上的任何 I_{pk} 、 t_{av} 工作点。选择一个工作点而不是另一个工作点作为数据表“最大”额定值的一些原因包括：选择工作点作为在生产线末端测试时用于筛选器件的相同工作点，或者出于营销或客户目的以指示某些所需的能量水平。将一个器件的 UIS 能力与另一个器件进行比较时，关键点是比较相同 $T_j(initial)$ 温度下的 I_{pk} vs t_{av} 绘图数据，而不是比较单个 UIS 额定值。

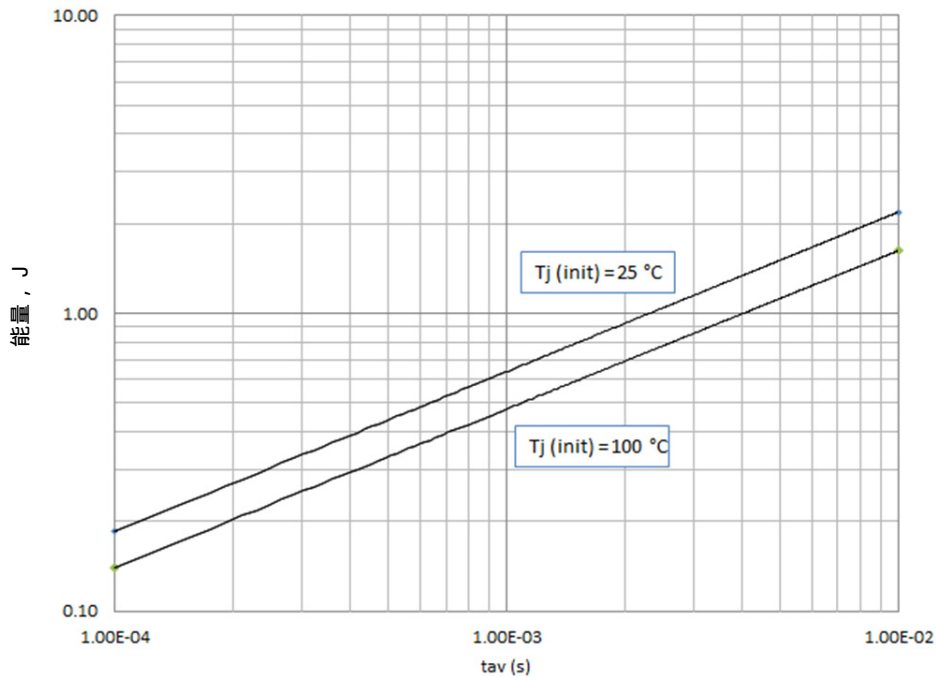


图 8. 图 7 中的数据转换为雪崩中随时间变化的能量的数据。UIS 能量随着 t_{av} 的增加而增加。

几个设计和相关的晶圆加工属性被用来影响功率 MOSFET UIS 能力。其中最主要的是源极金属触点的设计和/或处理 (稍后讨论), 但是讨论这些属性并不是理解任何功率 MOSFET 设计的主要目标的必要条件, 关于 UIS 功能, 关键是确保器件热失效。也就是说, 由于雪崩操作而在器件中耗散的能量仅受器件针对该特定功率函数的热能力的限制。具有相似 BV 特性 (即相同或相似的雪崩电压) 和相似热性能的 MOSFET 器件将具有相似的 UIS 能力。由于实际应用中典型的 UIS 雪崩时间 (并列在数据表图上) 通常小于一毫秒, 因此热流不会明显受到外部热边界条件的影响; 主要的热约束是 MOSFET 管芯的有源面积和厚度。因此, 在 MOSFET 技术和类似技术内, 作为 t_{av} 函数的 $I_{pk}(fail)$ 能力预计应该与管芯有源面积成比例。事实证明这是正确的, 见图 9。图 9 的 y 轴标记为 $J_{pk}(fail)$, 单位为 A/mm^2 , 这是单个 MOSFET 样品的 $I_{pk}(fail)$ 值除以器件有源面积得到的值。这使得可以

