

2.2 功率 MOSFET 模块 [264]、[265]

2.2.1 最大定额

MOSFET / 模块

漏源电压 V_{DS}

MOSFET 芯片中，漏源极间的最大允许电压。此时，栅源回路为开路或有接入电阻。

参数：壳温 $T_{\text{case}} = 25^{\circ}\text{C}$

漏栅电压 V_{DGR}

漏栅极间的最大允许电压。

参数：栅源极之间的外接电阻 R_{GS} 、壳温 $T_{\text{case}} = 25^{\circ}\text{C}$

漏极连续直流电流 I_D

漏极端子的最大允许直流电流。

参数：壳温，例如 $T_{\text{case}} = 25^{\circ}\text{C}$ 、 80°C ； $I_D@25^{\circ}\text{C}$ 、 $I_D@80^{\circ}\text{C}$

可重复的漏极电流峰值 I_{DM} 或漏极脉冲电流 $I_{D\text{puls}}$

在脉冲运行状态下漏极端子的最大允许峰值电流。

参数：脉宽 t_p 、壳温（例如 $T_{\text{case}} = 25^{\circ}\text{C}$ 、 80°C ）、脉冲占空比（见图“安全工作区”）

单脉冲时擎住能耗 E_{AS}

在非箝位的电感负载条件下关断时，单个芯片漏源之间最大允许的擎住能耗（单脉冲负载）。

参数：关断瞬间的漏极电流 i_D 、漏源工作电压 V_{DD} 、栅源外接电阻 R_{GS} 、负载电感 L 、芯片温度（例如 $T_j = 25^{\circ}\text{C}$ ）

栅源电压 V_{GSS} 或 V_{GS}

栅源极间的最大允许电压。

参数：壳温 $T_{\text{case}} = 25^{\circ}\text{C}$

最大耗散功率 P_{tot} 或 P_D

单个晶体管 / 二极管或整个模块的最大允许损耗功率。

$$P_{\text{tot}} = (T_{j\text{max}} - T_{\text{case}}) / R_{\text{thjc}}$$

参数：壳温 $T_{\text{case}} = 25^{\circ}\text{C}$

运行温度范围 T_{ij} 或 T_j 、 $T_{j(min)}$ - $T_{j(max)}$

允许模块持续运行的芯片温度范围。

储藏温度范围 T_{stg} 、 $T_{stg(min)}$ - $T_{stg(max)}$

在该温度范围内，元件在无电气连接的情况下允许被储藏或运输。

绝缘测试电压 V_{isol} 或 V_{is}

当所有的输入端子和控制端子短接时（所有端子相互连接），该端与模块底板之间最大测试电压的有效值

参数：测试时间（1分钟、1秒），若有要求的话，还需要记录测试电压的上升速度

根据 IEC146-1-1(1991)、EN60146-1-1(1993) 的第 4.2.1 节（同 VDE0558 第 1-1 卷(1993-04)）以及 DIN VDE 0160 (1988-05) 的第 7.6 节（同 EN50178(1994) / E VDE 0160(1994-11)），测试电压只能逐步上升至最大值。

