

认知半导体晶体管

知识目标

- ① 理解晶体管的基本构造、工作原理、特性和主要参数。
- ② 理解场效应管的基本结构、工作原理、特性和主要参数。
- ③ 熟悉晶体管的电流分配和放大作用。

技能目标

- ① 掌握晶体管的识别与检测方法。
- ② 掌握场效应管的识别与检测方法。

2.1 任务1 认知双极型晶体管

晶体管是组成各种电子电路的核心元件。晶体管分为双极型晶体管和单极型晶体管两大类，前者主要依靠半导体内多子和少子同时参与导电进行工作，而后者则主要依靠半导体内多子导电进行工作。它们的主要功能是“电流放大”作用。本任务主要介绍双极型晶体管的结构、电流放大原理、伏安特性、主要参数等知识。

2.1.1 双极型晶体管的结构和类型

双极型晶体管习惯上称为晶体管或三极管，它的种类很多，按照工作频率的不同，可分为高频管和低频管；按照功率的不同，可分为小功率管和大功率管；按照半导体材料的不同分为硅管和锗管；无论采用何种材料，按照晶体管的结构不同，都可分为NPN型和PNP型两种类型。

常见晶体管实物外形如图2-1所示。

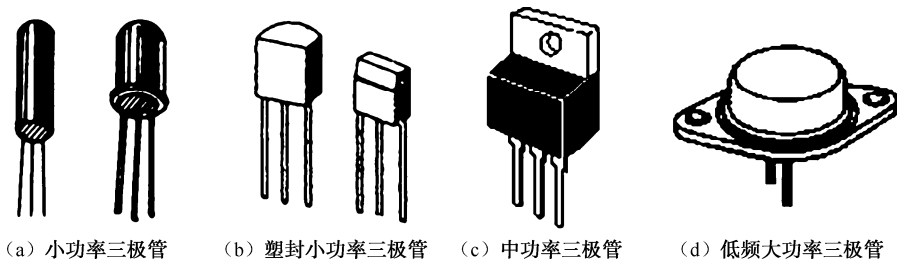


图 2-1 晶体管实物外形



无论是 NPN 型还是 PNP 型晶体管, 都有三个区: 发射区、基区、集电区, 基区很薄。从三个区各引出三个电极, 分别是发射极、基极和集电极。两个 PN 结分别是发射区与基区的发射结和集电区与基区的集电结。箭头方向表示发射结加正向电压时的电流方向, 其结构和符号如图 2-2 所示。

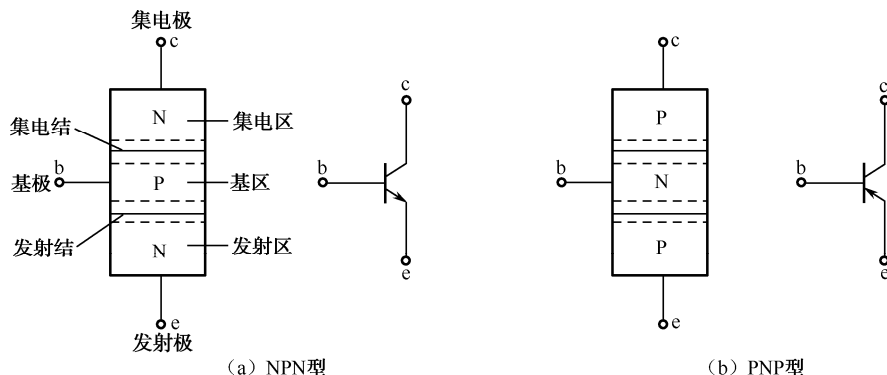


图 2-2 晶体管的组成及符号

为使晶体管具有电流放大作用, 在制造过程中必须满足实现放大的内部结构条件, 即:

- (1) 发射区掺杂浓度远大于基区的掺杂浓度, 以便于有足够的载流子供“发射”。
- (2) 基区很薄, 掺杂浓度很低, 以减少载流子在基区的复合机会, 这是晶体管具有放大作用的关键所在。
- (3) 集电区比发射区体积大且掺杂少, 以利于收集载流子。

由此可见, 晶体管并非两个 PN 结的简单组合, 不能用两只二极管来代替; 在放大电路中也不可将发射极和集电极对调使用。

2.1.2 晶体管的放大作用

1. 晶体管内部载流子的运动和各级电流的形成

1) 晶体管的工作电压

在晶体管的内部, 发射区的任务是向基区注入载流子, 集电区的任务是收集载流子。为达到这个目的, 应给发射结加正向电压 (正向偏置), 集电结加反向电压 (反向偏置), 这是使晶体管工作在放大状态的外部条件。

如图 2-3 所示, 其中 VT 为晶体管, U_{CC} 为集电极电源电压, U_{BB} 为基极电源电压, 两类管子外部电路所接电源极性正好相反, R_b 为基极电阻, R_c 为集电极电阻。若以发射极电压为参考电压, 则晶体管发射结正偏, 集电结反偏。这个外部条件也可用电压关系来表示: 对于 NPN 型: $U_C > U_B > U_E$; 对于 PNP 型: $U_E > U_B > U_C$ 。

2) 电流放大原理

为了分析晶体管的电流分配和放大作用, 下面以 NPN 型晶体管为例讨论, 所得结论同样适用于 PNP 型晶体管。

当晶体管满足工作在放大状态的外部条件时, 晶体管内部载流子将产生如下运动过程。(晶体管内部载流子的运动和电流分配关系如图 2-4 所示)

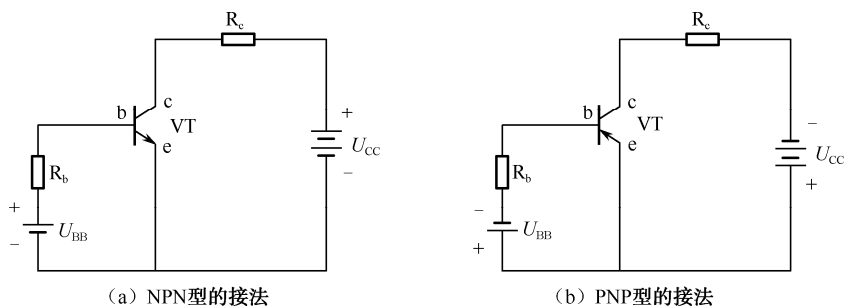


图 2-3 晶体管电源的接法

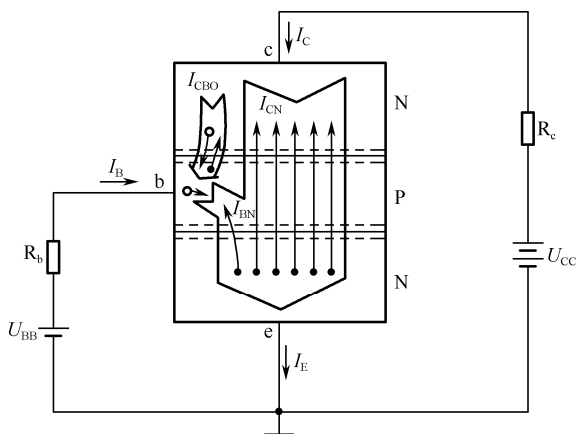


图 2-4 晶体管内部载流子的运动和各级电流

(1) 发射区向基区注入电子

由于发射结正向偏置，发射结的宽度将变薄，有利于 PN 结两边多数载流子的扩散运动。所以发射区的自由电子将连续不断地通过发射结向基区扩散，形成扩散电流（因为电子带负电，所以电流方向与电子运动方向相反）。与此同时，基区的多子空穴也将向发射区扩散，形成扩散电流。发射极电流 I_E 应是上述两个电流之和，但由于发射区的掺杂浓度远大于基区，因此发射区电子形成的扩散电流远大于基区空穴的扩散电流，可以忽略基区空穴的扩散电流不计，所以 I_E 基本上是由发射区电子的扩散运动产生的。

