

场效应管也是一类重要的半导体器件,本章在介绍了场效应管的基本结构、工作原理及特性曲线的基础上,讨论了由场效应管组成放大电路的原则,以及场效应管放大电路的基本工作原理和静态、动态情况下电路的分析方法。

场效应管以其优良的品质与性能,使之自 20 世纪 60 年代诞生以来,被广泛用于各类电子电路中。

半导体三极管是通过基极电流控制集电极电流,属于电流型控制器件,而场效应管是通过栅-源之间的电压或电场控制漏极电流的器件,是电压控制型器件,因而称为场效应管。场效应管有许多优良品质,如噪声小、便于集成等,近年来应用广泛。

从结构上来划分,可把场效应管分为结型场效应管(JFET)和绝缘栅型场效应管(MOSFET,简称 MOS)两大类,而每一类又可以细分。下面分别讨论这些场效应管及其电路。

3.1 结型场效应管

3.1.1 结构

根据导电沟道的不同,结型场效应管分为 N 沟道和 P 沟道两种结构形式,工作原理相同。后面均以 N 沟道场效应管为例对其结构、工作原理、放大电路进行讨论。图 3.1.1 是结型场效应管的结构示意图和符号。

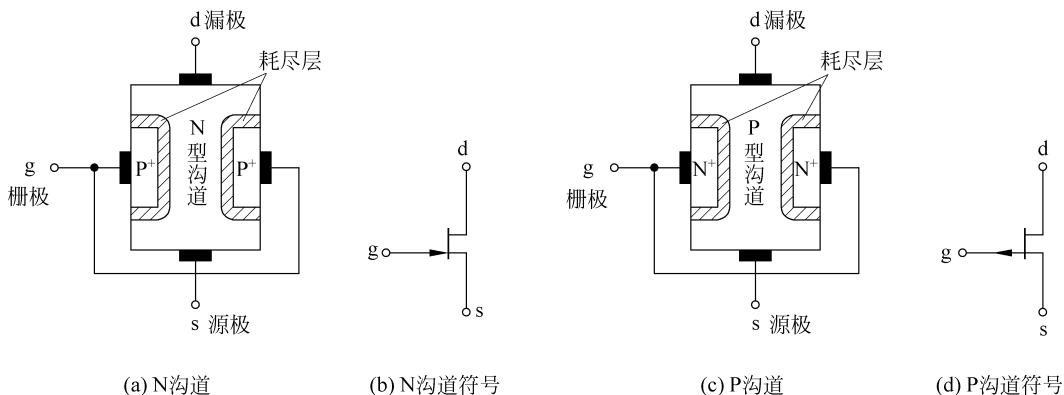


图 3.1.1 结型场效应管结构示意图及符号

图 3.1.1(a) 是 N 沟道结型场效应管的结构示意图。由图可见, 在一块 N 型半导体材料上制作两个高掺杂的 P 区(用 P^+ 表示), 形成两个 PN 结, 见图中阴影部分。将两个 P 区连在一起并引出一个电极, 称为栅极 g, 在 N 型半导体两端各引出一个电极, 分别称为漏极 d、源极 s。处于两个 PN 结之间的 N 型区, 是漏极与源极间的电流通道, 称为导电沟道, 由于导电沟道是 N 型半导体, 所以称为 N 沟道。图 3.1.1(b) 是 N 沟道结型场效应管在电路中的符号。

图 3.1.1(c) 和 (d) 分别是 P 沟道场效应管的结构示意图与电路中的符号。下面以 N 沟道场效应管为例, 讨论其工作原理和特性等问题。

3.1.2 工作原理

由图 3.1.1(a) 可见, 若在 d、s 间加电压 u_{DS} , 就会在 d、s 间形成电流 i_D , 通过改变栅极和源极间反向电压 u_{GS} 的大小, 即改变耗尽层的宽度从而改变导电沟道的宽度, 就可以控制电流 i_D 的大小。所以 N 沟道结型场效应管在正常工作时, 应在栅-源间加负电压 u_{GS} , 以实现了对沟道电流的控制; 在漏极和源极间加正电压 u_{DS} , 以形成漏极电流 i_D 。

由于在正常工作情况下, 场效应管同时承受电压 u_{GS} 和 u_{DS} , 无论 u_{GS} 还是 u_{DS} 的作用, 都将直接影响导电沟道, 使场效应管呈现与之对应的特性, 为简单起见, 下面将分别讨论 u_{GS} 、 u_{DS} 作用时对场效应管特性及漏极电流 i_D 的影响。

1. $u_{DS}=0$, 改变 u_{GS} 时对导电沟道的影响

(1) 当 $u_{GS}=0$ 时, 耗尽层较窄, 导电沟道最宽, 如图 3.1.2(a) 所示。

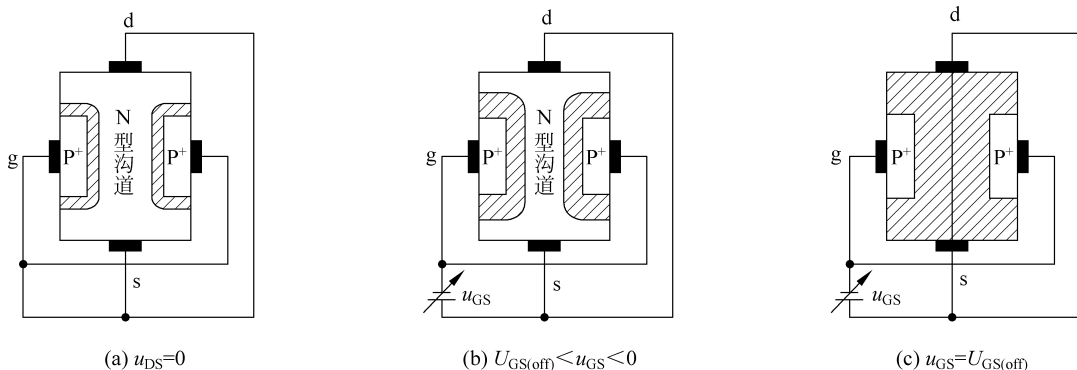


图 3.1.2 $u_{DS}=0$ 时 u_{GS} 对导电沟道的影响

(2) 当 u_{GS} 由 0 向负值变化, 耗尽层加宽, 导电沟道变窄, 沟道电阻加大, 如图 3.1.2(b) 所示。

(3) 当 u_{GS} 的负值进一步加大, 使 $u_{GS}=U_{GS(off)}$, 两个 PN 结耗尽层相遇, 导电沟道消失, 沟道电阻趋于无穷大, 称这种情况为导电沟道被夹断, 如图 3.1.2(c) 所示, 称 $U_{GS(off)}$ 为夹断电压。在夹断状态, 无论 u_{DS} 是否为 0, 在 d、s 间都不能形成电流 i_D 。

2. 当 u_{GS} 为 $U_{GS(off)} \sim 0$ 的某值时, u_{DS} 对 i_D 的影响

1) 当 u_{DS} 较小时, 漏、源间呈可变电阻特性

当 $U_{GS(off)} < u_{GS} < 0$, 导电沟道存在, 若在漏极和源极之间加较小的电压 u_{DS} , 则在漏、源间有电流 i_D , 并沿着电流方向在导电沟道上产生电压降, 漏极电位最高、源极电位最低。栅极与导电沟道上任何点的电压中, 只有 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS}$ 是最负(最小)的电压, 所以, 两个

