

第 3 章

场效应管及基本放大电路

由于双极型晶体管工作在放大状态时,必须保证发射结正向导通,故输入端始终存在输入电流。改变输入电流就可改变输出电流,所以晶体管是电流控制器件,需要信号源提供一定的电流才能工作,故其输入电阻较低,通常为 $10^2 \sim 10^4 \Omega$ 。

场效应管是一种利用电场效应来控制其导电能力的一种半导体器件,属于电压控制器件。它不吸收信号源电流,不消耗信号源功率,因此,场效应管的输入电阻可高达 $10^8 \sim 10^{15} \Omega$ 。由于场效应管工作时只有一种载流子(多数载流子)参加导电,故常称为单极型晶体管。场效应管不仅有输入阻抗高、耗电省、寿命长等特点,而且还有体积小、质量轻、噪声低、热稳定性好、抗辐射能力强和制造工艺简单等优点,因而大大地扩展了它的应用范围,特别是在大规模和超大规模集成电路中得到了广泛的应用。

根据结构的不同,场效应管可分为两大类:结型场效应管(junction type field effect transistor, JFET)和金属-氧化物-半导体场效应管(metal-oxide-semiconductor type field effect transistor, MOSFET)。

本章首先介绍各类场效应管的结构、工作原理、特性曲线及参数,然后介绍场效应管放大电路。

3.1 结型场效应管

3.1.1 结构

结型场效应管(简称 JFET)有两种结构形式。图 3.1(a)是一种结型场效应管的结构示意图。它是在一块 N 型半导体材料的两侧进行高浓度扩散形成两个 P 区(记作 P^+)构成两个 PN 结,将这两个 P 区连在一起引出一个电极,称为栅极(g),在 N 型半导体的两端各引出一个电极,分别称为源极(s)和漏极(d),中间的 N 区为电流流通的路径,称为导电沟道。这种结构的管子称为 N 沟道结型场效应管,其符号如图 3.1(b)所示。图中箭头所示方向为 PN 结的方向。

如在 P 型半导体材料两侧各制作一个高浓度的 N 区,便可形成一个 P 沟道结型场效应管,其结构和符号如图 3.2 所示。

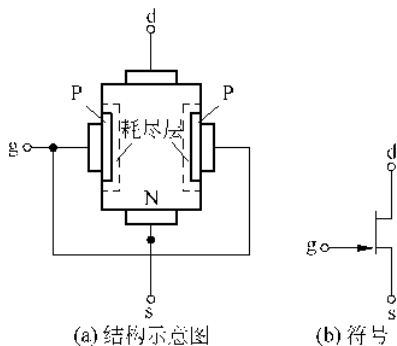


图 3.1 N 沟道结型场效应管

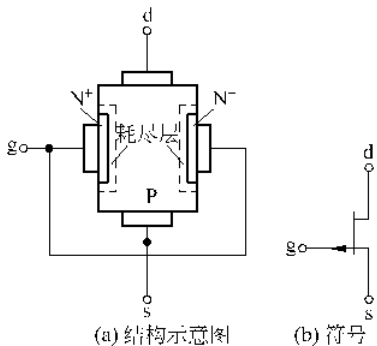


图 3.2 P 沟道结型场效应管

3.1.2 工作原理

下面以 N 沟道结型场效应管为例讨论其工作原理。

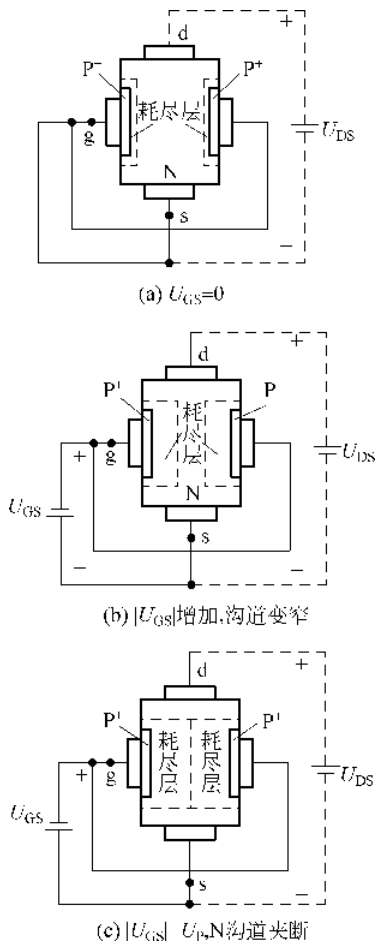
当 N 沟道结型场效应管处在放大状态时,在栅、源极之间加反向电压 U_{GS} ,栅极电流 $I_G \approx 0$,场效应管呈现高达 $10^7 \Omega$ 以上的输入电阻。而在漏、源极之间加正向电压 U_{DS} ,使 N 沟道中的多数载流子(自由电子)在电场作用下由源极向漏极运动,形成电流 I_D 。 I_D 的大小受 U_{GS} 的控制。因此,讨论结型场效应管的工作原理就是讨论 U_{GS} 对 I_D 的控制作用和 U_{DS} 对 I_D 的影响。

