

第 3 章 场效应管及其放大电路

场效应管 (Field Effect Transistor, FET) 是一种利用电场效应控制其电流大小的半导体器件。由于其内部只有一种载流子参与导电, 所以又称为单极型晶体管。与双极型晶体管相比, 场效应管具有输入阻抗高、噪声低、热稳定性好、抗辐射能力强、制造工艺简单、便于大规模集成等优点, 所以得到了越来越广泛的应用。

场效应管按结构可分为结型场效应管 (Junction FET, JFET) 和绝缘栅场效应管 (Isolated Gate FET, IGFET)。本章介绍场效应管的结构、工作原理及特性参数, 并在此基础上介绍由场效应管构成的基本放大电路。



3.1 结型场效应管



3.1.1 结型场效应管的结构与类型

根据导电载流子的不同, 结型场效应管可分为 N (电子型) 沟道结型场效应管和 P (空穴型) 沟道结型场效应管。N 沟道结型场效应管的剖面图如图 3.1.1 (a) 所示, 其结构示意图如图 3.1.1 (b) 所示。在一块 N 型半导体材料两边扩散高掺杂的 P⁺ 型区, 形成两个 PN 结。从两个 P⁺ 型区引出电极连在一起作为控制极, 称为栅极 G (Gate), 相当于晶体管的基极 b。在 N 型半导体材料的两端各引出一个电极, 分别称为源极 S (Source) 和漏极 D (Drain), 相当于晶体管的发射极 e 和集电极 c。两个 PN 结中间的 N 型区域称为导电沟道。N 沟道结型场效应管的电路符号如图 3.1.1 (c) 所示, 其中, 箭头的方向表示栅源之间正偏时栅极电流的方向, 即由 P 指向 N, 所以由符号即可判断结型场效应管的沟道类型。按照类似的方法可以制成 P 沟道结型场效应管, 其电路符号如图 3.1.1 (d) 所示。

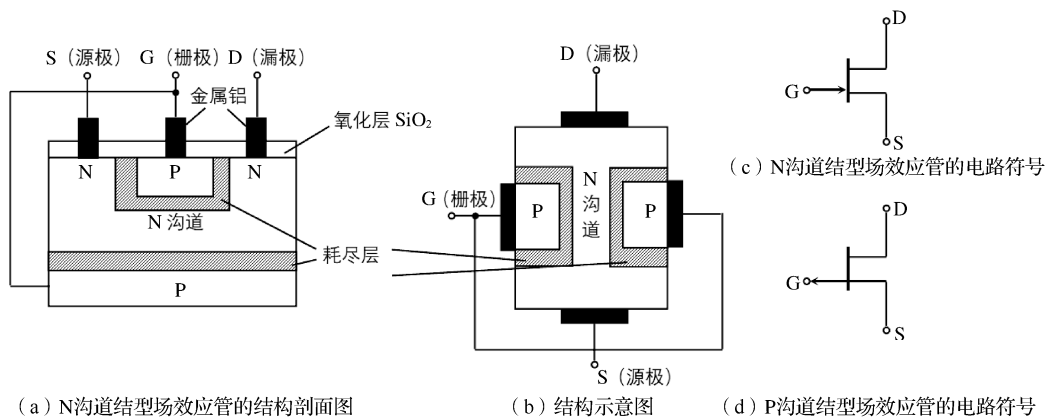


图 3.1.1 结型场效应管的结构和符号

3.1.2 结型场效应管的工作原理

下面以 N 沟道结型场效应管为例，介绍它的工作原理。

结型场效应管工作于放大状态时，栅极与源极之间的偏置电压应使栅极与导电沟道之间的两个 PN 结反偏 ($u_{GS} < 0$)，栅极电流 $i_G \approx 0$ ，栅源之间的输入电阻高于 $10^7 \Omega$ 。同时，还需要在漏极与源极之间加正向电压 u_{DS} ($u_{DS} > 0$)，使导电沟道中的多子（电子）在电场的作用下由源极向漏极运动，形成漏极电流 i_D 。改变栅-源电压 u_{GS} 的大小，就可以改变 PN 结的厚度，导电沟道的宽度随之改变，导电沟道的电阻也随之变化，从而实现利用栅-源电压 u_{GS} 控制漏极电流 i_D 的作用。

1. u_{GS} 对导电沟道及 i_D 的控制作用

先讨论当 $u_{DS} = 0$ 时， u_{GS} 对导电沟道的控制作用。若 $u_{GS} = 0$ ，耗尽层很窄，导电沟道很宽，如图 3.1.2 (a) 所示。当 u_{GS} 由零向负减小时，在反偏电压 u_{GS} 的作用下，两个 PN 结的耗尽层加宽，导电沟道变窄，导电沟道的电阻增大，如图 3.1.2 (b) 所示。需要说明的是，由于 N 型半导体的掺杂浓度远低于 P 型半导体的掺杂浓度，所以耗尽层的厚度主要增加在 N 型半导体一侧。当 $|u_{GS}|$ 增大到某一数值时，两侧耗尽层在中间合拢，导电沟道被夹断，如图 3.1.2 (c) 所示，此时导电沟道的电阻趋于无穷大。导电沟道夹断时的栅-源电压称为夹断电压 $U_{GS(off)}$ 。在 N 沟道结型场效应管中， u_{GS} 和 $U_{GS(off)}$ 均为负值；在 P 沟道结型场效应管中， u_{GS} 和 $U_{GS(off)}$ 均为正值。

上述分析表明，改变 u_{GS} 的大小可以有效地控制导电沟道电阻的大小。若在漏极和源极间加上固定的正向电压 ($u_{DS} > 0$)，则由漏极流向源极的电流 i_D 将受到 u_{GS} 的控制，当 $|u_{GS}|$ 增大时，导电沟道的电阻增大， i_D 减小。由此可见，结型场效应管利用 u_{GS} 产生的电场变化改变导电沟道的电阻的大小，从而实现了对漏极电流 i_D 的控制，因此称为场效应管。由于场

效应管的 PN 结处于反偏状态，所以栅极电流很小，通常忽略不计。

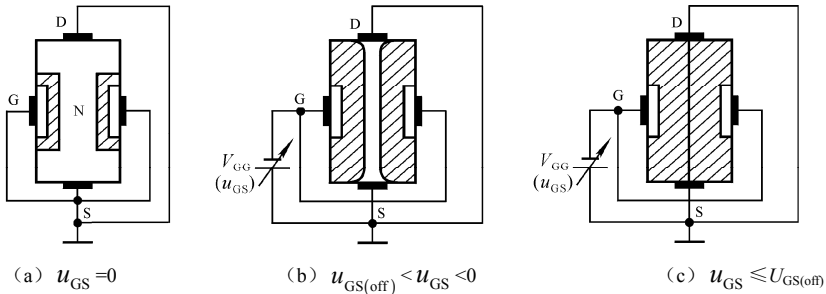


图 3.1.2 当 $u_{DS}=0$ 时, u_{GS} 对导电沟道的控制作用

2. 当 u_{GS} 为常量时, u_{DS} 对漏极电流 i_D 的影响

在栅极和源极间加一个 $U_{GS(off)}$ 到 0 的固定电压 u_{GS} , 若 $u_{DS}=0$, 此时虽然存在一定宽度的导电沟道, 但是漏极和源极之间的电压为零, 电子不会产生定向移动, 所以漏极电流 $i_D=0$ 。

若 $u_{DS} > 0$, 则有电流 i_D 从漏极流向源极。同时, 此电流将沿着导电沟道的方向产生一个电压降, 这就使导电沟道上各点的电位不同, 从而使导电沟道上各点与栅极之间的电位差不同, 其值沿沟道从源极到漏极逐渐增大。即导电沟道两侧 PN 结的反偏电压逐渐增大, 使靠近漏极一侧的耗尽层比靠近源极一侧的耗尽层宽, 如图 3.1.3 (a) 所示。

