

功率 MOSFET(Power MOSFET)的基本知识

自 1976 年开发出功率 MOSFET 以来，由于半导体工艺技术的发展，它的性能不断提高：如高压功率 MOSFET 其工作电压可达 1000V；低导通电阻 MOSFET 其阻值仅 $10\text{m}\Omega$ ；工作频率范围从直流到达数兆赫；保护措施越来越完善；并开发出各种贴片式功率 MOSFET(如 Siliconix 最近开发的厚度为 1.5mm“Little Foot 系列)。另外，价格也不断降低，使应用越来越广泛，不少地方取代双极型晶体管。

功率 MOSFET 主要用于计算机外设(软、硬驱动器、打印机、绘图机)、电源(AC / DC 变换器、DC / DC 变换器)、汽车电子、音响电路及仪器、仪表等领域。

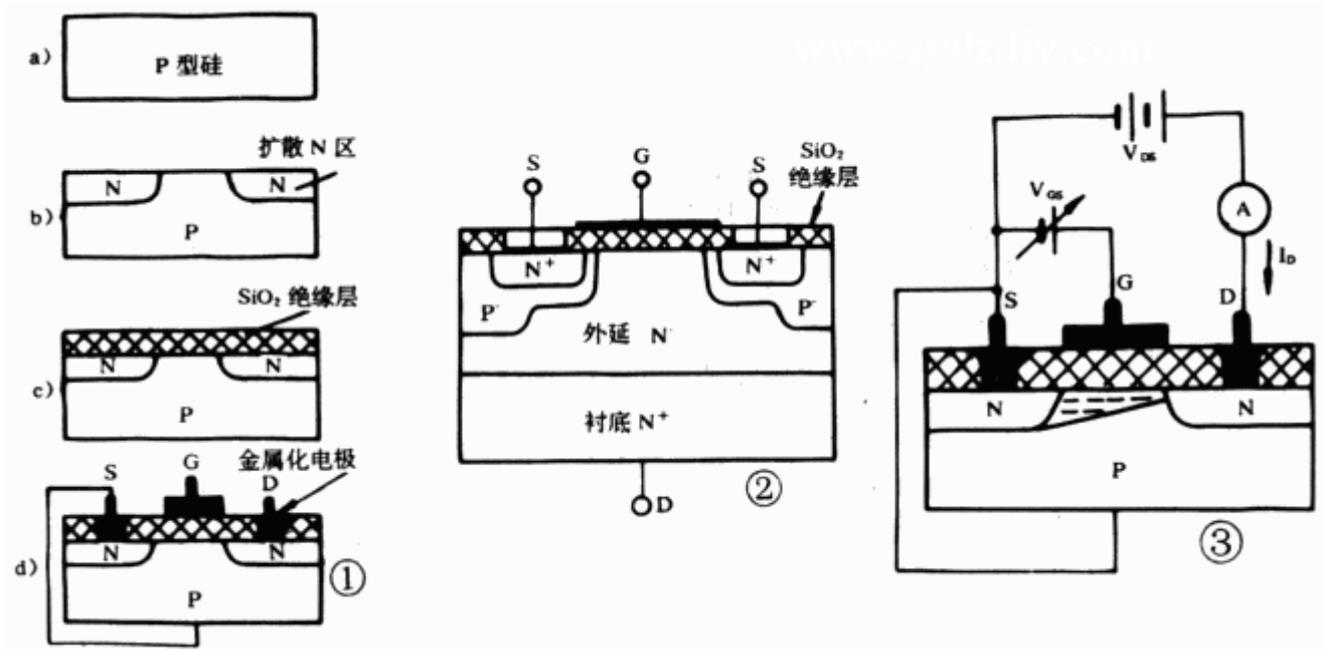
本文将介绍功率 MOSFET 的结构、工作原理及基本工作电路。

什么是 MOSFET

“MOSFET”是英文 MetalOxide Semiconductor Field Effect Transistor 的缩写，译成中文是“金属氧化物半导体场效应管”。它是由金属、氧化物(SiO_2 或 SiN)及半导体三种材料制成的器件。所谓功率 MOSFET(Power MOSFET)是指它能输出较大的工作电流(几安到几十安)，用于功率输出级的器件。

