

1.2.2.1 功率MOSFET

由上述的原理可以导出如图 1.8a 所示的功率 MOSFET 的输出特性。

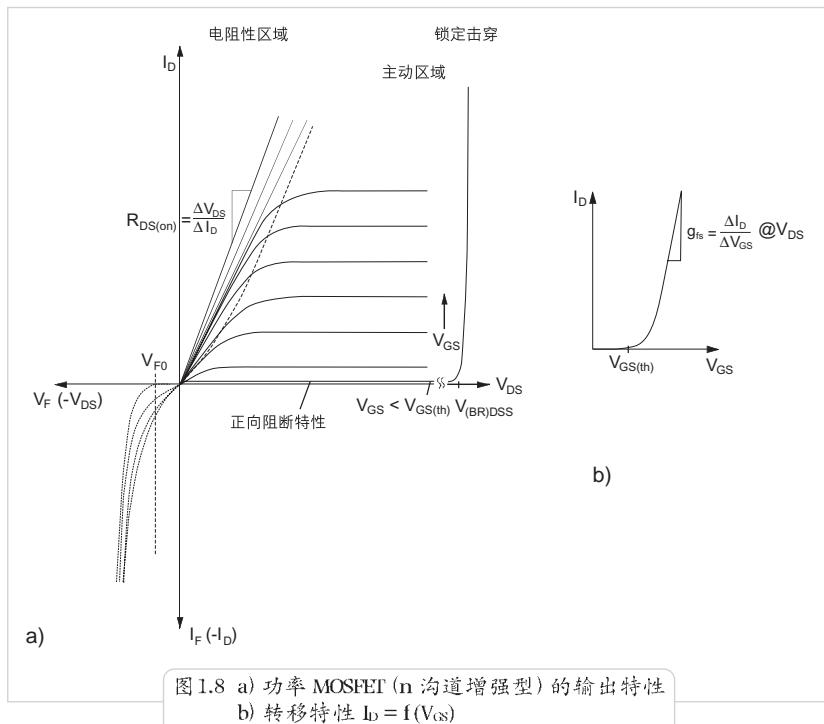


图 1.8 a) 功率 MOSFET (n 沟道增强型) 的输出特性
 b) 转移特性 $I_D = f(V_{GS})$

正向截止状态

当外加一个正的漏源电压 V_{DS} 时, 若栅源电压 V_{GS} 小于栅源开启电压 $V_{GS(th)}$, 则在漏源之间只有一个很小的残余漏电流 I_{DSS} 在流动。

当 V_{DS} 增加时, I_{DSS} 也略有增加。当 V_{DS} 超过某一特定的最高允许值 V_{DSS} 时, pin 结 (p^+ 井区 / n^- 漂移区 / n^+ 外延生长层) 会发生锁定现象 (锁定电压 $V_{(BR)DSS}$)。这一锁定电压在物理上大致对应了 MOSFET 结构中的寄生 npn 双极晶体管的击穿电压 V_{CER} 。该 npn 晶体管由 n 源区 (发射极) - p^+ 井区 (基极) - n^- 漂移区 / n^+ 生长层 (集电极) 构成, 见图 1.3。

由集电极-基极二级管的锁定现象所引起的电流放大效应可能会导致寄生双极晶体管的导通, 从而导致 MOSFET 的损坏。

值得庆幸的是, 基极和发射极区几乎被源极的金属化结构所短路, 在两区之间仅存在着 p^+ 井的横向电阻。

应用各种设计措施, 如精细的 MOSFET 单元、均匀的单元布置、低阻的 p^+ 井、优化的边缘结构以及严格统一的工艺, 先进的 MOSFET 已经可以实现很小的单元锁定电流。这样一来, 在严格遵守给定参数的情况下, 寄生双极晶体管结构的导通现象基本上可以被防止。

所以，对于这一类的 MOSFET 芯片，可以定义一个允许的锁定能量 E_A ，分别针对单个脉冲以及周期性的负载（锁定能量由最高允许的芯片温度所限制）。请参阅 2.2.1 节。

在功率模块由多个 MOSFET 芯片并联而成的情况下，因为不可能取得芯片间绝对的均衡，所以仅允许使用单个芯片所能够保证的 E_A 最大值。

导通状态

在漏源电压 V_{DS} 和漏极电流 I_D 均为正的情况下，正向的导通状态可分为两块区域（图 1.8，第一象限）。

主动区域

当栅源电压仅略大于栅极开启电压时，沟道内电流的饱和作用将产生一个可观的压降（输出特性的水平线）。此时， I_D 由 V_{GS} 所控制。

在图 1.8b 中，转移特性可以借助正向转移斜率 g_{fs} 来描述：

$$g_{fs} = dI_D/dV_{GS} = I_D/(V_{GS} - V_{GS(th)})$$

在主动区域内，正向转移斜率随着 I_D 和源极电压的增加而增加，并随芯片温度的增加而减小。

因为由多个 MOSFET 芯片并联而成的功率模块只允许在开关状态下工作，所以，主动区域只是在开通和关断过程中被经过。

一般来说，制造商不允许此类模块在主动区域内稳定运行。原因是 $V_{GS(th)}$ 随温度的上升而下降，因此单个芯片之间小小的制造偏差就有可能引起温升失衡。

电阻性区域

在开关工作状态下，如果 I_D 仅仅由外电路所决定，就处于被称为通态的阻性区域。此时的导通特性可以用通态电阻，即漏源电压 V_{DS} 和漏极电流 I_D 之商来描述。在大信号区域内，通态电压遵守在 1.2.1 节中所提及的关系

$$V_{DS(on)} = R_{DS(on)} \cdot I_D$$

$R_{DS(on)}$ 依赖于栅源电压 V_{GS} 和芯片温度。在 MOSFET 通常的工作温度范围内，它从 25°C 到 125°C 时大约会增加一倍（见 2.6 章）。