1. U_{GS} 对导电沟道 I_D 的控制作用

为讨论方便起见,先令 $U_{DS} = 0$, U_{GS} 也为 0,即为原始状态,如图 3.3(a)所示。

当 U_{GS} 从 0 向负值增加时,两 PN 结耗尽层加宽,向 N 沟道中扩展,使得导电沟道变窄、沟道电阻变大,如图 3.3(b)所示。当 U_{GS} 增加到等于夹断电压 U_P 时,两 PN 结的耗尽层将合拢,沟道全部被夹断。此时,漏极与源极间的电阻趋向无穷大,如图 3.3(c)所示。

由以上分析可知,改变栅、源电压 U_{GS} ,就可改变沟道的电阻值的大小。如在漏、源极之间加正向电压 U_{DS} ,使 N 沟道中的多数载流子(自由电子)在电场作用下由源极向漏极运动,形成从漏极流向源极的电流(称漏极电流) I_D 。则改变栅、源电压 U_{GS} 就可改变漏极电流 I_D ,当 $|U_{GS}|$ 增加时,沟道电阻增加, I_D 减小;反之, I_D 增大。从而实现了利用栅、源电压 U_{GS} 产生的电场来控制导

图 3.3 $U_{DS} = 0$ 时, U_{GS} 对导电沟道的控制作用

电沟道电流的目的。这就是结型场效应管的工作原理。

2. U_{DS} 对导电沟道 I_D 的影响

事实上,当栅、源极负向电压 u_{GS} 的数值小于 U_P 某值时,增加漏、源极之间正向电压 u_{DS} ,漏极电流 i_D 将随之改变。设 u_{DS} 为零时, i_D 显然为零,如图 3.4(a) 所示。当漏、源极之间正向电压 u_{DS} 逐渐增加时,沟道电场强度加大,漏极电流 i_D 迅速加大,但是,由于漏极电流 i_D 沿沟道产生的电压使得沟道上各点与栅极间的电压不再是相等的,漏极处的电压最大,随着电位的降低在源极处的电压最小。这使得沟道两侧的耗尽层沿着从源极到漏极的方向逐渐变宽,而在漏极附近导电沟道最窄,导电沟道呈楔形,如图 3.4(b) 所示。所以从这方面来说,增加 u_{DS} ,又产生了阻碍漏极电流 i_D 提高的因素。但在 u_{DS} 较小时,导电沟道靠近漏端区域仍较宽,这时阻碍的因素是次要的,故 i_D 随 u_{DS} 升高几乎成正比地随着 u_{DS} 增大。由于 u_{GS} 保持不变, u_{DS} 增大,使 $|u_{GD}|$ 随之增大,当 u_{DS} 增大到使 $|u_{GD}|$ 等于 $|U_P|$ 时,在漏极附近两侧的耗尽层开始合拢于 A 点,如图 3.4(c) 所示,这种情况称为预夹断,此时有