将来自不同 MOSFET 样品的 $I_{pk}(fail)$ vs t_{av} 数据包括在内, 这些样品具有不同的管芯有源面积 (在本例中为约 $1 mm^2$ 到 $13 mm^2$)。此外, 图 9 显示了三种截然不同的 60 V MOSFET 技术的数据, 每种技术都具有相似的雪崩电压特性。从该数据中可以清楚地看出, 这些具有相似雪崩电压特性的不同 MOSFET 技术表现出相同的 UIS 能力, 与管芯有源面积 (或更准确地说, 有源管芯体积) 成比例。图 10 显示了 $J_{pk}(fail)$ 数据作为雪崩时间的函数, 用于表示三个不同 BV 额定值的三组不同数据。图 10 说明, 与较高 BV 器件相比, 较低 BV 额定值 (较低 V_{av}) 器件在雪崩中的给定时间具有更高的 J_{pk} 能力。然而, 如果图 10 中的数据根据能量 (失效) 密度 (以 J/mm^2 为单位) 绘制, 则无论技术和 BV 额定值如何, 能量密度大致遵循相同的函数, 这进一步证明 MOSFET UIS 能力与管芯有源体积成比例 (见图 11)。

AND90158/D

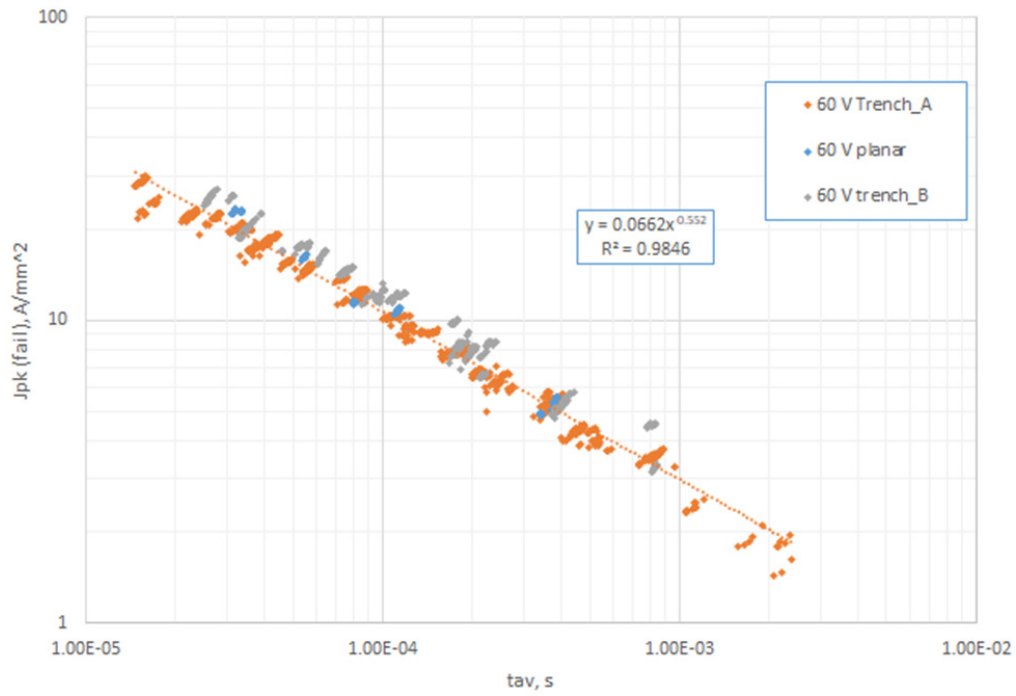


图 9. 三种不同额定 60 V MOSFET 技术的失效时峰值雪崩电流密度作为 t_{av} 数据的函数

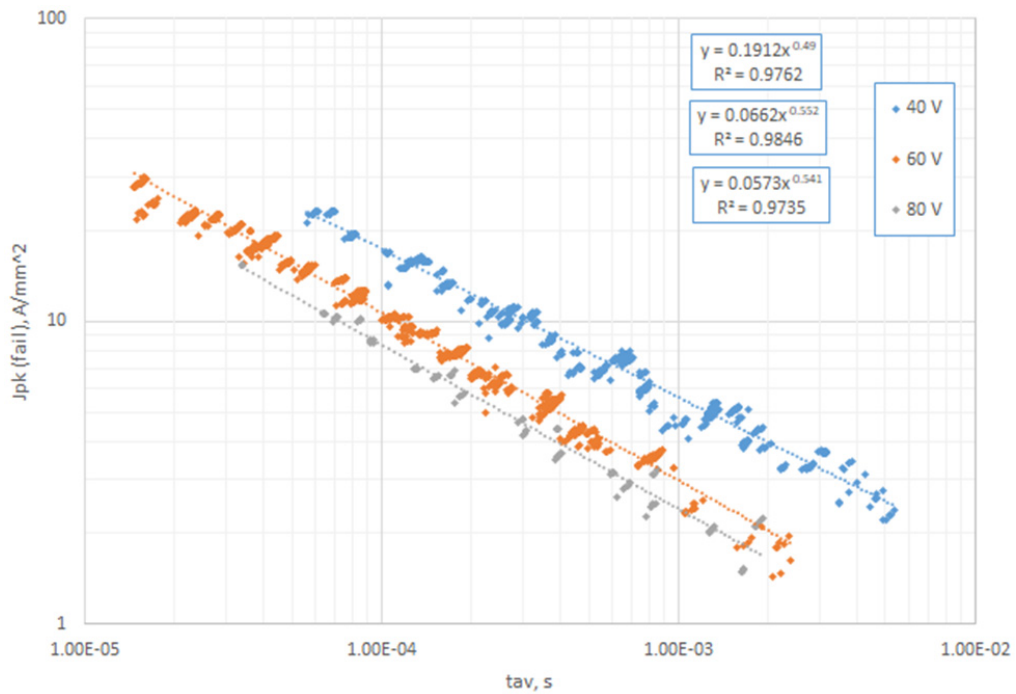


图 10. 三种不同 BV 额定值下多种 MOSFET 技术的失效时峰值雪崩电流密度与 t_{av} 数据的关系

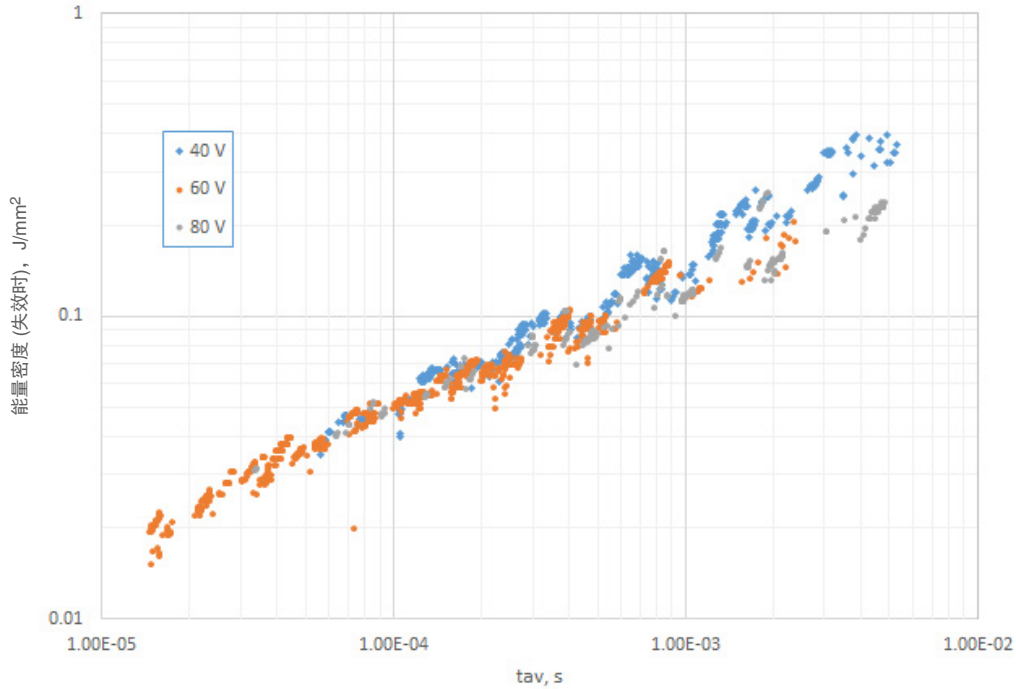


