

第三章 场效应管

知识要点：

场效应管原理、场效应管的小信号模型及其参数

场效应管是只有一种载流子参与导电的半导体器件，是一种用输入电压控制输出电流的半导体器件。有 N 沟道器件和 P 沟道器件。有结型场效应三极管 JFET(Junction Field Effect Transister)和绝缘栅型场效应三极管 IGFET(Insulated Gate Field Effect Transister)之分。IGFET 也称金属-氧化物-半导体三极管 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET)。

1.1 MOS 场效应管

MOS 场效应管有增强型 (Enhancement MOS 或 EMOS) 和耗尽型(Depletion)MOS 或 DMOS) 两大类，每一类有 N 沟道和 P 沟道两种导电类型。场效应管有三个电极：

D(Drain) 称为漏极，相当双极型三极管的集电极；
G(Gate) 称为栅极，相当于双极型三极管的基极；
S(Source) 称为源极，相当于双极型三极管的发射极。

1.1.1 增强型 MOS(EMOS)场效应管

根据图 3-1，N 沟道增强型 MOSFET 基本上是一种左右对称的拓扑结构，它是在 P 型半导体上生成一层 SiO_2 薄膜绝缘层，然后用光刻工艺扩散两个高掺杂的 N 型区，从 N 型区引出电极，一个是漏极 D，一个是源极 S。在源极和漏极之间的绝缘层上镀一层金属铝作为栅极 G。P 型半导体称为衬底，用符号 B 表示。

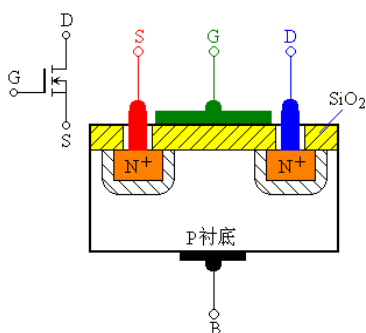


图 3-1 N 沟道增强型 EMOS 管结构示意图

一、工作原理

1. 沟道形成原理

当 $V_{GS}=0\text{V}$ 时，漏源之间相当两个背靠背的二极管，在 D、S 之间加上电压不会在 D、S 间形成电流。

当栅极加有电压时，若 $0 < V_{GS} < V_{GS(th)}$ 时，通过栅极和衬底间的电容作用，将靠近栅极下方的 P 型半导体中的空穴向下方排斥，出现了一薄层负离子的耗尽层。耗尽层中的少子将向表层运动，但数量有限，不足以形成沟道，所以仍然不足以形成漏极电流 I_D 。

进一步增加 V_{GS} ，当 $V_{GS} > V_{GS(th)}$ 时（ $V_{GS(th)}$ 称为开启电压），由于此时的栅极电压已经比较强，在靠近栅极下方的 P 型半导体表层中聚集较多的电子，可以形成沟道，将漏极和源极沟通。如果此时加有漏源电压，就可以形成漏极电流 I_D 。在栅极下方形成的导电沟

道中的电子，因与 P 型半导体的载流子空穴极性相反，故称为反型层 (inversion layer)。随着 V_{GS} 的继续增加， I_D 将不断增加。在 $V_{GS}=0V$ 时 $I_D=0$ ，只有当 $V_{GS} > V_{GS(th)}$ 后才会出现漏极电流，这种 MOS 管称为增强型 MOS 管。

转移特性曲线的斜率 g_m 的大小反映了栅源电压对漏极电流的控制作用。 g_m 的量纲为 mA/V，所以 g_m 也称为跨导。

跨导的定义式如下：

$$g_m = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} \right|_{V_{DS} = \text{const}} \quad (\text{单位 mS})$$