$$u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} \quad (3.1)$$

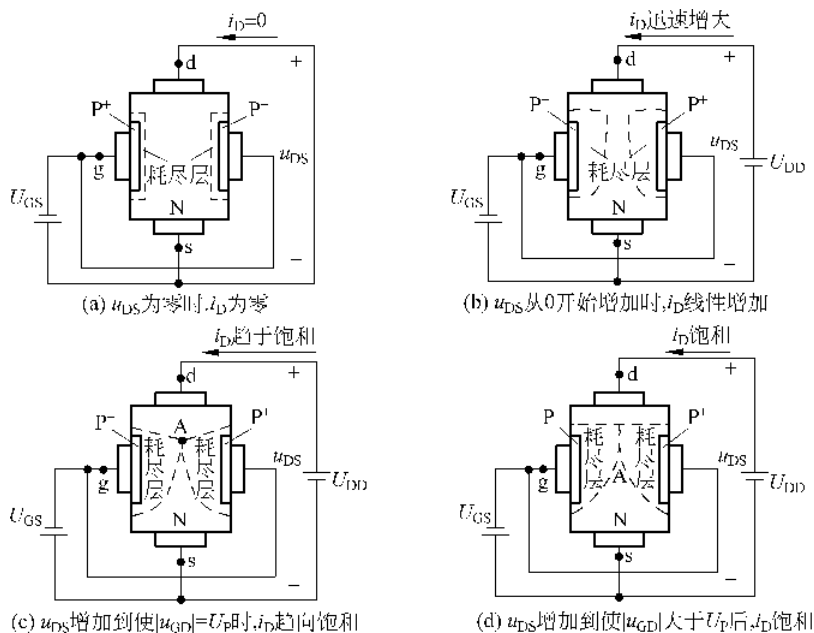


图 3.4 u_{GS} 一定时, u_{DS} 对导电沟道的影响

若 $u_{GS} = 0$, $u_{GD} = -u_{DS} = U_P$, 对应于图 3.5(a), i_D 达到了饱和漏极电流 I_{DSS} , I_{DSS} 下标中的第二个 S 表示栅、源极间短路的意思。当 u_{DS} 再继续增加时,耗尽区的合拢点 A 将从漏极开始向源极方向延伸(即夹断电压增长),如图 3.3(d) 所示。但由于夹断处场强也增大,仍能将电子拉过夹断区(即耗尽层),形成漏极电流,这和 NPN 型晶体管在集电结反偏时仍能把电子拉过耗尽区基本上是相似的。在从源极到夹断处的沟道上,沟道内电场基本上不随 u_{DS} 改变而变化。所以, i_D 基本上不随 u_{DS} 增加而上升,漏极电流趋于饱和。值得注意的是, u_{DS} 不能无限制地增加,否则会使夹断区的耗尽层击穿。

如果栅、源电压愈负,则耗尽层愈宽,沟道电阻就愈大,相应的 i_D 就愈小。因此,改变栅、源电压 u_{GS} 可得一族曲线,如图 3.5(b)所示。由于每个管子的 U_P 为一定值,因此,从式(3.1)可知,预夹断点随 u_{GS} 改变而变化,它在输出特性曲线上的轨迹如图 3.5(b)中左边虚线所示。

综合上述分析,对结型场效应管可得下述结论:

- (1) 栅、源之间的 PN 结是反向偏置的,因此,其 $i_G \approx 0$,输入电阻很高。
- (2) i_D 受 u_{GS} 控制,是电压控制电流器件。
- (3) 预夹断前, i_D 与 u_{DS} 呈近似线性关系;预夹断后, i_D 趋于饱和。

P 沟道结型场效应管的工作原理与 N 沟道相对应。用于放大时,使用电源电压极性与 N 沟道结型场效应管的正好相反。

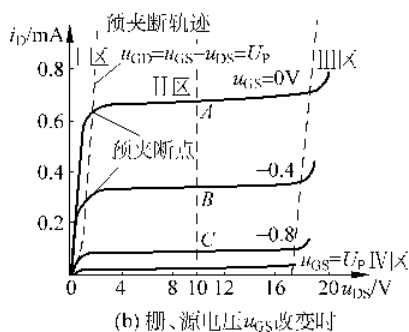
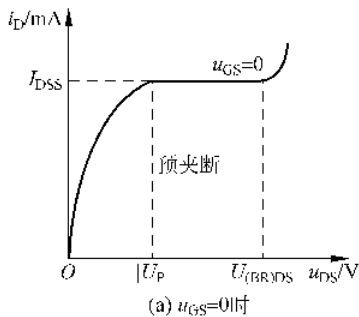


图 3.5 N 沟道结型场效应管的输出特性

3.1.3 特性曲线

结型场效应管的特性曲线包括输出特性曲线和转移特性曲线两种。

1. 输出特性曲线

输出特性曲线是以 u_{GS} 为参量时,漏极电流 i_D 与漏、源电压 u_{DS} 之间的关系曲线。即

$$i_D = f(u_{DS}) \big|_{u_{GS}=\text{常数}}$$

图 3.5(b)表示了 N 沟道结型场效应管的输出特性曲线,它可分为以下四个区域:

