

第 3 章

场效应管及其基本放大电路

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,通常仅为 $10^2 \sim 10^4 \Omega$ 。

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,因而极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、特性曲线及主要参数,然后介绍场效应管的特点和放大电路。

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。

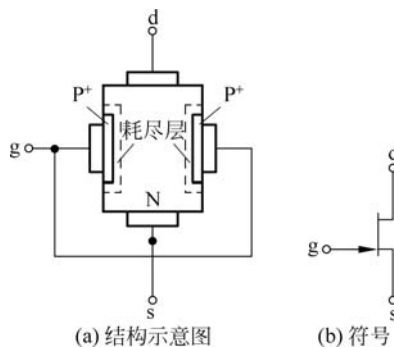


图 3.1 N 沟道结型场效应管

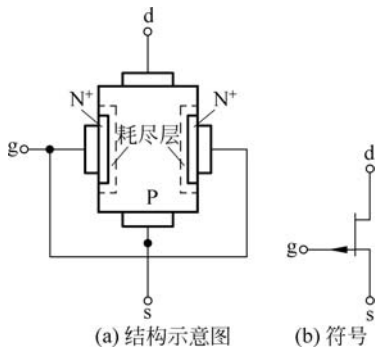


图 3.2 P 沟道结型场效应管

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。

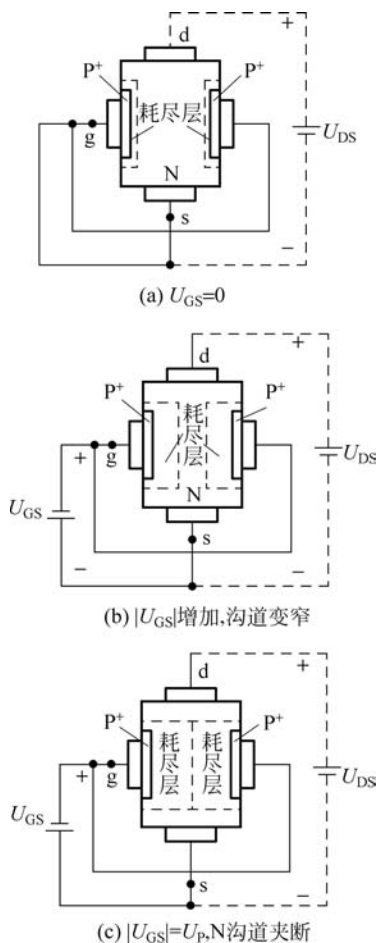
当 N 沟道结型场效应管处在放大状态时,在栅、源极之间加反向电压 U_{GS} ,栅极电流 $I_G \approx 0$,场效应管呈现高达 $10^7 \Omega$ 以上的输入电阻。而在漏、源极之间加正向电压 U_{DS} ,使 N 沟道中的多数载流子(自由电子)在电场作用下由源极向漏极运动,形成电流 I_D 。 I_D 的大小受 U_{GS} 的控制。因此,讨论结型场效应管的工作原理就是讨论 U_{GS} 对 I_D 的控制作用和 U_{DS} 对 I_D 的影响。

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,两个 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

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

导电沟道电流的目的。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

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

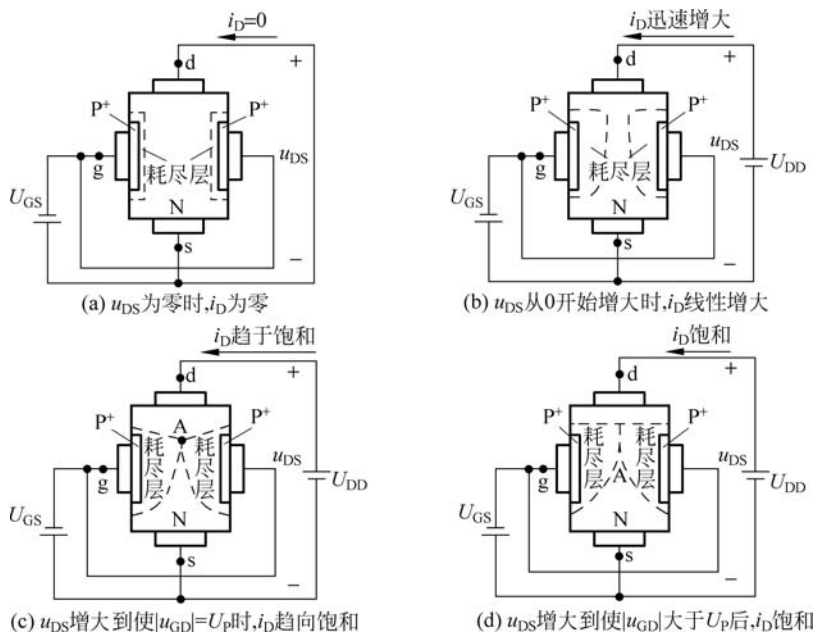


图 3.4 u_{GS} 一定时, u_{DS} 对导电沟道的影响

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 3.4(d)所示。但由于夹断处场强也增大,仍能电子拉过夹断区(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、源电压越负,则耗尽层越宽,沟道电阻就越大,相应的 i_D 就越小。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。