(2) 电子在基区的复合与扩散

从发射区注入的大量电子进入基区后（非平衡载流子），使得基区靠近发射结处的电子浓度升高很多。而基区离发射结远的地方电子的数量很少（基区靠近集电结处的电子浓度因集电结反偏，其作用几乎为 0）。所以，电子进入基区后由于浓度的差异将继续扩散。在扩散过程中，有些电子会和基区的多子空穴复合，使最终到达集电结的电子数量减少，若在基区复合越多，则到达集电结的电子越少，晶体管的放大系数就减小。为了减少这种复合，将基区做得很薄，而且基区掺杂浓度很低，以减少电子与空穴的相遇概率。所以，电子在这种扩散过程中与基区空穴复合的数量很少，大多数都能到达集电结处。

在基区与电子复合的空穴浓度由接在基极的正电源 U_{BB} 补充，以维持其浓度。随着发射区电子源源不断地注入，这种基区空穴的复合和补充也将连续进行，由此形成的电流 I_{BN} 是电流 I_B 的主要部分。



(3) 集电结收集电子的过程

由于集电结反偏, 在集电结内产生了一个较强电场, 该电场阻止了集电区电子和基区空穴的扩散, 却有利于从发射区扩散到基区的电子的漂移运动, 大多数电子通过集电结进入集电区而形成集电极电流 I_C 的大部分。只要集电结反偏, 集电结内电场就对扩散过来的电子具有吸引作用或抽取作用, 所以基区靠近集电结处的电子浓度几乎为 0。另外, 因为集电结反偏, 还有利于基区中本身的电子和集电区中的空穴产生漂移运动, 而形成反向饱和电流 I_{CBO} 。该电流是由集电结两边区域中的少数载流子形成的, 如图 2-4 所示。该电流的大小取决于少数载流子的浓度, 由于室温下少子数量很少, 所以电流很小。因为少数载流子的浓度与温度有关, 当温度升高时此电流将会增大, 所以这个电流对放大作用不仅没有贡献 (不受输入信号的控制), 还会大大降低管子的温度稳定性。因此, 在晶体管的生产制造过程中要尽量设法减小 I_{CBO} 。

综上所述, 晶体管要在一定的条件下才具有放大能力。内部条件有: ①发射区的掺杂浓度远大于集电区; ②基区很薄且掺杂浓度低; ③集电结面积远大于发射结。外部条件是发射结正偏, 集电结反偏。

晶体管工作时有两种极性的载流子参与导电, 既有多数载流子又有少数载流子, 故称其为双极型晶体管。

(4) 晶体管各极电流的分配关系

由晶体管内部载流子运动的示意图可以得出

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO} \quad (2-1)$$

$$I_B = I_{BN} - I_{CBO} \quad (2-2)$$

$$I_E = I_{CN} + I_{BN} = I_C + I_B \quad (2-3)$$

即发射极的电流等于基极电流与集电极电流之和。

晶体管各极电流的分配关系的定量数据可以通过实验得到, 实验电路如图 2-5 所示。若使晶体管工作在放大状态, 必须满足一定的外部条件: 加电源电压 U_{BB} , 使发射结正偏, 而电源电压 $U_{CC} > U_{BB}$, 保证集电结反偏。

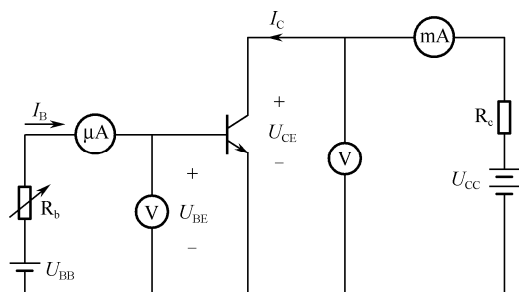


图 2-5 晶体管放大作用实验电路

若改变电阻 R_b , 则基极电流 I_B 、集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 都会发生变化。通过实验数据可得出如下结论:

① $I_E = I_B + I_C$, 晶体管三个电流之间的关系符合基尔霍夫定律。

② $I_C \approx I_E$ 。 I_B 虽然很小, 但对 I_C 有控制作用, I_C 随 I_B 的变化而变化。两者在一定范围内保持比例关系, 即 $\beta = I_C / I_B$, 即基极电流较小的变化可以引起集电极电流较大的变化。这表明基极电流对集电极具有小量控制大量的作用, 这就是晶体管的放大作用。



2. 晶体管的特性曲线

晶体管的特性曲线反映了晶体管各极电压与电流之间的关系，是分析和设计晶体管各种电路的重要依据。由于晶体管有三个电极，因此，要用两种特性曲线来表示，即输入特性曲线和输出特性曲线。

1) 共发射极输入特性曲线

共射输入特性曲线是以 U_{CE} 为参变量时， I_B 与 U_{BE} 间的关系曲线，由图 2-6 可知：

(1) 当 $U_{CE}=0V$ 时，从输入端看进去，相当于两个 PN 结并联且正向偏置，此时的特性曲线类似于二极管的正向伏安特性曲线。

(2) 当 $U_{CE} \geq 1V$ 时，从图中可见 $U_{CE} \geq 1V$ 的曲线比 $U_{CE}=0V$ 时的曲线稍向右移，不同的 U_{CE} 有不同的输入特性曲线，但当 $U_{CE} \geq 1V$ 以后，曲线基本保持不变。

2) 共发射极输出特性曲线

共射输出特性曲线是以 I_B 为参变量时， I_C 与 U_{CE} 间的关系曲线，如图 2-7 所示。

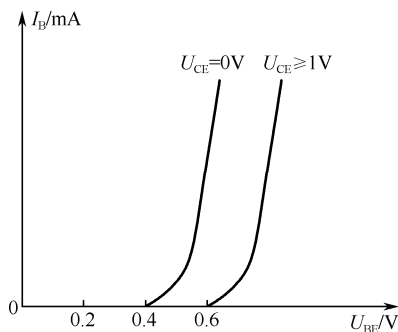


图 2-6 晶体管的输入特性曲线

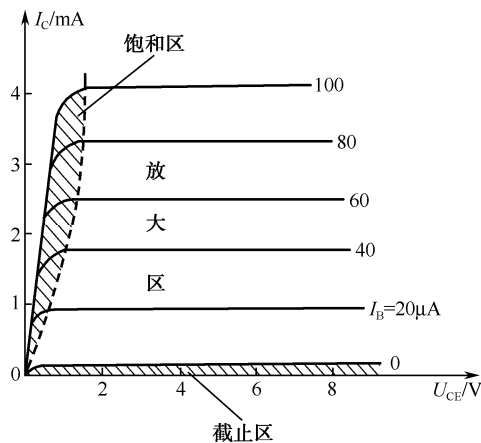


图 2-7 共发射极晶体管的输出特性曲线

当固定一个 I_B 值时，可得到一条输出特性曲线，当改变 I_B 值时，可得到一族输出特性曲线，由图 2-7 可见，输出特性可以划分为放大、饱和、截止三个区域，分别对应于三种工作状态。

(1) 放大区

当 $U_{CE} > 1V$ 以后，晶体管的集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 成正比，而与 U_{CE} 关系不大。所以输出特性曲线几乎与横轴平行，当 I_B 一定时， I_C 的值基本不随 U_{CE} 变化，具有恒流特性。 I_B 等量增加时，输出特性曲线等间隔地平行上移。这个区域的工作特点是发射结正向偏置，集电结反向偏置， $I_C \approx \beta I_B$ 。由于工作在这一区域的晶体管具有放大作用，因而把该区域称为放大区。

由图 2-7 可以看出，基极电流对集电极电流有很强的控制作用，当 I_B 有很小的变化量 ΔI_B 时， I_C 就会有很大的变化量 ΔI_C 。

为此，可用共发射极交流电流放大系数来表示这种控制能力。

$$I_B = f(U_{BE})|_{U_{CE}=\text{常数}} \quad (2-4)$$



(2) 饱和区

发射结和集电结均处于正偏的区域为饱和区。通常把 $U_{CE}=U_{BB}$ (即集电结零偏) 的情况称为临界饱和, 对应点的轨迹为临界饱和线。当 $U_{CE}<U_{BB}$ 时, I_C 与 I_B 不成比例, 它随 U_{CE} 的增加而迅速上升。此时, 晶体管工作在饱和状态。晶体管的集电极、发射极间呈现低电阻, 相当于开关闭合。