(1) 可变电阻区 I (非饱和区): 指图中预夹断轨迹线左边的部分,它反映了 u_{DS} 较小时管子处在预夹断前的 u_{DS} 与漏极电流 i_D 间的关系。该区的特点是当 u_{DS} 增加时, i_D 随 u_{DS} 线性增加,但 u_{GS} 不同时, i_D 增加的斜率不同。在此区域内,场效应管的漏、源极之间可以看作是一个由栅、源电压 u_{GS} 控制的可变电阻 r_{DS} 。

(2) 恒流区 II (饱和区): 指图中近似水平部分的区域。表示管子在预夹断后 u_{DS} 与 i_D 的关系,该区的特点是 i_D 的大小受 u_{GS} 的控制而与 u_{DS} 的大小基本无关。场效应管在作放大器使用时一般工作在此区域,所以该区也称为线性放大区。

(3) 击穿区 III: 指图中的最右部分,当 u_{DS} 升高到一定程度时,致使反向偏置的 PN 结发生雪崩击穿, i_D 将突然增大,因此 III 区称为击穿区。进入雪崩击穿后,管子不能正常工作,甚至很快烧毁。所以,场效应管不允许工作在这个区域。由于 u_{DS} 愈负时,达到雪崩击穿所需的 $U_{(BR)DS}$ 的电压愈小,故对应于 u_{GS} 愈负的特性曲线击穿愈早。其击穿电压用 $U_{(BR)DS}$ 表示,在图 3.5(a)中,当 $u_{GS} = 0$ 时,其击穿电压用 $U_{(BR)DS}$ 表示。

(4) 夹断区 IV (截止区): 当 $|u_{GS}| > |U_P|$ 时,沟道被夹断, $i_D \approx 0$,此区域称为夹断区或截止区,它对应于靠近横轴的部分。此区的特点是场效应管的漏、源极之间可看作开关断开。

2. 转移特性曲线

电流控制器件晶体管的工作性能是通过它的输入和输出特性及一些参数来反映的。场效应管是电压控制器件,由于栅极输入端基本上没有电流,故讨论它的输入特性是没有意义的。它除了用输出特性及一些参数来描述其性能外,还可以用转移特性来描述其性能。在一定的漏、源电压 u_{DS} 下,栅、源电压 u_{GS} 与漏极电流 i_D 的关系曲线称为转移特性,即

$$i_D = f(u_{GS}) \mid u_{DS} = \text{常数}$$

它反映栅极电压对漏极电流的控制作用。

转移特性和输出特性同样是反映场效应管工作时, u_{DS} 、 u_{GS} 和 i_D 三者之间的关系,所以它们之间是可以相互转化的。转移特性曲线可直接从输出特性上用作图法求出。例如,在图 3.6 右边所示的输出特性中,作 $u_{DS} = U_{DS1}$ 的一条垂直线,此垂直线与各条输出特性曲线的交点分别为 1、2、3 和 4,将 1、2、3 和 4 各点相应的 i_D 及 u_{GS} 值画在 i_D - u_{GS} 的直角坐标系中,就可得到图 3.6 左边所示的转移特性曲线 $i_{D1} = f(u_{GS}) \mid u_{DS} = U_{DS1}$ 。不同的 u_{DS} 所对应的转移特性曲线是不重合的, u_{DS} 越小,曲线的斜率越小,如图 3.6 中 $U_{DS1} > U_{DS2}$,显然,转移特性曲线 $i_{D1} = f(u_{GS}) \mid u_{DS} = U_{DS1}$ 的斜率大于转移特性曲线 $i_{D2} = f(u_{GS}) \mid u_{DS} = U_{DS2}$ 的斜率。

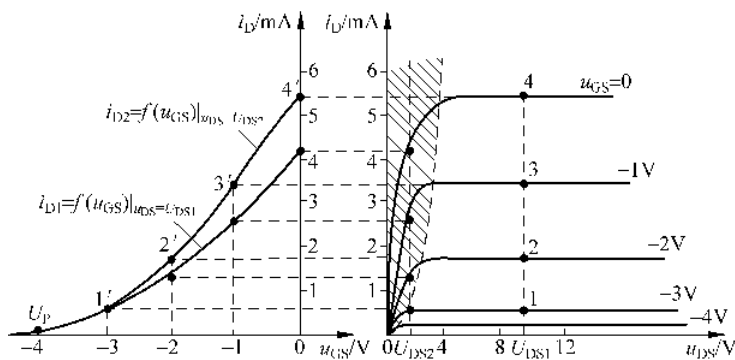


图 3.6 N 沟道结型场效应管转移特性曲线

由于在饱和区内,不同 u_{DS} 的转移特性是很接近的,这是因为在饱和区 i_D 几乎不随 u_{GS} 而改变。因此可用一条转移特性曲线来表示恒流区中的转移特性,使分析得到简化。实验表明,在 $U_P \leq u_{GS} \leq 0$ 范围内,即在饱和区内, i_D 随 u_{GS} 的增加(负数减少)近似按平方规律上升,因而有