MOSFET 的结构

图 1 是典型平面 N 沟道增强型 MOSFET 的剖面图。它用一块 P 型硅半导体材料作衬底(图 1a)，在其面上扩散了两个 N 型区(图 1b)，再在上面覆盖一层二氧化硅(SiO_2)绝缘层(图 1c)，最后在 N 区上方用腐蚀的方法做成两个孔，用金属化的方法分别在绝缘层上及两个孔内做成三个电极：G(栅极)、S(源极)及 D(漏极)，如图 1d 所示。



从图 1 中可以看出栅极 G 与漏极 D 及源极 S 是绝缘的，D 与 S 之间有两个 PN 结。一般情况下，衬底与源极在内部连接在一起。

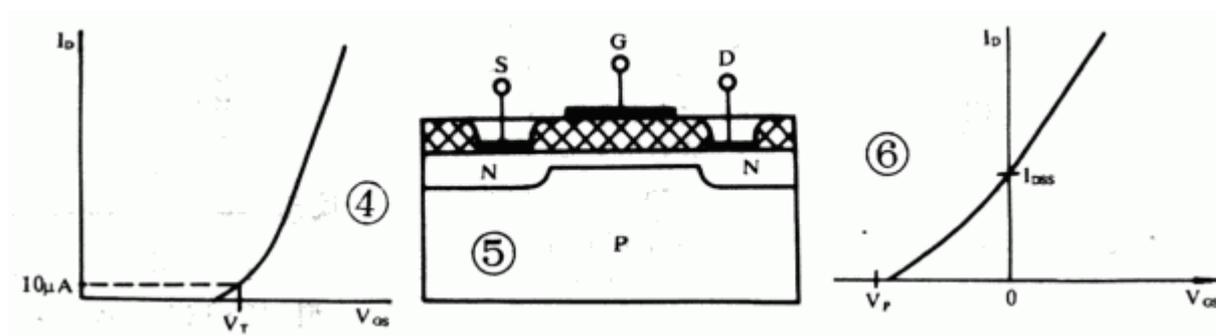
图 1 是 N 沟道增强型 MOSFET 的基本结构图。为了改善某些参数的特性，如提高工作电流、提高工作电压、降低导通电阻、提高开关特性等有不同的结构及工艺，构成所谓 VMOS、DMOS、TMOS 等结构。图 2 是一种 N 沟道增强型功率 MOSFET 的结构图。虽然有不同的结构，但其工作原理是相同的，这里就不一一介绍了。

MOSFET 的工作原理

要使增强型 N 沟道 MOSFET 工作，要在 G、S 之间加正电压 V_{GS} 及在 D、S 之间加正电压 V_{DS} ，则产生正向工作电流 I_D 。改变 V_{GS} 的电压可控制工作电流 I_D 。如图 3 所示（上面↑）。

若先不接 V_{GS} (即 $V_{GS}=0$)，在 D 与 S 极之间加一正电压 V_{DS} ，漏极 D 与衬底之间的 PN 结处于反向，因此漏源之间不能导电。如果在栅极 G 与源极 S 之间加一电压 V_{GS} 。此时可以将栅极与衬底看作电容器的两个极板，而氧化物绝缘层作为电容器的介质。当加上 V_{GS} 时，在绝缘层和栅极界面上感应出正电荷，而在绝缘层和 P 型衬底界面上感应出负电荷(如图 3)。这层感应的负电荷和 P 型衬底中的多数载流子(空穴)的极性相反，所以称为“反型层”，这反型层有可能将漏与源的两 N 型区连接