湿度等级

表示了由 DIN 40040 所规定的环境参数（大气湿度）

气候等级

表示了由 DIN IEC 68-1 所规定的环境参数（气候）

反向二极管 / 续流二极管**通态电流 I_F**

反向或续流二极管通态直流电流的最大允许值

参数：壳温，例如 $T_{case} = 25^\circ\text{C}$ 、 80°C

正向电流峰值 I_{FM} 或正向脉冲电流 I_{Fpuls}

在脉冲运行状态下的正向电流的最大值

参数：脉宽 t_p 、壳温，例如， $T_{case} = 25^\circ\text{C}$ 、 80°C

2.2.2 特性参数**MOSFET / 模块****漏源击穿电压 $V_{(BR)DSS}$**

栅源短路 ($V_{GS} = 0$) 时，漏源极间的击穿电压。

参数：漏极反向漏电流 I_D 、壳温 $T_{case} = 25^\circ\text{C}$

栅源开启电压 $V_{GS(th)}$

当栅源电压大于该值时，漏极有相当的电流通过。

参数：漏源电压 $V_{DS} = V_{GS}$ 、漏极电流 I_D 、壳温 $T_{case} = 25^\circ\text{C}$

零栅压漏极电流 I_{DSS}

当栅源电压为零 ($V_{GS} = 0$) 以及漏源电压为最大定额 $V_{DS} = V_{DSS}$ 时, 漏源间的截止电流。

参数: 结温, 例如 $T_j = 25^\circ\text{C}$ 、 125°C

栅源间漏电流 I_{GSS}

当漏源电压为零 ($V_{DS} = 0$) 以及栅源电压为最大定额 V_{GS} 时, 栅源间的漏电流。

参数: 栅源电压 V_{GS} 、壳温 $T_{\text{case}} = 25^\circ\text{C}$

漏源间通态电阻 $R_{DS(on)}$

在确定的栅源电压 V_{GS} 和漏极电流 I_D (额定值) 下, 一个完全由栅极控制的 MOSFET 的通态电阻为漏源电压 V_{DS} 的增量与漏极电流 I_D 的增量之比。

在这一导通状态下, V_{DS} 与 I_D 成比例关系。大信号的通态电压特性适用于

$$V_{DS(on)} = R_{DS(on)} * I_D$$

参数: 栅源电压 V_{GS} 、漏极电流 I_D (额定值)、壳温 $T_{\text{case}} = 25^\circ\text{C}$ ($R_{DS(on)}$ 对温度的依赖性很大)