因为 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} < 0$, 所以当 u_{DS} 由零逐渐增大时, u_{GD} 逐渐减小, 靠近漏极一侧的导电沟道必将随之变窄。若栅极和漏极之间不出现夹断区域, 则导电沟道的电阻基本取决于 u_{GS} 。此时, i_D 随 u_{DS} 的增大而线性增大, 导电沟道呈现电阻特性。一旦 u_{DS} 增大到使 $u_{GD} = U_{GS(off)}$ 时, 则漏极一侧的耗尽层开始出现夹断, 如图 3.1.3 (b) 所示, 此时称为预夹断。若 u_{DS} 继续增大, 则 $u_{GD} < U_{GS(off)}$, 耗尽层闭合部分将沿导电沟道方向延伸, 即夹断区变长, 如图 3.1.3 (c) 所示。这时, 自由电子从源极向漏极定向移动所受阻力增大 (只能从夹断区的窄缝以较高速度通过), 导电沟道电阻的增大抵消了电压 u_{DS} 的增大, 使 i_D 几乎不再随 u_{DS} 的增大而改变。即 u_{DS} 的增大几乎全部用于克服夹断区对 i_D 形成的阻力。因此, 从外部看, 在 $u_{GD} < U_{GS(off)}$ 的情况下, 当 u_{DS} 增大时 i_D 几乎不变, 即 i_D 只与 u_{GS} 有关, 表现出恒流特性。

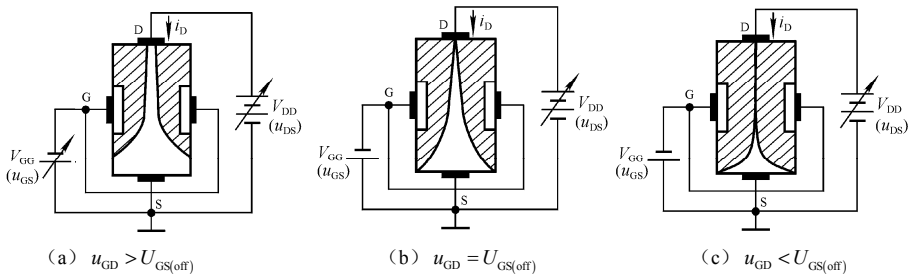


图 3.1.3 $U_{GS(off)} < u_{GS} < 0$ 且 $u_{DS} > 0$ 的情况

由以上分析可知, 在 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} < U_{GS(off)}$, 即 $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(off)}$ 的情况下, i_D 几乎不随 u_{DS} 变化, 对应于确定的 u_{GS} 就有确定的 i_D 。此时, 可以通过 u_{GS} 控制 i_D 的大小。由于 i_D 受 u_{GS} 的控制, 所以结型场效应管为电压控制器件。其工作状态可概括如下。

(1) 当 $u_{GS} < U_{GS(off)}$ 时, 结型场效应管截止, $i_D = 0$ 。

(2) 当 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} > U_{GS(off)}$ 时, 对应于不同的 u_{GS} , 漏极和源极之间可等效成不同阻值的电阻。

(3) 当 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} = U_{GS(off)}$ 时, 导电沟道出现预夹断。

(4) 当 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} < U_{GS(off)}$ 时, i_D 几乎仅仅由 u_{GS} 决定, 而与 u_{DS} 无关, 此时可以把 i_D 看成受 u_{GS} 控制的受控电流源。

3.1.3 结型场效应管的伏安特性

结型场效应管的伏安特性常用输出特性曲线和转移特性曲线表示。

1. 输出特性

输出特性又称漏极特性, 它反映了当 u_{GS} 为常量时 i_D 和 u_{DS} 之间的关系, 即

$$i_D = f(u_{DS}) \Big|_{u_{GS} = \text{常量}} \quad (3.1.1)$$

N 沟道结型场效应管的输出特性曲线如图 3.1.4 所示, 它有 3 个工作区域: 可变电阻区、恒流区 (饱和区) 和夹断区 (截止区)。

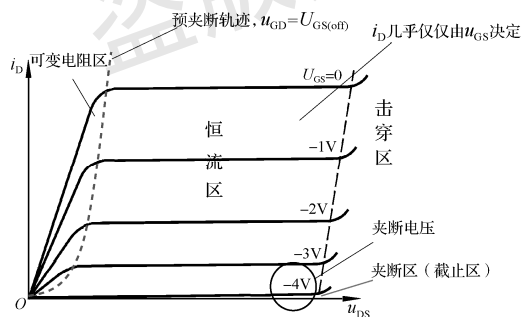


图 3.1.4 N 沟道结型场效应管的输出特性曲线

1) 可变电阻区

当 $u_{GS(off)} < u_{GS} < 0$ 且 $u_{DS} \leq u_{GS} - u_{GS(off)}$ 时, 结型场效应管工作于可变电阻区, 即图 3.1.4 中预夹断轨迹 ($u_{GD} = U_{GS(off)}$) 左边的区域。

在可变电阻区, 当 u_{GS} 一定时, i_D 与 u_{DS} 之间近似线性关系, 漏极与源极之间呈现电阻特性, 其等效电阻值即该区域中近似直线斜率的倒数。由图 3.1.4 可知, 漏极与源极之间的等效电阻随 u_{GS} 改变。 u_{GS} 越小, 曲线的斜率越小, 等效电阻就越大。这是因为 u_{GS} 越小, PN

结反偏电压越大, 耗尽层越厚, 导电沟道越窄, 所以漏极与源极之间的等效电阻就越大。在可变电阻区, 漏极与源极之间可等效为一个受 u_{GS} 控制的可变电阻。

2) 恒流区 (饱和区)

当 $u_{GS(\text{off})} < u_{GS} < 0$ 且 $u_{DS} \geq u_{GS} - u_{GS(\text{off})}$ 时, 结型场效应管工作于恒流区, 即图 3.1.4 中曲线近似水平方向平行部分。可变电阻区和恒流区的分界线即预夹断轨迹。

结型场效应管预夹断后, i_D 基本上不随 u_{DS} 变化, 只与栅-源电压 u_{GS} 有关, 可等效为受 u_{GS} 控制的受控电流源, 所以恒流区又称饱和区或线性放大区。将结型场效应管当作放大器件使用时, 结型场效应管必须工作于恒流区。

3) 夹断区 (截止区)

当 $u_{GS} < U_{GS(\text{off})}$ 时, 结型场效应管处于导电沟道完全夹断的情况, 工作于截止区, 即图 3.1.4 中靠近横轴的区域, 此时 $i_D \approx 0$ 。

图 3.1.4 中还标出了当 u_{DS} 太大时, 夹断部分场强太大, 引起 i_D 显著增大的击穿区。

2. 转移特性

结型场效应管是电压控制器件, 由于其栅极输入端基本上没有电流, 所以没有像晶体管那样的输入特性。

结型场效应管的转移特性是指在 u_{DS} 为定值时, u_{GS} 对 i_D 的控制特性, 即

$$i_D = f(u_{GS}) \Big|_{u_{DS}=\text{常量}} \quad (3.1.2)$$

转移特性曲线如图 3.1.5 (a) 所示。转移特性曲线可根据输出特性曲线绘制, 具体方法如图 3.1.5 中虚线所示。

在恒流区, 转移特性可近似用下式表示:

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(\text{off})}}\right)^2 \quad (3.1.3)$$