(3) 截止区

发射结和集电结均处于反偏的区域为截止区。在特性曲线上, 通常把 $I_B=0$ 那条输出特性曲线以下的区域称为截止区。此时因不满足放大条件所以没有电流放大作用, 各电极电流几乎全为零, 相当于晶体管内部各极开路, 即相当于开关断开。

3. 晶体管的主要参数

晶体管的参数是表征管子性能和安全运用范围的物理量, 是正确使用和合理选择晶体管的依据。下面介绍晶体管的几个主要的参数。

1) 电流放大系数

电流放大系数的大小反映了晶体管放大能力的强弱。

(1) 共发射极交流电流放大系数 β 。 β 指集电极电流变化量与基极电流变化量之比, 其大小体现了共射接法时, 晶体管的放大能力。即

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \bigg|_{U_{CE}=\text{常数}} \quad (2-5)$$

(2) 共发射极直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 。 $\bar{\beta}$ 为晶体管集电极电流与基极电流之比, 即

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad (2-6)$$

因 $\bar{\beta}$ 与 β 的值几乎相等, 故在应用中不再区分, 均用 β 表示。

2) 极间反向电流

(1) 集—基极间的反向电流 I_{CBO} 。 I_{CBO} 是指发射极开路时, 集—基极间的反向电流, 也称集电结反向饱和电流。当温度升高时, I_{CBO} 急剧增大, 温度每升高 10°C , I_{CBO} 增大一倍。选管时应选 I_{CBO} 小且受温度影响小的晶体管。

(2) 集—射极间的反向电流 I_{CEO} 。 I_{CEO} 是指基极开路时, 集电极—发射极间的反向电流, 也称集电结穿透电流。它反映了晶体管的稳定性, 其值越小, 受温度影响也越小, 晶体管的工作就越稳定。

3) 极限参数

晶体管的极限参数是指在使用时不得超过的极限值, 以此保证晶体管的安全工作。

(1) 集电极最大允许电流 I_{CM} 。集电极电流 I_C 过大时, β 将明显下降, I_{CM} 为 β 下降到规定允许值 (一般为额定值的 $1/2 \sim 2/3$) 时的集电极电流。使用中若 $I_C > I_{CM}$, 晶体管不一定会损坏, 但 β 明显下降。

(2) 集电极最大允许功率损耗 P_{CM} 。管子工作时, U_{CE} 的大部分降在集电结上, 因此集电极功率损耗 $P_C = U_{CE} I_C$, 近似为集电结功耗, 它将使集电结温度升高而使晶体管发热致使管子损坏。工作时的 P_C 必须小于 P_{CM} 。



(3) 反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 。 $U_{(BR)CEO}$ 为基极开路时集电结不致击穿, 施加在集—射极之间允许的最高反向电压。

根据三个极限参数 I_{CM} 、 P_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 可以确定晶体管的安全工作区, 如图 2-8 所示。晶体管工作时必须保证工作在安全区内, 并留有一定的余量。

【例 2-1】 某电子产品的晶体管标号不清, 于是利用测量晶体管各电极电位的方法判断管子的电极、类型及材料。测得三个电极对地的电位分别为 $U_A=6V$, $U_B=2.7V$, $U_C=2V$, 试判断晶体管的类型、材料及三个引脚的电极。

解: 根据所给数据初步判定管子工作在放大区, 首先根据 U_{BE} 的值判断基极和发射极, 因为晶体管处于放大状态时, 发射结正偏, 其 $U_{BE}=0.7V$ (硅管) 或 $U_{BE}=0.2V$ (锗管), 那么另一引脚即为集电极 C。再根据集电极电位是最高还是最低, 判断是 NPN 型还是 PNP 型。

由已知 $U_{BC}=U_B-U_C=2.7V-2V=0.7V$, 故此晶体管为硅管, A 为集电极, 又因 U_A 电位最高, 故为 NPN 管。在 NPN 管中, $U_B>U_E$, 故 B 为基极, C 为发射极。

思考与练习

2-1-1 晶体管是如何进行分类的?

2-1-2 发射区和集电区都是同类型的半导体材料, 发射极和集电极可以互换吗? 为什么?

2-1-3 简述晶体管的放大原理。

2-1-4 晶体管由两个 PN 结组成, 可否用两只二极管串联组成晶体管?

操作训练 1 晶体管的检测

1. 训练目的

- ① 掌握晶体管引脚的识别方法。
- ② 掌握使用万用表判断晶体管电极的方法。

2. 训练内容

1) 根据引脚排列规律进行引脚的识别

常用的小功率晶体管有金属外壳封装和塑料封装两种, 可直接观察出三个电极 e、b、c。但仍需进一步判断管型和管子的好坏, 一般可用万用表进行判别。

(1) 等腰三角形排列, 识别时引脚向上, 使三角形正好在上个半圆内, 从左角起, 按顺时针方向分别为发射极 e、基极 b 和集电极 c, 如图 2-9 (a) 所示。

(2) 在管壳外沿有一个突出部, 由此突出部按顺时针方向分别为发射极 e、基极 b 和集电极 c, 如图 2-9 (b) 所示。

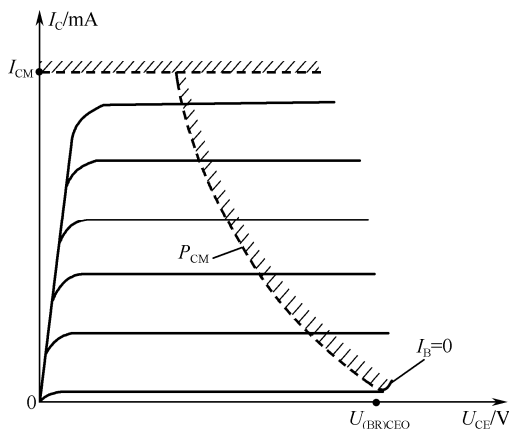


图 2-8 三极管的安全工作区



(3) 塑料封装晶体管的引脚判断如图 2-9 (c) 所示, 将其引脚朝下, 顶部切角对着观察者, 则从左至右排列为: 发射极 e、基极 b 和集电极 c。

(4) 如图 2-9 (d) 所示晶体管, 是装有金属散热片的晶体管, 判定时, 将其引脚朝下, 印有型号的一面对着观察者, 散热片的一面为背面, 则从左至右排列为: 基极 b、集电极 c 和发射极 e。

(5) 大功率晶体管的两个引脚为基极 b 和发射极 e, 集电极 c 是基面, 如图 2-9 (e) 所示。

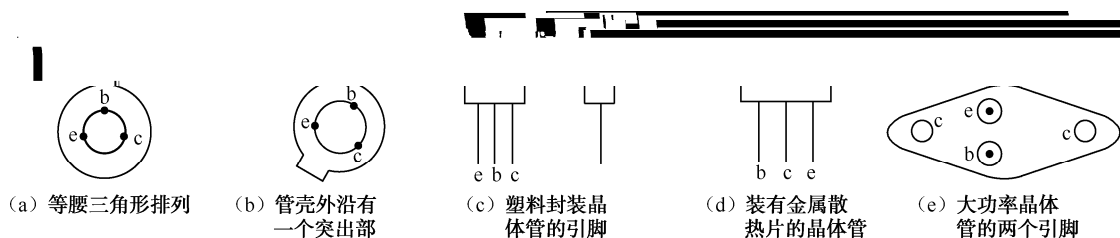


图 2-9 晶体管引脚排列规律

2) 万用表判断晶体管电极

(1) 判断基极与管型

对于 PNP 型晶体管, c、e 极分别为其内部两个 PN 结的正极, b 极为它们共同的负极, 而对于 NPN 型晶体管而言, 则正好相反, c、e 极分别为两个 PN 结的负极, 而 b 极则为它们共用的正极, 根据 PN 结正向电阻小反向电阻大的特性就可以很方便地判断基极和管子的类型。

