

## 实验 5 MOSFET 放大器设计与测试

### 一、实验目的

1. 理解 MOSFET 放大电路的组成原则、组成方式特点和电路特点；
2. 掌握 MOSFET 放大电路静态工作点的测试方法和调试原理；
3. 掌握 MOSFET 放大电路增益（放大倍数）的测试方法；
4. 掌握 MOSFET 放大电路输入电阻、输出电阻和通频带的测试方；
5. 掌握直流稳压电源、数字万用表、函数发生器、晶体管毫伏表和示波器的使用。

### 二、预习要求

1. 在 MOSFET 放大电路直流电源的作用是什么？
2. MOSFET 输出特性曲线分为哪些区域？如何让 N 沟道增强型 MOSFET 在放大区？
3. MOSFET 放大电路静态工作点如何计算和调试？
4. 如何计算共源极 MOSFET 放大电路的放大倍数？影响因素有哪些？
5. 如何计算共源极 MOSFET 放大电路的输入电阻和输出电阻？

### 三、实验设备及元器件准备

1. 函数发生器一台。
2. 晶体管毫伏表一台。
3. 直流稳压电源一台。
4. 示波器一台。
5. 数字万用表一个
6. N 沟道增强型 MOSFET、电阻、电解电容、导线若干。
7. 面包板一个。

### 四、实验原理

场效应管是一种电压控制型的半导体器件。按其结构和工作原理不同，可分为结型场效应管和绝缘栅型场效应管。它不仅像双极型晶体管一样具有体积小、重量轻、耗电少、寿命长等优点；而且与 BJT 相比，它的输入阻抗很高，可达  $10^9 \sim 10^{12} \Omega$ ，热稳定性好，抗辐射能力强。它的最大优点是占用硅片面积小，制作工艺简单，成本低，很容易在硅片上大规模集成，因此在大规模集成电路中占有极其重要的地位。

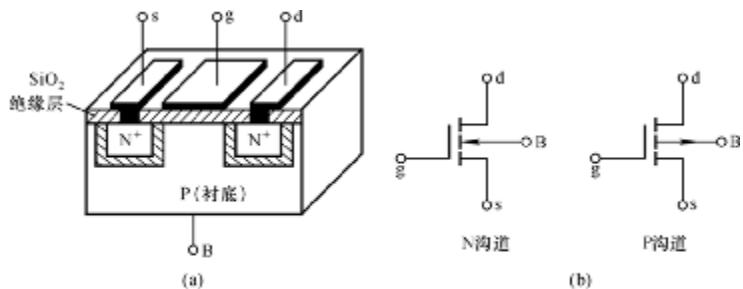


图5.1 N沟道增强型场效应管结构和电路符号

### （一）绝缘栅型效应管的结构和特性

绝缘栅型效应管（MOSFET）简称 MOS 管，由金属、氧化物、半导体材料制成，因其栅极与其它电极完全绝缘而得名。绝缘栅型效应管按照导电沟道有 N 沟道和 P 沟道之分外，还可以根据工作方式的不同分为增强型和耗尽型。图 5.1 为 N 沟道增强型场效应管的结构和电路符号。

绝缘栅型效应管是利用栅源电压（ $u_{GS}$ ）感应电荷形成导电沟道，形成导电沟道时的栅源电压称为开启电压（ $U_{GS(th)}$ ），并通过漏源电压（ $u_{DS}$ ）改变沟道导电特性来控制漏极电流实现放大功能和开关功能，如图 5.2 所示。图 5.2（a）（b）（c）分别描述了当漏源电压  $u_{DS} < u_{GS} - U_{GS(th)}$  时、 $u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(th)}$  时、 $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(th)}$  时导电沟道处于楔形、预夹断、部分夹断的情况。