PN 结的耗尽层将出现楔形,使靠近漏极间的沟道较窄,靠近源极间的沟道较宽,如图 3.1.3(a)所示。在 u_{DS} 较小的情况下, i_D 与 u_{DS} 间呈线性关系,导电沟道为一个线性电阻,该电阻的大小仅由 u_{GS} 决定, u_{GS} 越小(越负),沟道呈现的电阻越大。

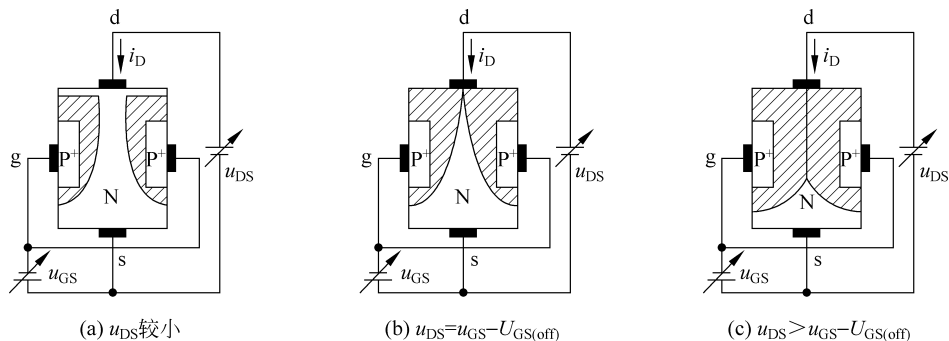


图 3.1.3 $U_{GS(off)} < u_{GS} < 0$ 且 $u_{DS} > 0$

2) 当 u_{DS} 上升到一定值,漏、源间呈受控电流源特性

若继续加大 u_{DS} ,漏极电位将继续升高,当 u_{DS} 上升到使 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} = U_{GS(off)}$ 时,即

$$u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(off)} \quad (3.1.1)$$

则在漏极处,两个 PN 结耗尽层相遇,出现夹断区,如图 3.1.3(b)所示,称这种情况为预夹断。通常,一个具体的场效应管,其 $U_{GS(off)}$ 是确定的,由式(3.1.1)可见,当栅、源间的电压 u_{GS} 不同时,进入预夹断状态的电压 u_{DS} 也不同。

必须指出,场效应管在进入预夹断状态后,并不意味着 $i_D = 0$,在 u_{DS} 电场作用下,电子仍然可从夹断区的窄缝中通过,只有 $u_{GS} \leq U_{GS(off)}$,场效应管才处于夹断状态,有 $i_D = 0$ 。

进一步加大 u_{DS} ,当 u_{DS} 上升到使 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} < U_{GS(off)}$ 时,即

$$u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(off)} \quad (3.1.2)$$

漏极处的夹断区沿导电沟道向源极方向移动,如图 3.1.3(c)所示,一方面使自由电子运动阻力加大,引起 i_D 减小;另一方面由于 u_{DS} 电场的加强,使 i_D 加大,结果是两种影响 i_D 的作用相互抵消,即加大 u_{DS} , i_D 基本不变, i_D 的大小仅由 u_{GS} 决定,漏、源间相当于受 u_{GS} 控制的电流源。

需要注意的是,若 u_{DS} 的值过高超过了允许范围,PN 结将被反向击穿,造成器件损坏。

3) u_{GS} 对 i_D 的控制作用

场效应管在正常工作情况下, u_{DS} 、 $U_{GS(off)}$ 是确定的,在满足式(3.1.2)的情况下,只要改变 u_{GS} 的值,就有一个确定的 i_D 与之对应,从而实现 u_{GS} 对 i_D 的控制。

3.1.3 特性曲线

由于场效应管是非线性元件,其漏极电流 i_D 与栅-源电压 u_{GS} 、漏-源电压 u_{DS} 间的关系只能用特性曲线来描述,即输出特性曲线和转移特性曲线。

1. 输出特性曲线

输出特性曲线,是指当栅-源电压 u_{GS} 为常数时漏极电流 i_D 与漏-源电压 u_{DS} 之间的函

数关系,即

$$i_D = f(u_{DS}) \big|_{u_{GS} = \text{常数}} \quad (3.1.3)$$

N 沟道结型场效应管的输出特性曲线如图 3.1.4(a)所示。

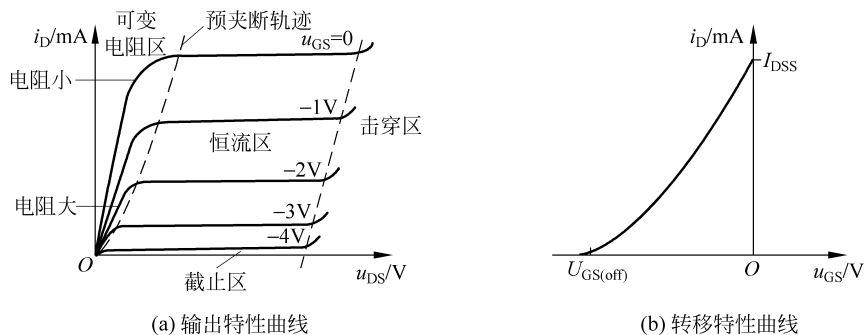


图 3.1.4 N 沟道结型场效应管的特性曲线

由图 3.1.4(a)可见,输出特性可划分成 4 个区,即可变电阻区、恒流区、击穿区和截止区。

1) 可变电阻区

可变电阻区位于预夹断轨迹虚线左边部分,由于 u_{DS} 较小,导电沟道尚未进入预夹断状态, i_D 与 u_{DS} 为线性关系,漏-源两端为线性电阻。当 u_{GS} 的取值不同时,曲线斜率不同, u_{GS} 取值越负,呈现的电阻越大,即改变 u_{GS} ,就可以改变电阻的大小,所以称为可变电阻区。

预夹断轨迹虚线与每条曲线的交点, u_{DS} 与 u_{GS} 的关系都满足 $u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(off)}$,在交点处,场效应管进入预夹断状态, u_{GS} 取值越负,使场效应管进入预夹断状态所对应的 u_{DS} 越小。

2) 恒流区

恒流区(即放大区)位于预夹断轨迹虚线右边部分,场效应管所处的状态如图 3.1.3(c)所示。每条曲线的 u_{DS} 与 u_{GS} 的关系都满足 $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(off)}$, u_{DS} 变化时, i_D 基本不变,只有改变 u_{GS} 的大小,才能改变 i_D 的大小,因此,可将 i_D 视为受 u_{GS} 控制的电流源。在用场效应管作放大电路时,场效应管应工作在恒流区。

在恒流区,若 u_{DS} 超过一定限度,场效应管将被击穿,造成器件损坏(见特性曲线的击穿区)。所以,场效应管工作时, u_{DS} 不能超过手册规定的极限值。

3) 截止区

截止区位于特性曲线靠近横坐标的区域,由于 $u_{GS} < U_{GS(off)}$,导电沟道被夹断, $i_D \approx 0$,场效应管处于截止状态,漏-源两端相当于开路。