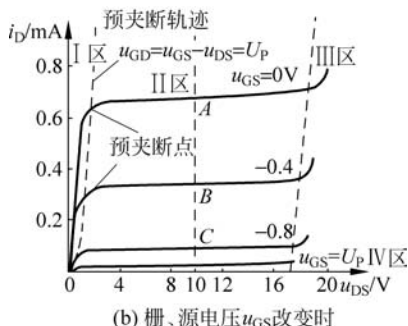
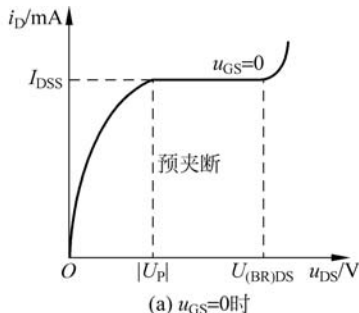


图 3.5 N 沟道结型场效应管的输出特性曲线

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

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

图 3.5(b)表示 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} 越负时,达到雪崩击穿所需的 $U_{(BR)DS}$ 的电压越小,故对应于 u_{GS} 越负的特性曲线击穿越早。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 所示, $U_{DS1} > U_{DS2}$,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。

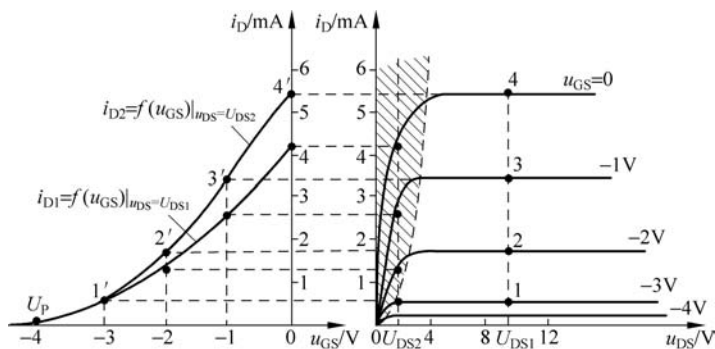


图 3.6 N 沟道结型场效应管转移特性曲线

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 $U_P \leq u_{DS} \leq 0$ 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

夹断电压指 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}

饱和漏极电流指在 $u_{GS}=0$ 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 $U_{(BR)DS}$

最大漏、源电压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 $|u_{GS}|$ 值越大, $U_{(BR)DS}$ 越小。

4. 最大栅、源电压 $U_{(BR)GS}$

最大栅、源电压指使栅、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}

最大耗散功率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}

直流输入电阻指漏、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

低频互导指 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为

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

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} 越高,互导 g_m 越大。

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

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

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,一般在几十千欧至几百千欧。

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

效应管	零栅压漏极电流 I_{DSS}/mA	夹断电压或开启电压 U_P 或 U_T/V	共源小信号低频互导 g_m/mS	极间电容 /pF		低频噪声 F/dB	最大漏栅电压 U_{DG}/V	最大漏源电压 U_{DS}/V	最大栅源电压 U_{GS}/V	最大耗散功率 P_{DM}/mW	储藏温度 $T_S/^\circ\text{C}$	最大漏源电流 I_{DM}/mA	备 注
				C_{gs}	C_{gd}								
CS468 (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, 作模拟开关和波用
CS146 (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			$V_n < 2nV/\sqrt{\text{Hz}}$	20	20	20	200	-55~+175		N 沟道 JFET, 弱信号低噪声前置放大和视音频信号处理
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	$10nV/\sqrt{\text{Hz}}$		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。