具体方法: 将万用表置于 $R \times 100$ 挡或 $R \times 1k$ 挡。用黑表笔接触某一引脚, 用红表笔分别接另外两个引脚, 若两次测得都是几十欧姆至上百千欧姆的高阻值时, 则黑表笔所接触的引脚即为基极, 且晶体管的管型为 NPN 型。若用上述方法两次测量都是几百欧姆的低阻值时, 则黑表笔所接触的引脚就是基极, 且晶体管的管型为 PNP 型, 如图 2-10 所示。

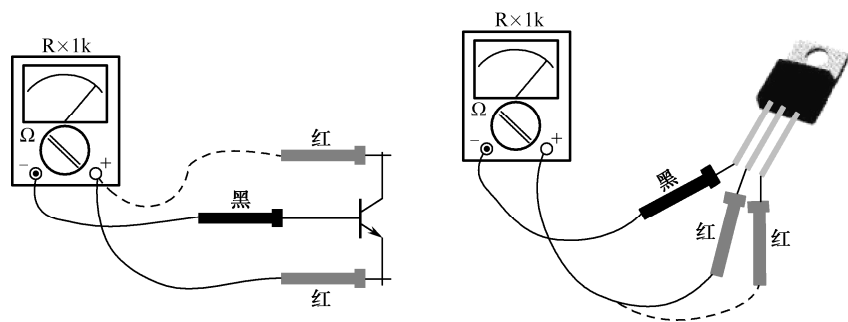


图 2-10 确定晶体管的基极

(2) 判断发射极和集电极

由于晶体管在制作时, 两个 P 区或两个 N 区的掺杂浓度不同, 如果发射极、集电极使用正确, 则晶体管具有很强的放大能力, 反之, 如果发射极、集电极互换使用, 则放大能力非常弱, 由此即可把管子的发射极和集电极区别开来。



在已经判断出晶体管基极和类型的情况下,任意假设另外两个电极为 c、e, 判别 c、e 时, 以 NPN 型晶体管为例, 如图 2-11 所示, 先将万用表置于 $R \times 100$ 挡或 $R \times 1k$ 挡, 将万用表红表笔接假设的集电极, 黑表笔接假设的发射极, 用潮湿的手指将基极与假设的集电极引脚捏在一起(注意不要让两极直接相碰), 注意观察万用表指针正偏的幅度。然后将两个引脚对调, 重复上述测量步骤。比较两次测量中表针向右摆动的幅度, 由摆动幅度相对较小的一次, 确定红表笔接的是发射极, 另一端是集电极。如果是 PNP 晶体管, 则正好相反。

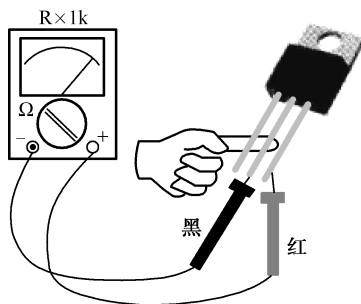


图 2-11 确定晶体管的集电极

3) 晶体管好坏的判断

如在以上操作中, 无一电极满足上述现象, 则说明晶体管已经损坏, 也可用数字式万用表的“ h_{FE} ”挡来进行判断, 当管型确定后, 将晶体管插入“NPN”或“PNP”插孔, 如 h_{FE} 值不正常(为 0 或大于 300)则说明晶体管已经损坏。

2.2 任务 2 认知单极型晶体管

单极型晶体管是以半导体中的多数载流子来实现导电的, 它是利用电场效应来控制电流的一种半导体器件, 所以又称为场效应管(FET)。场效应管根据结构不同, 可以分为结型场效应管(JFET)和绝缘栅型场效应管(IGFET)两大类, 其中绝缘栅型场效应管又称 MOS 型场效应管。根据场效应管制造工艺和材料的不同, 又可分为 N 沟道场效应管和 P 沟道场效应管。

场效应管具有很高的输入电阻, 能满足高内阻信号源对放大电路的要求, 所以是较理想的前置输入级器件。它还具有热稳定性好、功耗低、噪声低、制造工艺简单、便于集成等优点, 因此得到了广泛的应用。

2.2.1 结型场效应管

1. 结型场效应管的结构

结型场效应管分为 N 沟道和 P 沟道两种类型, 都属于耗尽型场效应管, 结型场效应管的结构示意图及其符号如图 2-12 所示。

图 2-12 (a) 所示为 N 沟道场效应管的结构示意图, 在一块 N 型半导体材料的两侧分别扩散一个高掺杂浓度的 P 型区(用 P^+ 表示), 两侧 P^+ 区与 N 沟道交界处形成两个 PN 结, 由于 P^+ 区内侧耗尽层非常窄, 可知这两个 PN 结都是非对称 PN 结。两边 P^+ 区各引出一个电极并联在一起, 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。两个 PN 结之间的 N 型区域称为 N 型导电沟道, 简称 N 沟道。N 沟道场效应管的符号如图 2-12 (c) 左侧所示, 其中, 箭头所指方向表示栅极和源极之间的 PN 结加正向偏压时, 栅极电流的方向是从 P 指向 N。

图 2-12 (b) 所示为 P 沟道场效应管的结构示意图, 其符号如图 2-12 (c) 右侧所示。对于 P 沟道场效应管, 在使用过程中, 除了直流电源电压极性和漏极电流的方向与 N 沟道场

应管相反外, 两者的工作原理完全一样。因此, 本节仅以 N 沟道场效应管为例介绍结型场效应管的工作原理。

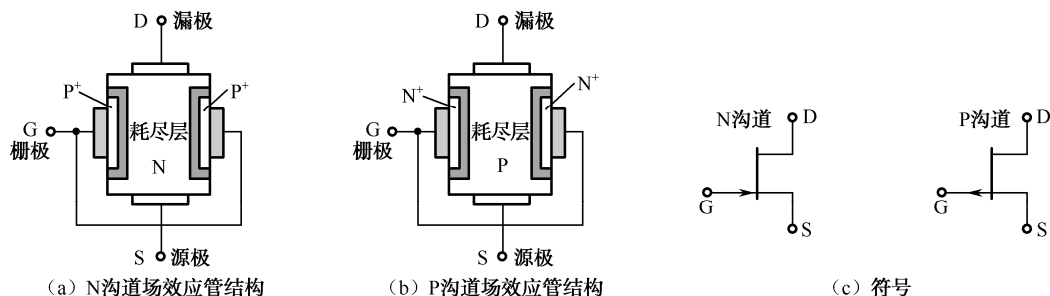


图 2-12 结型场效应管的结构及符号

2. N 沟道结型场效应管的工作原理

当 N 沟道结型场效应管工作时, 需要在栅极和源极之间加一个负电压, 即 $u_{GS} < 0$, 使栅极与 N 沟道间的 PN 结反偏, 栅极电流 $i_G \approx 0$, 场效应管呈现出高达 $10^9 \Omega$ 的输入电阻。在漏极和源极间加一个正电压, 即 $u_{DS} > 0$, 使 N 沟道中的多数载流子 (电子) 在电场作用下由源极向漏极运动, 形成漏极电流 i_D 。 i_D 的大小受 u_{DS} 的影响, 同时也受 u_{GS} 的控制, 因此讨论场效应管的工作原理实际上就是分析 u_{GS} 对 i_D 的控制作用和 u_{DS} 对 i_D 的影响。