2. 转移特性曲线

转移特性曲线,是指当漏-源电压 u_{DS} 为常数时漏极电流 i_D 与栅-源电压 u_{GS} 之间的函数关系,即

$$i_D = f(u_{GS}) \big|_{u_{DS} = \text{常数}} \quad (3.1.4)$$

N 沟道结型场效应管的转移特性曲线如图 3.1.4(b)所示。

由图 3.1.4(b)可见,当 $u_{GS} = 0$ 时, i_D 最大,即 $i_D = I_{DSS}$,称 I_{DSS} 为饱和漏极电流。当 u_{GS} 减小, i_D 也随之减小,当 $u_{GS} = U_{GS(off)}$,场效应管处于夹断状态, $i_D \approx 0$ 。

结型场效应管工作在恒流区时, i_D 与 u_{GS} 的关系,可用下面的近似公式表示:

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2 \quad (U_{GS(off)} \leq u_{GS} \leq 0) \quad (3.1.5)$$

式(3.1.5)是本章的重要公式之一,在后面场效应管放大电路分析时会经常用到。

3. 输出特性曲线与转移特性曲线间的对应关系

输出特性曲线和转移特性曲线都是描述同一个场效应管的 u_{GS} 、 u_{DS} 、 i_D 三者之间关系的曲线,两组曲线间存在着严格的对应关系,所以,可以根据输出特性曲线通过作图得到对应的转移特性曲线。由转移特性的定义,可以在输出特性的恒流区作垂线(u_{DS} 为常数),读出各条曲线与垂线交点处 u_{GS} 、 i_D 的坐标,在 u_{GS} 、 i_D 坐标系中画出对应点,然后连接各点即为转移特性曲线,如图 3.1.5 所示。

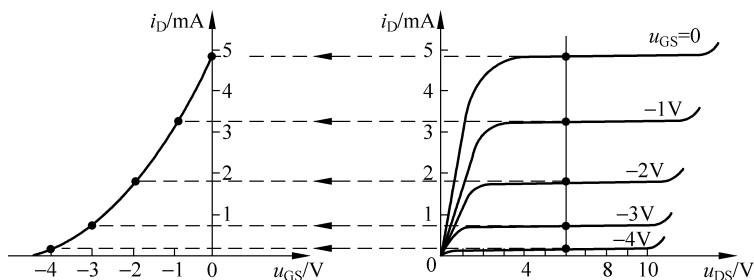


图 3.1.5 由输出特性曲线求转移特性曲线

3.2 绝缘栅场效应管

结型场效应管的输入电阻一般为 $10^7 \Omega$,在希望输入电阻更高的情况下,通常采用绝缘栅场效应管。绝缘栅场效应管由金属-氧化物和半导体制成,所以又称为金属-氧化物-半导体场效应管,简称 MOS 管。MOS 管分为 N 沟道和 P 沟道两种结构,每种结构又分为增强型和耗尽型两种形式。由于 N 沟道 MOS 管与 P 沟道 MOS 管工作原理相同,所以本节只讨论 N 沟道 MOS 管。

3.2.1 N 沟道增强型 MOS 管

1. 结构

图 3.2.1(a)是 N 沟道增强型 MOS 管的结构示意图,图 3.2.1(b)为电路中的符号。

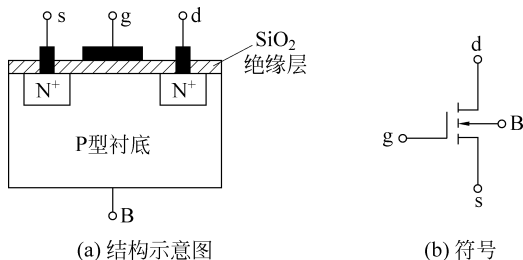


图 3.2.1 N 沟道增强型 MOS 管结构示意图及符号

由图 3.2.1(a) 可见, 它是以一块低掺杂的 P 型半导体为衬底, 通过一定的工艺在上面制作两个高掺杂的 N 型区 (图中用 N^+ 表示), 在半导体材料上覆盖一层 SiO_2 绝缘层, 在 SiO_2 绝缘层上制作一个金属电极, 作为栅极 g, 从两个 N 型区分别引出两个金属电极, 作为漏极 d 和源极 s。衬底上也引出一根引线 B, 通常情况下将它和源极在管内相连。由于栅极与源极、漏极间被绝缘材料隔开, 栅-源间电阻可达 $10^{10} \Omega$ 以上, 故称为绝缘栅场效应管。

2. 工作原理

绝缘栅场效应管的工作原理与结型场效应管有所不同, 它是通过改变栅-源电压 u_{GS} 的大小, 从而改变衬底靠近绝缘层处感应电荷的多少, 即改变感应电荷形成的导电沟道的状况, 达到控制漏极电流 i_D 之目的。

1) 导电沟道的建立

若栅-源间不加电压, 由于漏极和源极的两个 N^+ 区之间是 P 型半导体, 相当于两个背向的 PN 结, 漏-源间没有导电沟道, 无论在漏-源间加正或负电压, 总有一个 PN 结反向偏置, 所以漏-源间无电流, $i_D = 0$, 如图 3.2.2(a) 所示。

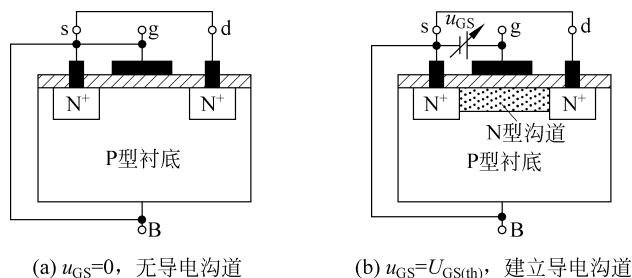


图 3.2.2 N 沟道增强型 MOS 管导电沟道的建立

若漏-源间不加电压, 在栅-源间加电压 u_{GS} 。当 $u_{GS} > 0$, 则会产生一个由栅极指向 P 型衬底的电场, 这个电场排斥 P 型衬底中的空穴, 吸引电子, 随着 u_{GS} 的增大, 吸引电子的能力也增强。当 $u_{GS} \geq U_{GS(th)}$ 时, 在衬底靠近绝缘层处形成电荷层, 将两个 N^+ 区连接起来, 使漏-源间形成电子导电的沟道, 称为 N 沟道。如图 3.2.2(b) 所示。 $U_{GS(th)}$ 称为开启电压, u_{GS} 越高, 导电沟道越宽, 沟道电阻越小。

2) u_{DS} 对 i_D 的影响

当 u_{GS} 是大于 $U_{GS(th)}$ 的某个确定值时, 若在漏-源间加电压 u_{DS} , 就会形成漏极电流 i_D , u_{DS} 对导电沟道的影响与结型场效应管完全类似。

当 u_{DS} 较小时, 由于导电沟道的任何点的电位都低于 d 点电位, 栅极与导电沟道各点间电压中 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS}$ 最小, 沟道由源极到漏极逐渐变窄, 漏-源间呈可变电阻特性, 如图 3.2.3(a) 所示。