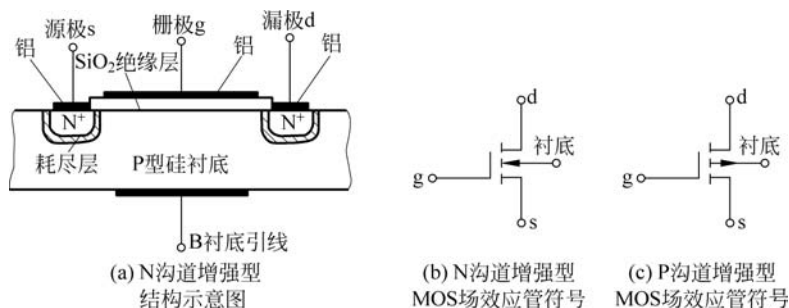


图 3.7 增强型 MOS 场效应管

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。

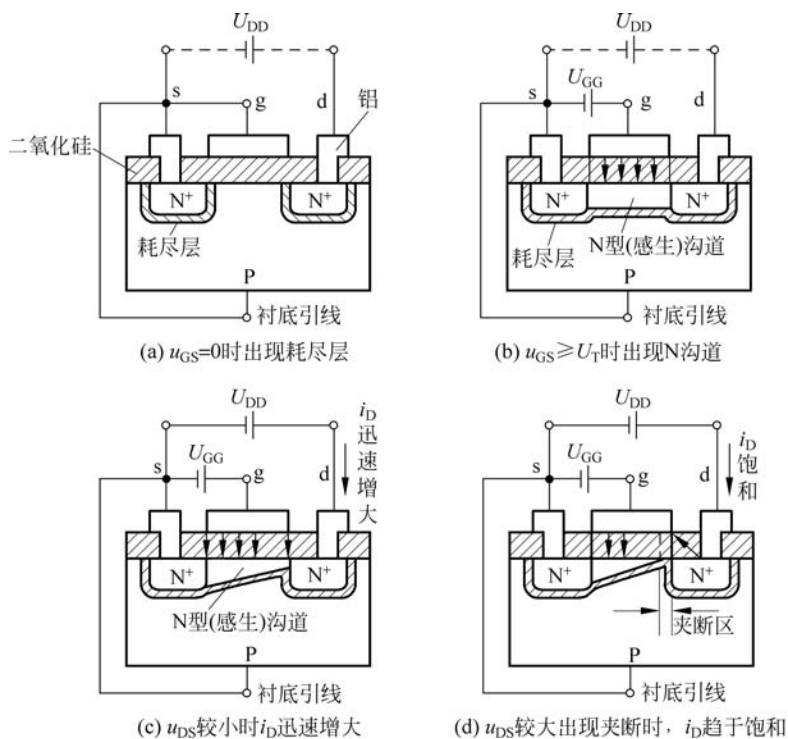


图 3.8 N 沟道增强型 MOS 场效应管工作原理示意图

当 $u_{DS}=0$ 、 $u_{GS}>0$ 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。

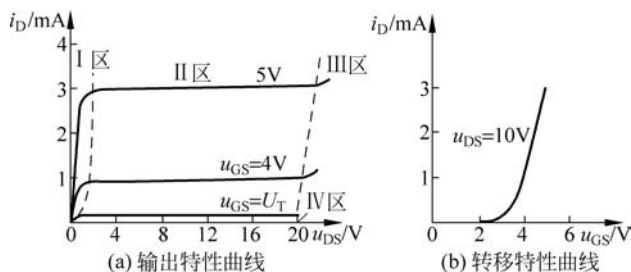


图 3.9 N 沟道增强型 MOS 场效应管的特性曲线

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。

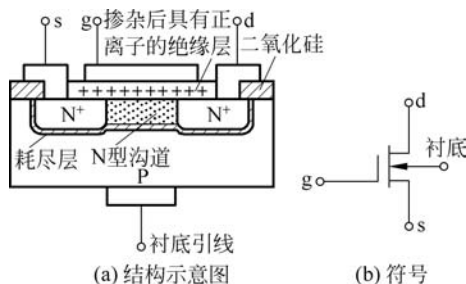


图 3.10 N 沟道耗尽型 MOS 场效应管

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。

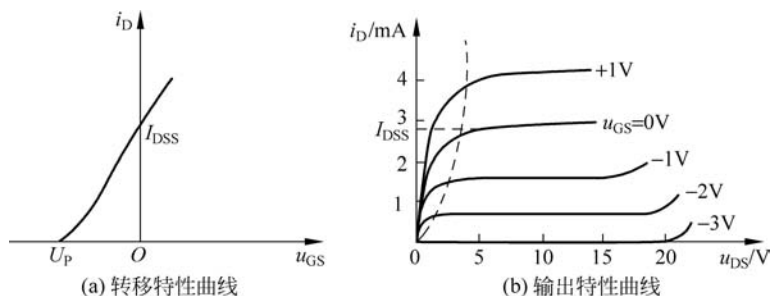


图 3.11 N 沟道耗尽型 MOS 场效应管的特性曲线

3.2.3 P 沟道 MOS 场效应管

P 沟道 MOS 场效应管与 N 沟道 MOS 场效应管的结构正好对偶, N 型衬底、P 型沟道, 所以上面对 N 沟道 MOS 场效应管工作原理及特性的分析也基本上适用于 P 沟道 MOS 场效应管, 只是使用时注意各电源电压极性与 N 沟道 MOS 场效应管正好相反。增强型 P 沟道 MOS 场效应管的开启电压 U_T 为负值, 耗尽型 MOS 场效应管制作时在绝缘层中掺入负离子, 其夹断电压 U_P 也为负值。

3.2.4 MOS 场效应管的主要参数

耗尽型 MOS 场效应管的主要参数与结型场效应管完全相同, 增强型 MOS 场效应管的主要参数也与结型场效应管基本相同, 只是没有夹断电压这一参数, 取代它的是开启电压 U_T 。开启电压 U_T 是指当 u_{DS} 为某一固定值时能产生 i_D 所需的最小 $|u_{GS}|$ 值。

由于 MOS 场效应管输入电阻极大, 使得栅极的感应电荷不易泄放, 加上二氧化硅绝缘层极薄, 栅极和衬底之间的电容量很小, 故栅极上只要有极小的感应电荷就极易产生高压, 使管子击穿。因此, 当 MOS 场效应管不使用时, 应使其三个电极短路, 以免外电场作用而使管子损坏。使用 MOS 场效应管时, 要注意在栅、源之间保持直流通路, 不要使栅极悬空。另外, MOS 场效应管的衬底和源极通常是接在一起的, 即使分开, 也应保证衬底和源极之间的 PN 结反向偏置, 以使管子正常工作。

3.3 场效应管的特点

场效应管具有放大作用, 可以组成各种放大电路, 它与双极型晶体管相比, 具有如下几个特点:

(1) 场效应管是一种电压控制器件, 它通过 u_{GS} 来控制 i_D 。而双极型晶体管是电流控制器件, 通过 I_B 来控制 I_C 。

(2) 场效应管输入端几乎没有电流, 所以其直流输入电阻和交流输入电阻都非常高。而双极型晶体管, 发射结始终处于正向偏置, 总是存在输入电流, 故输入电阻较小。

(3) 由于场效应管是利用多数载流子导电的,因此,与双极型晶体管相比,具有噪声小、受辐射的影响小、热稳定性较好等特性。特别是存在零温度系数工作点,即在不同温度下,同一场效应管的转移特性曲线有几条交于一点,若放大电路中场效应管的栅极电压选在该点,则当温度改变时 i_D 的值不变,该点称为零温度系数工作点。