(1) u_{GS} 对导电沟道和 i_D 的控制作用

为了分析方便, 首先假定 $u_{DS} = 0$ 。当 $u_{GS} = 0$ 时, 导电沟道未受任何电场的作用, PN 结处于平衡状态, 导电沟道最宽, 如图 2-13 (a) 所示。当 u_{GS} 由零向负值增大时, 即 $u_{GS} < 0$, 在 u_{GS} 的反向偏置电压作用下, 两个 PN 结反偏, 耗尽层将加宽, 导电沟道变窄, 沟道电阻增大, 如图 2-13 (b) 所示。当 u_{GS} 增大到一定数值时, 使 $u_{GS} = U_{GS(off)}$ 。两侧的耗尽层在中间完全合拢, 导电沟道被夹断, 如图 2-13 (c) 所示。此时漏—源极之间的电阻趋于无穷大, 相应的栅—源极之间的电压称为夹断电压 $U_{GS(off)}$ 。N 沟道场效应管的 $U_{GS(off)} < 0$ 。

由上述分析可见, 改变 u_{GS} 的大小可以有效控制导电沟道电阻的大小。但由于 $u_{DS} = 0$, 漏极电流 $i_D = 0$ 。若 u_{GS} 为一固定正值, 则在 u_{DS} 作用下漏极流向源极的电流 i_D 将受 u_{GS} 的控制; 若 u_{GS} 增大, 沟道电阻增大, i_D 将减小; 若 u_{GS} 减小, 沟道电阻减小, i_D 将增大。当 $u_{GS} = U_{GS(off)}$ 时, $i_D = 0$ 。

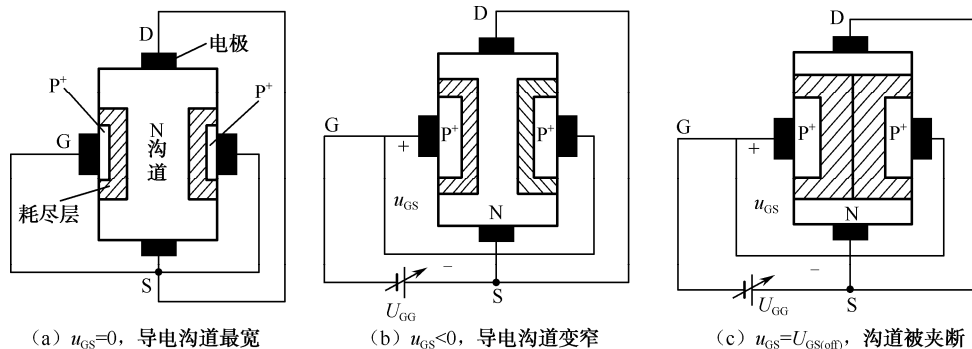


图 2-13 当 $u_{DS} = 0$ 时, u_{GS} 对导电沟道的影响



(2) u_{DS} 对导电沟道和 i_D 的控制作用

首先假定 $u_{DS}=0$ 、 $u_{GS}=0$ ，此时导电沟道未受任何电场的作用，PN 结也处于平衡状态，导电沟道最宽，如图 2-14 (a) 所示。

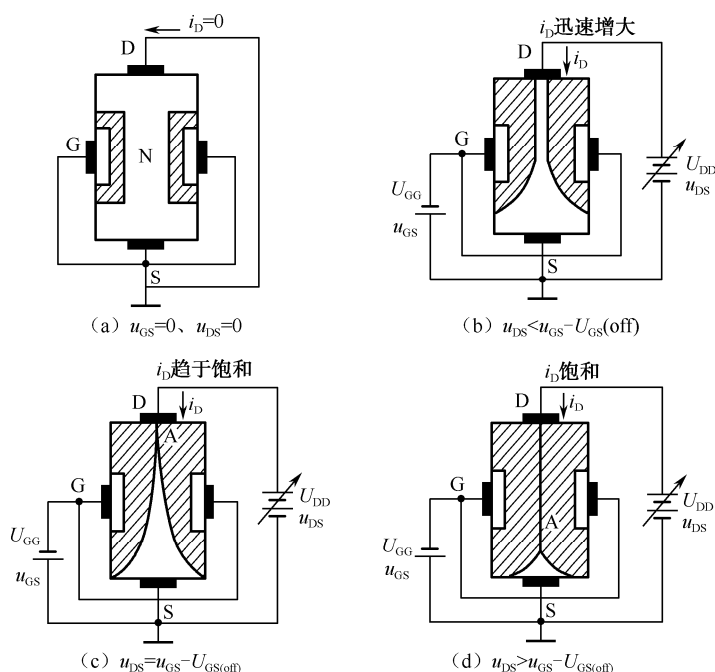


图 2-14 u_{DS} 对导电沟道的影响

当 u_{GS} 为某一固定值，且 $U_{GS(off)} < u_{GS} < 0$ 时，若 $u_{DS}=0$ ，则 $i_D=0$ 。当 u_{DS} 从零逐渐增大时，沟道中产生电位梯度，在电场的作用下导电沟道中形成沟道电流 i_D 。 i_D 从漏极流向源极。由于沟道中的电位梯度从源极到漏极，沿导电沟道的电位差从靠近源极端的零电位逐渐升高到靠近漏极端的 $+u_{DS}$ ，因此从源极端到漏极的不同位置上，栅极与导电沟道之间的电位差在逐渐变化，即距离源极越远电位差越大，施加到 PN 结的反偏压也越大，耗尽层越向沟道中心扩展，使导电沟道形成楔形，如图 2-14 (b) 所示。所以从这方面看，增大 u_{DS} ，靠近漏极的沟道变窄，沟道电阻增大，产生了阻碍漏极电流 i_D 增大的因素。但在 u_{DS} 较小时，靠近漏极的沟道还没有被夹断，漏极电流 i_D 随 u_{DS} 几乎成正比地增大。

当 u_{DS} 继续增大到 $u_{DS}=u_{GS}-U_{GS(off)}$ ，即 $u_{GD}=u_{GS}-u_{DS}=U_{GS(off)}$ 时，靠近漏极端的耗尽层在 A 点合拢，如图 2-14 (c) 所示，称为预夹断。此时，A 点耗尽层两边的电位差用夹断电压 $u_{GS(off)}$ 联系。预夹断处 A 点的电压 $U_{GS(off)}$ 与 u_{DS} 和 u_{GS} 关系为

$$u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(off)} \quad (2-7)$$

式 (2-7) 通常称为 JFET 的预夹断方程。图 2-15 为 $u_{GS}=0$ 时，N 沟道 JFET 的 $u_{DS}-i_D$ 的关系曲线。预夹断时相当于图 2-15 中 $u_{DS}=U_{GS(off)}$ 时的情况，此时 i_D 达到了饱和漏电流 I_{DSS} 。 I_{DSS} 下标中的第二个 S 表示栅—源极间短路。

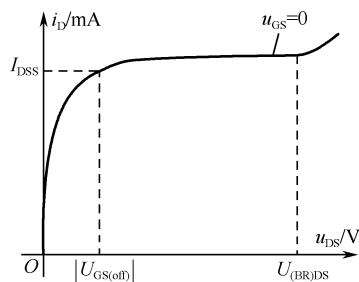


图 2-15 $u_{GS}=0$ 时 N 沟道 JFET 的 $u_{DS}-i_D$ 的关系



若 u_{DS} 继续增大, 夹断区加长, 夹断处 A 点沿导电沟道向源极端延伸, 如图 2-14 (d) 所示。 u_{DS} 增加的部分主要降落在夹断区, 夹断区的电场也随之增大, 仍能将载流子 (电子) 拉过夹断区形成漏极电流 i_D 。此时未被夹断的沟道内的电场基本上不随 u_{DS} 增大而变化, 漏极电流 i_D 趋于饱和, 几乎不随 u_{DS} 变化, 仅取决于 u_{GS} 。

