

## 知识点

### 1.1 半导体基础知识

了解半导体的掺杂性、热敏性与光敏性：半导体掺杂或温度升高或光照，导电能力大大增强。

概念：本征半导体，P 型半导体与 N 型半导体，多子与少子，扩散运动与扩散电流，漂移运动与漂移电流。

### 1.2 PN 结与晶体二极管（重点、难点）

PN 结是所有半导体器件的基础。

晶体二极管是由单 PN 结构成的半导体器件，二极管的本质即 PN 结。二极管具有 PN 结的所有特性。

概念：PN 结（或空间电荷区、势垒区、耗尽层、阻挡层、高阻区），PN 结平衡状态，势垒电压  $U_\phi$ ，势垒电容  $C_T$ ，变容二极管，理想二极管，工作点。

#### 1. PN 结单向导电性与伏安特性

（1）PN 结加正向电压时（P 区接电源正极 N 区接电源负极）：内建电场被削弱使势垒降低，多子扩散电流远大于少子漂移电流，形成很强的正向导通电流，PN 结导通。

（2）PN 结加反向电压时（P 区接电源负极 N 区接电源正极）：内建电场被增强使势垒升高，少子漂移电流大于多子扩散电流，形成很小的少子漂移电流（称反向电流）。由于反向电流的值很小且基本不随外加电压变化，一般称作反向饱和电流  $I_s$ 。 $I_s$  通常忽略不计，故 PN 结加反向电压时呈现截止状态。

PN 结（晶体二极管）正向导通、反向截止的特性称 PN 结的单向导电特性。

（3）晶体二极管的伏安特性：流过二极管的电流与二极管两端电压之间的关系如下：

$$i = I_s (e^{u/U_T} - 1)$$

式中： $U_T = \frac{kT}{q} \Big|_{T=300K} \approx 26\text{mV}$ ，称为热电压。

当二极管加正向电压时  $u > 0$ 。当  $e^{u/U_T} \gg 1$  时， $i \approx I_s e^{u/U_T}$ ，对应 PN 结正向导通状态。当二极管加反向电压时  $u < 0$ ，且满足  $e^{u/U_T} \ll 1$  时，则  $i \approx -I_s$ ，可以认为对应 PN 结截止状态。

实际晶体二极管特性表明正向导通时存在门限电压（死区电压） $U_r$ 。对于硅二极管， $U_r = 0.5 \sim 0.7\text{V}$ ；对于锗二极管， $U_r = 0.2 \sim 0.3\text{V}$ 。

#### 2. PN 结击穿特性与稳压管

（1）PN 结击穿：PN 结外加反向电压且电压值超过一定限度时，反向电流急剧增加而结两端电压基本不变的现象。PN 结击穿时的外加电压称击穿电压  $U_Z$ 。

击穿分两类：雪崩击穿、齐纳击穿。雪崩击穿的击穿电压高于齐纳击穿。

（2）稳压管：利用 PN 结击穿特性工作的二极管。正常工作时，稳压管上应加反向电压并使其处于反向击穿状态。由于击穿时电流急剧增加，故使用稳压管时应加限流电阻。

稳压管主要参数有：动态电阻  $r_z$ 、稳定电压  $U_Z$ （PN 结击穿电压）、稳定电流  $I_Z$  和额定功耗  $P_Z$ 。

### 3. PN 结温度特性

温度变化时，晶体二极管的反向饱和电流  $I_s$ 、门限电压  $U_r$  和击穿电压  $U_Z$  会随之发生变化。

温度每升高  $10^\circ\text{C}$ ，反向饱和电流  $I_s$  增大一倍，具有正的温度系数。门限电压的值  $|U_r|$  随温度升高而减小，具有负的温度系数；雪崩击穿的击穿电压  $U_Z$  随温度升高而增大，具有正的温度系数；而对于齐纳击穿，击穿电压  $U_Z$  随温度升高而下降，具有负的温度系数。