2. V_{DS} 对沟道导电能力的控制

当 $V_{GS} > V_{GS(th)}$ ，且固定为某一值时，来分析漏源电压 V_{DS} 对漏极电流 I_D 的影响。 V_{DS} 的不同变化对沟道的影响如图 3-2 所示。根据此图可以有如下关系

$$V_{DS} = V_{DG} + V_{GS} = -V_{GD} + V_{GS}$$

$$V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$$

当 V_{DS} 为 0 或较小时，相当 $V_{GD} > V_{GS(th)}$ ，沟道呈斜线分布。在紧靠漏极处，沟道达到开启的程度以上，漏源之间有电流通过。

当 V_{DS} 增加到使 $V_{GD} = V_{GS(th)}$ 时，相当于 V_{DS} 增加使漏极处沟道缩减到刚刚开启的情况，称为预夹断，此时的漏极电流 I_D 基本饱和。当 V_{DS} 增加到 $V_{GD} < V_{GS(th)}$ 时，预夹断区域加长，伸向 S 极。 V_{DS} 增加的部分基本降落在随之加长的夹断沟道上， I_D 基本趋于不变。

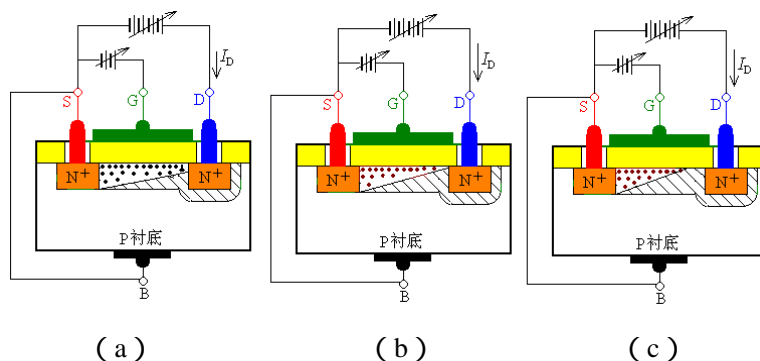


图 3-2 漏源电压 V_{DS} 对沟道的影响

当 $V_{GS} > V_{GS(th)}$ ，且固定为某一值时， V_{DS} 对 I_D 的影响，即 $i_D = f(v_{DS}) |_{V_{GS} = \text{const}}$ 这一关系曲线如图 3-3 所示。

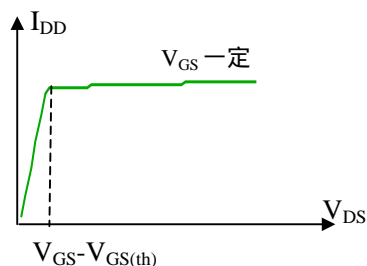


图 3-3 V_{GS} 一定， I_D 随 V_{DS} 变化的特性

二、伏安特性

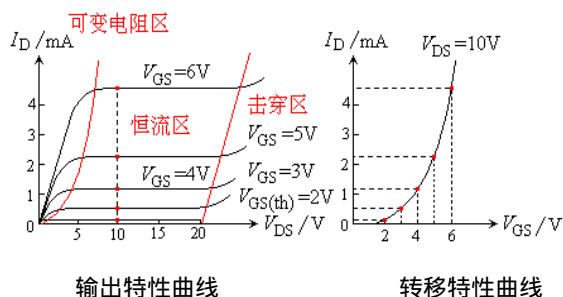


图 3-3 漏极输出特性曲线和转移特性曲线

1. 非饱和区

非饱和区 (Nonsaturation Region) 是沟道未被预夹断的工作区, 又称可变电阻区。由不等式 $V_{GS} > V_{GS(th)}$ 、 $V_{DS} < V_{GS} - V_{GS(th)}$ 限定。理论证明, I_D 与 V_{GS} 和 V_{DS} 的关系如下:

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

2. 饱和区

饱和区 (Saturation Region) 又称放大区, 它是沟道预夹断后所对应的工作区。由不等式 $V_{GS} > V_{GS(th)}$ 、 $V_{DS} > V_{GS} - V_{GS(th)}$ 限定。漏极电流表达式:

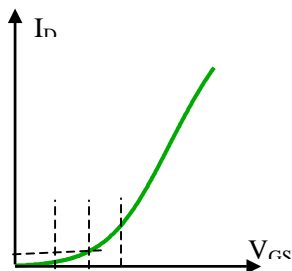
$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2l} (V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

在这个工作区内, I_D 受 V_{GS} 控制。考虑厄尔利效应的 I_D 表达式:

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

3. 截止区和亚阈区

$V_{GS} < V_{GS(th)}$, 沟道未形成, $I_D = 0$ 。在 $V_{GS(th)}$ 附近很小的区域叫亚阈区 (Subthreshold Region) 在这个区域内, I_D 与 V_{GS} 的关系为指数关系。



3-5 亚阈区转移特性

4. 击穿区

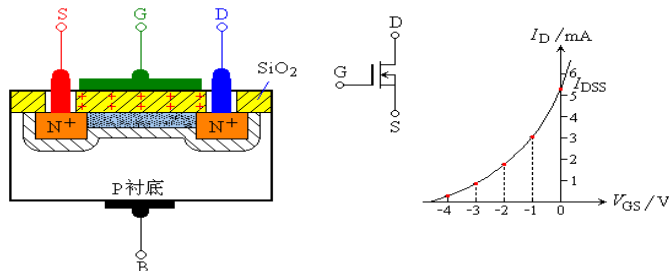
当 V_{DS} 增大到足以使漏区与衬底间 PN 结引发雪崩击穿时, I_D 迅速增加, 管子进入击穿区。

四、P 沟道 EMOS 场效应管

在 N 型衬底中扩散两个 P^+ 区, 分别做为漏区和源区, 并在两个 P^+ 之间的 SiO_2 绝缘层上覆盖栅极金属层, 就构成了 P 沟道 EMOS 管。

1.1.2 耗尽型 MOS (DMOS) 场效应管

N 沟道耗尽型 MOSFET 的结构和符号如图 3-5 所示,它是在栅极下方的 SiO_2 绝缘层中掺入了大量的金属正离子。所以当 $V_{GS}=0$ 时,这些正离子已经感应出反型层,形成了沟道。于是,只要有漏源电压,就有漏极电流存在。当 $V_{GS} > 0$ 时,将使 I_D 进一步增加。 $V_{GS} < 0$ 时,随着 V_{GS} 的减小漏极电流逐渐减小,直至 $I_D=0$ 。对应 $I_D=0$ 的 V_{GS} 称为夹断电压,用符号 $V_{GS(off)}$ 表示,有时也用 V_P 表示。N 沟道耗尽型 MOSFET 的转移特性曲线见图所示。

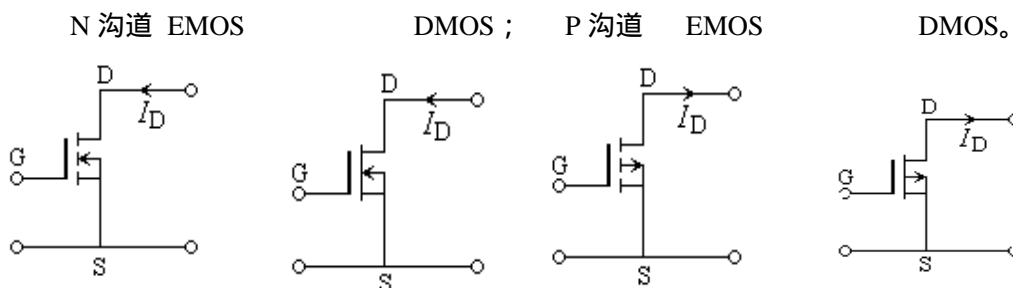


(a) 结构示意图 (b) 转移特性曲线

图 3-5 N 沟道耗尽型 MOSFET 的结构和转移特性曲线

P 沟道 MOSFET 的工作原理与 N 沟道 MOSFET 完全相同,只不过导电的载流子不同,供电电压极性不同而已。这如同双极型三极管有 NPN 型和 PNP 型一样。