正向转移电导 (跨导) g_f

在给定漏极电流 I_D (额定值) 时, 漏极电流的增量与栅源电压的增量之比。

参数: 漏源电压 V_{DS} 、漏极电流 I_D (额定值)、壳温 $T_{\text{case}} = 25^\circ\text{C}$

芯片与管壳间的电容 C_{CHC}

器件的某个子单元与外壳底板或散热器之间的电容。

参数: 壳温 $T_{\text{case}} = 25^\circ\text{C}$

输入电容 C_{iss}

在漏源回路对交流短路以及栅源电压为零 ($V_{GS} = 0$) 时, 栅源极间的电容。

参数: 漏源电压 V_{DS} 、测量频率 f 、壳温 $T_{\text{case}} = 25^\circ\text{C}$

输出电容 C_{oss}

当栅源短路 ($V_{GS} = 0$) 时, 漏源极间的电容。

参数: 漏源电压 V_{DS} 、测量频率 f 、壳温 $T_{\text{case}} = 25^\circ\text{C}$

反馈电容 (米勒电容) C_{rss} , C_{mi}

当漏源回路对交流短路以及栅源电压为零 ($V_{GS} = 0$) 时, 漏栅极间的电容。测量时源极应该与测量电桥的屏蔽端相连接。

参数: 漏源电压 V_{DS} 、测量频率 f 、壳温 $T_{\text{case}} = 25^\circ\text{C}$

漏源寄生电感 L_{DS}

漏源极间的电感。

开关时间

对于 MOSFET 来说,在参数表中所给出的开关时间是在电阻负载下由图 2.1a 所示的测量线路所测得。它和开关时的栅源电压曲线相关连,见图 2.1b。

开关时间和实际电流以及电压的特性曲线由器件内部的、以及栅源回路的电容、电感和电阻所决定。因此,参数表中的参数值及其特性曲线只能作为大致的参考。

既然纯电阻负载条件下测得的电流和电压特性曲线并不适用于大多数的应用情形,它的实际意义仅限于定义开关时间。

尤其是当负载为感性或容性时,特性曲线的走势有着明显的不同(1.2.3 节)。此时,测量结果也有所不同。

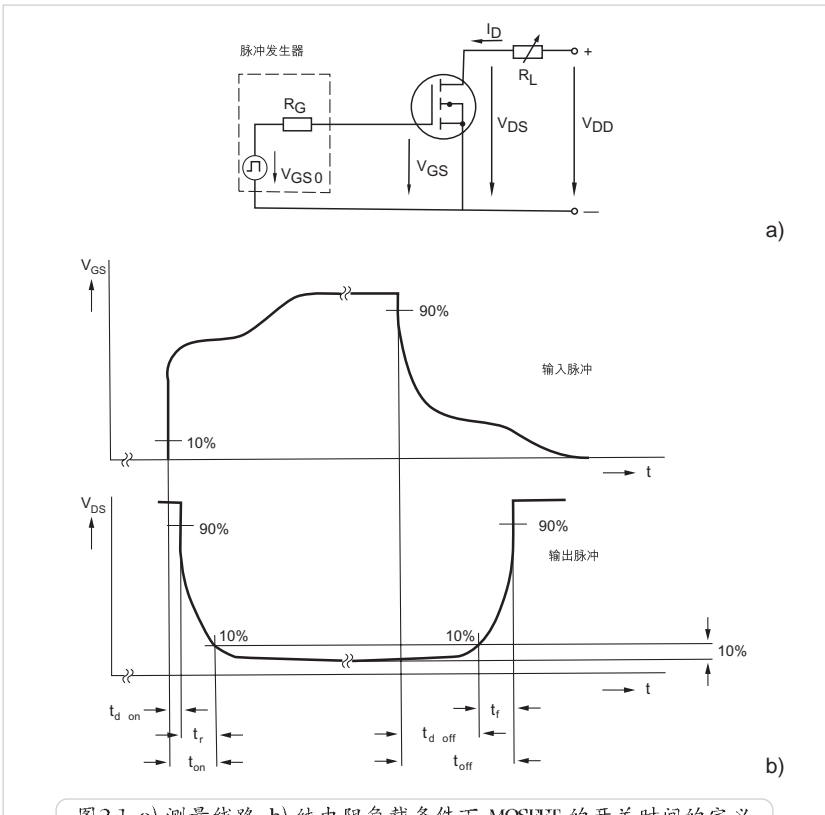


图2.1 a) 测量线路 b) 纯电阻负载条件下 MOSFET 的开关时间的定义

下列参数和开关时间的定义有关：

测量线路、漏源工作电压 V_{DD} 、栅源驱动电压 V_{GS} 、漏极电流 I_D 、栅极串联电阻 R_G (驱动回路的内阻)、在某些情况下还给出栅源间的电阻 R_{GS} 、壳温 $T_{case} = 25^\circ\text{C}$ 。

开通延迟时间 $t_{d(on)}$

在栅源极间突然加上一个阶跃式的正向驱动电压 V_{GG} 后，栅源电压 V_{GS} 开始上升。该上升过程的时间常数由输入电容和栅极驱动回路的电阻所决定。一旦栅源电压达到开启电压 $V_{GS(th)}$ 时，则漏源电压 V_{DS} 开始下降，同时漏极电流 I_D 开始上升。

从栅源电压 V_{GS} 到达其最终值的 10% 开始，到漏源电压 V_{DS} 降落至其初始值 (V_{DD}) 的 90% 为止，这一段时间被定义为开通延迟时间 $t_{d(on)}$ 。

上升时间 t_r

上升时间 t_r 紧接在开通延迟时间之后。在这一时间内，漏源电压从其初始值 (V_{DD}) 的 90% 降落至 10%。因为在这一时间内漏极电流也同时上升 (上升时间即由此而来)，所以开通损耗的主要部分在此期间产生。

开通延迟时间 $t_{d(on)}$ 与上升时间 t_r 之和被称为开通时间 t_{on} 。

因为在 t_{on} 结束时漏源电压 V_{DS} 还没有达到其通态压降值 $V_{DS(on)} = R_{DS(on)} * I_D$ ，而只是达到 V_{DD} 的 10%，所以在 t_{on} 结束之后，器件的损耗仍然大于通态损耗。

关断延迟时间 $t_{d(off)}$

当栅源极间的正向驱动电压 V_{GG} 被突然撤消后，栅源电压 V_{GS} 开始下降，下降过程的时间常数由 MOSFET 的输入电容和栅极驱动回路的电阻 R_{GS} 所决定。因为漏极电流在线性放大区内通过转移电导 $g_{fs} = di_D/dV_{GS}$ 与栅极电压相耦合，所以它也开始下降，同时漏源电压相应上升。

从栅源电压 V_{GS} 降落至其初始值 (V_{GG}) 的 90% 开始，到漏源电压上升至漏源工作电压 V_{DD} 的 10% 为止，这一段时间被定义为关断延迟时间 $t_{d(off)}$ 。

下降时间 t_f

下降时间紧接在关断延迟时间之后。在这一时间内，漏源电压从漏源工作电压的 10% 上升至 90%。因为在这一时间内漏极电流也同时下降 (下降时间即由此而来)，所以关断损耗的主要部分在此期间产生。