当 u_{DS} 增大到使 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} = U_{GS(th)}$ 时, 即

$$u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(th)} \quad (3.2.1)$$

时, 漏极处的导电沟道出现夹断区, 场效应管处于预夹断状态, 如图 3.2.3(b) 所示。

当 u_{DS} 增大到使 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} > U_{GS(th)}$ 时, 即

$$u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(th)} \quad (3.2.2)$$

时,夹断区向源极方向移动,和结型场效应管一样,增大的 u_{DS} 和增大的沟道电阻基本抵消, i_D 基本不变,具有恒流源特性,如图 3.2.3(c) 所示。

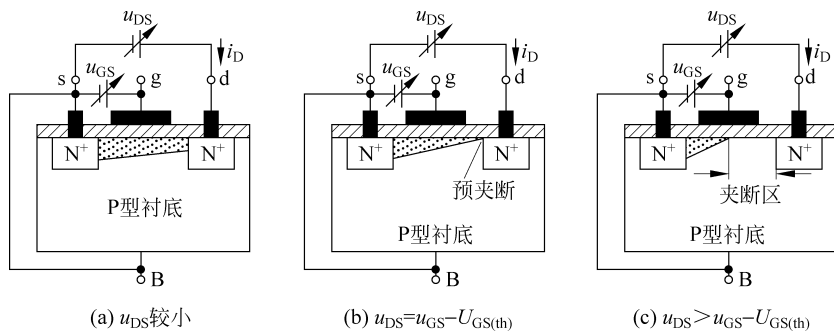


图 3.2.3 u_{DS} 对导电沟道和 i_D 的影响

3) u_{GS} 对 i_D 的控制作用

MOS 管在正常工作情况下, u_{DS} 、 $U_{GS(th)}$ 是确定的,在满足式 (3.2.2) 的情况下,只要改变 u_{GS} 的值,就有一个确定的 i_D 与之对应,从而实现 u_{GS} 对 i_D 的控制。

3. 特性曲线

N 沟道增强型 MOS 管的转移特性和输出特性如图 3.2.4 所示。

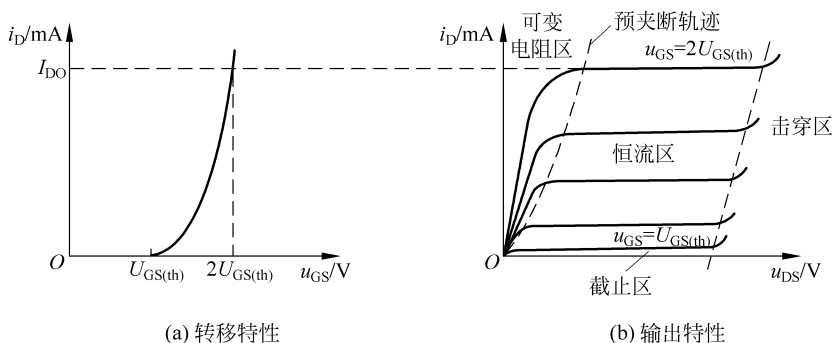


图 3.2.4 N 沟道增强型 MOS 管的特性曲线

MOS 管的输出特性也分为 4 个区: 可变电阻区、恒流区、截止区、击穿区,各区的含有与结型场效应管完全相同。

由 MOS 管的转移特性可见,当 $u_{GS} < U_{GS(th)}$ 时, $i_D = 0$, MOS 管中没有形成导电沟道,只有 $u_{GS} \geq U_{GS(th)}$ 时,才存在导电沟道,在满足式 (3.2.2) 的情况下,随着 u_{GS} 的增大,导电沟道增宽,沟道电阻减小, i_D 增大。N 沟道 MOS 管工作在恒流区时, i_D 与 u_{GS} 的关系,可用下面的近似公式表示:

$$i_D = I_{DO} \left(\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2, \quad (u_{GS} \geq U_{GS(th)}) \quad (3.2.3)$$

式中, I_{DO} 为 $u_{GS} = 2U_{GS(th)}$ 时的 i_D 值,见图 3.2.4(a) 所示。

3.2.2 N 沟道耗尽型 MOS 管

N 沟道耗尽型 MOS 管与增强型 MOS 管结构基本相似,唯一的区别是,耗尽型 MOS 管在制造过程中,将 SiO_2 绝缘层中掺入大量正离子,这些正离子形成的电场同样具有排斥 P 型衬底中的空穴,吸引电子的能力,从而在衬底靠近绝缘层处形成电荷层,使漏、源间形成电子导电的沟道,如图 3.2.5 所示。

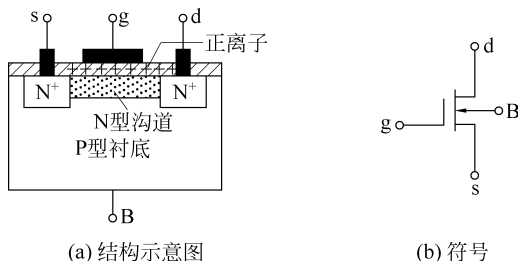


图 3.2.5 N 沟道耗尽型 MOS 管结构示意图及符号

当在栅-源间加负电压 u_{GS} ,将削弱 SiO_2 绝缘层中正离子形成的电场,使导电沟道变窄, i_D 减小;若 u_{GS} 更负,满足 $u_{GS} = U_{GS(off)}$,导电沟道被夹断, $i_D = 0$,称 $U_{GS(off)}$ 为夹断电压。可见,N 沟道耗尽型 MOS 管的 u_{GS} 选择范围更灵活,可以在小于 0、等于 0、大于 0 的一定范围内实现对漏极电流 i_D 的控制。

N 沟道耗尽型 MOS 管的特性曲线如图 3.2.6 所示。

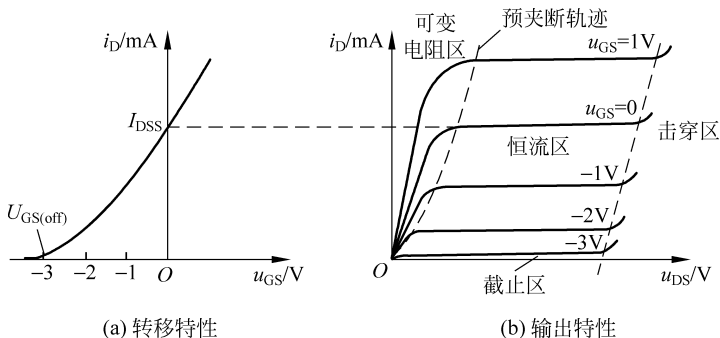


图 3.2.6 N 沟道耗尽型 MOS 管特性曲线

3.2.3 P 沟道场效应管

P 沟道场效应管与对应的 N 沟道场效应管有完全相同的工作原理。从结构看,只要将对应 N 沟道场效应管中的 N 型半导体改为 P 型半导体、P 型半导体改为 N 型半导体即得到对应的 P 沟道场效应管。从外加的电压看,只要将对应 N 沟道场效应管的外加正电压改为负电压、外加负电压改为正电压,就符合对应 P 沟道场效应管的外加电压要求。例如,与 N 沟道增强型 MOS 管对应,P 沟道增强型 MOS 管的开启电压 $U_{GS(th)} < 0$, $u_{GS} < U_{GS(th)}$ 时才形成导电沟道,漏-源间应加负电压, i_D 的真实方向也相应改变。与 N 沟道场效应管类比,不难得到 P 沟道场效应管的特性曲线,如表 3.2.1 所示。