式中, I_{DSS} 为饱和漏极电流, 它是 $u_{GS} = 0$ 时的 i_D 。

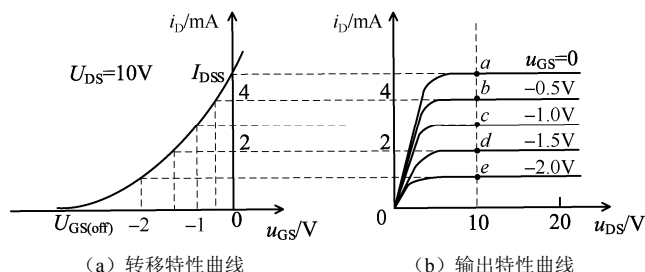


图 3.1.5 从输出特性曲线到转移特性曲线

P 沟道结型场效应管的工作原理和伏安特性, 读者可据此自行分析。



3.1 测试题



3.2 绝缘栅场效应管



绝缘栅场效应管视频 绝缘栅场效应管课件

结型场效应管在正常工作时 PN 结反偏，所以其输入电阻 $r_{GS}(r_{GS} = u_{GS} / i_G)$ 较高，可达 $10^7 \Omega$ ，但是反偏的 PN 结仍有微小的反向电流，所以当需要更大的输入电阻时，应采用绝缘栅场效应管。在绝缘栅场效应管中，目前常用二氧化硅 (SiO_2) 作金属铝 (Al) 和半导体之间的绝缘层，称为金属-氧化物-半导体 (Metal Oxide Semiconductor, MOS) 场效应管，简称 MOSFET 或 MOS 管。由于 MOS 管的栅极与源极、栅极与漏极之间用 SiO_2 绝缘层隔离，所以其输入电阻更高，可达 $10^9 \Omega$ 。

根据导电载流子的不同，MOS 管可分为 N 沟道 MOS 管 (NMOS) 和 P 沟道 MOS 管 (PMOS)。根据导电沟道形成机理不同，又可分为增强型 MOS 管和耗尽型 MOS 管，所以 MOS 管有 4 种类型：N 沟道增强型 MOS 管、N 沟道耗尽型 MOS 管、P 沟道增强型 MOS 管、P 沟道耗尽型 MOS 管。下面分别讨论增强型和耗尽型两种类型 MOS 管的工作原理、特性及主要参数。

3.2.1 增强型 MOS 管

下面以 N 沟道增强型 MOS 管为例，介绍其工作原理和伏安特性。

N 沟道增强型 MOS 管的结构示意图如图 3.2.1 (a) 所示，以一块掺杂浓度较低、电阻率较高的 P 型硅半导体为衬底，采用扩散的方法形成两个高掺杂浓度的 N^+ 型区，引出两个铝电极，分别为漏极 D 和源极 S。在漏极和源极之间的 P 型硅半导体表面制作一层很薄的 SiO_2 绝缘层，引出一个铝电极，为栅极 G。通常情况下，衬底和源极在制造时已短接在一起，此时漏极和源极不可互换。N 沟道增强型 MOS 管的电路符号如图 3.2.1 (b) 所示，电路符号中的箭头方向表示由 P (衬底) 指向 N (导电沟道)，垂直短画线代表导电沟道，短画线表示当栅-源无电压时，漏极与源极之间无导电沟道。

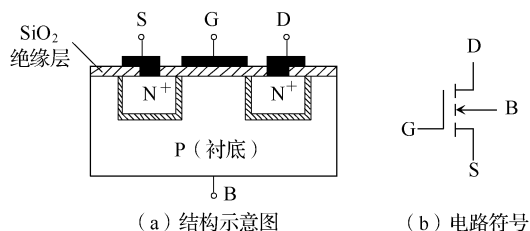


图 3.2.1 N 沟道增强型 MOS 管

1. 工作原理

(1) 在图 3.2.1 (a) 中，将源极和衬底短接，若 $u_{GS} = 0$ ，则漏极和源极之间有两个背靠

背的 PN 结, 所以无论 u_{DS} 的大小、极性如何, 总有一个 PN 结反偏, 漏极和源极之间无导电沟道, 此时漏极电流 $i_D \approx 0$, N 沟道增强型 MOS 管处于截止状态。

把源极和衬底、漏极和源极分别短接, 在栅极和源极之间加正向电压 u_{GS} ($u_{GS} > 0$), 如图 3.2.2 所示。因为漏极、源极及衬底被短接在一起, 所以栅极和衬底相当于一个以 SiO_2 为介质的平板电容器。由于 $u_{GS} > 0$, 所以在该平板电容器内形成了由栅极指向衬底的电场, 该电场会排斥空穴而吸引电子, 衬底中的多子 (空穴) 被排斥向下移动, 剩下不能移动的负离子区, 形成耗尽层, 如图 3.2.2 (a) 所示。该电场同时吸引衬底中的少子 (电子) 向栅极移动。当 u_{GS} 增大时, 向栅极移动的电子数增加, 在绝缘层和耗尽层中间形成 N 型薄层, 称为反型层。该反型层沟通了漏极和源极的 N^+ 型区而形成导电沟道, 即 N 沟道, 如图 3.2.2 (b) 所示。随着 u_{GS} 的增大, 反型层加厚, N 沟道的电阻减小。通常把形成导电沟道时的最小栅-源电压 u_{GS} 称为开启电压 $U_{GS(th)}$ 。

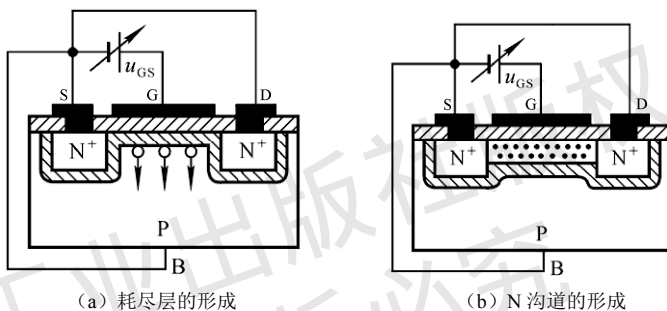
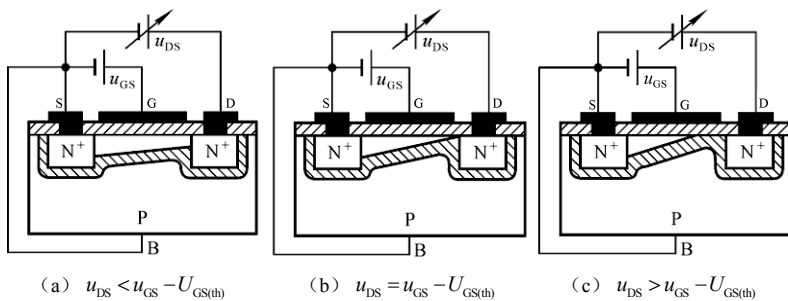


图 3.2.2 当 $u_{DS} = 0$ 时 u_{GS} 对导电沟道的影响

当 $u_{GS} > U_{GS(th)}$ 且保持不变时, 若在漏极和源极之间加正向电压 u_{DS} ($u_{DS} > 0$), 则将产生一定的漏极电流 i_D 。此时, u_{DS} 的变化对导电沟道的影响与结型场效应管类似。当 $u_{DS} > 0$ 且较小时, 导电沟道呈楔形, 靠近漏极一侧窄, 靠近源极一侧宽, 如图 3.2.3 (a) 所示。当导电沟道未被夹断时, 导电沟道电阻的不均匀性不明显, 若 u_{GS} 为定值, 则导电沟道的电阻几乎不变, i_D 随 u_{DS} 增大而线性增大。若进一步增大 u_{DS} , 则 u_{GD} ($u_{GD} = u_{GS} - u_{DS}$) 减小, 靠近漏极一侧的导电沟道变得更窄。当 u_{GD} 减小到 $U_{GS(th)}$ 时, 导电沟道预夹断, 如图 3.2.3 (b) 所示。继续增大 u_{DS} , 使 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} < U_{GS(th)}$, 即 $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(th)}$ 时, 夹断区延长, 如图 3.2.3 (c) 所示, 导电沟道的电阻增大, u_{DS} 的增大部分几乎全部用于克服夹断区对漏极电流的阻力。从外部看, i_D 几乎不再随 u_{DS} 增大, 而基本保持预夹断时的数值, N 沟道增强型 MOS 管进入恒流区, i_D 几乎仅仅决定于 u_{GS} 。