(4) 由于场效应管的结构对称,有时漏极和源极可以互换使用,而各项指标基本上不受影响,因此应用比较方便、灵活。对于有的绝缘栅场效应管,制造时源极已与衬底连在一起,则漏极和源极不能互换。

(5) 场效应管的制造工艺简单,有利于大规模集成。特别是 MOS 电路,硅片上每个 MOS 场效应管所占面积是晶体管的 5%,因此集成度更高。目前,大规模和超大规模集成电路主要由 MOS 电路构成。

(6) 由于 MOS 场效应管的输入电阻高,因此,由外界静电感应所产生的电荷不易泄漏。为此,在存放时应将各电极引线短接。焊接时,要注意将电烙铁外壳接上可靠地线,或者在焊接时,将电烙铁与电源暂时脱离。

(7) 场效应管的互导较小,当组成放大电路时,在相同的负载电阻时,电压放大倍数比双极型晶体管低。

为便于比较和记忆,将各种场效应管的符号和特性曲线列于表 3.2 中。

表 3.2 各种场效应管的符号和特性曲线比较

结构种类	工作方式	符 号	电压极性		转移特性曲线 $i_D=f(u_{GS})$	输出特性曲线 $i_D=f(u_{DS})$
			U_P 或 U_T	U_{DS}		
N 沟道 MOS 场效应管	耗尽型		(-)	(+)		
	增强型		(+)	(+)		
P 沟道 MOS 场效应管	耗尽型		(+)	(-)		

续表

结构种类	工作方式	符号	电压极性		转移特性曲线 $i_D = f(u_{GS})$	输出特性曲线 $i_D = f(u_{DS})$
			U_P 或 U_T	U_{DS}		
P 沟道 MOS 场效应管	增强型		(-)	(-)		
P 沟道 JFET	耗尽型		(+)	(-)		
N 沟道 JFET	耗尽型		(-)	(+)		

注： i_D 的假定正向为流进漏极。

3.4 场效应管放大电路

场效应管与双极型晶体管都具有放大作用,都存在着三个极,其对应关系为:栅极 g 对应基极 b ;源极 s 对应发射极 e ;漏极 d 对应集电极 c ,所以可组成相应的场效应管放大电路。但由于两种放大器件各自的特点不同,故不能将双极型晶体管放大电路的晶体管,简单地用场效应管取代,组成场效应管放大电路。

3.4.1 场效应管的直流偏置电路

由场效应管组成的放大电路和晶体管一样,要建立合适的静态工作点 Q ,避免输出波形产生严重的非线性失真。所不同的是,场效应管是电压控制器件,因此它需要有合适的栅极电压。通常偏置的形式有两种,现以 N 沟道耗尽型结型场效应管为例说明如下。

1. 自偏压电路

图 3.12(a)为自偏压电路,它适用于结型场效应管或耗尽型场效应管。它和晶体管的射极偏置电路相似,通常在漏极接入漏极电阻 R_d 。考虑到结型场效应管只能工作在 $U_{GS} < 0$

的区域,而 $I_G \approx 0$, R_g 上没有压降,栅极的直流电位与“地”电位相等,所以源极是经电阻 R 接地,依靠漏极电流 I_D 在 R 上的电压降,使电路自行提供栅极偏压,即

$$U_{GS} = -I_D R \quad (3.6)$$

由此得名自偏压电路。显然,式(3.6)为一直线方程,称为自偏压电路的偏置线方程。为减少 R 对放大倍数的影响,在 R 两端同样也并联一个足够大的旁路电容 C ,称为源极旁路电容。

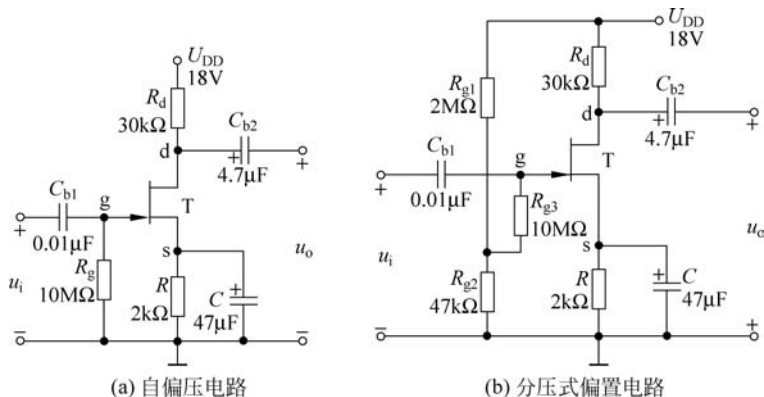


图 3.12 场效应管的直流偏置电路

2. 分压式偏置电路

虽然自偏压电路比较简单,但当静态工作点决定后, U_{GS} 和 I_D 也就确定了,因而 R 可选择的范围很小。分压式偏置电路是在图 3.12(a) 的基础上加接分压电阻后构成的,如图 3.12(b) 所示。为了不使分压电阻 R_{g1} 、 R_{g2} 对放大电路的输入电阻影响太大,故通过 R_{g3} 与栅极相连,供给栅极电压 $U_G = R_{g2} U_{DD} / (R_{g1} + R_{g2})$, 同时漏极电流在源极电阻 R 上也产生压降 $U_S = I_D R$, 因此,静态时加在场效应管上的栅、源电压为

$$U_{GS} = U_G - U_S = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} U_{DD} - I_D R = - \left(I_D R - \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} U_{DD} \right) \quad (3.7)$$