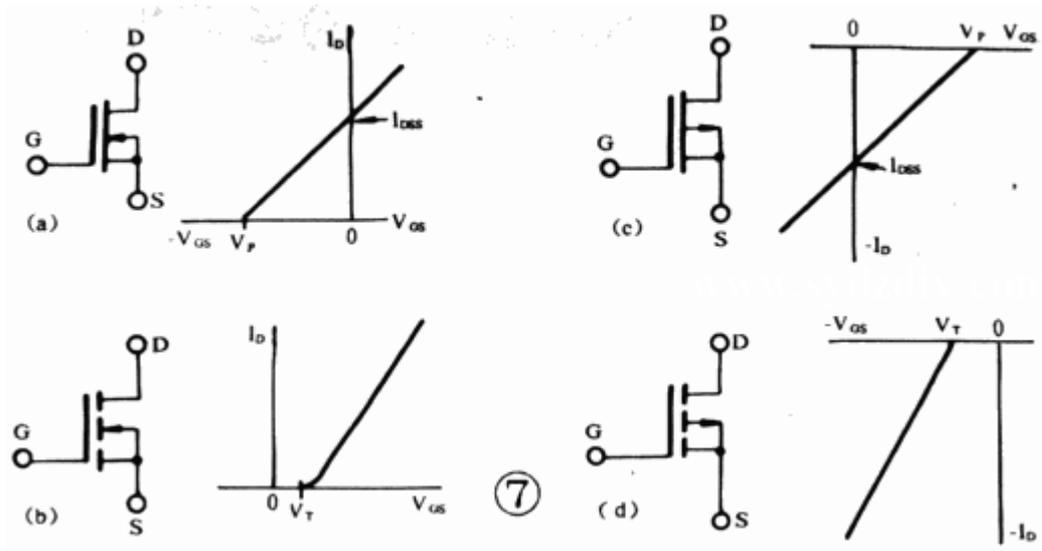
起来形成导电沟道。当 V_{GS} 电压太低时，感应出来的负电荷较少，它将被 P 型衬底中的空穴中和，因此在这种情况下，漏源之间仍然无电流 I_D 。当 V_{GS} 增加到一定值时，其感应的负电荷把两个分离的 N 区沟通形成 N 沟道，这个临界电压称为开启电压(或称阈值电压、门限电压)，用符号 V_T 表示(一般规定在 $I_D=10\mu A$ 时的 V_{GS} 作为 V_T)。当 V_{GS} 继续增大，负电荷增加，导电沟道扩大，电阻降低， I_D 也随之增加，并且呈较好线性关系，如图 4 所示。此曲线称为转换特性。因此在一定范围内可以认为，改变 V_{GS} 来控制漏源之间的电阻，达到控制 I_D 的作用。



由于这种结构在 $V_{GS}=0$ 时， $I_D=0$ ，称这种 MOSFET 为增强型。另一类 MOSFET，在 $V_{GS}=0$ 时也有一定的 I_D (称为 I_{DSS})，这种 MOSFET 称为耗尽型。它的结构如图 5 所示，它的转移特性如图 6 所示。 V_P 为夹断电压($I_D=0$)。

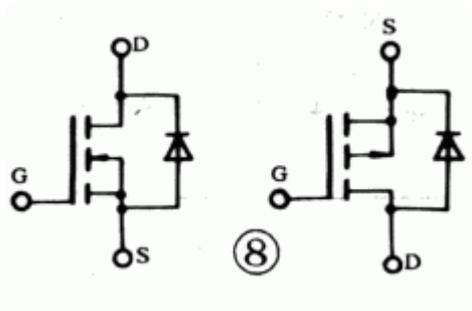
耗尽型与增强型主要区别是在制造 SiO_2 绝缘层中有大量的正离子，使在 P 型衬底的界面上感应出较多的负电荷，即在两个 N 型区中间的 P 型硅内形成一 N 型硅薄层而形成一导电沟道，所以在 $V_{GS}=0$ 时，有 V_{DS} 作用时也有一定的 $I_D(I_{DSS})$ ；当 V_{GS} 有电压时(可以是正电压或负电压)，改变感应的负电荷数量，从而改变 I_D 的大小。 V_P 为 $I_D=0$ 时的 $-V_{GS}$ ，称为夹断电压。

除了上述采用 P 型硅作衬底形成 N 型导电沟道的 N 沟道 MOSFET 外，也可用 N 型硅作衬底形成 P 型导电沟道的 P 沟道 MOSFET。这样，MOSFET 的分类如图 7 所示。