(a) $u_{DS} < u_{GS} - U_{GS(th)}$ (b) $u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(th)}$ (c) $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(th)}$

图 3.2.3 当 $u_{GS} > U_{GS(th)}$ 且 $u_{DS} > 0$ 的情况

2. 伏安特性

N 沟道增强型 MOS 管的输出特性曲线和转移特性曲线如图 3.2.4 所示。与结型场效应管相似，N 沟道增强型 MOS 管也有 3 个工作区域，即截止区、可变电阻区和恒流区。

(1) 截止区（夹断区）

当 $u_{GS} < U_{GS(th)}$ 时，导电沟道尚未形成，N 沟道增强型 MOS 管工作于截止区，如图 3.2.4

(b) 中靠近横轴的区域，此时 $i_D = 0$ 。

(2) 可变电阻区

当 $u_{GS} > U_{GS(th)}$ 且 $u_{DS} \leq u_{GS} - U_{GS(th)}$ 时，N 沟道增强型 MOS 管工作于可变电阻区，如图 3.2.4

(b) 中预夹断轨迹（ $u_{GD} = U_{GS(th)}$ ）左边的区域。

(3) 恒流区（饱和区或放大区）

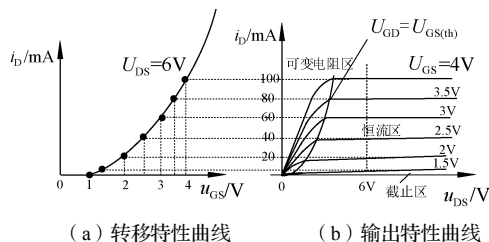
当 $u_{GS} > U_{GS(th)}$ 且 $u_{DS} \geq u_{GS} - U_{GS(th)}$ 时，N 沟道增强型 MOS 管工作于饱和区，如图 3.2.4

(b) 中曲线近似水平方向的平行区域，此时 u_{DS} 较大。在恒流区，N 沟道增强型 MOS 管的漏极电流 i_D 与栅-源电压 u_{GS} 的关系表达式为：

$$i_D = I_{DO} \left(\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2 \quad (3.2.1)$$

式中， I_{DO} 是 $u_{GS} = 2U_{GS(th)}$ 时的漏极电流 i_D 。

当 u_{DS} 过高时会出现击穿，即 N 沟道增强型 MOS 管进入击穿区。



(a) 转移特性曲线 (b) 输出特性曲线

图 3.2.4 N 沟道增强型 MOS 管的特性曲线

P 沟道增强型 MOS 管的工作原理和伏安特性，读者可据此自行分析。

3.2.2 耗尽型 MOS 管

由前面分析可知，N 沟道增强型 MOS 管在 $u_{GS} < U_{GS(th)}$ 时，漏极和源极之间不存在导电沟道，在工作时 u_{GS} 只能是单极性的，这给使用带来不便。耗尽型 MOS 管在制造时，在漏极和源极之间的 SiO_2 中掺入带电离子，这些带电离子将吸引半导体衬底中的异性载流子，从而出现反型层，即不需要外接电路导电沟道就已存在。例如，在 N 沟道耗尽型 MOS 管中，漏极和源极之间的 SiO_2 中已掺入带正电的离子，这些正离子吸引 P 型衬底中的电子，使靠近 SiO_2 一侧的 P 型衬底中形成 N 型反型层，如图 3.2.5 所示。

耗尽型 MOS 管的工作原理与增强型 MOS 管类似，只是其 u_{GS} 可正可负。

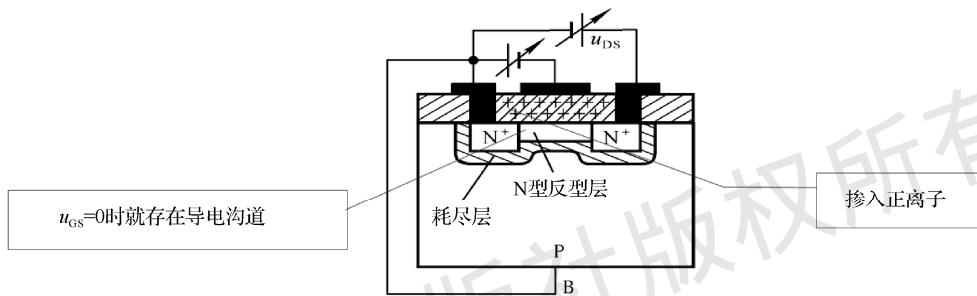


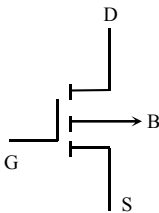
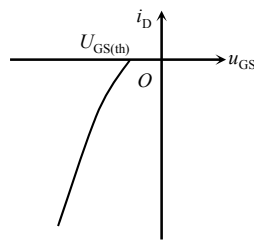
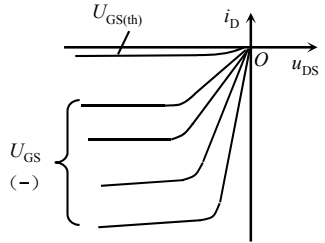
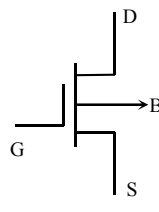
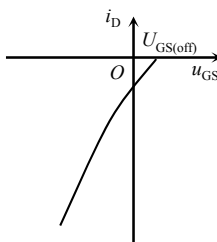
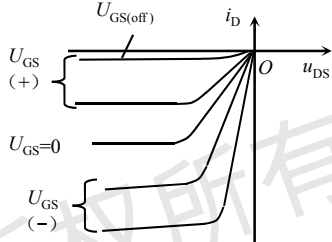
图 3.2.5 N 沟道耗尽型 MOS 管结构示意图

4 种 MOS 管的电路符号和特性曲线如表 3.2.1 所示。

表 3.2.1 4 种 MOS 管的电路符号和特性曲线

参数类型	电路符号	转移特性曲线	输出特性曲线
N 沟道增强型 MOS 管			
N 沟道耗尽型 MOS 管			

续表

参数类型	电路符号	转移特性曲线	输出特性曲线
P沟道增强型MOS管			
P沟道耗尽型MOS管			

3.2.3 MOS管使用注意事项

MOS管使用注意事项如下所示。

(1) 由于MOS管的输入电阻极高，一般大于 $10^9\Omega$ ，所以当MOS管受到外界电场影响时，栅极感应的电荷没有释放通道，而 SiO_2 绝缘层的电容容量很小，只要有很少的感应电荷就能产生很高的电压，从而使很薄的 SiO_2 绝缘层击穿导致MOS管损坏。因此，无论是在存放时，还是在使用中，MOS管都应该避免栅极悬空。测试时所用仪器应保证接地良好，焊接时要将烙铁可靠接地。

(2) MOS管在保存时需要将各极短路。目前市场上已有在栅极与源极之间引入保护用二极管的场效应管，这样使用时就方便安全许多。

(3) MOS管的源极与漏极在结构上是对称的，一般可将源极与漏极互换使用。如果MOS管内部已将衬底与源极短接，则源极与漏极不能互换。对于结型场效应管来说，漏极与源极是可以互换的。



3.2 测试题

3.3 场效应管的参数和小信号模型



3.3.1 场效应管的主要参数

1. 夹断电压 $U_{GS(off)}$

当 u_{DS} 为常量时, 使漏极电流 i_D 为规定的微小电流 (如 $20\mu A$) 时的栅-源电压为夹断电压 $U_{GS(off)}$ 。 $U_{GS(off)}$ 是耗尽型场效应管的主要参数。