1.1.3 四种 MOS 场效应管比较



非饱和区

$$\begin{aligned} V_{GS} &> V_{GS(th)} \\ V_{DS} &< V_{GS} - V_{GS(th)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{GS} &< V_{GS(th)} \\ V_{DS} &> V_{GS} - V_{GS(th)} \end{aligned}$$

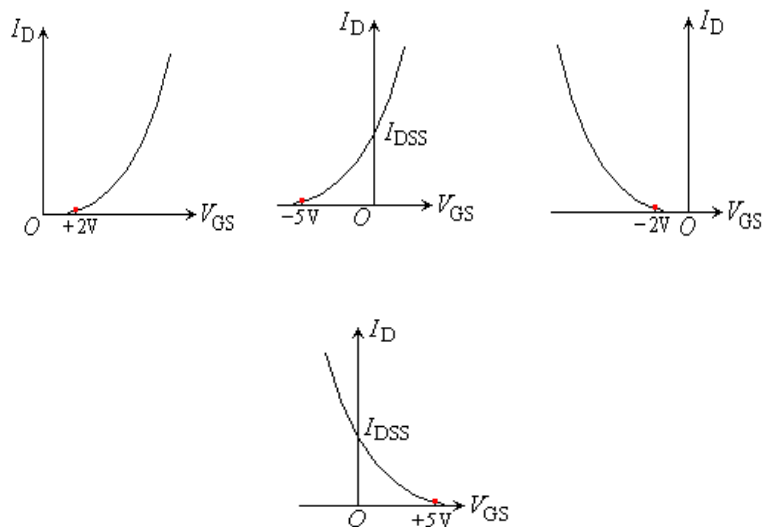
$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2l} [2(V_{GS} - V_{GS(th)})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

饱和区

$$\begin{aligned} V_{GS} &> V_{GS(th)} \\ V_{DS} &\geq V_{GS} - V_{GS(th)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{GS} &< V_{GS(th)} \\ V_{DS} &\leq V_{GS} - V_{GS(th)} \end{aligned}$$

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



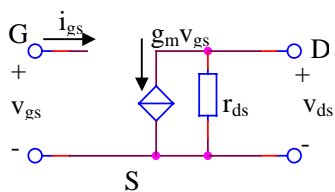
四种 MOS 管比较

1.1.4 小信号电路模型

$$v_{GS} = v_{GSQ} + v_{gs}, v_{DS} = v_{DSQ} + v_{ds}, i_D = I_{DQ} + i_d$$

饱和区：

$$i_D = f(v_{GS}, v_{DS}) = I_{DQ} + \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_Q v_{gs} + \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \right|_Q v_{ds}$$



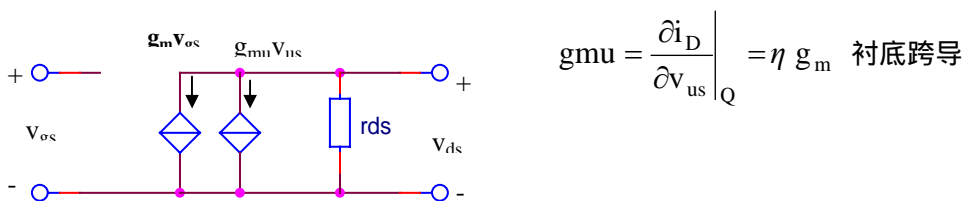
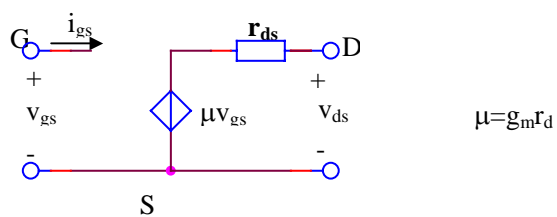
g_m : Transconductance
 $1/g_{ds}$: output resistance
 $r_{ds} = 1/g_{ds}$