3. 结型场效应管的特性曲线

1) 输出特性曲线

N 沟道结型场效应管的输出特性曲线是指当栅源电压 u_{GS} 一定时, JFET 漏极电流 i_D 与漏源电压 u_{DS} 之间的关系曲线, 如图 2-16 (a) 所示, 其函数关系为

$$i_D = f(u_{DS}) | u_{GS} = \text{常数} \quad (2-8)$$

图 2-16 (a) 所示为 N 沟道结型场效应管的输出特性曲线。与晶体管的输出特性线类似, 结型场效应管的输出特性曲线也分为 4 个区域。

(1) 可变电阻区

在图 2-16 (a) 的 (1) 区, 结型场效应管可以看作一个受栅源电压 u_{GS} 控制的可变电阻, 称为可变电阻区。在该区域内, 当 u_{GS} 变化时, 导电沟道的宽度也随之变化。 u_{GS} 越负, 漏源之间的等效电阻越大, 输出特性曲线越倾斜。

(2) 放大区

在图 2-16 (a) 的 (2) 区, 导电沟道处于夹断状态, 漏极电流 i_D 基本稳定, 不随 u_{DS} 的变化而变化, 称为饱和区或恒流区。场效应管用作放大器时通常都工作在这个区域, 因此该区域又称为放大区。

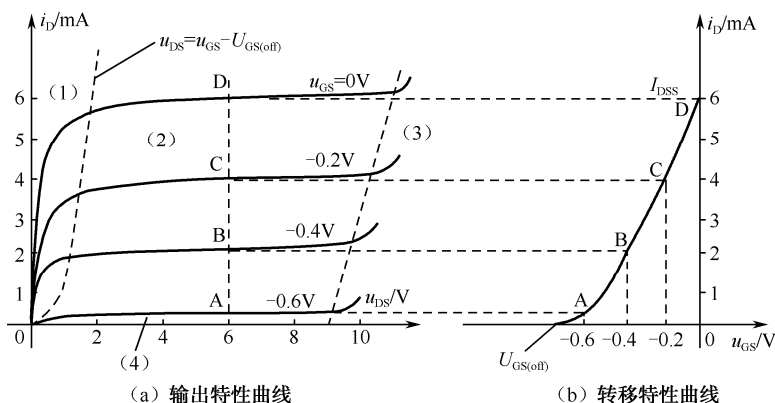


图 2-16 结型场效应管的特性曲线

(3) 击穿区

图 2-16 (a) 的 (3) 区, 随着 u_{DS} 的继续增大, 在 $u_{DS} > U_{(BR)DS}$ 后, 由于导电沟道所承受的电压降太高, 电场很强, 致使栅漏间的 PN 结发生击穿, 漏极电流 i_D 迅速增大, 因此该区域称为击穿区。进入击穿区后场效应管不能正常工作, 并且可能因为漏极电流 i_D 太大而烧毁 FET, 通常不允许场效应管工作在击穿区。

(4) 夹断区

图 2-16 (a) 的 (4) 区称为场效应管的截止区。当 $u_{GS} < U_{GS(off)}$, 导电沟道完全被夹断,



$i_D=0$ 。这点与双极结型晶体管输出特性曲线的截止区类似。

2) 转移特性曲线

场效应管是电压控制器件, 由于栅—源之间的 PN 结加反偏压, 流过栅极的电流几乎为零, 因此讨论场效应管的输入特性曲线没有实际意义。为了讨论 u_{GS} 对 i_D 的控制作用, 常用场效应管的转移特性来描述。所谓转移特性是指在漏—源极电压 u_{DS} 为某一常数时, u_{GS} 与 i_D 之间的关系曲线, 即

$$i_D = f(u_{GS})|_{u_{DS}=\text{常数}} \quad (2-9)$$

由于输出特性和转移特性都是用来描述场效应管的电压与电流之间关系, 因此转移特性可以直接从输出特性曲线上通过作图法求得。如图 2-16 所示, 在图 2-16 (a) 中, 令 $u_{DS}=6V$, 在输出特性曲线上作一条 $u_{DS}=6V$ 的垂线, 该垂线与各条输出特性曲线分别相交于 A、B、C 和 D 点, 将 A、B、C 和 D 点各相应的漏极电流 i_D 及其对应的 u_{GS} 值画在 $u_{GS}-i_D$ 直角坐标中, 得到如图 2-16 (b) 所示的场效应管的转移特性曲线。

将 u_{DS} 取不同的常数值, 可得到一族转移特性曲线。但由于在饱和区 $u_{DS}=u_{GS}-U_{GS(off)}$, 漏极电流 i_D 受 u_{DS} 的影响很小, 因此不同 u_{DS} 下的转移特性曲线基本重合。

实验表明, 在场效应管输出特性曲线的饱和区, 即在 $U_{GS(off)} \leq u_{GS} \leq 0$ 的范围内, i_D 随 u_{GS} 的增加 (负数减小) 近似按平方律上升, 即

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2 \quad (2-10)$$

由式 (2-10) 可见, 只要给出 I_{DSS} 和 $U_{GS(off)}$ 的数值就可以将转移特性曲线中的其他点近似计算出来。

4. 场效应管的主要参数

1) 直流参数

(1) 夹断电压 $U_{GS(off)}$: 夹断电压是指施加于场效应管漏—源极之间的电压 u_{DS} 为某一常数时, 使 i_D 为一个微小电流值时的 u_{GS} 值。从转移特性曲线上看, 当 u_{GS} 从 $U_{GS(off)}$ 增大 (负值减小) 时 i_D 开始增大。 $U_{GS(off)}$ 是耗尽型场效应管的参数。

(2) 开启电压 $U_{GS(th)}$: 开启电压是指施加于场效应管漏源之间的电压 u_{DS} 为某一常数时, i_D 为一个微小电流值时的 u_{GS} 值。从转移特性曲线上看, 当 u_{GS} 从 $U_{GS(th)}$ 增大时 i_D 开始增大。 $U_{GS(th)}$ 是增强型场效应管的参数。

(3) 饱和电流 I_{DSS} : 在 $u_{GS}=0$ 时, $u_{DS}>U_{GS(off)}$ 的漏极电流 i_D 称为饱和电流 I_{DSS} 。通常令 $u_{GS}=0$, u_{DS} 为某一常数时测出的漏极电流 i_D 就是 I_{DSS} 。在转移特性上 $u_{GS}=0$ 时对应的 i_D 就是 I_{DSS} 。

(4) 直流输入电阻 R_{GS} : 场效应管的直流输入电阻是在漏—源极之间短路的条件下, 栅源施加一定电压时的直流电阻值。线型场效应管的栅极电流很小, 其直流输入电阻通常大于 10^7 , 而 MOS 场效应管的 R_{GS} 以可达到 $10^9 \sim 10^{15} \Omega$ 。

2) 交流参数

(1) 低频跨导 (互导) g_m : 当 u_{DS} 为某一常数时, 场效应管漏极电流 i_D 的微小变化量与栅源电压 u_{GS} 的微小变化的比, 称为场效应管的低频跨导, 用 g_m 表示, 即



$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{DS} = \text{常数}} \quad (2-11)$$

g_m 是表征 u_{GS} 对 i_D 的控制能力的一个重要参数, 其单位为 ms 或 μs 。它是转移特性曲线工作点上切线的斜率。 g_m 通常在十分之几至几毫秒的范围内, 特殊的场效应管可达 100ms。应注意到, 跨导随场效应管的工作点不同而异。

(2) 输出电阻 r_{ds} : 场效应管输出电阻的定义为

$$r_{ds} = \left. \frac{\partial u_{DS}}{\partial i_D} \right|_{u_{GS} = \text{常数}} \quad (2-12)$$

输出电阻 r_{ds} , 表明了 u_{DS} 对 i_D 的影响, 是输出特性曲线工作点上切线的斜率的倒数。在放大区 (饱和区), i_D 随 u_{DS} 的变化很小, 因此也称为恒流区, r_{ds} 的值很大, 通常在几十千欧姆到几百千欧姆。

(3) 极间电容: 场效应管的极间电容包括栅源电容 C_{GS} 栅漏电容 C_{GD} 和漏源电容 C_{DS} 。通常 C_{GS} 和 C_{GD} 为 1~3pF, C_{DS} 为 0.1~1pF。场效应管的三个电极之间的等效电容将影响它的工作频率, 其值越小越好。