图 11. 失效时的能量密度与根据图 10 数据计算的 t_{av} 数据。
此能量密度函数对于任何额定值的 BV 产品都大致相同。

MOSFET UIS 能力在任何情况下仅受 MOSFET 器件热能力限制，但有一个例外。在较高的雪崩电流密度下，MOSFET 器件可能会在远低于热基 $J_{pk}(fail)$ 预期值的情况下发生失效。也就是说，数据表上的 I_{pk} vs t_{av} 图不能无限外推到更高的 I_{pk} 和更低的 t_{av} 值。其原因如图 13 所示。MOSFET 结构的 p 掺杂区、n 掺杂源极区和 n 掺杂漂移 (epi) 区形成一个 npn 晶体管。此 npn 晶体管的基极到发射极结由 p 掺杂区域和 n 掺杂源极区域形成，被前端金属短接。因此，源极金属触点是 MOSFET UIS 能力的关键设计和工艺参数。如果 npn 被激活，因为基极到发射极是正向偏置的，大量的雪崩电流将聚集在缺陷位置，导致器件快速失效。

关键是要认识到 p 掺杂区域具有一定的电阻水平，因此在某些雪崩电流密度下，p-n 结将正向偏置，从而激活 npn 晶体管。图 13 显示了与较长雪崩时间相比，较低雪崩时间的 $J_{pk}(fail)$ 数据，其中器件 J_{pk} 的失效显然是与固有的热性能有关。因此，任何功率 MOSFET 都必须对峰值雪崩电流有一个最大限制。即使数据表没有列出或显示最大 UIS I_{pk} 值也是如此。在应用设计中，如果需要从非常高幅值的短路电流中断开，雪崩过程中的最大 I_{pk} 限制可能会成为一个问题。由于 PCB 或电源线布线中的小杂散电感，即使雪崩能量远低于固有热失效所需的能量，MOSFET 也可能在关断时发生雪崩失效。