同样,式(3.7)也是一直线方程,称为分压式偏置电路的偏置线方程。这种偏压电路的另一特点是适用于增强型管子的电路。

3.4.2 静态分析

对场效应管放大电路的静态分析一般可采用图解法和公式计算法。图解法的原理和晶体管相似。下面讨论用公式进行计算以确定 Q 点。

场效应管的 I_D 和 U_{GS} 的关系可用转移特性近似计算公式(3.2)近似表示,即

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2, \quad U_P \leq U_{GS} \leq 0 \quad (3.8)$$

式中, I_{DSS} 为饱和漏极电流; U_P 为夹断电压,可由手册查出。

联立求解转移特性近似计算公式和偏置线方程即可得到图 3.12(a)、(b) 电路的静态值

I_D 和 U_{GS} 。为使工作点受温度的影响达到最小,应尽量将栅偏压设置在零温度系数附近。

例 3.1 电路参数如图 3.12(b)所示, $R_{g1}=2M\Omega$, $R_{g2}=47k\Omega$, $R_d=30k\Omega$, $R=2k\Omega$, $U_{DD}=18V$, 场效应管的 $U_P=-1V$, $I_{DSS}=0.5mA$, 试确定 Q 点。

解 根据式(3.8)和式(3.7)有

$$\begin{cases} I_D = 0.5 \times \left(1 + \frac{U_{GS}}{1}\right)^2 (\text{mA}) \\ U_{GS} = \frac{47 \times 18}{2000 + 47} - 2I_D = (0.4 - 2I_D) (\text{V}) \end{cases}$$

将上式中 U_{GS} 的表达式代入 I_D 的表达式,得

$$I_D = 0.5 \times (1 + 0.4 - 2I_D)^2 (\text{mA})$$

解得

$$I_D = (0.95 \pm 0.64) \text{mA}$$

因 $I_{DSS}=0.5\text{mA}$, 而 $-1 \leq U_{GS} \leq 0$, I_D 不应大于 1mA , 所以

$$I_D = I_{DQ} = (0.95 - 0.64) \text{mA} = 0.31 \text{mA}$$

$$U_{GS} = U_{GSQ} = 0.4 - 2I_D = -0.22 \text{V}$$

$$U_{DS} = U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ}(R_d + R) = 8.1 \text{V}$$

3.4.3 场效应管的微变等效电路

如果输入信号很小,场效应管工作在线性放大区(即输出特性中的恒流区)时,和晶体管一样,可用微变等效电路来分析。

由于场效应管输入端不取电流,输入电阻极大,故输入端可视为开路。场效应管漏电流 i_D 仅是栅、源电压 u_{GS} 和漏、源电压 u_{DS} 的函数,即

$$i_D = f(u_{GS}, u_{DS})$$

其微分方程

$$di_D = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{DS}} du_{GS} + \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \right|_{u_{GS}} du_{DS} \quad (3.9)$$

由式(3.3)低频互导 g_m 的定义和式(3.5)场效应管输出电阻 r_d 的定义得知

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{DS}} \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{r_d} = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \right|_{u_{GS}} \quad (3.11)$$

若用 i_d 、 u_{gs} 、 u_{ds} 分别表示其变化部分,则式(3.9)可写为

$$i_d = g_m u_{gs} + \frac{1}{r_d} u_{ds} \quad (3.12)$$

根据式(3.12),如果用 $g_m \dot{U}_{gs}$ 表示电压 $\dot{U}_{gs}$ 控制的电流源,用 r_d 表示电流源电阻,则和晶体管相似,作为双口有源器件的场效应管,图 3.13(a)也可导出其微变等效电路,如图 3.13(b)所示。图中 r_d 通常在几百千欧的数量级,一般比负载电阻大很多,故在放大电路的微变等效电路可以认为 r_d 开路。因此,微变等效电路 3.13(b)可简化为图 3.13(c)所示。图中 g_m 的数值可从特性曲线上求出,也可通过式(3.4)求得,即

$$g_m = -\frac{2I_{DSS}\left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)}{U_P} \quad (3.13)$$