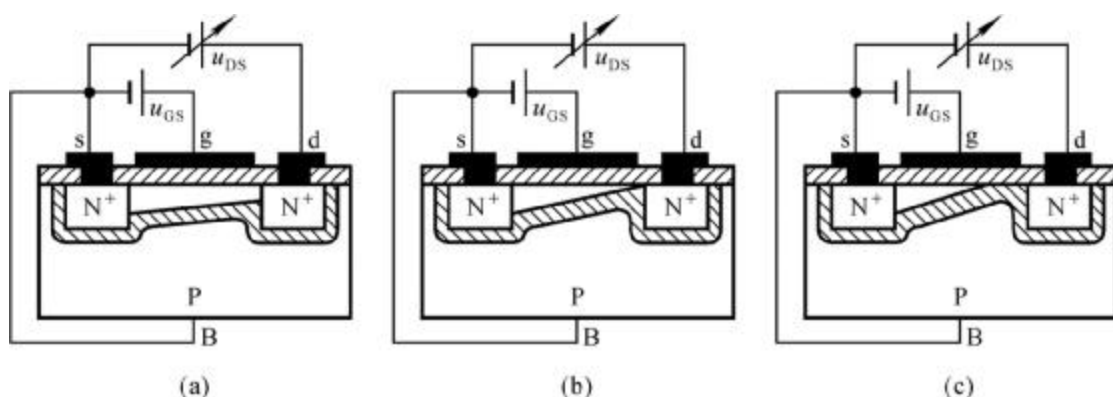


图 5.2 N 沟道增强型 MOS 管工作原理

栅源电压对漏极电流的控制关系可用转移特性曲线来描述，图 5.3（a）为 N 沟道增强型 MOS 管的转移特性曲线。

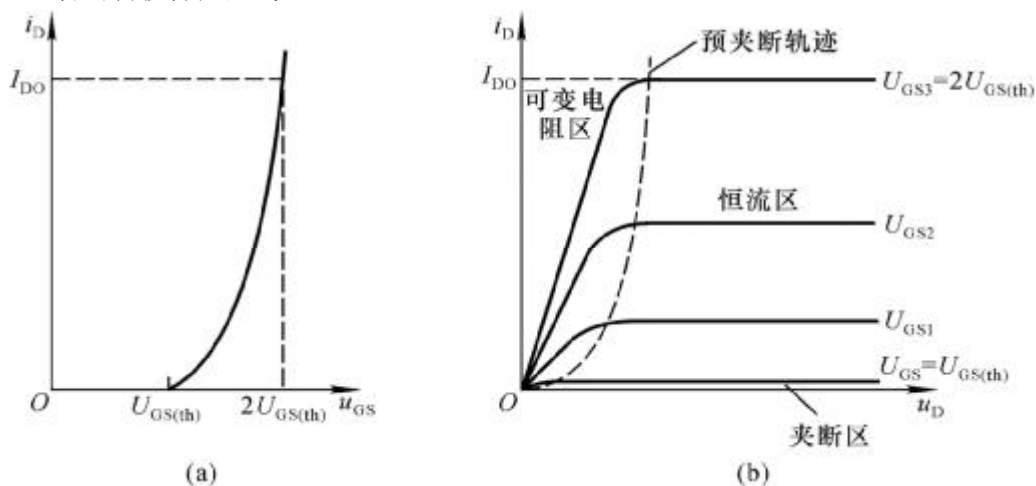


图 5.3 N 沟道增强型 MOS 管特性曲线

图 5.3 中  $U_{GS(th)}$  为开启电压，当  $U_{GS} < U_{GS(th)}$  时漏极电流几乎为零，此时场效应管处于夹断区；当  $U_{GS} > U_{GS(th)}$  时才有漏极电流，而且受  $U_{GS}$  控制，其控制关系可用转移特性方程来描述。

$$I_D = I_{DO} \left( \frac{U_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2 \quad (5.1)$$

式中  $I_{DO}$  为  $U_{GS}=2U_{GS(th)}$  时漏极电流，转移特性曲线的斜率称为跨导  $g_m$ ， $g_m$  是衡量场效应管放大能力的主要参数。