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_P} \right)^2 \quad (U_P \leq u_{GS} \leq 0) \quad (3.2)$$

式中 I_{DSS} 为 $u_{GS} = 0$ 、 u_{DS} 增加到使场效应管产生预夹断时的饱和漏极电流。这样,只要给出 I_{DSS} 和 U_P 就可以把转移特性曲线中的其他点近似计算出来。

3.1.4 主要参数

1. 夹断电压 U_P

指 u_{DS} 为某一确定值,使 i_D 降至某一微小电流时,栅、源之间所需加的电压 $|u_{GS}|$ 。

2. 饱和漏极电流 I_{DSS}

指在 $u_{GS} = 0$ 的条件下,场效应管进入预夹断点时的漏极电流,它也是结型场效应管能

够输出的最大电流。

3. 最大漏、源电压 $U_{(BR)DS}$

指管子发生雪崩击穿、 i_D 急剧上升时的 u_{DS} 值。由于加到 PN 结上的反向电压与 u_{GS} 有关,故 $|u_{GS}|$ 值愈大, $U_{(BR)DS}$ 愈小。

4. 最大栅、源电压 $U_{(BR)GS}$

指使栅、源极之间的 PN 结反向击穿、栅极电流急剧上升的栅、源电压值。

5. 最大耗散功率 P_{DM}

指管子工作时允许的最大耗散功率,它等于 u_{DS} 和 i_D 的乘积,即 $P_{DM} = u_{DS} i_D$ 。当耗散功率超过此值时,会使管子温度过高而损坏。

6. 直流输入电阻 R_{GS}

指漏、源极间短路,在栅、源极之间加上一定电压时栅、源间的直流电阻。

7. 低频互导 g_m

指 u_{DS} 为某一确定值时,漏极电流的微小变化量与引起它变化的栅、源电压的微小变化量之比,即转移特性曲线的斜率

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{DS}=\text{常数}} \quad (3.3)$$

g_m 体现栅、源电压对漏极电流的控制能力,是表征场效应管放大能力的一个重要参数,单位为 mS 或 μS 。 g_m 一般在十分之几 mS 至几 mS 的范围内,特殊的可达 100mS ,甚至更高。值得注意的是,互导随管子的工作点不同而改变,它是场效应管小信号建模的重要参数之一。漏、源电压 u_{DS} 愈高,互导 g_m 愈大。

如果手头没有场效应管的特性曲线,则可利用式(3.2)和式(3.3)近似估算 g_m 值,即

$$g_m = \frac{d\left[I_{DSS}\left(1 - \frac{u_{GS}}{U_P}\right)^2\right]}{du_{GS}} = -\frac{2I_{DSS}\left(1 - \frac{u_{GS}}{U_P}\right)}{U_P} \quad (\text{当 } U_P \leq u_{GS} \leq 0 \text{ 时}) \quad (3.4)$$

8. 输出电阻 r_d

在 u_{GS} 等于常数时,漏、源电压的微变量和引起这个变化的漏极电流的微变量之比就是输出电阻 r_d ,即

$$r_d = \left. \frac{\partial u_{DS}}{\partial i_D} \right|_{u_{GS}=\text{常数}} \quad (3.5)$$

输出电阻 r_d 说明了 u_{DS} 对 i_D 的影响,是输出特性曲线某一点上切线斜率的倒数。在饱和区(即线性放大区), i_D 随 u_{DS} 改变很小,因此 r_d 的数值很大,一般在几十千欧到几百千欧之间。

除了以上参数外,场效应管还有噪声系数、高频参数、极间电容等其他参数。场效应管的噪声系数很小,可达 1.5dB 以下。表 3.1 列出了几种典型的 N 沟道结型场效应管的主要参数。