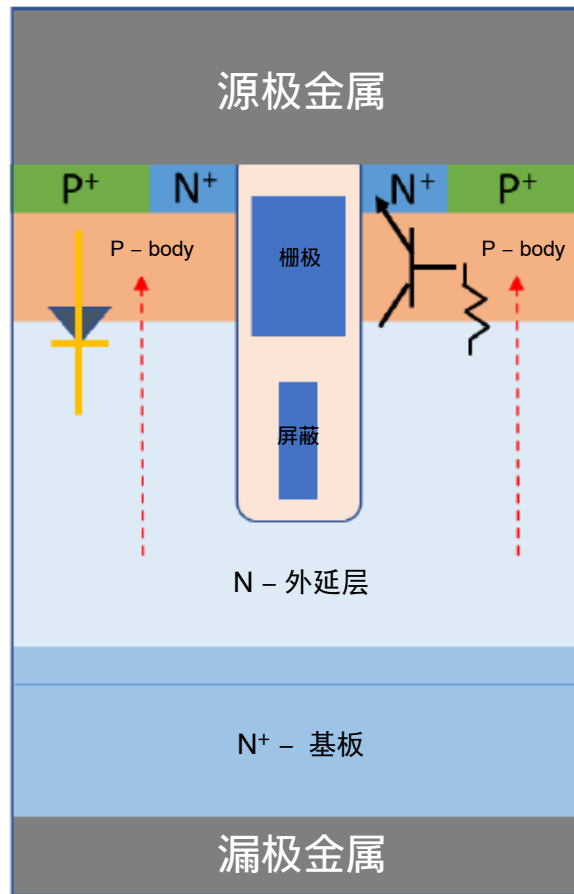


图 12. 显示内部 npn BJT 结构的屏蔽栅极 MOSFET 结构的简化横截面图。虚线箭头代表雪崩电流。

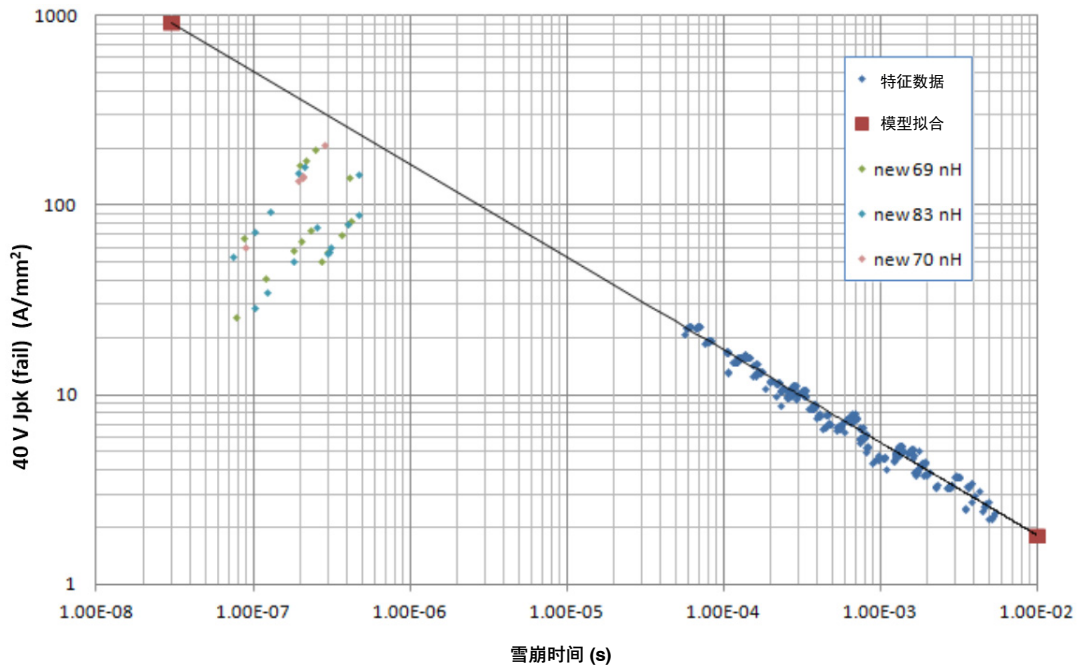


图 13. 额定电压为 40 V 的产品的峰值雪崩电流密度与 t_{av} 的关系，显示了在低雪崩时间和高峰值电流密度下的非热失效

功率 MOSFET 可以在雪崩中重复运行，前提是每次雪崩事件都在安全工作限制范围 (I_{pk} 、 t_{av} 、 $T_j(\text{initial})$) 内。也就是说，基于沟槽的 MOSFET 技术 (目前在业内占主导地位) 由于类似于热载流子注入的效应而导致重复的雪崩操作，可能会表现出直流参数偏移。图 14 说明了这一点：在雪崩期间，处于高电场下的漂移 (n-epi) 区域可能存在高电流密度 (漂移或台面区域完全耗尽)。在沟槽结构中，栅极和屏蔽氧化物与高电流雪崩电流相邻，高电场可以将电荷载流子撞击到栅极和屏蔽氧化物中，具体取决于操作条件。平面技术结构在雪崩操作期间并非如此。通常，平面 MOSFET 结构不受重复雪崩 HCI 效应的影响。