2. 开启电压 $U_{GS(th)}$

当 u_{DS} 为常量时, 使漏极电流 i_D 为规定的微小电流 (如 $50\mu A$) 时的栅-源电压为开启电压 $U_{GS(th)}$ 。 $U_{GS(th)}$ 是增强型 MOS 管的主要参数。

3. 饱和漏极电流 I_{DSS}

结型场效应管或者耗尽型 MOS 管在 u_{DS} 为常量、 $u_{GS} = 0$ 时, 发生预夹断时的漏极电流为饱和漏极电流 I_{DSS} 。

4. 低频跨导 g_m

当 u_{DS} 为固定值时, 漏极电流的微小变化量与此时栅-源电压 u_{GS} 的微小变化量之比, 称为低频跨导, 即

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

g_m 反映了栅-源电压 u_{GS} 对漏极电流 i_D 的控制能力, 是表征场效应管放大能力的重要参数。 g_m 在数值上就等于转移特性曲线上静态工作点处切线的斜率, 其大小与工作电流 i_D 有关, 如图 3.3.1 所示。由于转移特性曲线是非线性曲线, 所以 i_D 越大, g_m 也越大。

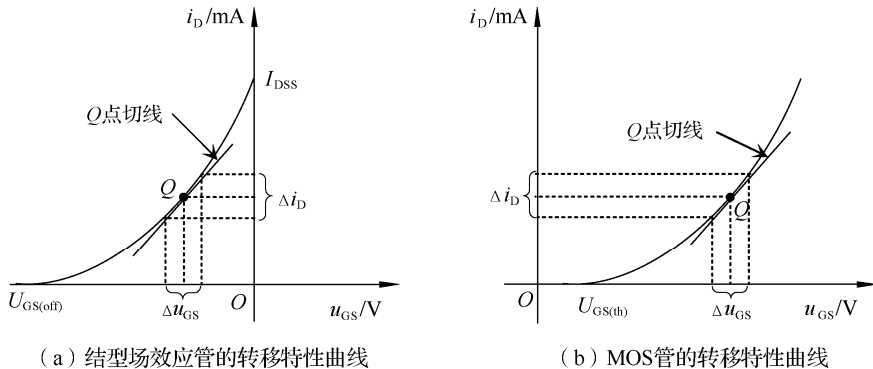


图 3.3.1 结型场效应管与 MOS 管的转移特性曲线

5. 极限参数

1) 漏极最大允许电流 I_{DM}

漏极最大允许电流 I_{DM} 是指场效应管正常工作时漏极电流的最大允许值, 相当于双极型晶体管的集电极最大允许电流 I_{CM} 。

2) 漏极最大允许耗散功率 P_{DM}

漏极耗散功率就是漏极电流 i_D 与漏-源电压 u_{DS} 的乘积, 即 $P_D = u_{DS}i_D$ 。在正常使用时, P_D 必须小于漏极最大允许耗散功率 P_{DM} 。若超过这个数值, 则场效应管会因过热而烧毁, 它相当于双极型晶体管的集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 。

3) 漏-源击穿电压 $U_{(BR)DS}$

漏-源击穿电压 $U_{(BR)DS}$ 是指场效应管工作于恒流区时, 使 i_D 急剧增加的 u_{DS} 值。

4) 栅-源击穿电压 $U_{(BR)GS}$

栅-源击穿电压 $U_{(BR)GS}$ 是指栅极源极之间反向电流开始急剧增加时的 u_{GS} 。结型场效应管的 $U_{(BR)GS}$ 就是栅极与导电沟道之间 PN 结的反向击穿电压; MOS 管的 $U_{(BR)GS}$ 就是 SiO_2 绝缘层击穿时的 u_{GS} 。

3.3.2 场效应管的小信号模型

与分析晶体管的等效模型相同, 将场效应管看成一个二端口网络, 栅极与源极之间看成输入端口; 漏极与源极之间看成输出端口。以 N 沟道增强型 MOS 管为例, 可以认为栅极电流为零, 栅极和源极之间只有电压存在。而 i_D 是 u_{GS} 和 u_{DS} 的函数, 即

$$i_D = f(u_{GS}, u_{DS}) \quad (3.3.2)$$

取其全微分, 可得:

$$di_D = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{U_{DS}} du_{GS} + \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \right|_{U_{GS}} du_{DS} \quad (3.3.3)$$

其中, $\left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{U_{DS}}$ 为跨导 g_m , 而

$$\left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \right|_{U_{GS}} = \frac{1}{r_{ds}} \quad (3.3.4)$$

当信号幅值较小时, 场效应管的电流和电压只在 Q 点附近变化, 因此可认为在 Q 点附近的特性是线性的, g_m 和 r_{ds} 近似为常数。式 (3.3.3) 可以写成:

$$i_d = g_m u_{gs} + \frac{1}{r_{ds}} u_{ds} \quad (3.3.5)$$

由式 (3.3.5) 可画出场效应管在低频时的微变等效电路, 如图 3.3.2 所示。在放大电路

中, r_{ds} 的数值通常大于几十千欧, 远大于漏极的等效负载电阻, 所以可将其视为开路。

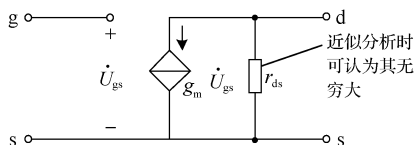


图 3.3.2 场效应管在低频时的微变等效电路

3.3.3 场效应管与晶体管的比较

场效应管和晶体管的主要区别包括以下几个方面。

1. 导电机理

场效应管只利用一种载流子导电, 而晶体管则利用两种载流子导电。

2. 结构对称性

场效应管的结构具有对称性, 如果 MOS 管的衬底在电路内部事先不与源极相连, 则 MOS 管的源极和漏极可以互换。而晶体管的结构没有对称性, 它的集电极与发射极是不能互换的。

3. 控制方式

场效应管工作于放大状态时, 漏极电流 i_D 基本上只随栅-源电压 u_{GS} 的变化而变化, 所以是电压控制器件。

晶体管工作于放大状态时, 集电极电流 i_C 基本上只随基极电流 i_B 的变化而变化, 所以是电流控制器件。

4. 放大能力

场效应管的跨导 g_m 较小, 所以其放大能力较弱; 晶体管的电流放大系数 β 较大, 所以放大能力较强。

5. 直流输入电阻

场效应管的直流输入电阻大 (结型场效应管大于 $10^7\Omega$, MOS 管大于 $10^9\Omega$); 而晶体管的直流输入电阻较小 (发射结正偏)。

6. 稳定性及噪声

场效应管具有较好的温度稳定性、抗辐射性和低噪声性, 而双极型晶体管受温度和辐射的影响较大。这是因为场效应管只依靠自由电子或空穴在导电沟道中的漂移运动实现导电, 导电能力不易受环境的影响; 而双极型晶体管则主要依靠基区中非平衡少子的扩散运动导电, 其导电能力受外界环境影响较大。



3.3 测试题



3.4 场效应管放大电路



场效应管放大电路视频 场效应管放大电路课件

与双极型晶体管相似，场效应管也可构成 3 种基本放大电路：共源极放大电路、共漏极放大电路和共栅极放大电路。为了使场效应管放大电路可以线性地放大信号，必须设置合适的静态工作点，以保证在信号的整个周期内，场效应管均工作于放大区。下面分别讨论场效应管放大电路的偏置方法及其静态分析和动态分析。

3.4.1 场效应管偏置电路及其静态分析

1. 基本共源放大电路

基本共源放大电路采用的是 N 沟道增强型 MOS 管，如图 3.4.1 所示， U_{GG} 是栅极回路的直流电源，其作用是给 MOS 管的栅极和源极之间加上合适的直流偏置电压，以保证 $u_{GS} > u_{GS(th)}$ 。 U_{DD} 是漏极回路的直流电源，其作用是保证在漏极和源极之间加上一个合适的工作电压 u_{DS} 。 R_d 与共发射极放大电路中的 R_c 具有完全相同的作用，它将漏极电流 i_D 的变化转换成电压 u_{DS} 的变化，从而实现电压放大。