场效应管的输出电压和输出电流的关系可用输出特性曲线来描述，如图 5.3 (b) 所示。输出特性曲线分为四个区，它们分别是可变电阻区、恒流区、夹断区和击穿区。

### 1. 可变电阻区

图 5.3 (b) 中虚线左边区域称为可变电阻区，该区域中的曲线近似为不同斜率的直线。当  $U_{GS}$  确定时，直线的斜率也唯一地被确定，该斜率的倒数即为漏源间的等效电阻。因此，在该区域中，通过改变  $U_{GS}$  的大小，可以改变漏源间的电阻阻值。所以把这个区域称为可变电阻区。

### 2. 恒流区

图 5.3 (b) 虚线右边区域为恒流区，各曲线近似为一组横轴的平行线。漏极电流  $I_D$  基本不随  $U_{DS}$  而变，故称此区域为恒流区。在恒流区内，虽然  $I_D$  不随  $U_{DS}$  而变化，但是，对应于不同的  $U_{GS}$ ，漏极电流的恒值不同。也就是说， $U_{GS}$  对漏极电流有控制作用，所以又称为“放大区”。场效应管作为放大器使用时，一般工作在此区域内。

### 3. 夹断区

当  $U_{GS} < U_{GS(th)}$  时，导电沟道被夹断， $I_D \approx 0$ ，即图 5.3 (b) 中  $U_{GS} = U_{GS(th)}$  以下靠近横轴的部分，称为夹断区。

### 4. 击穿区

当  $U_{DS}$  增加到某一临界值时，漏极电流  $I_D$  开始迅速增大而出现击穿现象。这是由于  $U_{DS}$  过高而使漏区与衬底之间的 PN 结产生雪崩击穿所致。

## (二) 共源极 MOSFET 放大电路分析

如图 5.4 所示为实验所采用的阻容耦合共源极 MOSFET 放大电路。为使 MOS 管工作在恒流区，通过  $R_{g1}$  和  $R_{g2}$  对电源  $V_{DD}$  分压来设置偏压  $U_G$ ，所以称此电路为分压式偏置电路。 $U_{GS}$  应大于  $U_{GS(th)}$ ；在输出回路加漏极电源  $V_{DD}$ ，一方面使漏源电压大于予夹断电压，以保

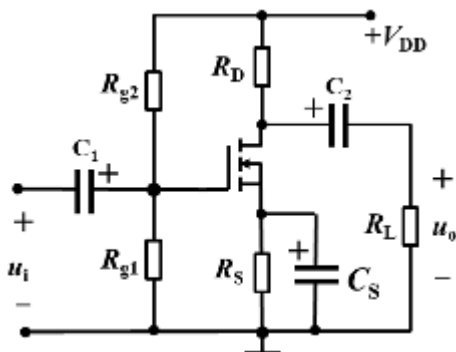


图 5.4 电容耦合共源极放大器

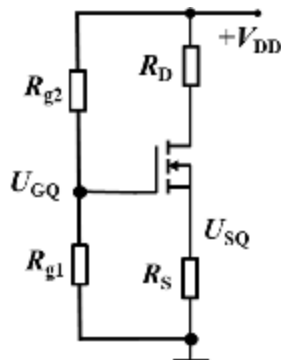


图 5.5 分压偏置电路

证管子工作在恒流区，另一方面作为电路的能源。 $R_d$ 的作用是将漏极电流  $I_D$  的变化转换成电压  $U_{DS}$  的变化，从而实现电压放大。

### 1. 直流分析

据场效应管放大电路得到图 5.5 所示直流通路，称为分压式偏置电路。由于栅极电流为零，所以栅极电位可用分压公式得出

$$U_{GQ} = \frac{R_{g1}}{R_{g1} + R_{g2}} V_{DD} \quad (5.2)$$

$$U_{SQ} = I_{DQ} R_S \quad (5.3)$$

$$U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ} = \frac{R_{g1}}{R_{g1} + R_{g2}} V_{DD} - I_{DQ} R_S \quad (5.4)$$

$$I_{DQ} = I_{DO} \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}}^2 \quad (5.5)$$