3) 极限参数

(1) 最大漏极电流 I_{DM} : I_{DM} 表示当场效应管正常工作时所允许的最大漏极电流。当 $i_D > I_{DM}$ 时场效应管的性能变差。

(2) 最大耗散功率 P_{DM} : $P_{DM} = u_{DS} i_D$ 是由场效应管最高工作温度确定的参数。当场效应管的 $P_D > P_{DM}$ 时, 管子的性能变差, 甚至被烧坏。

(3) 击穿电压: 场效应管的击穿电压包括 $U_{(BR)DS}$ 和 $U_{(BR)GS}$ 。它们分别表示漏—源极和栅—源极之间的击穿电压。

2.2.2 绝缘栅场效应管

结型场效应管的直流输入电阻可以高达 $10^6 \sim 10^9$, 由于这个电阻从本质上看仍然是 PN 结的反向电阻, 因此总存在少量的反向电流, 这就限制了场效应管输入电阻的进一步提高。在高温条件下工作时由于 PN 结反向电流增大, 输入电阻值明显减小, 尤其是栅源之间的 PN 结加正向电压, 将出现较大的栅极电流, 影响了结型场效应管的正常工作。

与结型场效应管不同, 采用金属—氧化物—半导体场效应管 (MOSFET) 可以进一步提高场效应管的输入电阻。MOSFET 也是利用半导体表面的电场效应进行工作的。由于 MOSFET 的栅极处于绝缘状态, 其输入电阻可以高达 $10^{15} \Omega$ 。

MOSFET 也有 N 沟道和 P 沟道两种类型, 每种类型又有增强型 (E 型) 和耗尽型 (D 型), 即, 有 N 沟道增强型、N 沟道耗尽型、P 沟道增强型和 P 沟道耗尽型四种基本类型的 MOSFET。此外, 还有其他类型的 MOSFET, 如 VMOSFET 等, 但它们的工作原理基本相同。本节主要讨论 N 沟道 MOSFET, 其他类型可在此基础上触类旁通。

1. N 沟道增强型绝缘栅场效应管

1) 结构

N 沟道增强型 MOSFET 的结构示意图如图 2-17 (a) 所示, 增强型 MOSFET 的符号如



图 2-17 (b) 所示。它是在一块掺杂浓度较低的 P 型半导体材料（衬底）上，利用扩散工艺形成两个高掺杂浓度的 N 型区域（用 N^+ 表示），并在此 N 型区域上引出两个接触电极，分别称为源极（S）和漏极（D）。两个电极之间的衬底表面覆盖一层二氧化硅（ SiO_2 ）绝缘层，该绝缘层上再沉积金属铝层并引出电极作为栅极（G），从衬底引出的电极称为衬底电极（B），通常将衬底电极和源极连接在一起使用。

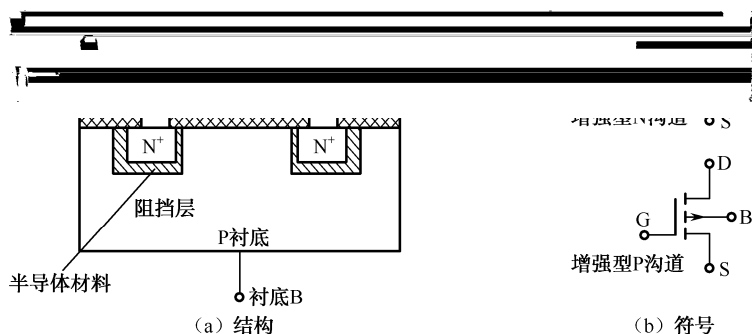


图 2-17 N 沟道增强型 MOSFET 的结构及符号

2) 工作原理

(1) u_{GS} 对 i_D 的控制作用

① 当 $u_{GS}=0$ 时，没有 N 型导电沟道。

当 $u_{GS}=0$ 时，源区（ N^+ ）、衬底（P）和漏区（ N^+ ）之间形成两个背靠背的 PN 结，如图 2-18 (a) 所示，这时无无论 u_{GS} 的极性如何，总漏源之间都不能形成导电沟道，因此， $i_D=0$ ，此时漏源之间的电阻值可以高达 $10^{15}\Omega$ 。

② 当 $u_{GS}>U_{GS(th)}$ 时，出现 N 沟道。当 $u_{GS}\geq 0$ 、 $u_{DS}=0$ 时，如图 2-18 (b) 所示，由于栅极和衬底之间的 SiO_2 绝缘作用，栅极电流 $i_G=0$ 。同时，栅极和衬底之间形成了一个以 SiO_2 为介质的平板电容器，在 $u_{GS}\geq 0$ 的作用下，介质中产生了一个垂直于 P 型半导体（衬底）表面由栅极指向衬底的电场，该电场排斥 P 型半导体中的空穴，而将电子吸附到靠近 SiO_2 一侧的 P 型衬底表面，形成一个 N 型薄层，称为反型层，即导电沟道，也称为感生沟道。源区的 N^+ 区和漏区的 N^+ 通过感生沟道连接起来，人们可以通过 u_{GS} 控制 N 型沟道的厚度，此时在 u_{DS} 的作用下将产生漏极电流 i_D 。显然， u_{GS} 越大，导电沟道越厚，沟道电阻值越小。通常将在 u_{DS} 作用下开始导电时的 u_{GS} 称为开肩电压，用 $U_{GS(th)}$ 表示，也正是由于这种场效应管只有在 $u_{GS}>U_{GS(th)}$ 时形成导电沟道，故称为增强型场效应管。

(2) u_{DS} 对 i_D 的影响

在 $u_{GS}>U_{GS(th)}$ 导电沟道形成后，此时外加漏源电压 u_{DS} 将产生漏极电流 i_D 。在 u_{GS} 和 u_{DS} 的共同作用下，导电沟道的电位梯度将产生变化，使沟道的厚度也发生变化，如图 2-18 (c) 所示，靠近漏极端沟道变薄，靠近源极端沟道变厚。

当 u_{DS} 较小时， i_D 随 u_{DS} 增大而迅速增大。当 u_{DS} 增加到 $u_{DS}=u_{GS}-U_{GS(th)}$ 时，靠近漏极端的沟道厚度为零，出现预夹断。若 u_{DS} 继续增大，使 $u_{DS}>u_{GS}-U_{GS(th)}$ ，导电沟道的夹断点向源极方向移动，夹断区域向源极方向延伸，如图 2-18 (d) 所示。沟道电阻增大，电流 i_D 趋于饱和， u_{DS} 的增量部分主要降在夹断区，在夹断区形成较强的电场。在这个电场的作用下，源区端的