表 3.1 场效应管主要参数

参数名称	零栅压漏极电流	夹断电压或开启电压	共源小信号低频互导	极间电容		低频噪声	最大漏栅电压	最大漏源电压	最大栅源电压	最大耗散功率	储藏温度	最大漏源电流	备 注
参数符号	I_{DSS}	U_P 或 U_T	g_m	C_{gs}	C_{gd}	F	U_{DG}	U_{DS}	U_{GS}	P_{DM}	T_s	I_{DM}	
单位	mA	V	mS	pF	pF	dB	V	V	V	mW	℃	mA	
CS4868 (2N4868)	1~3	-1~-3	1~3	<25	<5	<1	40	40	-40	300	-55~175		JFET,用作低噪声音频和亚音频放大
CS4393 (2N4393)	5~30	-0.3~-3		<14	<3.5		40	40	-40	380~1800	-65~200	30	N 沟道 JFET,作模拟开关、斩波用
CS446 (3DJ9)	18	-7	3~9	<2.8	<0.9		20	20	20	100	-55~+175		N 沟道 JFET,在 400MHz 以下的高输入阻抗电路中作高频放大用
DZ302	50~250	-5	>30			$V_n < 2nV/\sqrt{Hz}$	20	20	20	200	-55~+175		N 沟道 JFET,弱信号低噪声前置放大和视频信号处理
CS187 (3N187)	5~30	-0.5~-4	>7	4~8.5	<0.03	4.5		20	$\pm 6.5 \sim 12$	330	-65~+175	50	N 沟道耗尽型双栅 MOS 管,用作高放、中放和混频用
CS430 (U430) CS431(U431)	12~60	-1~-6	10	<5	<2.5	$10nV/\sqrt{Hz}$		25	25	一边 300 两边 500	-65~+200		硅 N 沟道 JFET 配对管,用于差放和平衡混频用
3C01		-2~-6	0.5~3				20	15	20	100	-55~+175	15	P 沟道增强型 MOS 管
CX591	20~120	-5	>20			<2.2	6	8	6	50	-55~+175	20~120	砷化镓微波低噪声 FET,用作低噪声放大、振荡和混频等
CX621	>35	<-15	>20				8	8	8	500	-55~+175	>35	砷化镓微波 FET,用作前置放大、振荡和混频

3.2 金属-氧化物-半导体场效应管

结型场效应管的输入电阻虽然一般可达 $10^6 \sim 10^9 \Omega$, 但由于这个电阻从本质上来说是 PN 结的反向电阻, PN 结反向偏置时总会有一些反向电流存在, 这就限制了输入电阻的进一步提高, 在有些要求更高的场合仍不能满足要求。而金属-氧化物-半导体场效应管(简称 MOS 场效应管)是利用半导体表面的电场效应进行工作的。由于它的栅极处于不导电(绝缘)状态, 因而具有更高的输入电阻(可达 $10^{15} \Omega$), 也由此得名为绝缘栅场效应管。

MOS 场效应管也可分为 N 沟道和 P 沟道两类, 每一类又分为增强型和耗尽型两种。由于 P 沟道和 N 沟道 MOS 场效应管的工作原理相似, 所以下面以 N 沟道为主先讨论增强型 MOS 场效应管的工作原理及伏安特性, 然后指出耗尽型场效应管的特点。

3.2.1 N 沟道增强型 MOS 场效应管

所谓增强型就是指 $u_{GS}=0$ 时, 没有导电沟道, 即 $i_D=0$ 。

1. 基本结构

N 沟道增强型 MOS 场效应管的结构如图 3.7(a)所示。它是以一块掺杂浓度较低、电阻率较高的 P 型硅片作衬底(B), 利用扩散的方法在其表面形成两个高掺杂的 N^+ 区, 并引出两个铝电极, 分别称为源极(s)和漏极(d), 然后在 P 型硅表面上生长一层很薄的二氧化硅绝缘层, 最后在漏、源极之间的绝缘层上再制造一个铝电极, 称之为栅极(g)。N 沟道增强型 MOS 场效应管的符号如图 3.7(b)所示, 箭头方向表示由 P(衬底)指向 N(沟道)。对于 P 沟道 MOS 场效应管, 其箭头方向与上述相反, 如图 3.7(c)所示。