1) 图解法求解静态工作点

令 $u_i = 0$ ，由于栅极与源极之间是绝缘的，所以栅极电流 $I_G = 0$ ，此时 $U_{GSQ} = U_{GG}$ 。

假设场效应管的输出特性曲线已知，首先在输出特性曲线中找到 $U_{GS} = U_{GG}$ 的那条输出特性曲线，然后作直流负载线 $U_{DS} = U_{DD} - I_D R_d$ ，如图 3.4.2 所示。直流负载线与输出特性曲线的交点就是静态工作点 Q ，读其坐标值即得 I_{DQ} 和 U_{DSQ} 。

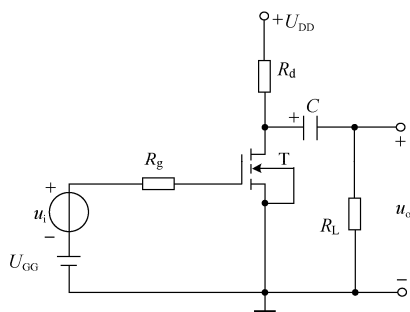


图 3.4.1 基本共源放大电路

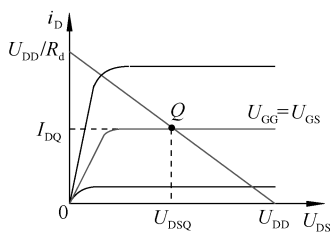


图 3.4.2 图解法求静态工作点

2) 估算法求解静态工作点

由图 3.4.1 可知， $U_{GSQ} = U_{GG}$ ，代入式 (3.2.1) 可得 I_{DQ} ，即

$$I_{DQ} = I_{DO} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2 \quad (3.4.1)$$

对输出回路列 KVL 方程

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} R_d \quad (3.4.2)$$

由此可得静态工作点 $Q (U_{GSQ}, I_{DQ}, U_{DSQ})$ 。

例 3.4.1 基本共源放大电路如图 3.4.1 所示, 已知 $U_{GG} = 2V$, $U_{DD} = 5V$, $U_{GS(th)} = 1V$, $I_{D0} = 0.2mA$, $R_d = 12k\Omega$ 。试计算此电路的静态工作点。

解: 令 $u_i = 0$, 则 $U_{GSQ} = U_{GG} = 2V$

由式 (3.4.1) 可得:

$$I_{DQ} = I_{D0} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2 = 0.2 \times \left(\frac{2}{1} - 1 \right)^2 = 0.2mA$$

由式 (3.4.2) 可得:

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} R_d = 5 - 0.2 \times 12 = 2.6V$$

$\because U_{DSQ} > U_{GSQ} - U_{GS(th)} = 1$

\therefore 场效应管工作于饱和区, 静态工作点 $Q (2V, 0.2mA, 2.6V)$ 。

为了使信号源和放大电路“共地”, 也为了采用单电源供电, 在实用电路中多采用下面介绍的自给偏压电路和分压式偏置电路。

2. 自给偏压电路

N 沟道结型场效应管放大电路如图 3.4.3 所示, 该电路也是典型的自给偏压电路。在静态时, $I_G \approx 0$, 使栅极电位近似为零, 由于 N 沟道结型场效应管在 $U_{GS} = 0$ 时导电沟道就已存在, 所以图 3.4.3 中源极的静态电位为正, 故 $u_{GS} < 0$, 满足场效应管的工作条件。

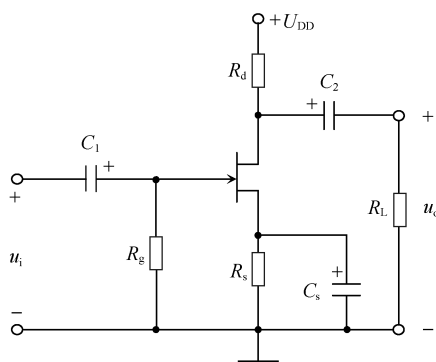


图 3.4.3 自给偏压电路

1) 公式法估算静态工作点

由下式可求得自给偏压电路的静态工作点:

$$\begin{cases} U_{GSQ} = -I_{DQ}R_s \\ I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}} \right)^2 \\ U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ}(R_s + R_d) \end{cases} \quad (3.4.3)$$

2) 图解法求解静态工作点

利用图解法求解场效应管自给偏压电路的静态工作点的步骤如下所示。

在转移特性曲线上根据 $U_{GS} = -I_D R_s$ 作直线 OL ，该直线与转移特性曲线的交点即静态工作点 Q ，读其坐标值即得 I_{DQ} 和 U_{GSQ} ，如图 3.4.4 (a) 所示。

根据 $U_{DD} = U_{DS} + I_D (R_s + R_d)$ 在输出特性曲线上画出对应的直流负载线 MN 。过 Q 点作水平线，水平线与直线 MN 的交点 Q' 所对应的横坐标即 U_{DSQ} ，如图 3.4.4 (b) 所示。

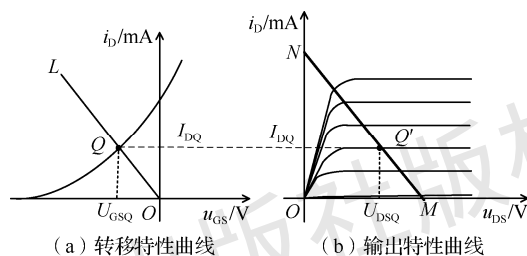


图 3.4.4 图解法求解自给偏压电路的静态工作点

3. 分压式偏置电路

N 沟道结型场效应管构成的分压式偏置电路如图 3.4.5 所示。为了提高电路的输入阻抗，引入了高阻值的 R_{g1} 。由于栅极电流几乎为零，所以栅极电位 V_G 由 R_{g1} 和 R_{g2} 分压得到：

$$V_G = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} U_{DD}$$

而 $V_S = I_D R_s$ ，所以

$$U_{GSQ} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} U_{DD} - I_D R_s$$

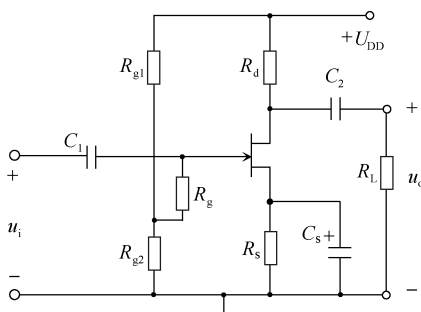


图 3.4.5 分压式偏置电路

由此可见，只要选择不同比例的 R_{g1} 和 R_{g2} ， U_{GS} 的大小和极性均可不同，因此分压式偏置电路适用于任何类型的场效应管。

联立求解以下方程式，即可求得此电路的静态工作点：

$$\begin{cases} U_{GSQ} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} U_{DD} - I_{DQ} R_s \\ I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}} \right)^2 \\ U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} (R_s + R_d) \end{cases} \quad (3.4.4)$$

如果为增强型 MOS 管，只需要将方程式中的 $U_{GS(off)}$ 换成 $U_{GS(th)}$ 、将 I_{DSS} 换成 I_{DO} 即可。

用图解法求解分压式偏置电路静态工作点的步骤与自给偏压电路相似。

3.4.2 场效应管放大电路的动态分析

1. 共源极放大电路的微变等效电路分析法

图 3.4.3 所示共源极放大电路的微变等效电路如图 3.4.6 所示，由此可求出电路的动态参数。

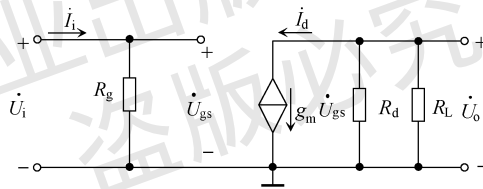


图 3.4.6 共源极放大电路的微变等效电路

电压放大倍数：

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-g_m \dot{U}_{gs} (R_d // R_L)}{\dot{U}_{gs}} = -g_m (R_d // R_L) \quad (3.4.5)$$