### 4. 晶体二极管重要参数与简化模型

(1) 晶体二极管重要参数：直流电阻  $R_D$  和交流电阻  $r_d$ 。

定义：  $R_D = U/I$

定义：  $r_d = du/di$

分析表明：  $r_d = 26\text{mV}/I_Q$ （常温  $300\text{K}$  时），式中  $I_Q$  为二极管工作点的电流。

直流电阻  $R_D$  与交流电阻  $r_d$  均为非线性电阻，其值均随工作点  $Q$  位置的改变而改变。

#### (2) 二极管简化模型

①分段线性模型：在工程计算时允许有一定的近似，如图 1 所示。图(a)为理想二极管；图(b)只考虑门限电压；图(c)为既考虑门限电压又考虑交流电阻。需要注意的是：图中认为反向电流为零，且没有工作到击穿区。

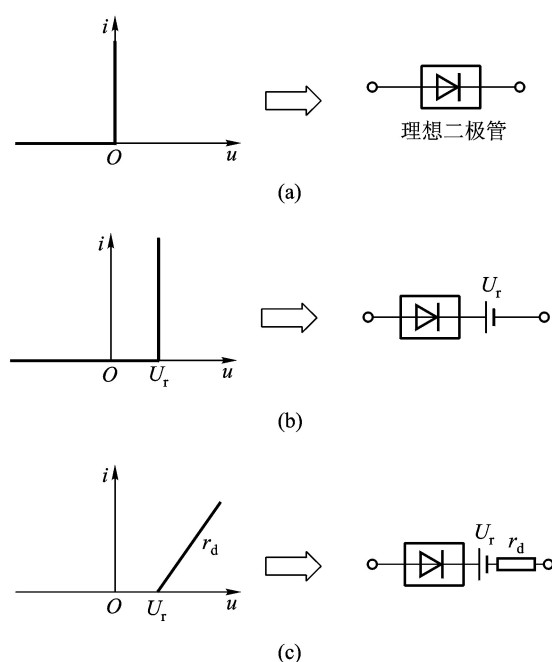


图 1 二极管大信号工作模型图

## 1.3 晶体三极管（重点、难点）

### 1. 晶体三极管放大原理

(1) 三极管放大条件：发射结正向偏置，集电结反向偏置。

由放大条件可知，处于放大状态的晶体三极管各极对地的直流电位满足如下关系：

对于 NPN 管：  $U_C > U_B > U_E$ ；对于 PNP 管：  $U_C < U_B < U_E$ 。

(2) 载流子传输过程。注意分清主体过程与伴随过程。

主体过程：发送（发射区发送的载流子）、传输（基区传转载流子）和收集（集电区收集载流子）载流子。

伴随过程：载流子在基区的复合以及集电结两边的少子漂移。

应当指出：晶体三极管是由两个 PN 结所组成，除了存在载流子扩散运动和漂移运动之外，还存在载流子扩散运动与复合运动一对矛盾，使得晶体三极管具有电流放大作用。

(1) 电流分配关系。

$$I_C = \bar{\alpha} I_E + I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$$

$$I_B = (1 - \bar{\alpha}) I_E - I_{CBO}$$

$$I_E = I_C + I_B = (1 + \bar{\beta}) I_B + I_{CEO}$$

$$I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$$

三极管的基极电流有一微小的变化时，集电极（发射极）电流会相应的发生较大的变化，三极管是电流控制型器件。

## 2. 晶体三极管输出特性曲线

输出特性曲线  $i_C = f(i_B, u_{CE})$  为一簇非线性曲线，分为截止区、放大区、饱和区和击穿区。实际常用的是截止区、放大区和饱和区。如图 2 所示。

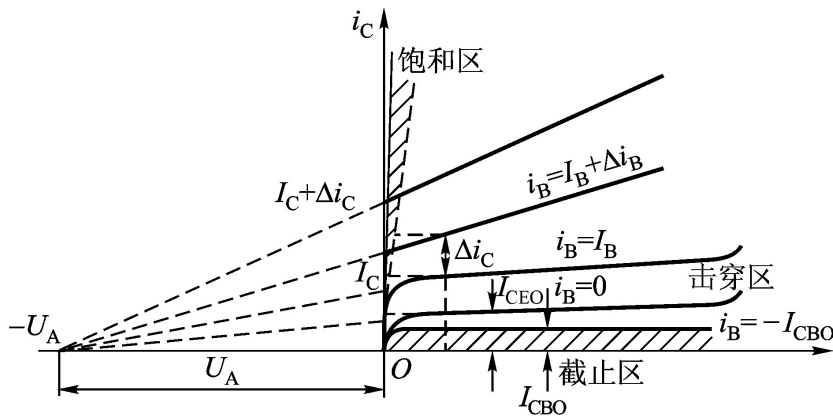


图 2 三极管（NPN 型）输出特性

截止区：对应晶体三极管处于截止状态（发射结、集电结均反向偏置）。特点： $i_E = 0$ ， $i_C = I_{CBO}$ ， $i_B = -I_{CBO}$ 。