耗尽型：N 沟道(图 7a)；P 沟道(图 c)；

增强型：N 沟道（图 b)；P 沟道(图 d)。



为防止 MOSFET 接电感负载时，在截止瞬间产生感应电压与电源电压之和击穿 MOSFET，一般功率 MOSFET 在漏极与源极之间内接一个快速恢复二极管，如图 8 所示。

功率 MOSFET 的特点

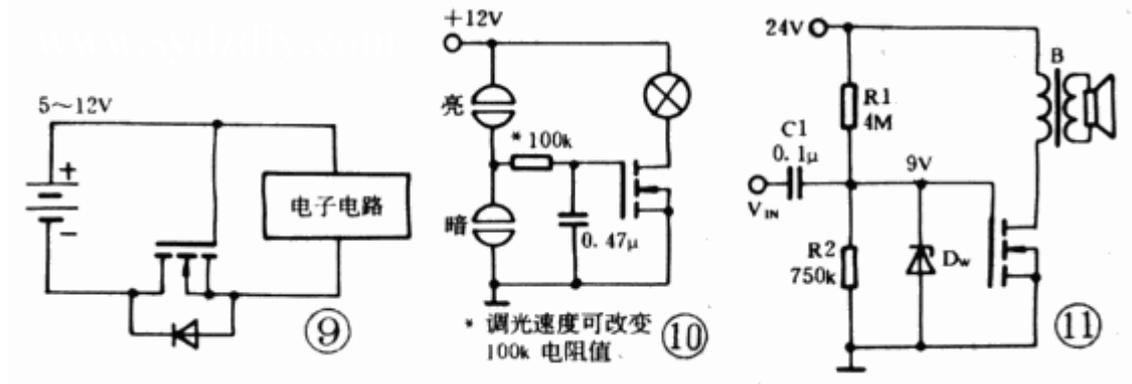
功率 MOSFET 与双极型功率相比具有如下特点：

1. MOSFET 是电压控制型器件(双极型是电流控制型器件)，因此在驱动大电流时无需推动级，电路较简单；
2. 输入阻抗高，可达 $10^8\Omega$ 以上；
3. 工作频率范围宽，开关速度快(开关时间为几十纳秒到几百纳秒)，开关损耗小；
4. 有较优良的线性区，并且 MOSFET 的输入电容比双极型的输入电容小得多，所以它的交流输

入阻抗极高；噪声也小，最合适制作 Hi-Fi 音响；

5. 功率 MOSFET 可以多个并联使用，增加输出电流而无需均流电阻。

典型应用电路



1. 电池反接保护电路

电池反接保护电路如图 9 所示。一般防止电池接反损坏电路采用串接二极管的方法，在电池接反时，PN 结反接无电压降，但在正常工作时有 0.6~0.7V 的管压降。采用导通电阻低的增强型 N 沟道 MOSFET 具有极小的管压降($R_{DS(ON)} \times I_D$)，如 Si9410DY 的 $R_{DS(ON)}$ 约为 0.04Ω ，则在 1A 时约为 0.04V。这时要注意在电池正确安装时， I_D 并非完全通过管内的二极管，而是在 $V_{GS} \geq 5V$ 时，N 导电沟道畅通(它相当于一个极小的电阻)而大部分电流是从 S 流向 D 的(I_D 为负)。而当电池装反时，MOSFET 不通，电路得以保护。

2. 触摸调光电路

一种简单的触摸调光电路如图 10。当手指触摸上触头时，电容经手指电阻及 100k 充电， V_{GS} 渐增大，灯渐亮；当触摸下触头时，电容经 100k 及手指电阻放电，灯渐暗到灭。

3. 甲类功率放大电路

由 R_1 、 R_2 建立 V_{GS} 静态工作点(此时有一定的 I_D 流过)。当音频信号经过 C_1 耦合到栅极，使产生 ΔV_{GS} ，则产生较大的 ΔI_D ，经输出变压器阻抗匹配，使 $4 \sim 8\Omega$ 喇叭输出较大的声功率。图 11

中 D_w 为 9V 稳压二极管，是保护 G、S 极以免输入过高电压而击穿。从图中也可以看出，偏置电阻的数值较大，因为栅极输入阻抗极高，并且无栅流。