表 3.2.1 场效应管的符号和特性曲线

种 类	符 号	转移特性曲线	输出特性曲线
结型	N 沟道		
	P 沟道		
绝缘栅增强型	N 沟道		
	P 沟道		
绝缘栅耗尽型	N 沟道		
	P 沟道		

3.3 场效应管的主要参数

3.3.1 直流参数

1. 开启电压 $U_{GS(th)}$

$U_{GS(th)}$ 是增强型 MOS 管的参数。 $U_{GS(th)}$ 的定义是,当 u_{DS} 为某常数时,漏极电流 i_D 达到某微小值(通常是 $5\mu A$)时所需要的最小 $|u_{GS}|$ 值。

2. 夹断电压 $U_{GS(off)}$

$U_{GS(off)}$ 是结型、耗尽型 MOS 管的参数。 $U_{GS(off)}$ 的定义是,当 u_{DS} 为某常数时,使漏极电流 i_D 减小到某微小值(通常是 $5\mu A$)时所需要的 u_{GS} 值。

3. 饱和漏极电流 I_{DSS}

I_{DSS} 是结型、耗尽型 MOS 管的参数。 I_{DSS} 的定义是,当 $u_{GS}=0$ 、场效应管处于预夹断状态(即 $|u_{DS}| \geq |U_{GS(off)}|$)时的漏极电流。

4. 直流输入电阻 R_{GS}

R_{GS} 的定义是,栅、源间所加电压与栅极电流之比。由于栅极电流几乎趋于 0,所以 R_{GS} 非常大,结型场效应管的输入电阻高达 $10^7 \Omega$ 以上,MOS 管的输入电阻高达 $10^{10} \Omega$ 以上。

3.3.2 交流参数

1. 低频跨导 g_m

g_m 类似于半导体三极管的 β , g_m 描述的是 u_{GS} 对 i_D 的控制作用。 g_m 的定义是,当 u_{DS} 为某常数时, i_D 与 u_{GS} 的变化量之比,即

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{DS}=\text{常数}} \quad (3.3.1)$$

g_m 即转移特性上某点切线的斜率,随着静态工作点的变化而变化,不是常数。 g_m 也可以通过公式求得,对于 N 沟道结型、耗尽型 MOS 管,可通过对式(3.1.5)求导得到;对于 N 沟道增强型 MOS 管,可通过对式(3.2.3)求导得到。

g_m 的单位为 mS(毫西门子)。

2. 极间电容

极间电容指场效应管三个电极间的电容,即 C_{GS} 、 C_{GD} 、 C_{DS} 。这些电容一般为几个皮法,它们的值越小,则高频特性越好、速度越快。

3.3.3 极限参数

1. 漏极最大允许功率 P_{DM}

P_{DM} 的定义是,漏极电流与漏-源电压的乘积,工作时不允许场效应管的功率超过该值,否则,场效应管会因为温度升高而造成损坏。

2. 漏-源击穿电压 $U_{(BR)DS}$

$U_{(BR)DS}$ 指场效应管进入恒流区后,漏极电流突然增大对应的 $|u_{DS}|$,这时场效应管已被击穿。工作时加在漏-源间的电压不能超过该值。

3. 栅-源击穿电压 $U_{(BR)GS}$

$U_{(BR)GS}$ 指场效应管栅-源间允许加的最大电压 $|u_{GS}|$ 。若栅、源电压超过该值,对于结型场效应管,将造成 PN 结被反向击穿,对于 MOS 管,将使 SiO_2 被击穿,使场效应管损坏。

3.4 场效应管放大电路

对于场效应管,可以通过 u_{GS} 控制 i_D ,从对能量的控制角度看,它与双极型三极管通过 i_B 控制 i_C 在本质上并无区别,因此用场效应管也能组成放大电路。

场效应管与双极型三极管存在着一定的对应关系,因此用场效应管组成放大电路时,可以参照双极型三极管放大电路的某些做法,理解起来就比较容易了。在分析方法上,双极型三极管放大电路中使用的分析方法,在场效应管放大电路中也基本适用。

首先,场效应管有三个电极,分别可以和双极型三极管的三个电极对应,即栅极 g 与基极 b 对应,漏极 d 与集电极 c 对应,源极 s 与发射极 e 对应。可以设想,场效应管放大电路也应有三种基本形式,即共源放大电路、共漏放大电路、共栅放大电路,实际工程中主要使用前两种放大电路,一般不使用共栅放大电路。然而,两种元件毕竟工作原理不同,特性曲线也不尽相同,两者之间不能简单取代。

其次,两种元件组成放大电路时,都必须工作在放大区(场效应管为恒流区),都必须设置合理的静态工作点。不同之处在于双极型三极管是电流控制器件,设置静态工作点时,必须使发射结正偏、集电结反偏,通过 β 描述其放大作用。场效应管是电压控制器件,设置静态工作点时,对于 N 沟道结型、耗尽型 MOS 管,必须使 $u_{GS} > U_{GS(off)}$ 且 $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(off)}$,对于 N 沟道增强型 MOS 管,必须使 $u_{GS} > U_{GS(th)}$ 且 $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(th)}$,通过 g_m 描述其放大作用。

最后,对场效应管放大电路的分析也包括静态分析和动态分析,分别要用放大电路的直流通路和交流通路,在直流通路和交流通路中,对电容元件、直流电源、信号源的处理原则完全相同。分析方法也有图解法、解析法,只是在动态分析中,场效应管与双极型三极管的线性化模型不同。根据场效应管的结构、工作原理和特性曲线知,场效应管的栅极几乎没有电流,因此,在其微变等效电路中可认为栅-漏、栅-源之间是开路的;在恒流区(即放大区), i_D 基本不随 u_{DS} 的变化而改变,具有恒流源特性, i_D 的大小只受 u_{GS} 控制,因此,在其微变等效电路中可认为漏-源之间是受 u_{GS} 控制的受控电流源。因此,可得到场效应管的微变等效电路如图 3.4.1(a)所示。通常情况下,由于 r_{ds} 比电路输出回路电阻大得多,所以可忽略 r_{ds} 上的电流,将 r_{ds} 作开路处理,所以有简化的微变等效电路如图 3.4.1(b)所示。

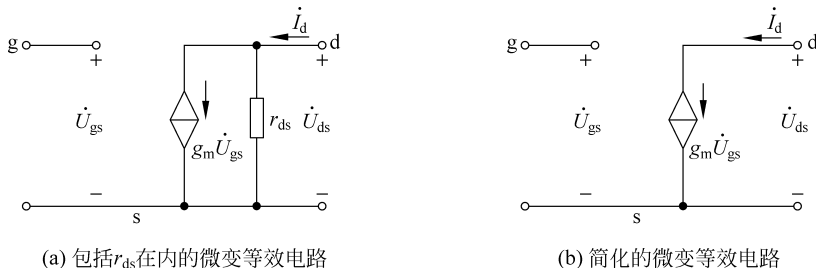


图 3.4.1 场效应管的微变等效电路

在场效应管简化的微变等效电路中,跨导 g_m 是待求的参数,前已述及, g_m 可通过对式(3.1.5)或式(3.2.3)求导得到,在已知 I_{DSS} (或 I_{DO})、 $U_{GS(off)}$ (或 $U_{GS(th)}$) 的情况下,只需将求导结果中的 u_{GS} 用静态工作点处的 U_{GSQ} 代入,即可求得 g_m 。