虽然 g_m 是动态参数,但由式(3.13)得知,它的大小与静态工作点有关。

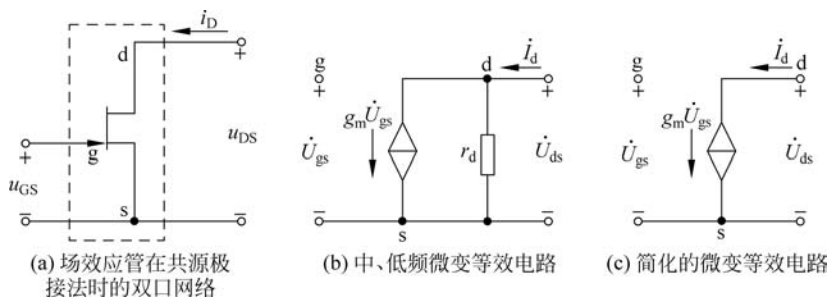


图 3.13 场效应管的微变等效电路

3.4.4 动态分析

动态分析主要应用微变等效电路进行分析,分析步骤和晶体管电路相同。

1. 共源极放大电路

下面对图 3.14(a)所示电路进行动态分析,其放大电路的微变等效电路如图 3.14(b)所示。

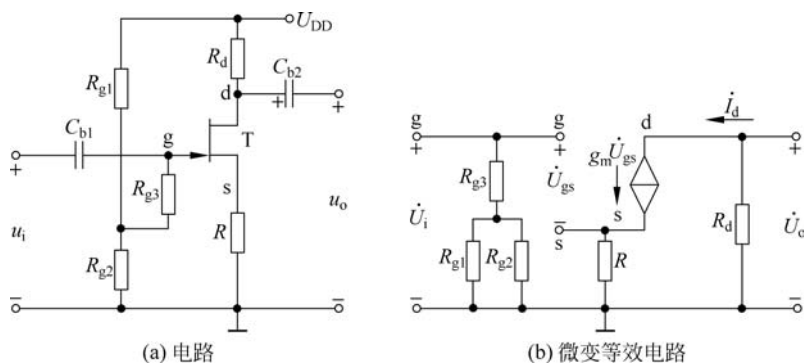


图 3.14 共源极电路及其微变等效电路

1) 电压放大倍数

对微变等效电路的输入和输出回路应用 KVL,分别得出

$$\begin{aligned} \dot{U}_i &= \dot{U}_{gs} + g_m \dot{U}_{gs} R = (1 + g_m R) \dot{U}_{gs} \\ \dot{U}_o &= -g_m \dot{U}_{gs} R_d \end{aligned}$$

所以

$$\dot{A}_{um} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{g_m R_d}{1 + g_m R} \quad (3.14)$$

2) 输入电阻 r_i

由输入回路得

$$r_i = R_{g3} + R_{g1} // R_{g2} \quad (3.15)$$

由于 R_{g1} 、 R_{g2} 主要用来确定静态工作点, 所以, 输入电阻主要由 R_{g3} 确定。一般 R_{g3} 阻值都较高, 常为几百千欧至几兆欧, 甚至几十兆欧。

3) 输出电阻 r_o

将输入端短路, $\dot{U}_i = 0$, 有 $\dot{U}_{gs} = 0$, 则 $\dot{U}_o = R_d \dot{I}_o$, 故输出电阻为

$$r_o = R_d \quad (3.16)$$

例 3.2 计算图 3.15(a) 所示电路的电压放大倍数、输入电阻、输出电阻。电路参数及管子参数为: $R_{g1} = 150\text{k}\Omega$, $R_{g2} = 50\text{k}\Omega$, $R_{g3} = 1\text{M}\Omega$, $R_d = R = 10\text{k}\Omega$, $R_L = 1\text{M}\Omega$, $U_{DD} = 20\text{V}$, $U_P = -5\text{V}$, $I_{DSS} = 1\text{mA}$ 。

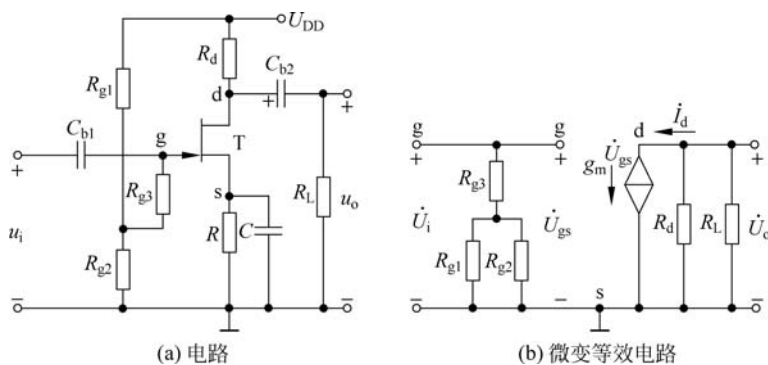


图 3.15 例 3.2 用图

解 因题目中没有给 g_m , 所以先要确定静态工作点, 计算出 g_m , 才能进行动态计算。由式(3.7)和式(3.8)可得

$$\begin{cases} U_{GS} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} U_{DD} - I_D R = \frac{50}{150 + 50} \times 20 - 10 I_D \\ I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2 = 1 \times \left(1 + \frac{U_{GS}}{5} \right)^2 \end{cases}$$

求解上述方程组得

$$\begin{cases} U_{GS} = -1.1\text{V} \\ I_D = 0.61\text{mA} \end{cases}$$

根据式(3.13)计算出

$$g_m = - \frac{2 I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)}{U_P} = \frac{2 \times 1 \times \left(1 + \frac{1.1}{5} \right)}{5} = 0.312$$

然后对图 3.15(a) 所示电路进行动态分析, 作出电路微变等效电路, 如图 3.15(b) 所示。根据图 3.15(b) 有

$$\dot{U}_o = -g_m \dot{U}_{gs} (R_d // R_L) = -g_m \dot{U}_i R'_L$$

所以电压放大倍数为

$$\dot{A}_{um} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -g_m R'_L = -0.312 \times \frac{10 \times 1000}{10 + 1000} \approx -3.12$$

由图 3.15(b)所示的输入、输出回路有

$$r_i = R_{g3} + R_{g1} // R_{g2} = 1000 + \frac{50 \times 150}{50 + 150} = 1038 \approx 1.038(\text{M}\Omega)$$

$$r_o = R_d = 10\text{k}\Omega$$

2. 共漏极放大器(源极输出器)