输入电阻：

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_g \quad (3.4.6)$$

令 $\dot{U}_i = 0$ ，则 $\dot{U}_{gs} = 0$ ，所以 $g_m \dot{U}_{gs} = 0$ ，可得输出电阻：

$$R_o \approx R_d \quad (3.4.7)$$

2. 共漏极放大电路的微变等效电路分析法

共漏极放大电路及其微变等效电路如图 3.4.7 所示，由此可求出电路的动态参数。

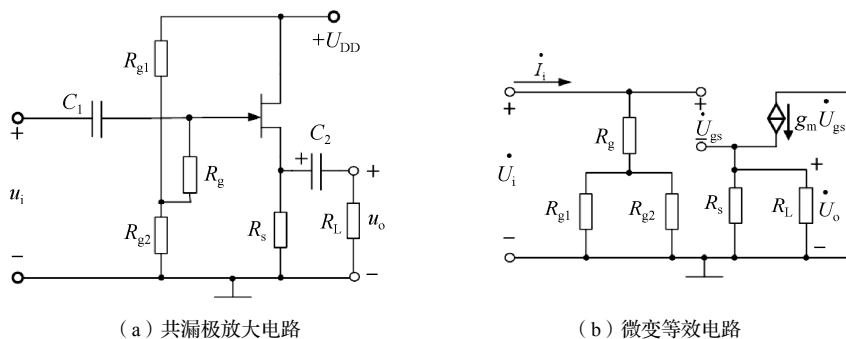


图 3.4.7 共漏极放大电路及其微变等效电路

电压放大倍数:

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{g_m \dot{U}_{gs} (R_s // R_L)}{\dot{U}_{gs} + g_m \dot{U}_{gs} (R_s // R_L)} = \frac{g_m (R_s // R_L)}{1 + g_m (R_s // R_L)} \quad (3.4.8)$$

输入电阻:

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_g + R_{g1} // R_{g2} \quad (3.4.9)$$

为了求出共漏极放大电路的输出电阻 R_o , 令 $u_i = 0$, 把 R_L 开路, 在 R_L 原来的位置上加电压 u_x , 求电流 i_x , 如图 3.4.8 所示。

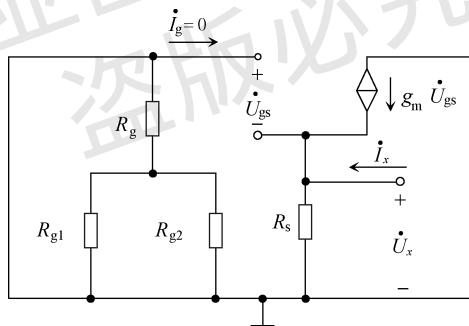


图 3.4.8 求共漏极放大电路的输出电阻等效图

由

$$(\dot{I}_x + g_m \dot{U}_{gs}) R_s = -\dot{U}_{gs}$$

可得:

$$\begin{aligned} \dot{I}_x &= -\frac{1 + g_m R_s}{R_s} \dot{U}_{gs} \\ R_o &= \frac{\dot{U}_x}{\dot{I}_x} = \frac{-\dot{U}_{gs}}{-\frac{1 + g_m R_s}{R_s} \dot{U}_{gs}} = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + g_m} = R_s // \frac{1}{g_m} \end{aligned} \quad (3.4.10)$$

例 3.4.2 电路如图 3.4.9 所示, 设 $R_{g1}=90\text{k}\Omega$, $R_{g2}=60\text{k}\Omega$, $R_d=R_L=30\text{k}\Omega$, $U_{DD}=5\text{V}$, $U_{GS(th)}=1\text{V}$, $I_{D0}=0.1\text{mA}$, $g_m=0.2\text{mS}$ 。(1) 计算静态工作点 Q (U_{GSQ} , I_{DQ} , U_{DSQ}), 判断场效应管的工作状态; (2) 计算电压放大倍数 A_u 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

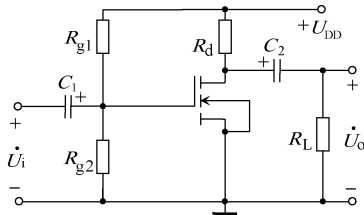


图 3.4.9 例 3.4.2 图

解: (1) 直流通路如图 3.4.10 所示。由图 3.4.10 可得:

$$U_{GSQ} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} U_{DD} = \frac{60}{60 + 90} \times 5 = 2\text{V}$$

由式 (3.4.1) 得:

$$I_{DQ} = I_{D0} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2 = 0.1 \times \left(\frac{2}{1} - 1 \right)^2 = 0.1\text{mA}$$

对输出回路列 KVL 方程, 得:

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} R_d = 5 - 0.1 \times 30 = 2\text{V} > U_{GSQ} - U_{GS(th)}$$

所以场效应管工作于饱和区, 静态工作点 Q (2V , 0.1mA , 2V)。

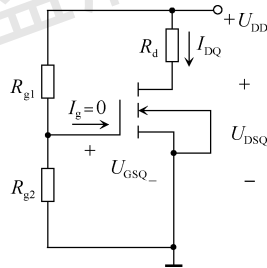


图 3.4.10 直流通路

(2) 该电路的微变等效电路如图 3.4.11 所示, 由此可求得动态参数。

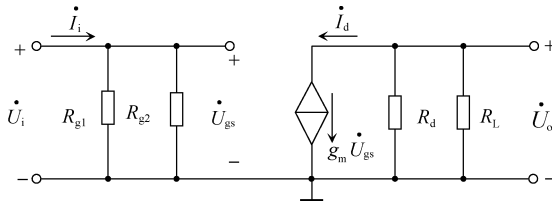


图 3.4.11 微变等效电路

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -g_m(R_d // R_L) = -0.2 \times (30 // 30) = -3$$

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_{g1} // R_{g2} = 60 // 90 = 36\text{k}\Omega$$

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



3.4 测试题

本章小结

(1) 场效应管 (FET) 分为结型场效应管 (JFET) 和绝缘栅场效应管 (MOS 管), 每一类又有 N 沟道和 P 沟道之分。结型场效应管只有耗尽型, 而绝缘栅场效应管有增强型和耗尽型两种。二者因结构上的差异, 其控制漏极电流的机理不完全相同, 但都是利用栅-源电压 u_{GS} 的变化控制导电沟道的宽窄, 从而达到控制漏极电流 i_D 的目的, 所以场效应管是电压控制器件。因为其内部只有一种载流子参与导电, 所以为单极型器件。

(2) 场效应管的伏安特性有输出特性和转移特性, 二者之间有严格的对应关系, 由输出特性曲线可对应求出转移特性曲线。输出特性曲线通常可划分为可变电阻区、恒流区 (饱和区) 和夹断区 (截止区)。在放大电路中, 场效应管工作于恒流区。

(3) 场效应管放大电路有 3 种基本组态: 共源极放大电路、共漏极放大电路和共栅极放大电路, 其静态分析方法、动态分析方法与晶体管放大电路基本相同。场效应管放大电路与晶体管放大电路有一一对应关系, 即共发射极对共源极、共集电极对共漏极、共基极对共栅极。共源极放大电路可实现反相放大, 输入电阻大; 共漏极放大电路又称为源极输出器, u_o 与 u_i 同相, 电压放大倍数 A_u 小于 1, 输入电阻大, 输出电阻小; 共栅极放大电路可实现同相放大, 输入电阻小。