3.4.1 共源极放大电路

如图 3.4.2(a) 所示的电路是用 N 沟道耗尽型 MOS 管组成的共源极放大电路,图 3.4.2(b) 为对应的交流通路。电路中 C_1 、 C_2 为耦合电容, C_s 为旁路电容,起隔直传交的作用。直流电源 U_{DD} 的作用是,一方面通过电阻 R_1 、 R_2 分压,为场效应管设置静态工作点,并使场效应管工作在恒流区;另一方面为负载提供能量。电阻 R_g 的作用是,避免因 R_1 、 R_2 的影响使放大电路的输入电阻减小。电阻 R_s 的作用是稳定静态工作点(类似于工作点稳定电路中的 R_e)。电阻 R_d 的作用是,将漏极电流 i_D 的变化转化成电压 u_{DS} 的变化,实现电压放大。

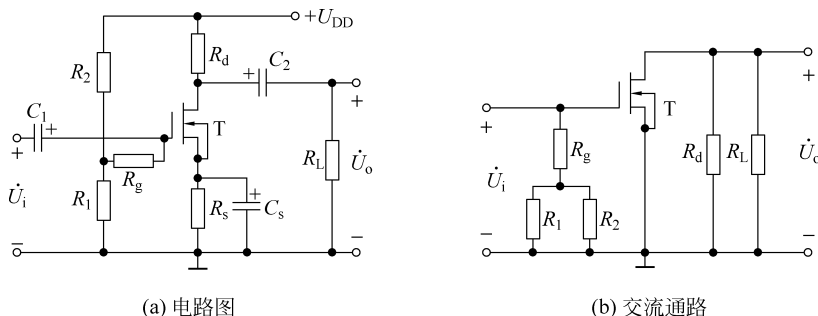


图 3.4.2 共源极放大电路

从交流通路看,放大电路的输入、输出回路的公共端是场效应管的源极,所以该电路为共源放大电路。

从静态工作点的设置方法看,直流电源通过 R_1 、 R_2 分压产生静态值 U_{GQ} ,又称这种偏置方式的放大电路为分压式偏置电路。根据电路参数的不同,分压式偏置电路能够保证静态时 U_{GSQ} 大于 0、等于 0 或小于 0,因此这种偏置方式对结型场效应管、耗尽型 MOS 管、增强型 MOS 管均适用。

1. 静态分析

1) 解析法

由于电阻 R_g 上无电流, $U_{GQ} = U_{R1Q}$ 。根据图 3.4.2(a) 电路的直流通路,有

$$U_{GSQ} = U_{DD} \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} - I_{DQ} R_s \quad (3.4.1)$$

再利用场效应管的电流公式(3.1.5),即

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}} \right)^2 \quad (3.4.2)$$

将式(3.4.1)、式(3.4.2)联立,可求得 U_{GSQ} 、 I_{DQ} 。根据图 3.4.2(a) 所示电路对应的直流通路的输出回路,有

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} (R_d + R_s) \quad (3.4.3)$$

2) 图解法

图解法就是在场效应管的转移特性和输出特性上,通过作图,估算放大电路的静态工作

点,具体方法如下:

(1) 由放大电路直流通路的输入回路写出 u_{GS} 与 i_D 的关系式,得到直线方程,即

$$u_{GS} = U_{DD} \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} - i_D R_s \quad (3.4.4)$$

在转移特性上作式(3.4.4)表示的直线方程,曲线与直线方程的交点即为 Q 点,得到 I_{DQ} 、 U_{GSQ} 。

(2) 由放大电路直流通路的输出回路写出 u_{DS} 与 i_D 的关系式,得到直线方程,即

$$u_{DS} = U_{DD} - i_D (R_d + R_s) \quad (3.4.5)$$

在输出特性上作式(3.4.5)表示的直线方程,与 $u_{GS} = U_{GSQ}$ 对应的曲线和直线方程的交点即为 Q 点,可得到 U_{DSQ} 。

2. 动态分析

下面根据图 3.4.2(a)所示电路的微变等效电路,求放大电路电压放大倍数、输入电阻、输出电阻。如图 3.4.2(a)所示电路的微变等效电路如图 3.4.3 所示。

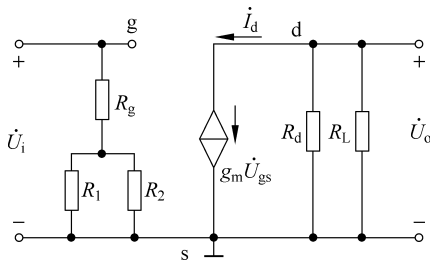


图 3.4.3 图 3.4.2 (a) 所示电路的微变等效电路

1) 电压放大倍数

由于

$$\dot{U}_o = -\dot{I}_d (R_d // R_L) = -g_m \dot{U}_{gs} (R_d // R_L)$$

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{gs}$$

所以电压放大倍数为

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -g_m (R_d // R_L) \quad (3.4.6)$$

2) 输入电阻和输出电阻

$$r_i = R_g + (R_1 // R_2) \quad (3.4.7)$$

$$r_o = R_d \quad (3.4.8)$$

3. 自给偏压电路

对于 N 沟道结型场效应管,必须在栅-源电压 $u_{GS} < 0$ 时才能正常工作,对于耗尽型 MOS 管,在 $u_{GS} < 0$ 时也能正常工作,因此由这两种场效应管组成放大电路时,设置静态工作点时也可采用如图 3.4.4 所示的自给偏压电路。

图中,由于栅极无电流,静态时,栅极电位 $U_{GQ} = 0V$,静态漏极电流 I_{DQ} 流过电阻 R_s 产生电压,使源极电位 $U_{SQ} = I_{DQ} R_s$,所以栅-源间的静态电压为

$$U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ} = -I_{DQ} R_s \quad (3.4.9)$$

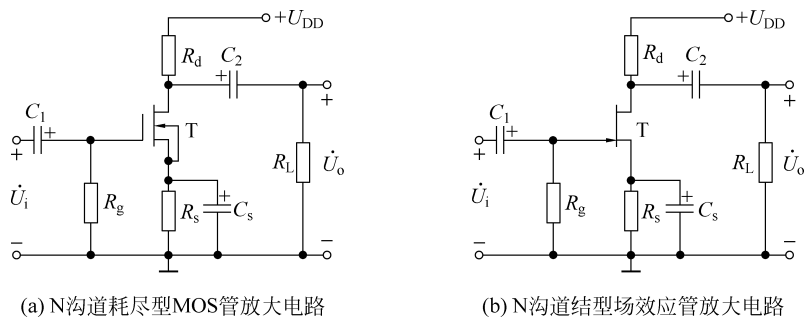


图 3.4.4 自给偏压共源极放大电路

因电路是通过源极电阻上的电压为栅-源提供负偏压,故称这种电路为自给偏压电路。若将式(3.4.9)与式(3.4.2)联立,再利用式(3.4.3),即可求出电路的静态工作点。