电子仍能克服夹断区的阻力到达漏极, 但漏极电流 i_D 饱和, 基本不随 u_{DS} 的变化而变化, 仅取决于 u_{GS} 。

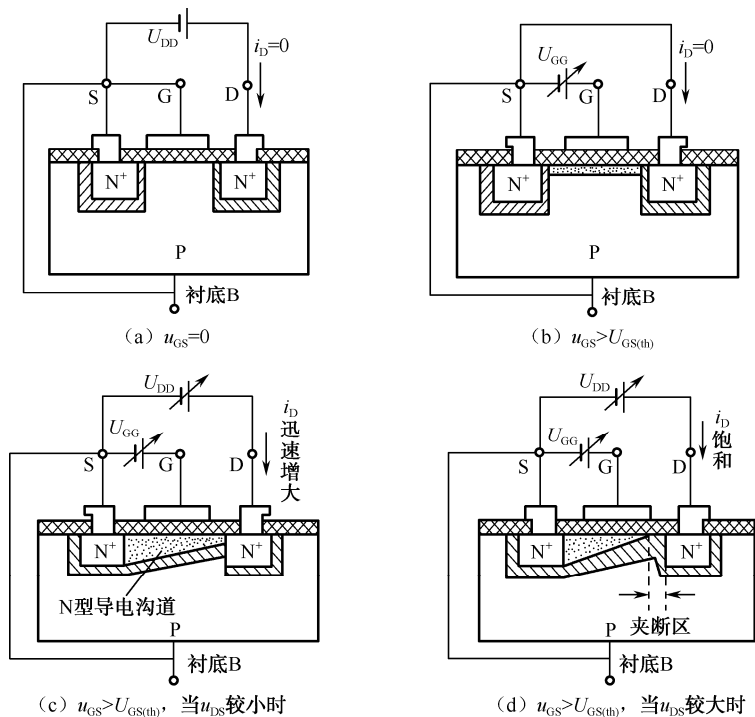


图 2-18 N 沟道增强型 MOSFET 的工作原理示意图

3) 特性曲线

与结型场效应管特性类似, N 沟道增强型 MOSFET 的特性曲线也分为输出特性曲线和转移特性曲线, 如图 2-19 所示。其中, 图 2-19 (a) 为 N 沟道增强型 MOSFET 的转移特性曲线; 图 2-19 (b) 为 N 沟道增强型 MOSFET 的输出特性曲线。输出特性曲线同样分为可变电阻区、放大区 (饱和区)、击穿区和夹断区。转移特性曲线同样是在 u_{GS} 为常数的条件下, 从输出特性曲线上用作图法求出。

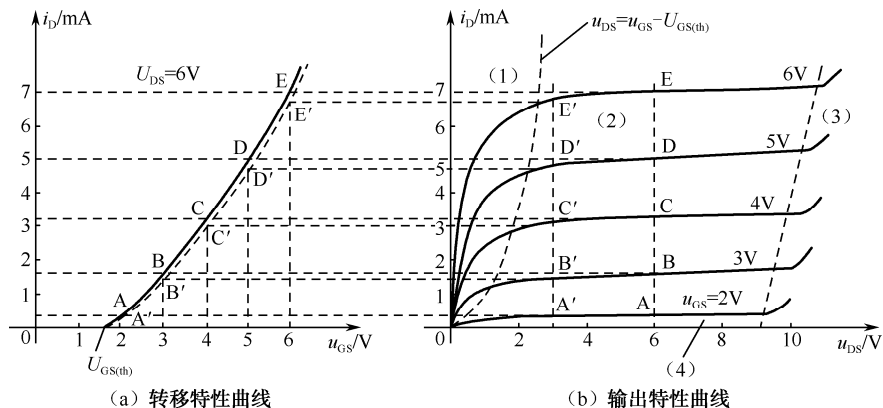


图 2-19 N 沟道增强型 MOSFET 的特性曲线



增强型 MOSFET 的转移特性曲线同样是以 u_{DS} 为参变量, 漏极电流 i_D 随栅源电压 u_{GS} 变化的关系曲线, 即

$$i_D = f(u_{GS}) | u_{DS} = \text{常数} \quad (2-13)$$

从图 2-19 可以看到, 在 u_{DS} 大于一定的数值后, 如 $u_{DS}=3V$ 与 $u_{DS}=6V$ 时的转移特性曲线基本重合, 如图 2-19 (b) 中的虚线和实线所示, 工程上通常忽略沟道的调制效应, 因此为了分析方便, 只用一条转移特性曲线表示输出特性放大区域内电压与电流的关系。这时漏极电流 i_D 的近似表达式为

$$i_D = I_{DO} \left(\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2 \quad (u_{GS} > U_{GS(th)}) \quad (2-14)$$

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

2. N 沟道耗尽型 MOSFET

N 沟道耗尽型 MOSFET 的结构示意图如图 2-20 (a) 所示, 耗尽型 MOSFET 的符号如图 2-20 (b) 所示。N 沟道耗尽型 MOSFET 的结构与增强型 MOSFET 结构相似, 不同之处在于 N 沟道耗尽型 MOSFET 在制造过程中, 在栅—源极之间的 SiO_2 绝缘层中注入一些离子 (图中 2-20 (a) 中用 “+” 表示), 使漏—源极之间的导电沟道在 $u_{GS}=0$ 时就已经存在了, 这一沟道称为初始沟道。如图 2-20 (a) 所示, 在绝缘层中预先注入正离子, 形成 N 型初始沟道, 因此称为 N 沟道耗尽型 MOSFET。由于 $u_{GS}=0$ 时就存在初始导电沟道, 所以只要加上 u_{DS} 就能形成漏极电流 i_D 。

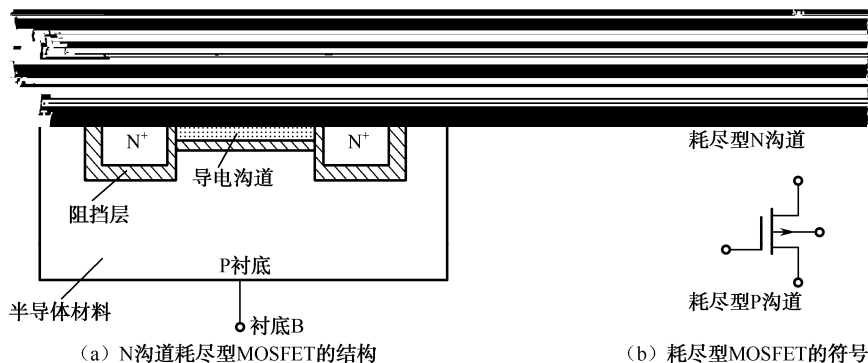


图 2-20 耗尽型 MOSFET 的结构及符号

如果在 N 沟道耗尽型 MOSFET 的栅—源极之间加上负偏压 ($u_{GS} < 0$), 则在栅—源极之间产生的外加电场将与绝缘层中预注入的正离子产生的电场相互抵消, 使吸附到衬底表面的 N 型层 (导电沟道) 变薄, 沟道电阻增大。当负栅压增大到 $u_{GS}=U_{GS(off)}$ 时, 导电沟道被完全夹断, 使漏极电流 $i_D=0$ 。N 沟道耗尽型 MOSFET 的特性曲线如图 2-21 所示。

N 沟道耗尽型 MOSFET 的漏极电流可近似表示为

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2 \quad (U_{GS(off)} \leq u_{GS} \leq 0) \quad (2-15)$$

式中, I_{DSS} 是 $u_{GS}=0$ 时的漏极电流。

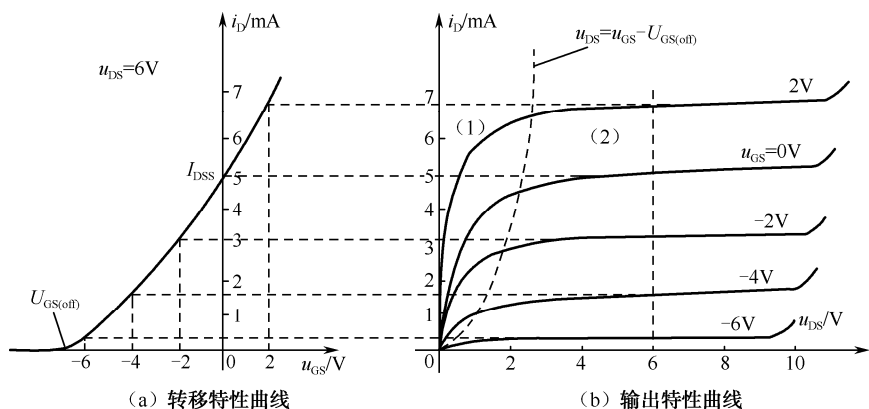


图 2-21 N 沟道耗尽型 MOSFET 的特性曲线

2.2.3 场效应管的使用

1. 各种场效应管的特性比较

表 2-1 给出了各种场效应管的符号及输入、输出特性。

表 2-1 各种场效应管的特性比较

名 称	符 号	转 移 特 性	输 出 特 性
N 沟道耗尽型 MOS 管			
N 沟道增强型 MOS 管			
P 沟道耗尽型 MOS 管			
P 沟道增强型 MOS 管			