



厦门大学

信息与通信工程系

---

## 电子线路I

### 第四讲——场效应管知识归纳及重难点总结

---

厦门大学朋辈导师辅导计划

2024年11月9日

# 1 MOS场效应管介绍

MOS管分为增强型(EMOS)和耗尽型(DMOS)两大类,每一类中又有N沟道和P沟道两种类型。简而言之,增强型和耗尽型的区别主要是 $V_{GS(on)}$ 导通电压不同;N沟道和P沟道的区别主要就是电流方向和电压正负号相反而已,其他没有什么区别(类比如三极管NPN型和PNP型)。场效应管一共有栅极(G)、源极(S)、漏极(D)和衬底(B)四个部分组成,一般情况下B与S是连接在一起的,不加以区分。对于N沟道MOS管来说,绝大部分为P型半导体,仅有S极与D极下方填充了N型半导体,其类似于沟道,故得名N沟道。沟道的长度记为 $W$ ,S极与D极两沟道之间的间隔为 $l$ 。对于P沟道MOS管来说就完全相反,S极与D极下方是P型半导体,其余部分为N型半导体。

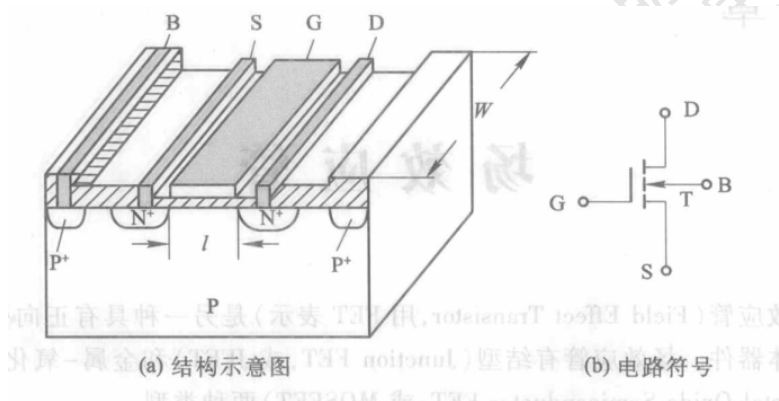
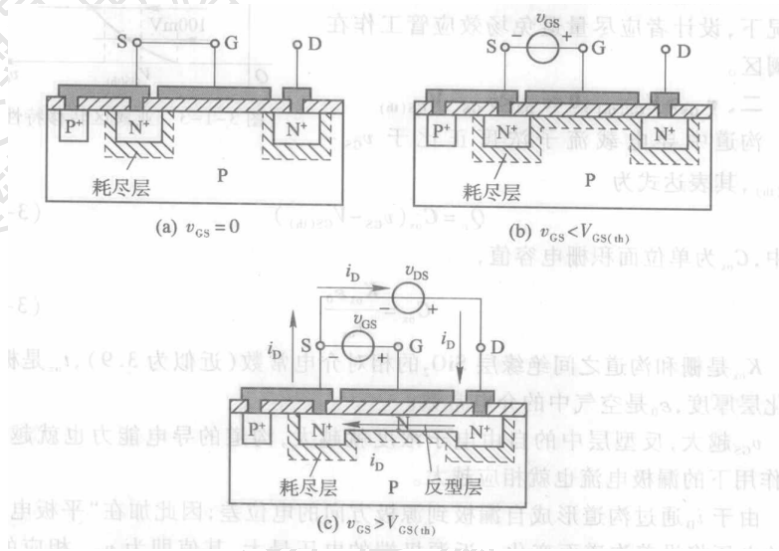


图 1: N沟道EMOS管结构

## 1.1 工作原理



上图是N沟道增强型MOS管受 $V_{GS}$ 影响的变化图。当 $V_{GS}$ 外加正向电压时,G极带正电,可以吸引P区的电子。

当 $V_{GS} = 0$ 或者 $V_{GS}$ 很小时,仅有少部分P区的电子被吸引到G极下方,从S极到D极之间不能形成良好的通路,MOS管导电性能非常弱。

当 $V_{GS}$ 大于一定值时,由于G极带正电,P区中大量电子被吸引到G极下方,此时这个位置的多子变为电子,从P型半导体变成了N型半导体,称为反型层。反型层连接了S极和D极,此时如果 $V_{DS}$ 外加正向电压,电子便会在S极与D极之间沿反型层移动形成电流 $I_D$ 。