例 3.4.1 设图 3.4.2 共源极放大电路中,场效应管的 $U_{GS(off)} = -1\text{V}$, $I_{DSS} = 0.5\text{mA}$, $U_{DD} = 18\text{V}$, $R_1 = 47\text{k}\Omega$, $R_2 = 2\text{M}\Omega$, $R_g = 10\text{M}\Omega$, $R_s = 2\text{k}\Omega$, $R_d = 30\text{k}\Omega$, $R_L = 30\text{k}\Omega$ 。

(1) 求放大电路的静态工作点;

(2) 求放大电路的电压放大倍数、输入电阻、输出电阻。

解 (1) 根据电路的直流通路,有

$$U_{GSQ} = U_{DD} \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} - I_{DQ}R_s = 18 \times \frac{47}{2047} - I_{DQ}R_s$$

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}} \right)^2 = 0.5 \times \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{-1} \right)^2$$

将以上两式联立,因为 N 沟道耗尽型 MOS 管的漏源电压 $U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ}(R_d + R_s)$ 应该为正值,所以舍弃漏源电压 U_{DSQ} 为负值的解。解得

$$I_{DQ1} = 1.6\text{mA}$$

$$I_{DQ2} = 0.32\text{mA} = I_{DQ}$$

$$U_{GSQ} = -0.23\text{V}$$

$$U_{DSQ} = 7.76\text{V}$$

(2) 先求 g_m :

$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} = -\frac{2I_{DSS}}{U_{GS(off)}} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}} \right) = -\frac{2 \times 0.5}{-1} \left(1 - \frac{-0.23}{-1} \right) = 0.77(\text{mS})$$

由图 3.4.3 所示的微变等效电路,将电路的有关参数代入式(3.4.6)~式(3.4.8),有

$$\dot{A}_u = -g_m(R_D // R_L) = -0.77 \times \frac{30 \times 30}{30 + 30} \approx -11.6$$

$$r_i = R_g + (R_1 // R_2) \approx R_g = 10\text{M}\Omega$$

$$r_o = R_d = 30\text{k}\Omega$$

3.4.2 共漏极放大电路

图 3.4.5(a)所示的电路是用 N 沟道耗尽型 MOS 管组成的共漏极放大电路,图 3.4.5(b)为对应的交流通路微变等效电路。从微变等效电路看,放大电路的输入、输出回路的公共端

是场效应管的漏极,所以该电路为共漏放大电路。共漏放大电路又称为源极输出器。

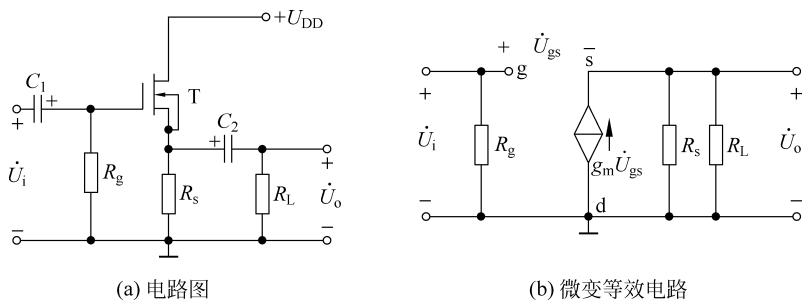


图 3.4.5 共漏极放大电路

1. 静态分析

由于电路为自给偏压电路,所以静态时,根据电路的直流通路,利用式(3.4.9)和场效应管的电流特性方程联立,即

$$U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ} = -I_{DQ}R_s$$

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}} \right)^2$$

求出 I_{DSQ} 和 U_{GSQ} ,再根据直流通路的输出回路,有

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ}R_s$$

2. 动态分析

1) 电压放大倍数

由图 3.4.5(b)所示的微变等效路,有

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{g_m \dot{U}_{gs} (R_s // R_L)}{\dot{U}_{gs} + g_m \dot{U}_{gs} (R_s // R_L)} = \frac{g_m (R_s // R_L)}{1 + g_m (R_s // R_L)} \quad (3.4.10)$$

当 $g_m (R_s // R_L) \gg 1$ 时, $\dot{A}_u \approx 1$ 。

2) 输入电阻

$$r_i = R_g \quad (3.4.11)$$

3) 输出电阻

根据输出电阻的定义,求输出电阻时,令输入信号为 0,从输出端往里看的等效电阻。由于输入信号为 0 时,电路中受控源仍然存在,所以,这里求输出电阻时,只能用二端网络求解等

效电阻的一般方法,即在输出端加电压 $\dot{U}_o$,求出端钮电流 $\dot{I}_o$,则 $r_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o}$ 。如图 3.4.6 所示,有

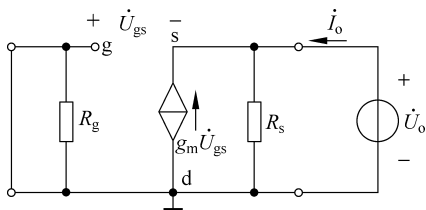


图 3.4.6 求图 3.4.5 共漏极放大电路的输出电阻

$$\dot{i}_o = \frac{\dot{U}_o}{R_s} - g_m \dot{U}_{gs} = \frac{\dot{U}_o}{R_s} + g_m \dot{U}_o$$

所以

$$r_o = R_s // \frac{1}{g_m} \quad (3.4.12)$$

由以上的动态分析可见,源极输出器的特点与双极型三极管构成的射极输出器的特点非常相似,即电压放大倍数近似为 1,输入电阻大,输出电阻小。若增大 R_s 的值,可使电路呈现非常大的输入电阻,而射极输出器很难做到。

本章小结

本章主要讨论了场效应管的基本结构和工作原理,以及场效应管放大电路的基本原理和分析方法。

1. 场效应管是一种电压控制器件,通过栅-源电压 u_{GS} 控制漏极电流 i_D ,实现对信号的放大。描述其放大能力的参数是跨导 g_m 。

2. 和半导体三极管相比,场效应管由多数载流子参与导电,而前者由电子、空穴两种载流子参与导电,所以前者又称为双极型三极管,场效应管称为单极型三极管。因为场效应管是多数载流子参与导电,所以温度稳定性好、抗辐射能力强、噪声低。

3. 场效应管的一个主要优点是输入电阻非常高,通常可达 $10^7 \sim 10^{12} \Omega$,由场效应管构成的放大电路基本不向信号索取电流,当对放大电路输入电阻要求很高的情况下,可采用场效应管放大电路。此外,场效应管还具有功耗小、体积小、制造工艺简单、便于集成化等突出优点,在大规模集成电路中得到了广泛应用。

4. 场效应管分为结型和绝缘栅型两类,每类都有 N 沟道和 P 沟道两种结构。对于绝缘栅型场效应管,还分为增强型和耗尽型两种形式。

5. 由于 MOS 管的栅-源间电容容量较小,只要少量的感应电荷就能产生很高的电压,而栅-源电阻非常高,感应电荷不易释放,这样很容易使 SiO_2 绝缘层被击穿而造成器件损坏。虽然在有些集成电路中增加了栅极保护电路,但它所能承受的静电电压仍有一定限度,因此,无论在何种情况下,都要避免 MOS 管的栅极悬空;在焊接时,电烙铁要有良好的接地。