$$i_d = i_D - I_{DQ} \approx g_m v_{gs} + g_{ds} v_{ds}$$

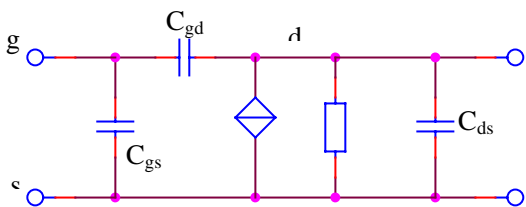
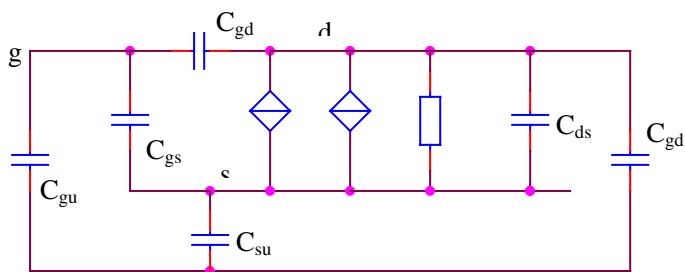
$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_Q = \frac{\mu C_{ox} W}{l} (V_{GSQ} - V_{GS(th)}) (1 + \lambda V_{DSQ}) = 2 \sqrt{\frac{\mu C_{ox} W}{2l}} I_{DQ} (1 + \lambda V_{DSQ})$$

$$V_{GS} - V_{GS(th)} = \sqrt{\frac{2I_D}{\mu C_{ox} W}}$$

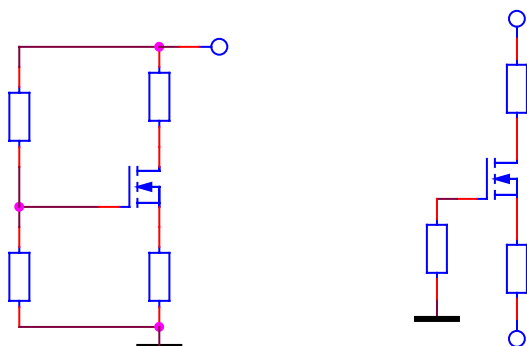
$$g_m \approx \sqrt{\frac{\mu C_{ox} W}{2l}} I_{DQ}, g_{ds} = \lambda I_{DQ}$$



高频小信号电路模型



1.1.5 分析方法



1.2 结型场效应管

1.2.1 工作原理

结型场效应三极管的结构与绝缘栅场效应三极管相似，工作机理也相同。结型场效应三极管的结构如图所示，它是在 N 型半导体硅片的两侧各制造一个 PN 结，形成两个 PN 结夹着一个 N 型沟道的结构。两个 P 区即为栅极，N 型硅的一端是漏极，另一端是源极。

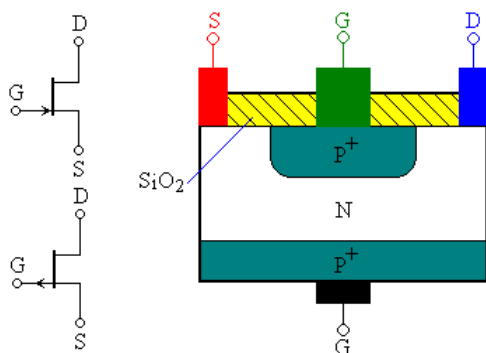
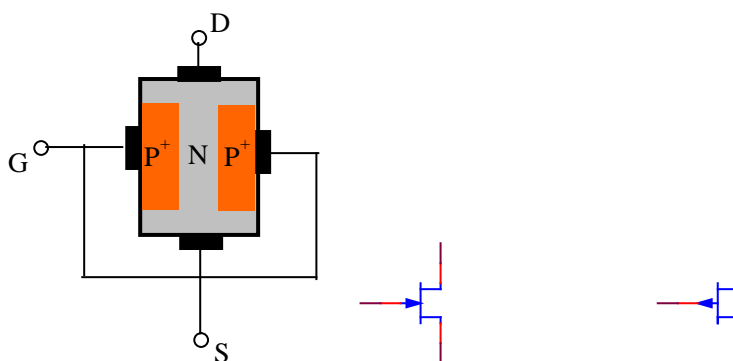