关断延迟时间 $t_{d(off)}$ 与下降时间之和被称为关断时间 t_{off} 。

因为在 t_{off} 之末尾，漏极电流 I_D 还未达到其截止漏电流值，而只是到达其通态电流值的 10%，所以在 t_{off} 结束之后，器件的损耗仍然大于截止损耗。

MOSFET 开关的芯片热阻 R_{thjc}

芯片热阻 R_{thjc} 描述了 MOSFET 芯片 (下标 j) 和模块底板 (下标 c) 之间的传热界面。它表征了模块 (通常由多个芯片并联而成) 内部 MOSFET 单元的静态散热能力。它和芯片的大小以及模块的封装形式有关。

在耗散功率一定时, 芯片和外壳底板之间的温差可由下式得出:

$$\Delta T_{jc} = T_j - T_{case} = P * R_{thjc}$$

MOSFET 模块的接触热阻 R_{thch}

接触热阻 R_{thch} 描述了模块底板 (下标 c) 和散热器 (下标 h) 之间的传热界面。它表征了一个 MOSFET 模块 (可能由数个 MOSFET 开关所组成) 的静态散热能力。它的大小取决于模块的尺寸、散热器和模块底板的表面状况、模块与散热器之间的导热层 (导热脂、导热薄膜、压印) 的厚度和性能、以及紧固螺栓的上紧力矩。

在耗散功率一定时, 外壳底板和散热器之间的温差可由下式得出:

$$\Delta T_{ch} = T_{case} - T_h = P_n * R_{thch}$$

如果模块不含底板 (例如 SEMITOP、SKiiPPACK、MiniSKiiP), 则 R_{thjc} 和 R_{thch} 便无法分开测量。因此对于这一类模块来说, 可以用模块每个 MOSFET 单元的 R_{thjh} 来代替。温差的计算可参考上述公式。

机械参数

除了封装形式以外, 在参数表中通常还给出了下列机械参数:

紧固螺栓的上紧力矩 M_1 (最小值和最大值), 单位为 Nm 或 lb.in.;

主回路端子的上紧力矩 M_2 (最小值和最大值), 单位为 Nm 或 lb.in.;

模块的重量 w , 单位为 g;

允许的振动加速度 a , 单位为 $m*s^{-2}$ 。

续流二极管 / 反向二极管

反向二极管的通态电压 (反向的源漏电压) V_{SD} , V_F

当栅源回路短路 ($V_{GS} = 0$) 时, 源漏极间的反向电压降。 V_{SD} 描述了 MOSFET 寄生的反向二极管或与 MOSFET 反向并联的混合续流二极管的通态特性。

参数: 通态电流 I_F 、壳温 $T_{case} = 25^\circ C$

反向二极管的开启电压 $V_{(TO)}$ 、反向二极管的等效电阻 r_r

二极管的导通特性可以简单地用两个特征量, 即开启电压和等效电阻, 来近似地描述。开启电压表达了特性曲线与电压轴的交点, 而等效电阻则表达了特性曲线的上升斜率。

反向二极管的反向恢复时间 t_{rr}

在续流工作状态下, 即在高的 di_F/dt 和高的截止电压 $V_R = V_{DD}$ 条件下, 漏

极电流 $-I_D = I_F$ 进行换流时, MOSFET 的寄生或混合反向二极管的反向恢复时间。

注意: t_{rr} 对温度的依赖性极大 (从 25°C 到 150°C 时约增加一倍)。

参数: 通态电流 I_F 、反向电压 V_R 、换流速率 $-di_F/dt$ 、芯片温度 $T_j = 25^\circ\text{C}$ 、 150°C 。

反向二极管的反向恢复电荷 Q_{rr}

在续流工作状态下, 即在高的 di_F/dt 和高的截止电压 $V_R = V_{DD}$ 条件下, 漏极电流 $-I_D = I_F$ 进行换流时, MOSFET 的寄生或混合反向二极管的反向恢复电荷。