6. 场效应管有三个工作区:可变电阻区、恒流区、截止区,当组成放大电路时,应工作在恒流区。对于 N 沟道结型场效应管、耗尽型 MOS 管,必须使 $u_{GS} > U_{GS(\text{off})}$ 且 $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(\text{off})}$,对于 N 沟道增强型 MOS 管,必须使 $u_{GS} > U_{GS(\text{th})}$ 且 $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(\text{th})}$ 。

7. 场效应管放大电路的偏置电路有分压式偏置电路和自给偏压电路两种常用的形式,后者只能用于由结型场效应管和耗尽型 MOS 管组成的放大电路。

8. 常用的场效应管放大电路有共源、共漏两种形式,它们与双极型三极管组成的共射、共集电路有一定的对应关系,但比双极型三极管放大电路输入电阻高、稳定性好、电压放大倍数低,通常用来做多级放大电路的输入级。

习题

- 3.1 场效应管和双极型三极管比较有什么特点？
- 3.2 说明场效应管的夹断电压 $U_{GS(off)}$ 、开启电压 $U_{GS(th)}$ 的含义。对于 N 沟道场效应管, $U_{GS(off)}$ 和 $U_{GS(th)}$ 为正值、负值还是 0? 对于 P 沟道场效应管呢?
- 3.3 耗尽型 MOS 管和增强型 MOS 管的区别是什么?
- 3.4 绝缘栅场效应管的栅极为什么不能悬空?
- 3.5 为什么增强型场效应管不能采用自给偏置电路?
- 3.6 I_{DSS} 和 I_{DO} 是如何定义的? 它们分别是哪种场效应管的参数?
- 3.7 场效应管处于“预夹断”状态时, 是否意味着漏极电流等于 0?
- 3.8 电路如图 3.1 所示, 若 R_g 短路或开路, 将对电路产生什么影响?
- 3.9 电路如图 3.2 所示, R_g 的作用是什么?

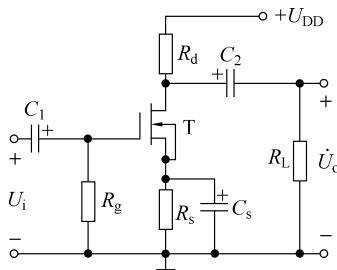


图 3.1 题 3.8 的图

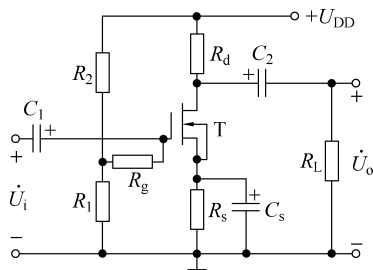


图 3.2 题 3.9 的图

- 3.10 某场效应管的输出特性如图 3.3 所示, 回答如下问题。
- (1) $u_{GS} = -2V$ 时, u_{DS} 为多少伏场效应管出现预夹断?
 - (2) $u_{GS} = -3V$ 时, u_{DS} 为多少伏场效应管被击穿?
 - (3) 该场效应管的夹断电压是多少伏?
 - (4) 该场效应管的 I_{DSS} 是多少?
- 3.11 某场效应管的输出特性如图 3.4 所示, 画出 $u_{DS} = 6V$ 时对应的转移特性曲线。

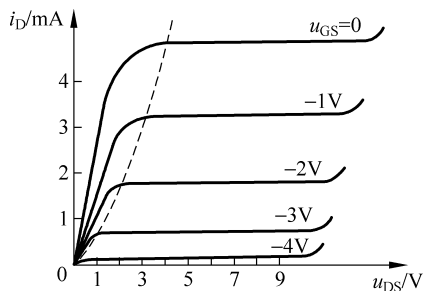


图 3.3 题 3.10 的图

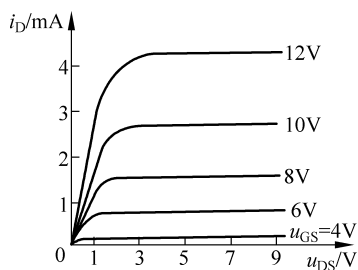


图 3.4 题 3.11 的图

- 3.12 电路如图 3.5 所示, 判断它们能否放大输入信号。
- 3.13 场效应管转移特性曲线及放大电路如图 3.6 所示。

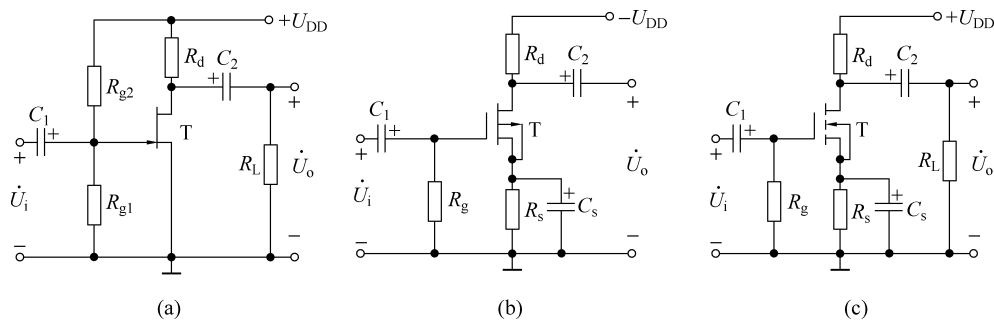


图 3.5 题 3.12 的图

- (1) 计算电路的静态工作点；
- (2) 计算电路的 $\dot{A}_u$ 、 r_i 、 r_o 。

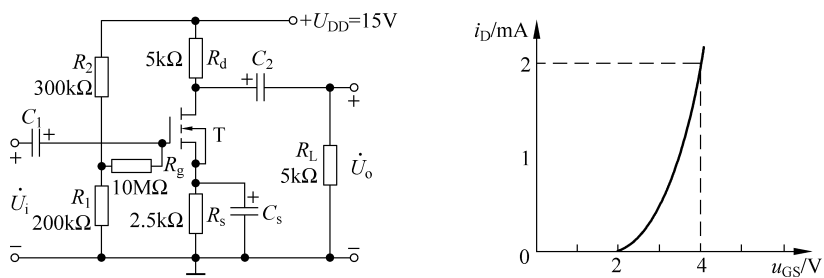


图 3.6 题 3.13 的图

3.14 场效应管放大电路如图 3.7 所示,画出电路的直流通路和微变等效电路,并写出电路的 $\dot{A}_u$ 、 r_i 、 r_o 的表达式。

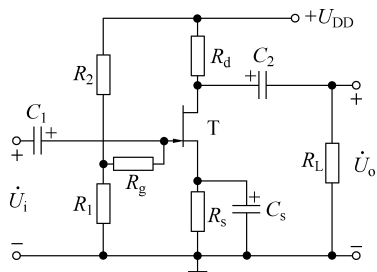


图 3.7 题 3.14 的图