放大区：对应晶体三极管处于放大状态（发射结正向偏置，集电结反向偏置），特性曲线平坦部分。特点：具有电流放大作用；存在基调(或厄立)效应。

饱和区：对应晶体三极管处于饱和状态（发射结正向偏置，集电结正向偏置），特性曲线上上升部分。特点：固定  $u_{CE}$ ， $i_C$  基本不随  $i_B$  增加而增加（即：饱和现象）；固定  $i_B$ ， $i_C$  随  $u_{CE}$  剧烈变化。

## 3. 晶体三极管重要参数与温度特性

(1) 重要参数：共基极直流电流放大系数  $\bar{\alpha}$  和交流电流放大系数  $\alpha$ ；共发射极直流

电流放大系数  $\bar{\beta}$  和交流电流放大系数  $\beta$ 。其相互关系为：

$$\bar{\beta} = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}, \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

在放大区可以认为  $\beta \approx \bar{\beta}$ ，不再区分。

(2) 温度特性：

温度升高，晶体三极管的共发射极电流放大系数  $\beta$  增大，门限电压  $U_{BEQ}$  ( $U_{EBO}$ ) 减小，反向饱和电流  $I_{CBO}$  急剧增大，最终导致集电极电流  $I_C$  的增加。

### 1.4 场效应管（重点、难点）

#### 1. 场效应管工作原理：

场效应管是利用栅源电压控制漏极电流，进而实现放大功能。它是电压控制器件。

(1) 漏极电流  $i_D$  受控于栅源电压  $u_{GS}$ ： $u_{GS}$  变化时， $i_D$  随之单调变化。沟道被夹断时， $i_D = 0$ 。


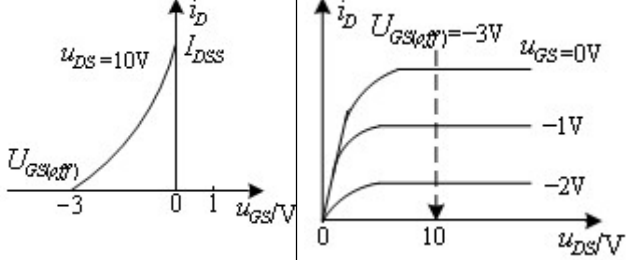

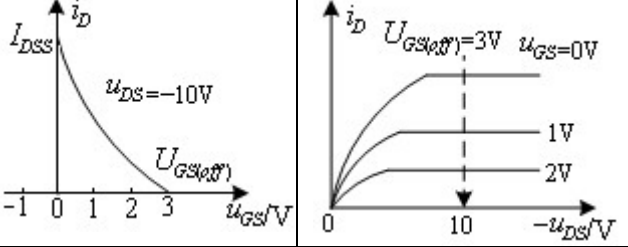
(2) 漏极电流  $i_D$  受漏源电压  $u_{DS}$  影响： $u_{DS}$  变化时， $i_D$  的变化分两阶段。预夹断前， $i_D$  随  $u_{DS}$  近似线性变化，称为可变电阻区，又称非饱和区；预夹断后， $u_{DS}$  改变  $i_D$  近似不变维持恒定，称为饱和区。当  $|u_{GD}| = |U_{GS(off)}|$  ( $|U_{GS(th)}|$ ) 时，场效应管处于预夹断状态。


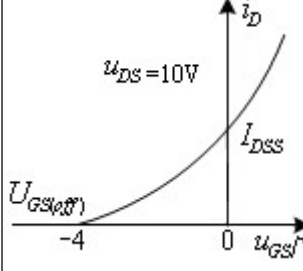
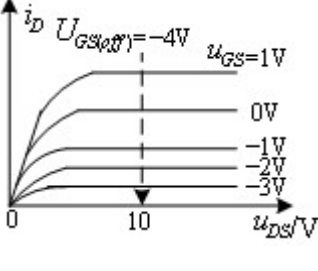