注意: Q_{rr} 对温度的依赖性极大 (从 25°C 到 150°C 时约增加一倍)。

参数: 通态电流 I_F 、反向电压 V_R 、换流速率 $-di_F/dt$ 、芯片温度 $T_j = 25^\circ\text{C}$ 、 150°C 。

2.2.3 特性曲线图

在这一节里, 我们将按照参数表的顺序, 介绍在 MOSFET 模块参数表中所包含的特线曲线的一些要点。如果其中某些图在另外的章节中会被更详细地涉及, 则我们在此节中将只给出一个索引。

MOSFET 模块的最大允许耗散功率 P_D 与壳温 T_{case} 的关系

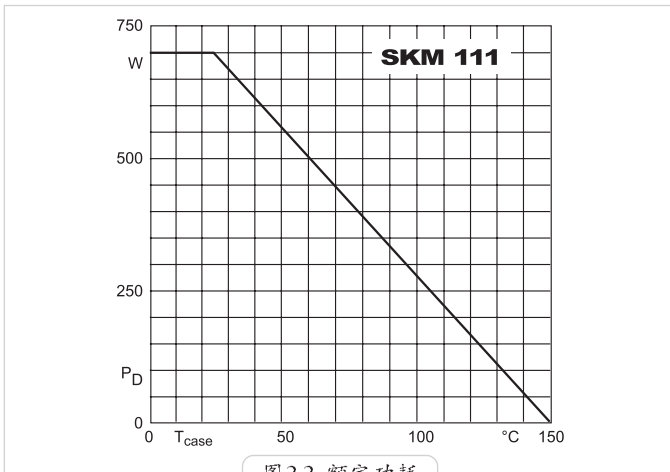


图 2.2 额定功耗

以 $T_{case} = 25^\circ\text{C}$ 时所给定的临界值为起点, 该曲线描述了 MOSFET 的最大允许功耗

$$P_{D(25^\circ\text{C})} = (T_{jmax} - 25^\circ\text{C}) / R_{thjc}$$

随壳温的增加而降额的关系。

脉冲工作状态下的最大安全工作区域 (SOA)

如 1.2.3 节所提到的, 在硬开关工作状态下, MOSFET 需要提供一个准正方形的安全工作区域。

SOA (安全工作区域) 的曲线描述了各种临界的、不导致模块损坏的运行状态。

SOA 的边界曲线为:

1. 最大允许的漏极电流 (水平边界);
2. 最大允许的漏源电压 (垂直边界);
3. 最大允许功耗或最高允许的芯片温度 (图 2.3 中的虚对角线);
4. 开通电阻 (实对角线)。

针对不同的脉冲宽度, 图 2.3 以双对数图的形式显示了 MOSFET 在开关和通态工作状态下的安全工作图 $I_D = f(V_{DS})$ 。

这里必须指出的是, 图中的临界值只适用于单脉冲和壳温 $T_c = 25^\circ\text{C}$ 时。在这一单脉冲的作用下, MOSFET 的芯片温度将不会超过最高允许值 $T_j = 150^\circ\text{C}$ 。

安全工作区域图中最下面的一条对角线代表了最大允许的静态功耗 P_{tot} 。尽管如此, MOSFET 模块只允许在开关期间经过线性放大区。因为由芯片之间的制造偏差而引起的不对称和开启电压的负温度系数可能会引起系统发热的失衡, 所以不允许长时间运行在放大区域。