典型的共漏极放大器(源极输出器),如图 3.16(a)所示,图 3.16(b)所示是微变等效电路。

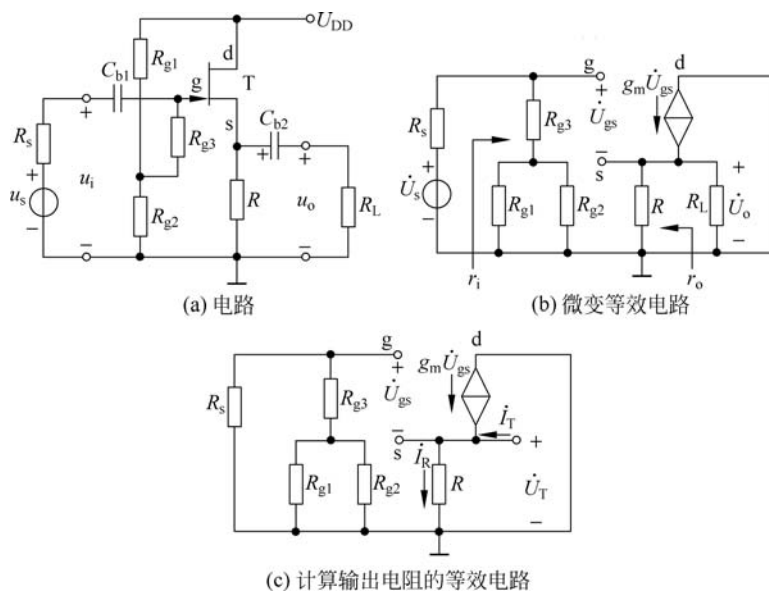


图 3.16 共漏极电路及其微变等效电路

1) 电压放大倍数

由图 3.16(b)得

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs} + g_m \dot{U}_{gs} (R // R_L) = (1 + g_m R'_L) \dot{U}_{gs}$$

$$\dot{U}_o = g_m \dot{U}_{gs} R'_L$$

式中, $R'_L = R // R_L$, 所以

$$\dot{A}_{um} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \quad (3.17)$$

当 $g_m (R // R_L) \gg 1$ 时, $\dot{A}_{um} \approx 1$, 共漏极电路属电压跟随器。与射极输出器的 $\dot{A}_u$ 式(2.36)相比, 可知场效应管的 g_m 相当于晶体管的 $(1 + \beta)/r_{be} \approx \beta/r_{be}$ 。

2) 输入电阻 r_i

由输入回路得

$$r_i = R_{g3} + R_{g1} // R_{g2} \quad (3.18)$$

3) 输出电阻 r_o 。

根据定义令 $\dot{U}_s = 0$, 保留其内阻 R_s , 将 R_L 开路, 在输出端加一测试电压 $\dot{U}_T$, 得一电流 $\dot{I}_T$, 由此可画出求共漏极电路输出电阻 r_o 的电路, 如图 3.16(c) 所示。由图有

$$\dot{I}_T = \dot{I}_R - g_m \dot{U}_{gs} = \frac{\dot{U}_T}{R} - g_m \dot{U}_{gs}$$

而 $\dot{U}_s = 0$, 输入回路电流为零, 所以有

$$\dot{U}_{gs} = -\dot{U}_T$$

于是

$$\dot{I}_T = \frac{\dot{U}_T}{R} + g_m \dot{U}_T = \dot{U}_T \left(\frac{1}{R} + g_m \right)$$

因此

$$r_o = \frac{\dot{U}_T}{\dot{I}_T} = \frac{1}{\frac{1}{R} + g_m} = R // \frac{1}{g_m} \quad (3.19)$$

可见共漏极电路的输出电阻 r_o 等于源极电阻 R 和跨导的倒数 $1/g_m$ 相并联, 因而输出电阻 r_o 较小。

小 结

(1) 场效应管是除双极型晶体管之外的另一种常用半导体器件, 具有与晶体管十分相似的输出特性曲线, 因此也可以用场效应管组成放大电路。与晶体管相比, 二者不同之处在于: 晶体管是电流控制器件, 有两种载流子参与导电, 属于双极型器件; 而场效应管属于单极型器件, 只依靠一种载流子参与导电, 是电压控制器件, 即用栅极电压 U_{GS} 去控制输出电流 I_D , 其电压控制作用表现为 $I_D = g_m U_{GS}$ 。

(2) 虽然场效应管和晶体管这两种器件的控制原理有所不同, 但通过类比可以发现, 将晶体管的三个极 b、e、c 与场效应管的三个极 g、s、d 相对应, 就能得到形式极为相似的场效应管放大电路。

(3) 场效应管放大电路的分析方法仍然是图解法(亦可用公式计算)和微变等效电路分析法。

(4) 在场效应管放大电路中, U_{DS} 的极性决定于沟道性质, N(沟道)为正, P(沟道)为负; 为了建立合适的偏置电压 U_{GS} , 不同类型的场效应管对偏置电压的极性有不同要求: 结型场效应管的 U_{GS} 与 U_{DS} 的极性相反, 增强型 MOS 场效应管 U_{GS} 与 U_{DS} 的极性相同, 耗尽型 MOS 场效应管 U_{GS} 的极性可正、可负、可为零。

(5) 静态分析有图解法和计算法两种。计算法是利用转移特性的近似公式 $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2$ 与偏置线方程 $U_{GS} = f(I_D)$ 联立求解, 即可得静态值。

(6) 动态分析是利用微变等效电路进行分析, 分析方法与晶体管放大电路相同。

习 题

3.1 场效应管称为单极型管,因为_____;半导体性晶体管称为双极型管,因为_____。

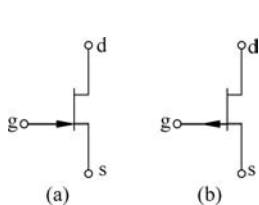
3.2 半导体晶体管属于_____器件,其输入电阻_____;场效应管属于_____器件,其输入电阻_____。