图 3-2-1 N 沟道 JFET 工艺结构示意图

图 3-2-2 N 沟道及 P 沟道 JEFET 结构示意图



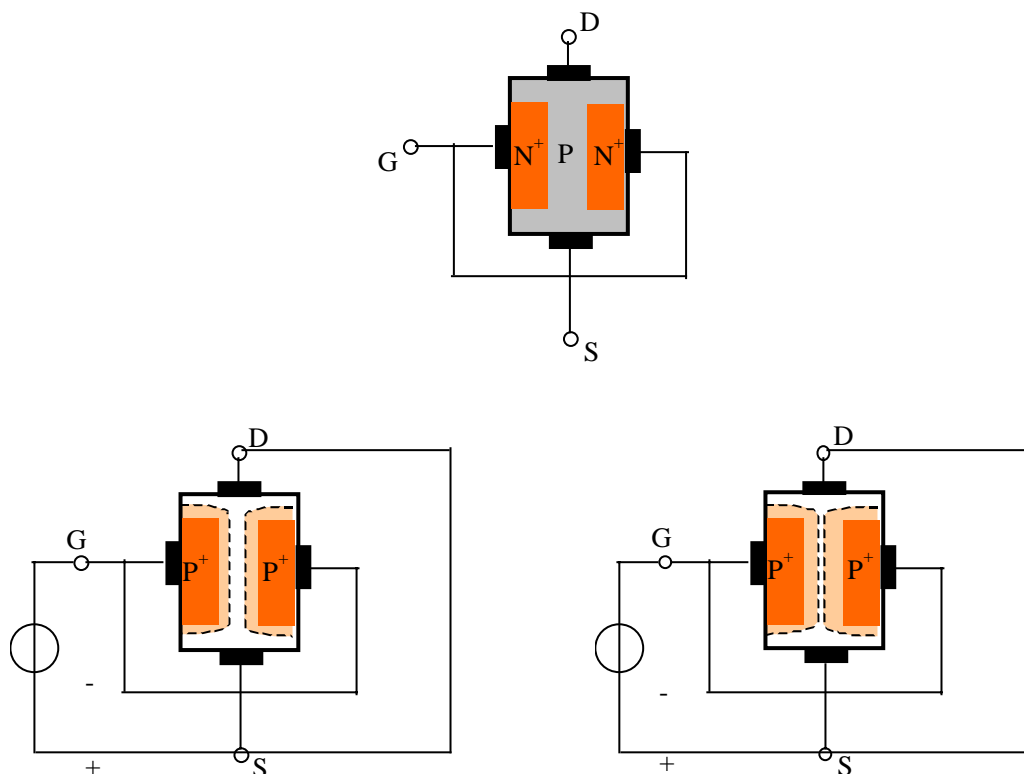
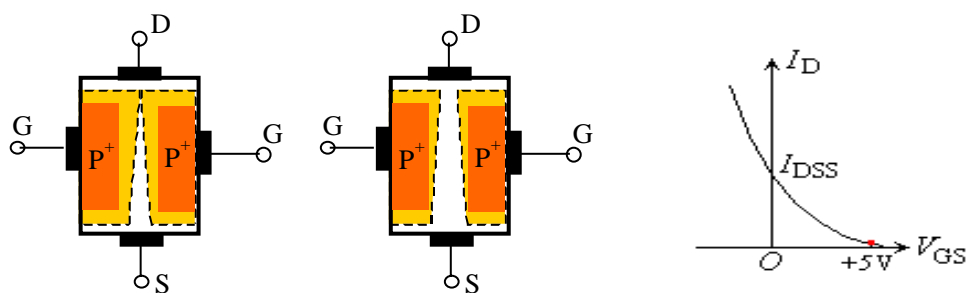