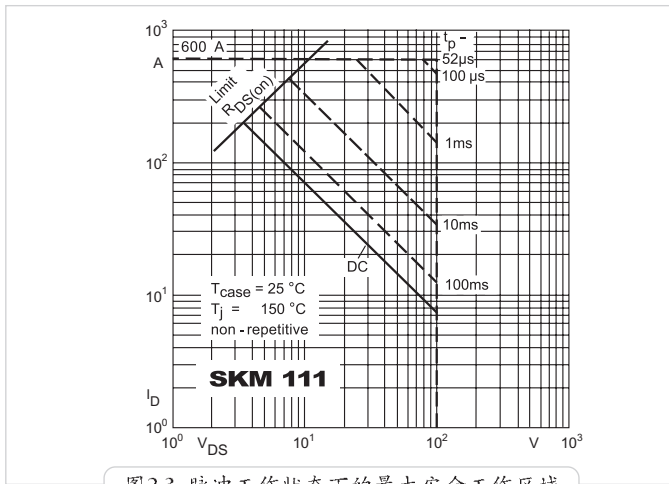


图 2.3 脉冲工作状态下的最大安全工作区域

正向输出特性 $I_D = f(V_{DS})$

以 V_{GS} 为参数, 图 2.4 显示了 MOSFET 的输出特性曲线 (典型值), 参阅 1.2.2.1 节。

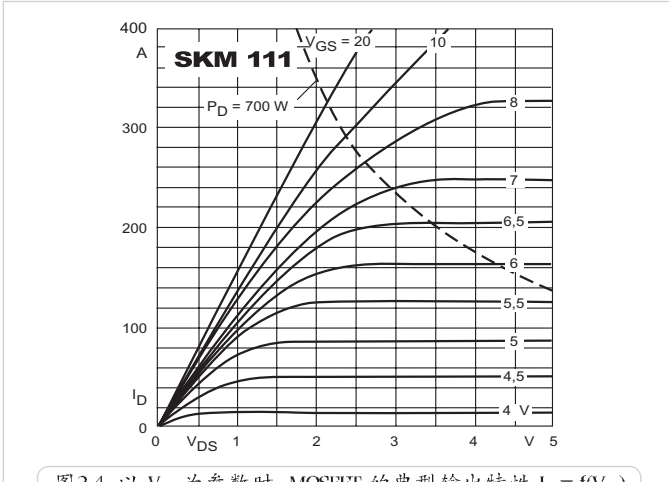


图2.4 以 V_{GS} 为参数时, MOSFET 的典型输出特性 $I_D = f(V_{DS})$

转移特性 $I_D = f(V_{GS})$

转移特性 (图2.5) 描述了MOSFET 在主动区域 (线性工作区域) 内, 且 $V_{DS} = 25V$ 时的特性。此时, 漏极电流通过

$$I_D = g_{fs} * (V_{GS} - V_{GS(th)})$$

与栅源电压相耦合。

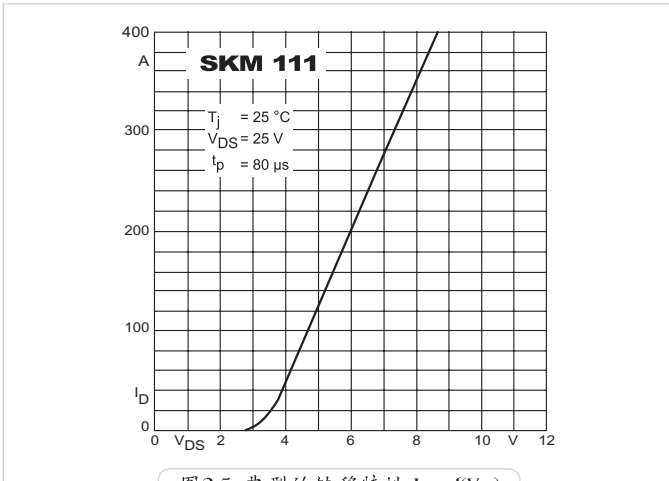


图2.5 典型的转移特性 $I_D = f(V_{GS})$

通态电阻与芯片温度的关系

见 2.6 节

漏极电流的降额与壳温的关系

见 2.6 节

漏源击穿电压与温度的关系

如图 2.6 所示, MOSFET 的漏源击穿电压 $V_{(BR)DSS}$ 随温度的增加而线性增长。由于在参数表中给出的临界值为 $T_j = 25^\circ\text{C}$ 时的值, 所以在芯片温度低于 25°C 时 MOSFET 必须降额使用。