联立式 5.4、式 5.5 两式可计算出  $U_{GSQ}$ ， $I_{DQ}$ 。

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_d + R_s) \quad (5.6)$$

$U_{GSQ}$ ， $I_{DQ}$ ， $U_{DSQ}$  为 MOSFET 放大电路的静态工作点。

### 2. 动态分析

根据图 5.6 放大电路的交流通路，把其中的场效应管用低频小信号模型替代得到微变等效电路如图 5.7 所示，场效应管放大电路的动态分析是根据微变等效电路求电路的电压放大倍数  $A_u$ 、输入电阻  $R_i$  和输出电阻  $R_o$ 。

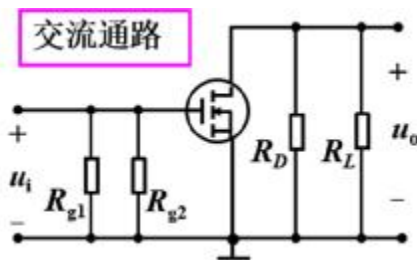


图 5.6 放大器的交流通路

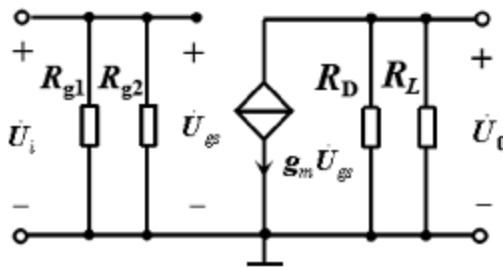


图 5.7 放大器的微变等效电路

#### 1) 电压放大倍数

根据电压放大倍数的定义计算可得：

$$A_U = \frac{U_o}{U_i} = -g_m (R_D // R_L) \quad (5.7)$$

$$2) \text{ 输入电阻 } R_i = R_{g1} // R_{g2} \quad (5.8)$$

$$3) \text{ 输出电阻 } R_o = R_D \quad (5.9)$$

### (三) 场效应管放大电路的测试方法

## 1. 静态工作点的测试

测量放大器的静态工作点，应在不加输入信号（ $u_s=0$ ）的情况下进行。

场效应管放大电路的静态工作点测量可选用量程合适的数字万用表或直流电压表，分别测量场效应管各电极对地的电位  $U_G$ 、 $U_S$  和  $U_D$ 。对漏极电流的测量，为了避免断开漏极，可使用间接测量的方法，先测量源极电阻两端的电压  $U_S$ ，再除以源极电阻算出漏极电流  $I_{DQ}$  的方法，例如，只要测出  $U_S$ ，即可用  $I_{DQ} = \frac{U_S}{R_S}$  算出  $I_{DQ}$ 。为了减小误差，提高测量精度，应选用内阻较高的直流电压表。

另外，场效应管三极对地的电位也可以使用示波器测量（注意耦合方式为直流耦合）。

## 2. 放大器动态指标测试

放大电路的动态指标包括电压放大倍数、输入电阻、输出电阻、最大不失真输出电压（动态范围）和通频带等。在进行动态测试之前，各电子仪器与被测电路的连接如图 5.8 所示。必须注意，各仪器的公共接地端与被测电路的公共接地端应连接在一起（称为“共地”），同时信号源、毫伏表和示波器的信号线通常都采用屏蔽线，而直流稳压电源  $V_{CC}$  的正负电源线只须用普通导线即可。