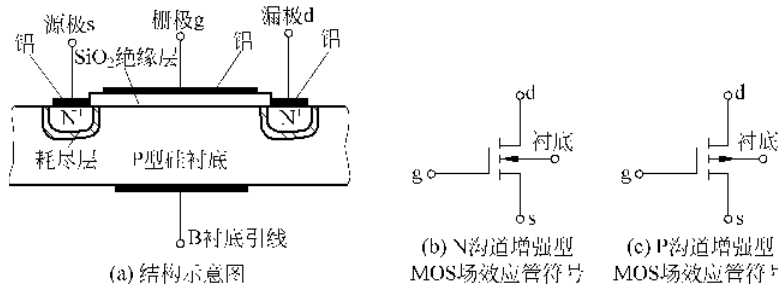


图 3.7 N 沟道增强型 MOS 场效应管

2. 工作原理

结型场效应管是通过改变 PN 结反向电压 u_{GS} , 来控制 PN 结的阻挡层的宽窄, 从而改变导电沟道的宽度, 达到控制漏极电流 i_D 的目的。而 MOS 场效应管则是利用栅、源电压的大小, 来改变半导体表面感生电荷的多少, 从而控制漏极电流的大小。

场效应管工作时, 通常将其衬底与源极连在一起, 在漏极与源极之间接入适当大小的

漏、源正向电压 u_{DS} 。对于 N 沟道增强型 MOS 场效应管而言,所接电源极性如图 3.8 所示。由于 N^+ 型漏区与 N^+ 型源区之间被 P 型衬底隔开,其间形成两个背靠背的 PN 结,当 $u_{GS}=0$ 时,不管 u_{DS} 的极性如何,其中总有一个 PN 结反向偏置,此时漏、源之间的电阻很大,没有形成导电沟道,所以 $i_D \approx 0$ 。如图 3.8(a) 所示。

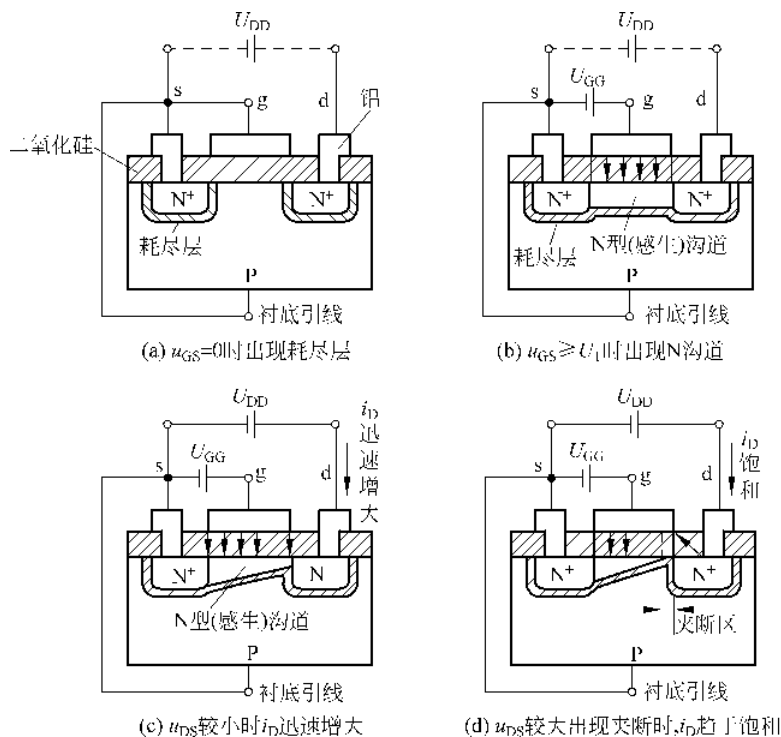


图 3.8 N 沟道增强型 MOS 场效应管工作原理示意图

当 $u_{DS}=0$ 、 u_{GS} 大于 0 时,则栅极和衬底之间由于绝缘层的存在而产生电场效应, u_{GS} 增加,则电场作用力增加,它将吸引自由电子而排斥空穴,在靠近栅极附近的 P 型衬底中留下带负电的受主离子,形成耗尽层,同时 P 型衬底中的少数载流子自由电子被吸引到衬底表面。当 u_{GS} 增大到一定值(U_T)时,吸引到表面层的自由电子较多,在耗尽层和绝缘层之间形成一个 N 型薄层,由于它的性质与 P 型区相反,故称为反型层,这个反型层就是沟通源区和漏区的导电沟道,称为 N 沟道。由于它是栅、源正电压感应产生的,所以也称感生沟道,如图 3.8(b) 所示。