受重复雪崩 HCI 效应影响的 MOSFET 直流参数包括 BV_{dss} (雪崩电压)、 I_{dss} (断态漏极-源极漏电流)、 V_{th} (栅极-源极阈值电压) 和 $R_{ds(on)}$ (通态漏极-源极阻抗)。 I_{gss} (断态栅极-源极漏电流) 不受重复雪崩操

作的影响。通常， BV_{dss} 参数偏移会发生并在最初的几百到几千个重复雪崩循环中稳定下来，但增量幅度通常小于 $\pm 3\text{ V}$ ，这在大多数情况下不会出现应用问题。在数百万至数亿次重复雪崩循环后， I_{dss} 会显著增加 (从纳安范围到个位微安范围)。通道中的迁移率会受到重复雪崩 HCI 效应的影响，导致 $R_{ds(on)}$ 增加，同时 V_{th} 降低，同样是在超过数百万到数亿个重复雪崩循环后出现。这些参数是否显著变化以及变化幅度取决于重复雪崩操作条件 (平均和峰值结温、结温变化、雪崩电流密度、雪崩时间和雪崩循环次数)。通常，这些参数偏移不会导致物理器件失效，但显然特定类型、幅度和方向的参数偏移可能会导致最终应用问题。图 15 显示了在重复雪崩条件下运行的沟槽 MOSFET 技术器件的参数偏移数据 (相较于初始测量结果的变化量) 示例。