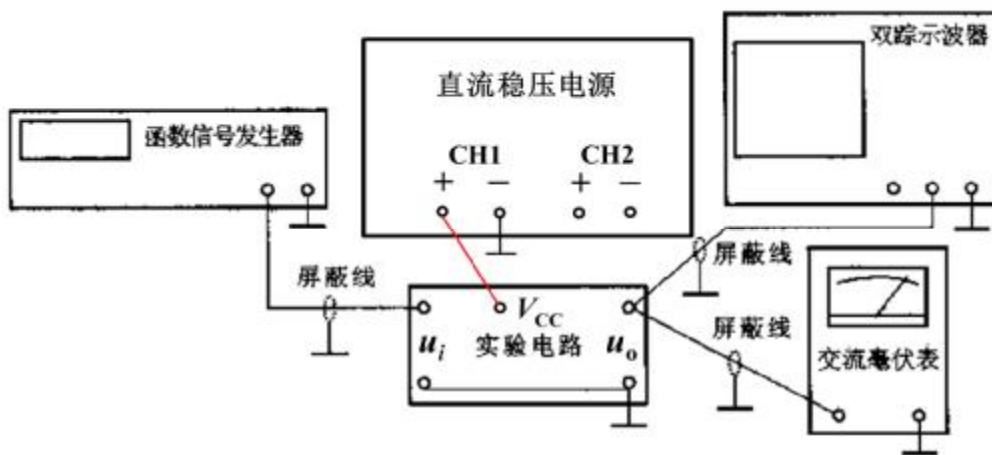


图 5.8 实验电路与各测试仪器的连接

### 1) 电压放大倍数的测量

静态工作点测试正确后，用函数发生器输出 1kHz，有效值为 10mV 左右的正弦交流信号，用示波器观察放大电路输出电压的波形，在输出信号没有明显失真的情况下，用交流毫伏表分别测出  $u_i$  和  $u_o$  的有效值  $U_i$  和  $U_o$ ，则放大倍数为

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} \quad (5.10)$$

## 2) 输入电阻的测量

输入电阻的测量电路如图 5.9 所示。

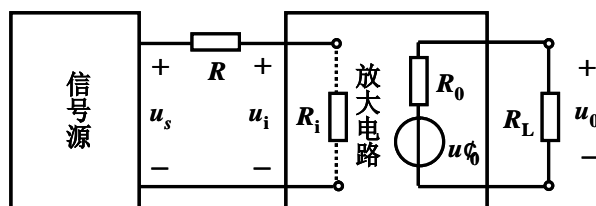


图 5.9 测量输入电阻的电路

在放大电路的输入端串联一只阻值已知的电阻  $R$  (取样电阻), 见图 5.9 所示, 通过毫伏表分别测出取样电阻  $R$  两端对地信号电压, 求得  $R$  上的压降  $(U_s - U_i)$ , 则:

$$I_i = (U_s - U_i) / R$$

所以有:

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{\frac{U_s - U_i}{R}} = \frac{U_i}{U_s - U_i} R \quad (5.11)$$

注意: 取样电阻  $R$  的值不宜取得过大或过小, 以免产生较大的测量误差, 通常取  $R$  与  $R_i$  为同一数量级为好。

## 3) 输出电阻的测量 (二次电压法)

放大电路的输出端可看成有源二端网络。如图 5.10 所示。

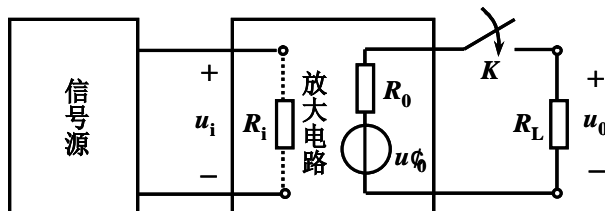


图 5.10 测量输出电阻的电路

在放大器正常工作条件下, 用毫伏表测出不接  $R_L$  时的空载电压  $U_0$  和接负载  $R_L$  后的输出电压  $U_o$ , 即可间接地推算  $R_o$  的大小:

$$R_o = \frac{U_0' - U_o}{U_o / R_L} = \frac{U_0' - U_o}{U_o} R_L \quad (5.12)$$

在测试中应注意, 必须保持  $R_L$  接入前后输入信号的大小不变。

## 4) 放大电路幅频特性的测量

放大电路频率特性是指放大电路的电压放大倍数  $A_u$  与输入信号频率之间的关系,  $A_u$  随输入信号频率变化下降到  $0.707A_u$  时所对应的频率定义为下限频率  $f_L$  和上限频率  $f_H$ , 通频带为  $f_{BW} = f_H - f_L$ 。

上、下限频率可用点频法进行测量: 先调节输入信号频率为 1kHz,  $U_i$  为 10mV; 用晶体管

毫伏表测量最大输出电压有效值  $U_o$ 。保持  $u_i$  幅度不变，增大信号  $u_i$  的频率， $u_o$  幅度随着下降，当输出电压有效值下降到  $0.707U_o$  时，对应的信号频率为上限频率  $f_H$ ；保持  $u_i$  幅度不变，降低  $u_i$  频率，同样使输出电压有效值下降到  $0.707U_o$  时，对应的信号频率为下限频率  $f_L$ 。