一旦出现了感生沟道,原来被 P 型衬底隔开的两个 N^+ 型区(源区和漏区)就被感生沟道连在一起了,此时场效应管处于导通状态。在一定漏、源电压 u_{DS} 作用下,使管子由截止变为导通的临界栅、源电压 u_{GS} 称为开启电压 U_T 。这种 $u_{GS}=0$ 时漏极与源极间无导电沟道,只有当 u_{GS} 增加到一定值时才能形成导电沟道的场效应管称为增强型场效应管。图 3.7 所示的增强型 MOS 场效应管符号中的断开线是增强型场效应管的标志特点。

当 $u_{GS} \geq U_T$,外加的 u_{DS} 较小时,漏极电流 i_D 将随 u_{DS} 上升迅速增大,由于沟道存在电位梯度,因此沟道厚度是不均匀的,靠近源端厚,靠近漏端薄。如图 3.8(c) 所示。当 u_{DS} 增加到使 $u_{GD}=U_T$ 时,沟道在漏极处附近出现预夹断,如图 3.8(d) 所示。随 u_{DS} 继续增加,夹断

区增长,但沟道电流基本保持不变。这种情况与结型场效应管相似,不再赘述。

3. 特性曲线与电流方程

N 沟道增强型 MOS 场效应管的输出特性曲线和转移特性曲线如图 3.9(a)、(b)所示。输出特性曲线也可分为可变电阻区Ⅰ、恒流区Ⅱ、夹断区Ⅲ和截止区Ⅳ。图 3.9(b)中只画出了管子工作在恒流区时对应的转移特性曲线。在恒流区内电流方程为

$$i_D = I_{D0} \left(\frac{U_{GS}}{U_T} - 1 \right)^2$$

式中 I_{D0} 为 $u_{GS}=2U_T$ 时的 i_D 值。

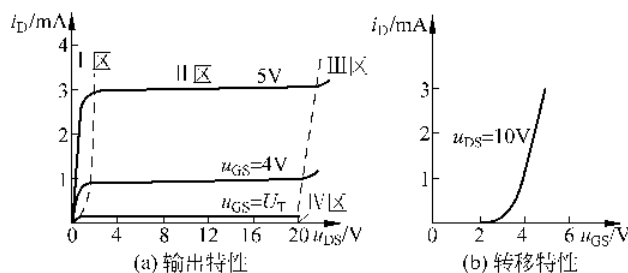


图 3.9 N 沟道增强型 MOS 场效应管的特性曲线

3.2.2 N 沟道耗尽型 MOS 场效应管

如果在制造管子时,在二氧化硅绝缘层里掺入大量的正离子,即使不外加栅、源电压,在这些正离子的作用下,P 型衬底表面已经出现反型层,形成导电沟道,只要外加漏、源电压就有漏极电流流过。这种在 $u_{GS}=0$ 时漏、源之间已存在导电沟道的 MOS 场效应管称为耗尽型 MOS 场效应管。N 沟道耗尽型 MOS 场效应管的结构示意图和符号如图 3.10 所示。

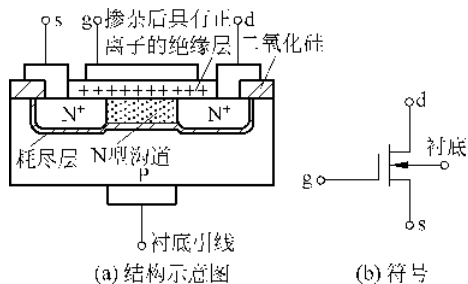


图 3.10 N 沟道耗尽型 MOS 场效应管

当 $u_{GS}>0$ 时,导电沟道增宽, i_D 增大;反之,当 $u_{GS}<0$ 时,导电沟道变窄, i_D 减小。当 u_{GS} 负向增加到某一数值时,导电沟道消失, i_D 趋向于零,管子截止,此时的栅、源电压 u_{GS} 称为夹断电压,仍用 U_P 表示。这是与结型场效应管相类似的,所以称它为耗尽型。所不同的是,N 沟道结型场效应管,当 $u_{GS}>0$ 时,将使 PN 结处于正向偏置而产生较大的栅流,破坏了它对漏极电流 i_D 的控制作用。但是 N 沟道耗尽型 MOS 场效应管在 $u_{GS}>0$ 时,由于绝缘层的存在,并不会产生 PN 结的正向电流,而是在沟道中感应出更多的负电荷,在 u_{DS} 作用下, i_D 将具有更大的数值。

这种在一定范围内 u_{GS} 的正、负值均可控制 i_D 的大小的特性是耗尽型 MOS 场效应管的一个重要特点。N 沟道耗尽型 MOS 场效应管的特性曲线如图 3.11(a)、(b)所示。