图 3-2-3 N 沟道 JFET 当 $V_{DS}=0$ 时， V_{GS} 对沟道宽度的影响

当 PN 结 反向偏置时，阻挡层宽度增大，主要向低掺杂 N 区扩展。当 $V_{DS}=0$ 时， V_{GS} 越负，响应的阻挡层越宽，沟道就窄，沟道的导电能力就越差，直到 $V_{GS}=V_{GS(off)}$ 时，两侧阻挡层相遇，沟道消失。



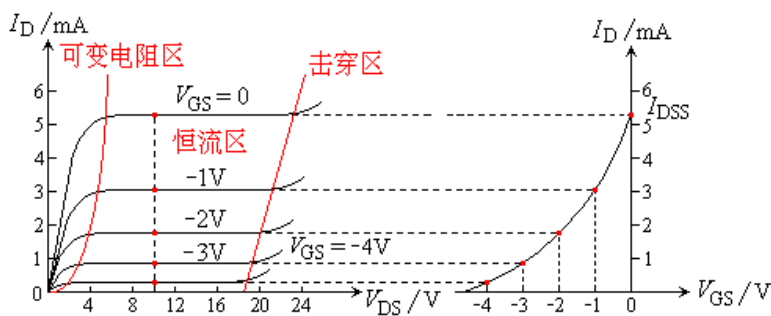
由于 I_D 通过长条沟道产生漏极到源极方向的电压降，因此在沟道的不同位置上，加在 PN 结上的反向偏置电压就不同，在源极端，PN 结上的反偏电压最小。在漏极端，PN 结上的反偏电压最高，响应的阻挡层最宽，沟道也最窄。当 $V_{GS}=V_{GS(off)}$ 时，近漏极端的沟道被夹断。

1.2.2 伏安特性曲线

根据结型场效应三极管的结构，因它没有绝缘层，只能工作在反偏的条件下，对于 N

沟道结型场效应三极管只能工作在负栅压区，P 沟道的只能工作在正栅压区，否则将会出现栅流。

结型场效应三极管的特性曲线有两条，一是转移特性曲线，二是输出特性曲线。它与绝缘栅场效应三极管的特性曲线基本相同，只不过绝缘栅场效应管的栅压可正、可负，而结型场效应三极管的栅压只能是 P 沟道的为正或 N 沟道的为负。N 沟道结型场效应三极管的特性曲线如下图所示。



(a) 漏极输出特性曲线

(b) 转移特性曲线

1. 非饱和区

$$V_{GS} > V_{GS(off)}, V_{DS} < V_{GS} - V_{GS(off)}$$

$$I_D = I_{DSS} \left[-2 \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right) \frac{V_{DS}}{V_{GS(off)}} - \left(\frac{V_{DS}}{V_{GS(off)}} \right)^2 \right]$$

2. 饱和区

$$V_{GS} > V_{GS(off)}, V_{DS} > V_{GS} - V_{GS(off)} \text{ 限定}$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2$$

3. 截止区

$$V_{GS} < V_{GS(off)} \text{ 沟道被夹断, } I_D = 0.$$

4. 击穿区

当 V_{DS} 增大到一定值 $V_{(BR)DS}$ 时，漏极端 PN 结发生雪崩击穿而使 I_D 急剧增加区域。