五、实验内容

准备工作：

- (1) 对照电路原理图，在面包板上搭建电路，场效应管的三个引脚尽量不要弯曲，垂直插入面包板孔内；**连接电解电容时，电容正负极性一定不能接反，否则，电容将会爆炸！后果将会非常严重！**电路搭建完成后用万用表检查电路连线是否正确，特别要判断电源与地之间是否有短路现象，如果有短路现象则重新检查电路。
- (2) 开启直流稳压电源，将直流稳压电源的输出调整到 12V，并用万用表检测输出电压。确认后，先关闭直流稳压电源。
- (3) 将电路板的工作电源端用导线与 12V 直流稳压电源接通。然后，开启直流稳压电源。此时，观察放大电路有无异常，若无异常，可进行电路测试。

1. 静态工作点调整与测试

令  $V_{DD} = +12V$ ，使放大器处于正常工作状态，测试静态工作点。用万用表测量  $U_G$ 、 $U_S$ 、 $U_D$ ，计算  $U_{GSQ}$ 、 $I_{DQ}$ 、 $U_{DSQ}$ ，数据记入表 1 中。

表 5.1 静态工作点的测量

$U_G$	$U_S$	$U_D$	$U_{GSQ}$	$I_{DQ}$	$U_{DSQ}$

2. 放大倍数的测试

用函数发生器输出一个正弦波信号作为放大器的输入信号，设置信号频率  $f = 1kHz$ ， $U_i = 10mV$ ，测量  $U_o$ ，计算放大器的电压放大倍数（增益） $A_u$ 。数据填入表 2 中，用坐标纸定量描绘输入、输出波形图。

表 5.2 放大倍数的测量

测试条件	工作状态	输出电压 ( $U_o$ )	放大倍数 ( $A_u$ )	输出波形
$f = 1kHz$ $U_i = 10mV$	正 常			定量画出

3. 放大器输入电阻的测量

在放大器输入口串接一个取样电阻  $R$ ，测量该放大器的输入电阻  $R_i$ ，数据填入表 3 中。

表 5.3 输入电阻的测量

$U_s$	$U_i$	取样电阻 $R$	$R_i$

## 4. 放大器输出电阻的测量

在放大器输出端选择一个合适的负载电阻  $R_L$ ，运用二次电压法分别测量空载与带载时的输出电压有效值，数据填入表 4 中。

表 5.4 输出电阻的测量

$U_o$ (空载)	$U_o$ (带载)	负载电阻 $R_L$	$R_o$

## 5. 放大器频率特性的测量并绘出频率特性曲线

用点频法测量放大器的频率特性，并计算放大器带宽，测试数据填入表 5 中。

表 5.5 幅频特性的测试

频率值 (Hz)	$f_L/2$	$f_L$		$f_0/2$	$f_0$	$2f_0$		$f_H$	$2f_H$	带宽 $Df$
$U_o$ (V)										

## 六、实验报告要求

1. 按照实验准备的要求完成设计作业一份，并估算放大电路的性能指标。
2. 记录实验中测得的有关静态工作点和电路交流性能指标的数据。
3. 认真记录和整理测试数据，按要求填入表格并画出输入、输出对应的波形图。
4. 对测试结果进行理论分析，找出产生误差的原因。
5. 详细记录组装、调试过程中发生的故障或问题，进行故障分析，并说明排除故障的过程和方法。
6. 写出对本次实验的心得体会，以及改进实验方法的建议。

## 七、思考题

1. 场效应管放大电路和双极型管放大电路性能有何差别？
2. 测量输入信号电压有效值、输出信号电压有效值时，要采用晶体管毫伏表而不用数字万用表，为什么？
3. 测量场效应管放大电路输入电阻时可以采用其他的测量方法？请描述下。
4. 思考共漏极放大电路的分析与测量。