3.3 双极型晶体管(BJT)和场效应管(MOSFET)比较,有下述说法,请在正确的说法后面画“√”,错误的说法后面画“×”。

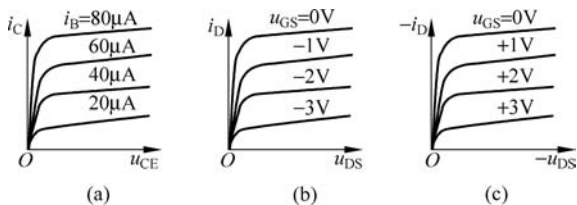
- (1) BJT 有两种载流子参与导电, MOSFET 只有一种。 ()
- (2) BJT 属电压控制型器件, MOSFET 属电流控制型器件。 ()
- (3) BJT 的功耗大于 MOSFET 的功耗。 ()
- (4) BJT 的热稳定性好于 MOSFET 的热稳定性。 ()
- (5) 两者在开关过程中都需要时间,在同样电流下, BJT 的开关速度快于 MOSFET。 ()

3.4 题图 3.4 所示符号各表示哪种沟道的结型场效应管? 其箭头方向代表什么?

3.5 由题图 3.5 所示输出特性曲线,你能分别判断它们各代表何种器件吗? 如是结型场效应管,请说明它属于何种沟道?

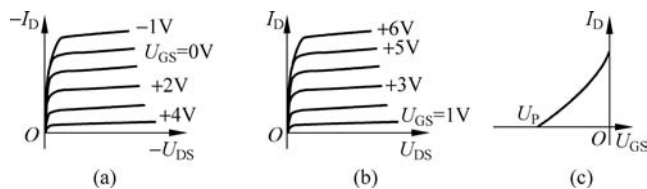


题图 3.4



题图 3.5

3.6 场效应管的输出特性曲线和转移特性曲线如题图 3.6 所示,试标出管子的类型(N 沟道还是 P 沟道,增强型还是耗尽型,结型还是绝缘栅型)。



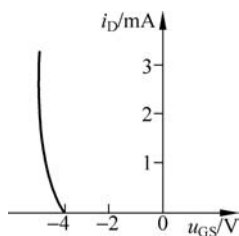
题图 3.6

3.7 一个 MOS 场效应管的转移特性曲线如题图 3.7 所示(其中漏极电流 i_D 的方向是它的实际方向)。试问:

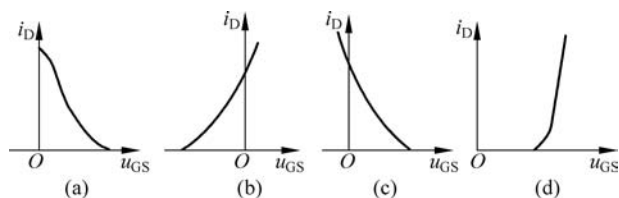
- (1) 该管是耗尽型还是增强型?
- (2) 是 N 沟道场效应管还是 P 沟道场效应管?

(3) 从这个转移特性上可求出该场效应管的夹断电压 U_P 还是开启电压 U_T ? 其值等于多少?

3.8 四个场效应管的转移特性分别如题图 3.8(a)、(b)、(c)、(d)所示,其中漏极电流 i_D 的方向是它的实际方向。试问它们各是哪种类型的场效应管?



题图 3.7



题图 3.8

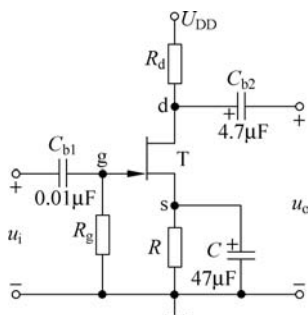
3.9 已知电路形式如题图 3.9 所示,电路参数为 $R_g = 5\text{M}\Omega$, $R_d = 25\text{k}\Omega$, $R = 1.5\text{k}\Omega$, $U_{DD} = 15\text{V}$,管子参数 $U_p = -1\text{V}$ 。试计算静态工作点。

3.10 已知电路参数如题图 3.10 所示,场效应管工作点上的互导 $g_m = 1\text{ms}$,设 $r_d \gg R_d$ 。

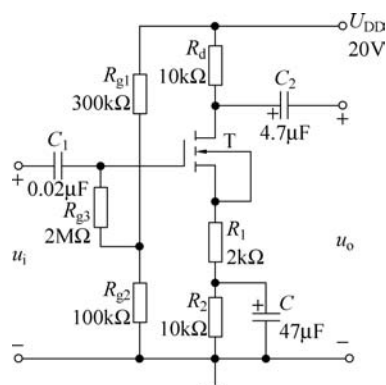
(1) 画出电路的微变等效电路;

(2) 求电压放大倍数 $\dot{A}_{u_m}$;

(3) 求放大器的输入电阻 r_i 。

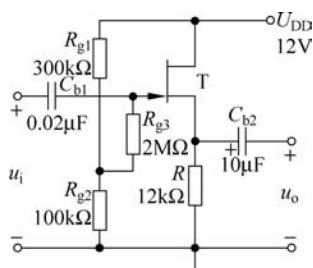


题图 3.9



题图 3.10

3.11 源极输出器电路如题图 3.11 所示。已知结型场效应管工作点上的互导 $g_m = 0.9\text{ms}$,其他参数如图中所示。求电压放大倍数 $\dot{A}_{u_m}$ 、输入电阻 r_i 和输出电阻 r_o 。



题图 3.11