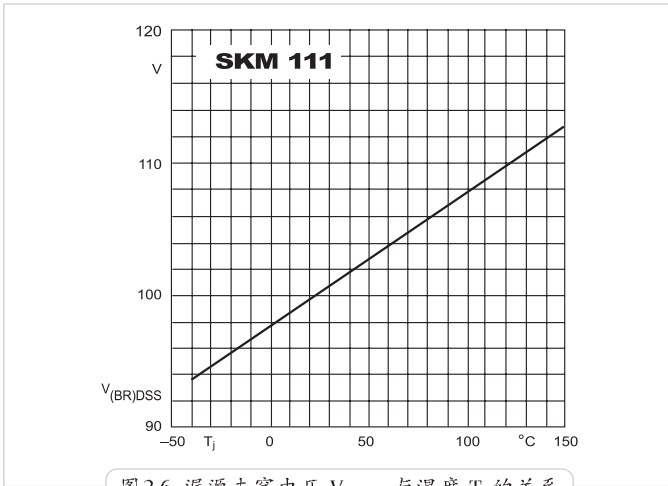


图 2.6 漏源击穿电压 $V_{(BR)DSS}$ 与温度 T_j 的关系

漏源电压的降额与漏极电流换流速率的关系

见 3.3.1 节

寄生电容与漏源电压的关系

见 1.2.3 节

栅极电荷的特性曲线

见 1.2.3 节

反向二极管的通态特性曲线

见 1.2.1 节

通态电阻与漏极电流的关系

图 2.7 显示了一个完全打开了的 MOSFET 的通态电阻 $R_{DS(on)}$ 与漏极电流 I_D 以及栅源电压 V_{GS} 的关系。

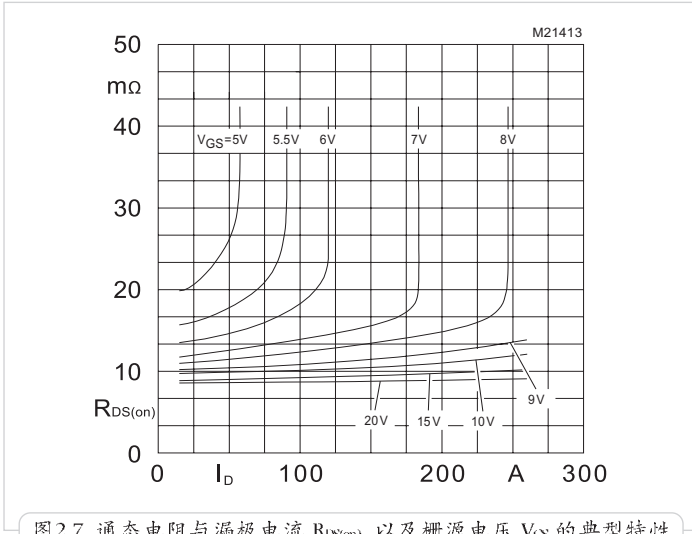


图2.7 通态电阻与漏极电流 $R_{DS(on)}$ 以及栅源电压 V_{GS} 的典型特性

通态电阻随栅源电压的增加而降低。另外，在整条曲线上需要注意 $R_{DS(on)}$ 随漏极电流的增加而略有增加。

栅源开启电压与温度的关系

图 2.8 包含了 MOSFET 的栅源开启电压 $V_{GS(th)}$ 与芯片温度 T_j 之间的三条曲线，分别为典型值及其上下边界曲线。

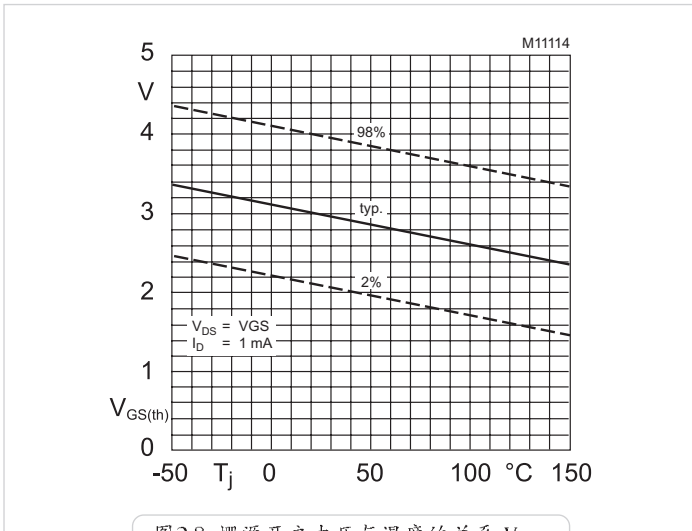


图2.8 栅源开启电压与温度的关系 $V_{GS(th)}$

当 T_j 增加时, $V_{GS(th)}$ 线性下降。在温度为 -50 度到 +150 度范围内, 开启电压的温度系数约为 -10 mV/K。

MOSFET 和反向二极管的动态热抗

见 3.2 节