反向运行

在反向运行时（第三象限），如果 V_{GS} 小于 $V_{GS(th)}$ ，则 MOSFET 会显示出二极管特性（图 1.8a 中的实线）。这一特性由 MOSFET 结构中的寄生二极管所引起。集电极—基极的 pn 结或源漏 pn 结（反向二极管的双极型电流）的导通电压分别决定了 MOSFET 在反向时的导通特性（图 1.9a）。

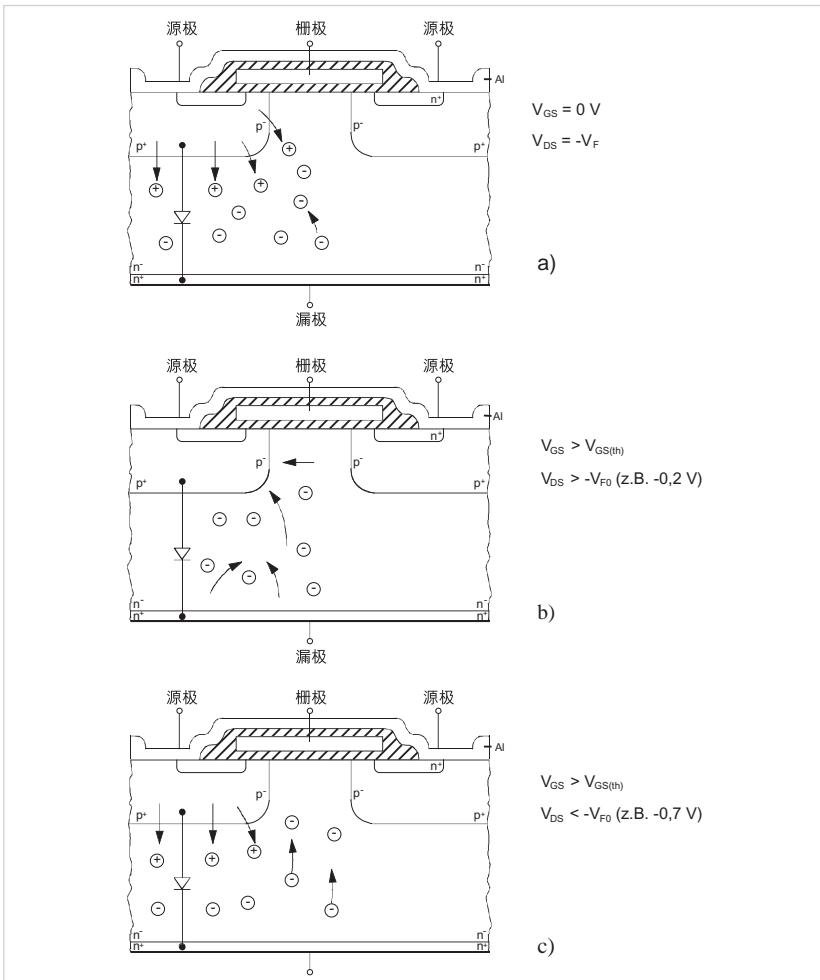


图 1.9 功率 MOSFET 的反向运行 [277]

- a) 当沟道关闭时 (双极型电流)
- b) 当沟道受控开通以及 V_{DS} 为一较小的负值时 (单极型电流)
- c) 当沟道受控开通以及 V_{DS} 为一较大的负值时 (混合型电流)

这个双极性反向二极管可以运行到由 MOSFET 所给定的电流极限。

然而在实际应用中，这个反向二极管会

1. 导致较大的通态损耗；它与 MOSFET 本身的损耗一起，必须被散发出去。
2. 在 MOSFET 作为硬开关应用时具有较差的关断特性（见第 0 篇），从而限制了 MOSFET 的应用范围。

如图 1.9b 所示，原则上只要栅源电压大于栅极开启电压，即使漏源电压为负值，MOSFET 的沟道也可以受控至导通状态。

如果此时的栅源电压保持在反向二极管的开启电压之下（例如，通过并联一个肖特基二极管），则漏源之间的反向电流就只是单极性的电子电流（多子电流）。这样一来，它的关断特性则与 MOSFET 的关断特性相同。

反向电流依赖于 V_{DS} 和 V_{GS} （图 1.8a 中的虚线）。

在图 1.9c 中，当沟道是导通的，并且存在着一个导通的双极式反向二极管时（漏源电压大于栅极开启电压），则会出现两者相结合的电流运行状况（图 1.8a 中的点划线）。与简单地并联了一个二极管的 MOSFET 相比，由于被注入的载流子还可以横向扩散，从而使得 MOSFET 的导电能力增加，最终导致通态电压下降。

除此以外，在过去的几年里，不同的制造商开发了带有快速反向二极管的 MOSFET 芯片（例如，带快恢复外延生长式二极管的场效应晶体管 FREDFET：Fast Recovery Epitaxial Diode Field Effect Transistors）[277]。在 FREDFET 芯片中，用类似于快速二极管的设计方法，有选择地向 n^- 漂移区扩散重金属，从而使得反向运行时的空穴寿命降低。