人们把正好形成反型层的那个开启电压值称为 $V_{GS(th)}$ ,这个值取决于场效应管的工艺参数。

当 $V_{DS}$ 增大时，反型层会呈现“一端薄，一段厚”的情况，这个时候电流 $I_D$ 由电压 $V_{GS}$ 和 $V_{DS}$ 共同决定，DS两端的等效电阻也会随之变化，故此时称为MOS管工作的变阻区或非饱和区。

当 $V_{DS}$ 满足 $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{GS(th)}$ 时，反型层靠近漏极一端的厚度接近于零或者消失，这称为夹断。这时所有被G极吸引上来的电子全部参与到DS两极间电流的定向运动中，故称为MOS管工作的饱和区。电流 $I_D$ 完全不受电压 $V_{DS}$ 的影响，仅由 $V_{GS}$ 决定。

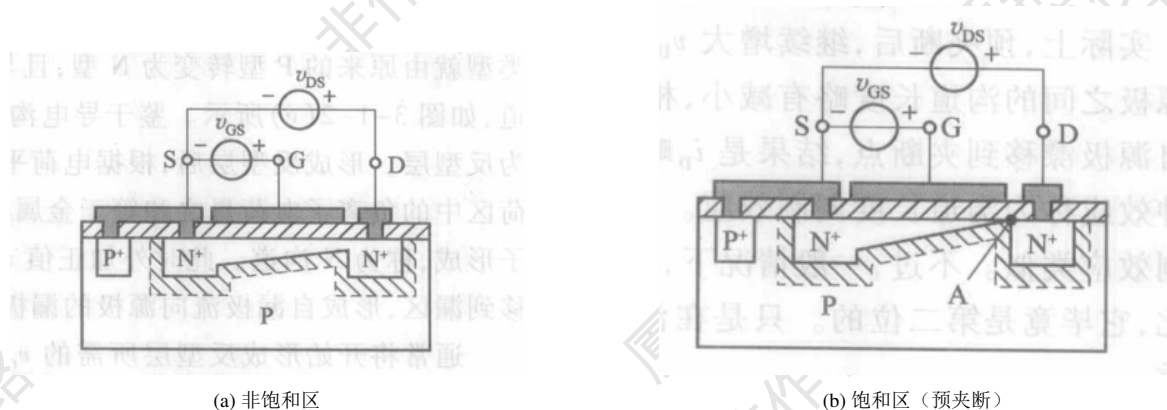


图 2: MOS管非饱和区与饱和区对比图

对于P沟道MOS管来说，情况则完全相反。 $V_{GS} = 0$ 时，G极不排斥下方N区的电子。当 $V_{GS} < 0$ 时，G极带负电，排斥下方N区的电子（吸引空穴）。当 $V_{GS} < V_{GS(th)}$ 时，G极下方反型层形成。 $V_{GS} - V_{GS(th)} < V_{DS} < 0$ 时，电流 $I_D$ 受 $V_{GS}$ 和 $V_{DS}$ 共同控制。 $V_{DS} < V_{GS} - V_{GS(th)}$ 时，到达饱和区。

## 1.2 MOS管工作状态判断

MOS管工作状态的判断可以简单由下面这个表格给出。

	截止区	变阻区或非饱和区	饱和区
N沟道	$V_{GS} \leq 0$	$V_{GS} > V_{GS(th)}$ , $V_{DS} < V_{GS} - V_{GS(th)}$	$V_{GS} > V_{GS(th)}$ , $V_{DS} > V_{GS} - V_{GS(th)}$
P沟道	$V_{GS} \geq 0$	$V_{GS} < V_{GS(th)}$ , $V_{DS} > V_{GS} - V_{GS(th)}$	$V_{GS} < V_{GS(th)}$ , $V_{DS} < V_{GS} - V_{GS(th)}$