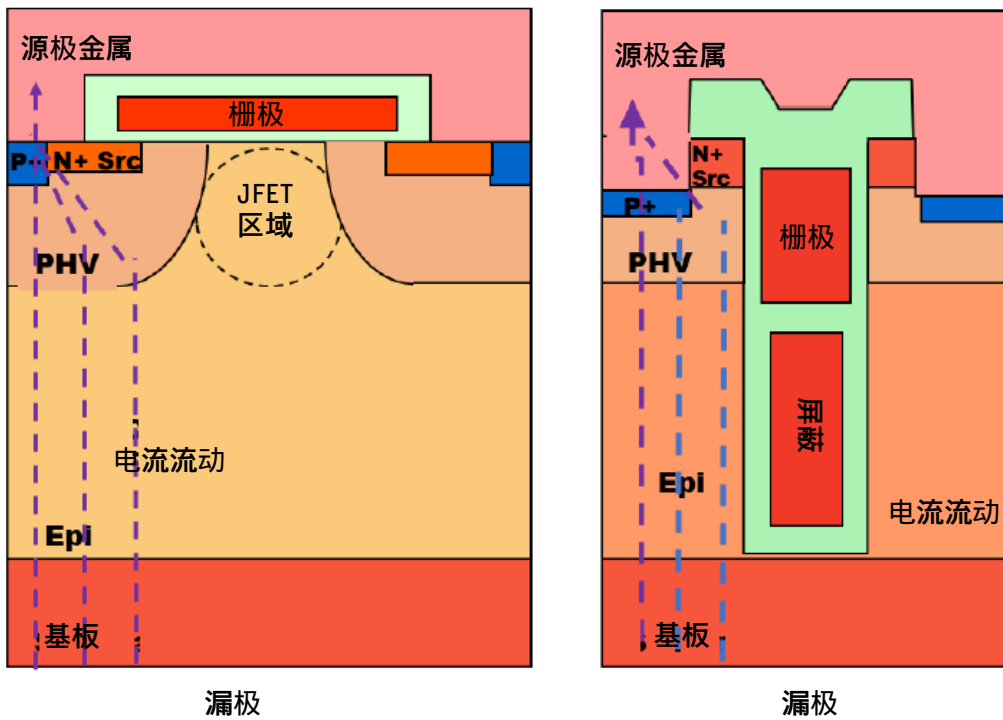


图 14. 平面 MOSFET 结构 (左) 和屏蔽栅极 MOSFET 结构 (右) 的简化横截面图。虚线代表雪崩电流。

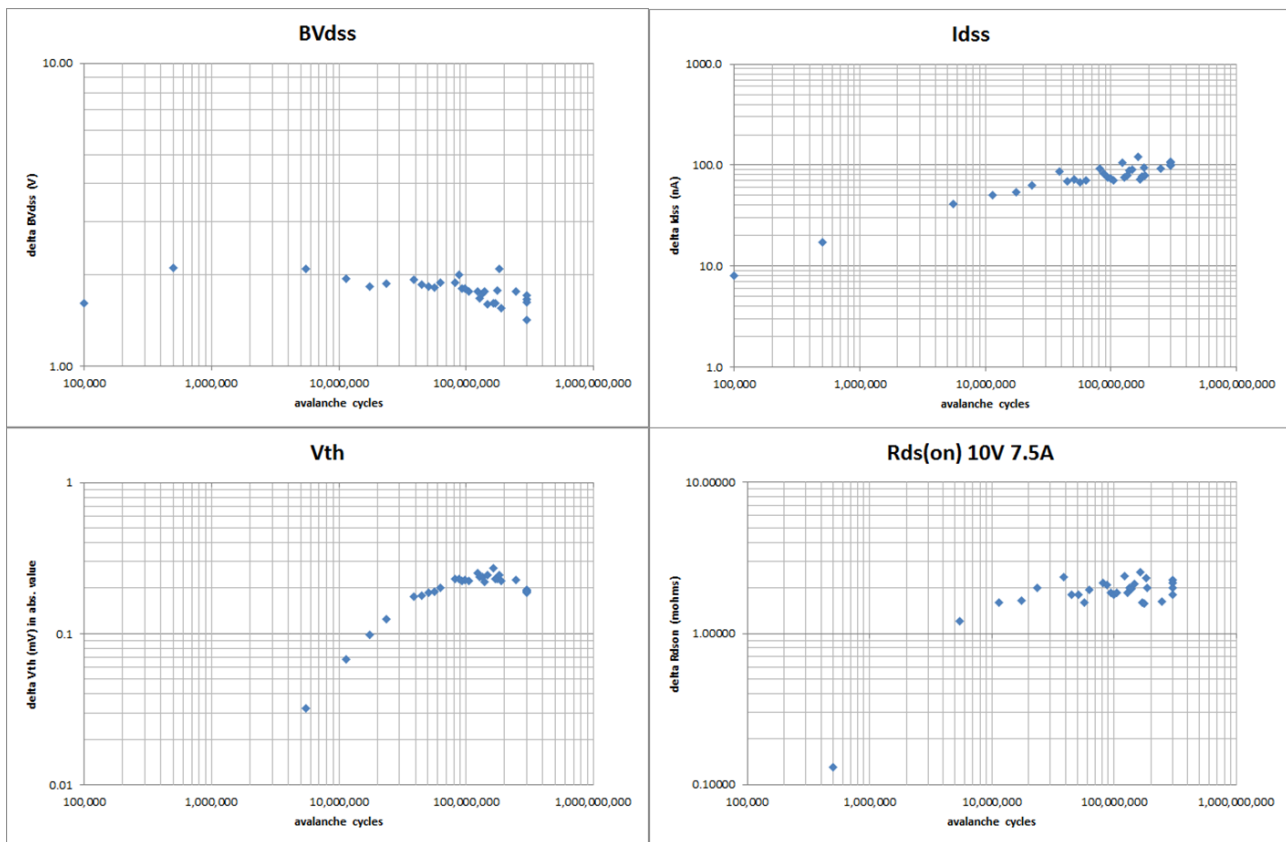


图 15. 沟槽型 MOSFET 中直流参数偏移作为重复雪崩循环数据的函数

关于功率 MOSFET 雪崩操作的关键点是，没有明确的方法来明确功率 MOSFET 重复雪崩能力的额定值。数据表上的任何重复雪崩额定值都应基于操作条件假设，并定义确定功能能力限制的方法（例如，达到某些直流参数百分比变化所需的循环次数）。作为一般设计规则，应避免重复雪崩操作，这是首选的电路设计操作。当然，这不可能总是被实践；正如本应用笔记前面提到的，现实世界中需要 MOSFET 按照设计发生重复雪崩的应用。在这些情况下，为确定 MOSFET 对重复雪崩操作的适用性，最好使用应用操作条件根据实证分析进行评估。

UIS (UIL) 是 MOSFET 雪崩操作的一种具体形式，由未钳位电感负载的关断引起。功率 MOSFET 的设计和制造使 UIS 雪崩操作仅受器件热能力或最大峰值雪崩电流密度的限制。I_{pk} 与 t_{av} SOA 的函数关系图是展示功率 MOSFET UIS 能力的最佳方式。除非已知并理解测试操作条件 (I_{pk}、V_{av}、L、t_{av} 和 T_{j(initial)})，否则不应在器件之间比较单个 UIS 能量额定值。具有相同或相似雪崩电压功能和相同或相似热能力的器件将具有相同的 UIS 失效能力，但 I_{pk} vs t_{av} SOA 图的降额因子可能因使用的行业而异。安全的重复雪崩操作是有可能实现的，但根据操作条件可能会发生 DC 参数偏移。

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.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:

Email Requests to: orderlit@onsemi.com

onsemi Website: www.onsemi.com

TECHNICAL SUPPORT

North American Technical Support:

Voice Mail: 1 800-282-9855 Toll Free USA/Canada

Phone: 011 421 33 790 2910

Europe, Middle East and Africa Technical Support:

Phone: 00421 33 790 2910

For additional information, please contact your local Sales Representative