(4) 场效应管的性能比双极型晶体管优越, 具有输入阻抗高、噪声低、功耗小等优点, 所以它的应用十分广泛, 尤其在集成电路中。

习题 3



第3章综合测试题

3.1 选择题

(1) 下列场效应管中, 没有原始导电沟道的为 ()。

- A. N 沟道结型场效应管 B. N 沟道耗尽型 MOS 管
 C. P 沟道增强型 MOS 管 D. P 沟道耗尽型 MOS 管
- (2) 当 $U_{GS} = 0$ 时, 不可能工作于恒流区的场效应管是 ()。
- A. 结型场效应管 B. 增强型 MOS 管
 C. P 沟道耗尽型 MOS 管 D. N 沟道耗尽型 MOS 管
- (3) 场效应管用于放大电路时, 工作于 ()。
- A. 恒流区 B. 可变电阻区 C. 截止区 D. 击穿区
- (4) 下列不属于场效应管的特点的是 ()。
- A. 场效应管的输入电阻高 B. 噪声低
 C. 只有一种载流子参与导电 D. 放大能力强

3.2 场效应管有哪几种类型, 各种管子在结构上有什么特点? 画出各种场效应管的电路符号。

3.3 为什么场效应管的导电沟道出现预夹断后, 其漏极电流基本上不再随漏-源电压的增大而增大?

3.4 简述开启电压 $U_{GS(th)}$ 、夹断电压 $U_{GS(off)}$ 的含义, 并说明如何由转移特性曲线确定它们的值。

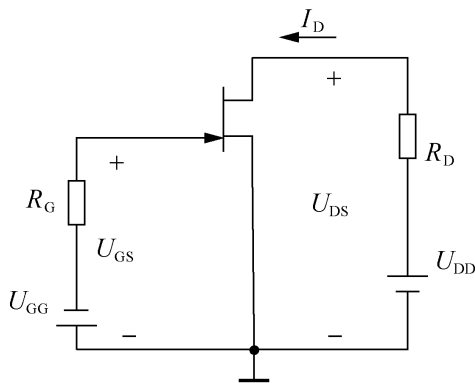
3.5 场效应管的放大能力用什么参数表示? 它是如何定义的?

3.6 为什么场效应管的输入电阻非常大?

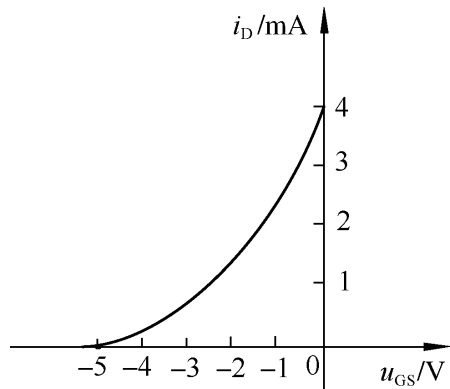
3.7 在题 3.7 图所示的电路中, 已知场效应管的 $U_{GS(off)} = -4V$, 问在下列 3 种情况下, 管子分别工作于什么状态 (区域)?

- (1) $u_{GS} = -7V, u_{DS} = 3V$; (2) $u_{GS} = -2V, u_{DS} = 4V$; (3) $u_{GS} = -2V, u_{DS} = 1V$ 。

3.8 一个结型场效应管的转移特性曲线如题 3.8 图所示, 试问它是 N 沟道结型场效应管还是 P 沟道结型场效应管? 它的夹断电压 $U_{GS(off)}$ 和饱和漏极电流 I_{DSS} 各是多少?

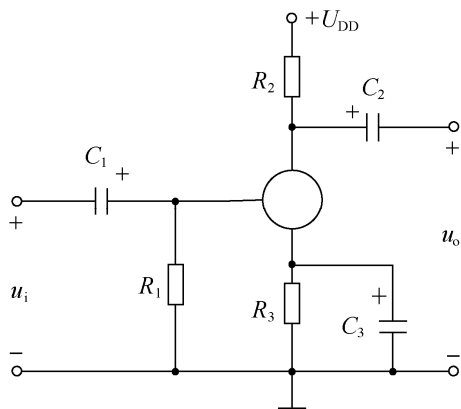


题 3.7 图



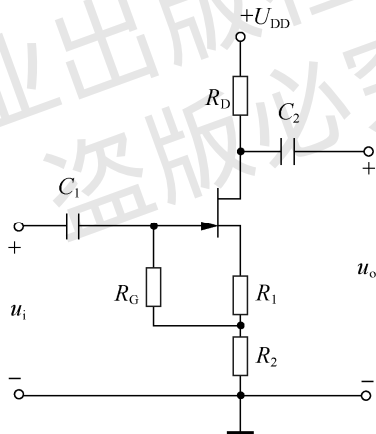
题 3.8 图

3.9 在题 3.9 图所示的电路中接入什么类型的管子，能使之正常放大？要求写出两种管子。



题 3.9 图

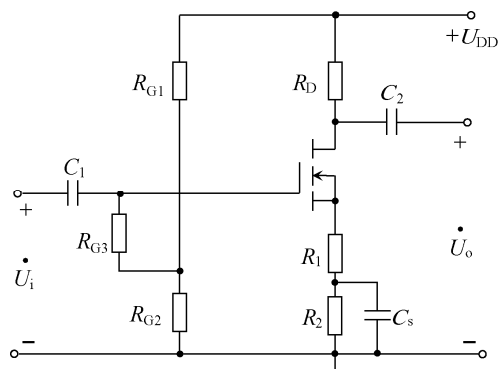
3.10 在题 3.10 图所示的电路中，已知场效应管处于放大状态， $I_{DSS} = 7\text{mA}$ ， $U_{GS(\text{off})} = -8\text{V}$ 。电路参数为 $U_{DD} = 30\text{V}$ ， $R_G = 1\text{M}\Omega$ ， $R_D = 3\text{k}\Omega$ ， $R_1 = R_2 = 500\Omega$ 。试确定其静态工作点 Q 。



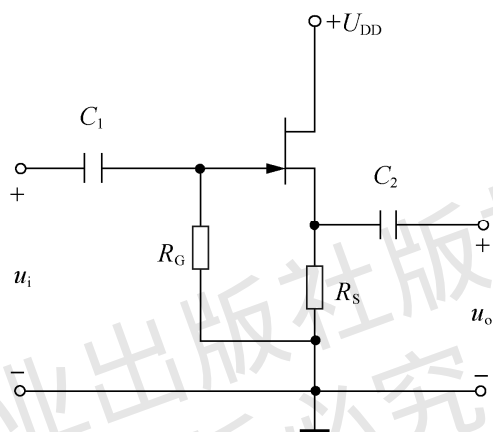
题 3.10 图

3.11 在题 3.11 图所示的电路中，已知 $U_{DD} = 20\text{V}$ ， $R_{G1} = 300\text{k}\Omega$ ， $R_{G2} = 100\text{k}\Omega$ ， $R_{G3} = 2\text{M}\Omega$ ， $R_D = 10\text{k}\Omega$ ， $R_1 = 2\text{k}\Omega$ ， $R_2 = 10\text{k}\Omega$ ，各电容的容量都足够大，场效应管在工作点上的跨导 $g_m = 1\text{mS}$ ，设 $r_{ds} \gg R_D$ 。(1) 画出微变等效电路；(2) 计算电压放大倍数 A_u ；(3) 计算放大电路的输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

3.12 在题 3.12 图所示的电路中，已知场效应管工作于恒流区， $R_G = 1.1\text{M}\Omega$ ， $R_S = 10\text{k}\Omega$ ，各电容的容量都足够大，场效应管在工作点上的跨导 $g_m = 0.9\text{mS}$ ，设 r_{ds} 可以忽略。求放大电路的电压放大倍数 A_u 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。



题 3.11 图



题 3.12 图