## 1.3 MOS管特性

对于MOS管来说， $I_D$ 与 $V_{DS}$ 之间的关系称为输出特性曲线， $I_D$ 与 $V_{GS}$ 之间的关系称为输入特性曲线或转移特性曲线。两种曲线特性由图3表示。

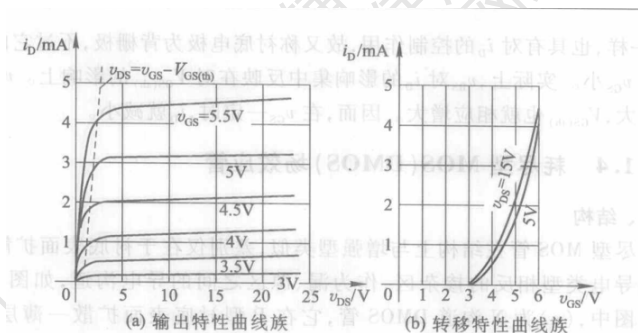


图 3: MOS管输入输出特性曲线

1. 在输出特性曲线图中，虚线左方表示非饱和区（线性电阻区），右方表示饱和区。从图中可以看到，在饱和区中电流 $I_D$ 随 $V_{GS}$ 增大而略微增大，这称为沟道长度调制效应。

2. 在转移特性曲线中, 当  $V_{GS} > V_{GS(th)}$  时, 开始产生电流  $I_D$ 。

## 1.4 耗尽型MOS管 (DMOS)

耗尽型MOS管的所有特性均和增强型MOS管一致, 区别仅在于耗尽型MOS管的反型层已经事先形成 (如图4所示), 这意味着 (对于N沟道来说) 即使  $V_{GS} = 0$ , 只要  $V_{DS} > 0$  电路中就有电流。换句话说, 也就是  $V_{GS(th)} < 0$  (如果是P沟道那就是  $V_{GS(th)} > 0$ )。

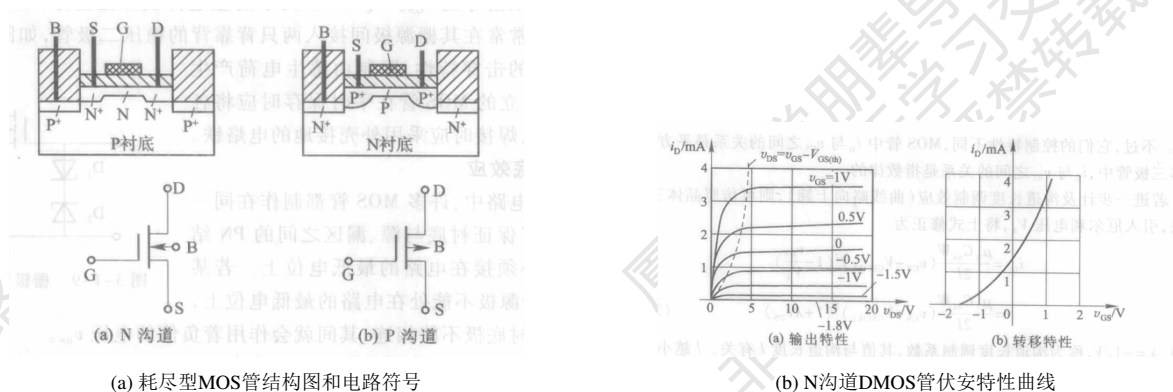


图 4: 耗尽型MOS管

## 2 场效应管等效电路

### 2.1 大信号等效模型

简单来说, 场效应管的大信号模型就是数学模型, 电流  $I_D$  可以近似看作  $V_{GS}$  和  $V_{DS}$  的表达式, 即  $I_D = f(V_{GS}, V_{DS})$ 。在不同工作情况下, 电流  $I_D = f(V_{GS}, V_{DS})$  的表达式略有不同。

1. 非饱和区:

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2l} [2(V_{GS} - V_{GS(th)})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

$$\approx \frac{\mu_n C_{ox} W}{l} (V_{GS} - V_{GS(th)})V_{DS} \quad (\text{当 } V_{DS} \text{ 很小时})$$

2. 饱和区 (不计沟道长度调制效应):

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2l} (V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

3. 饱和区 (考虑沟道长度调制效应):

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2l} (V_{GS} - V_{GS(th)})^2 \left(1 - \frac{V_{DS}}{V_A}\right)$$

$$= \frac{\mu_n C_{ox} W}{2l} (V_{GS} - V_{GS(th)})^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad (\lambda = -\frac{1}{V_A})$$

(注: 1、 $\mu_n$ 、 $C_{ox}$ 、 $W$  和  $l$  都是MOS管参数, 题目会直接给出; 2、沟道长度调制效应是否要考虑也是根据题目说法决定, 如果题目说不计沟道长度调制效应或  $V_A \rightarrow \infty$  ( $\lambda \rightarrow 0$ ) 则直接按照2中的公式计算  $I_D$  即可。

### 2.2 大信号分析方法

对于MOS管电路分析问题, 通常遵从下面的步骤进行。

1. 计算G极（栅极）电压，得到 $V_{GS}$ 的表达式（通常是关于 $I_D$ 的式子）。
2. 假设MOS管此时工作在饱和区，使用上面的饱和区公式带入 $V_{GS}$ 计算 $I_D$ 。
3. 计算得到 $I_D$ 后（通常得到的是两个解，其中一个往往不合理，需要结合后续 $V_{GS}$ 和 $V_{DS}$ 的计算来判断其合理性），计算 $V_{GS}$ 和 $V_{DS}$ 。
4. 根据上文中的表格判断MOS管此时是否处于饱和区，如果是，假设成立；否则假设不成立，MOS管工作在非饱和区或截止区。

## 2.3 小信号模型

MOS管的小信号模型非常简单，最常用的就是压控电流源模型。

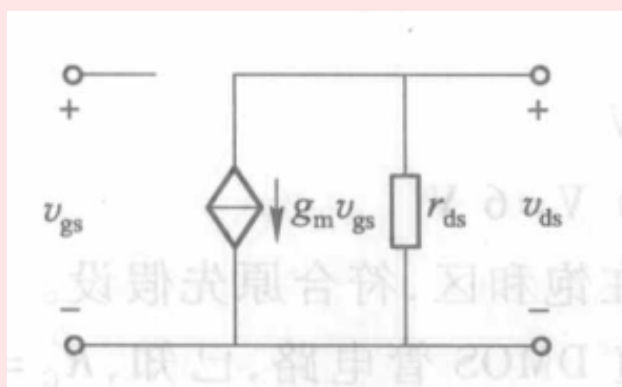


图 5: MOS管小信号压控电流源模型

MOS管小信号电路模型参数通常有以下两个：

1. 跨导 $g_m$ ，表示电流 $i_d$ 与电压 $v_{gs}$ 的比值。

$$g_m = 2\sqrt{\frac{\mu C_{ox} W}{2l} I_{DQ}}$$

2. 输出电阻 $r_{ds}$ 。

$$r_{ds} = \frac{1}{g_{ds}} = \frac{1}{\lambda I_{DQ}} = \frac{|V_A|}{I_{DQ}} \left( \lambda = -\frac{1}{V_A} \right)$$

（注： $V_A$ 为厄尔利电压，一般由题目给出。如果题中说不计沟道长度调制效应或 $V_A \rightarrow \infty$ ，则不用考虑输出电阻 $r_{ds}$ 或 $r_{ds} \rightarrow \infty$ ）。

## 3 总结

对于MOS管，我们需要重点掌握其漏极电流 $I_D$ 的计算公式，以及它静态工作点的计算方法和工作状态的判断。最后，还需要掌握MOS管的小信号压控电流源模型。

## 参考文献

[1] 电子电路原理（原书第7版）. Albert Malvino, David J.Bates.

[2] 《电子线路（线性部分）》. 冯军, 谢嘉奎.