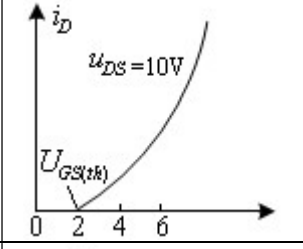
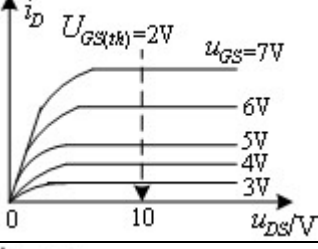

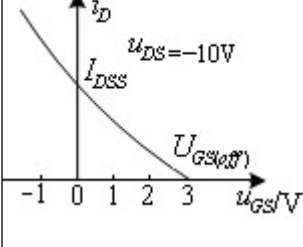
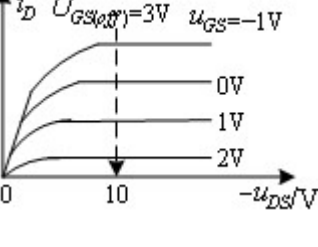

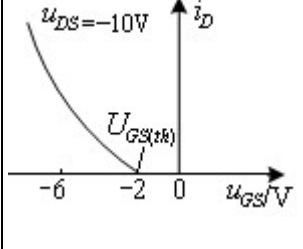
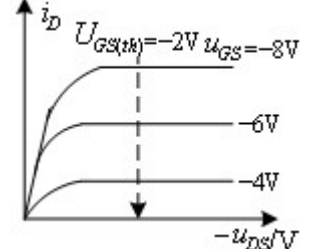
#### 2. 场效应管特性曲线

(1) 输出特性曲线：特性曲线中实际用到的区域为截止区、放大区与可变电阻区。

表 1 给出了各种场效应管的特性。

表 1 各种类型的 FET 的特性

类型	符号	放大状态的电压极性		转移特性	输出特性	$u_{GS(off)}$	$u_{GS(th)}$
		$u_{GS}$	$u_{DS}$				
结型	N 沟道 耗尽型		-	+		-	
	P 沟道 耗尽型		+	-		+	

绝缘栅型	N 沟道	耗尽型		+	+			-	
		增强型		+	+			+	
	P 沟道	耗尽型		+	-			+	
		增强型		-	-			-	

截止区：对应管子内部沟道未开启即处于夹断的状态。特点：对于 N 沟道场效应管  $u_{GS} \leq U_{GS(off)} (U_{GS(th)})$  时， $i_D = 0$ ；对于 P 沟道场效应管  $u_{GS} \geq U_{GS(off)} (U_{GS(th)})$  时， $i_D = 0$ 。

放大区（恒定电阻区）：对应管子内部沟道发生预夹断后的状态。特点： $i_D$  受控于  $u_{GS}$ 。对于 N 沟道场效应管：当  $u_{GS} > U_{GS(off)} (U_{GS(th)})$ ，且  $u_{GD} < U_{GS(off)} (U_{GS(th)})$  时，场效应管工作于放大区；对于 P 沟道场效应管：当  $u_{GS} < U_{GS(off)} (U_{GS(th)})$ ，且  $u_{GD} < U_{GS(off)} (U_{GS(th)})$  时，场效应管工作于放大区。

可变电阻区：对应预夹断前状态。特点：呈线性电阻特性，即： $i_D$  与  $u_{DS}$  近似线性关系；不同的  $u_{GS}$  电阻大小不同，呈变阻特性。

（2）转移特性曲线：发生预夹断后（即放大区）转移特性曲线基本重合，即认为放大区， $u_{DS}$  对  $i_D$  无控制作用（输出特性曲线呈现水平）。

### 3. 场效应管重要参数

（1）交流参数：跨导  $g_m$  与背栅跨导  $g_{mb}$ ，输出电阻  $r_{ds}$ 。它们的定义如下：

$$g_m = \left. \frac{di_D}{du_{GS}} \right|_{u_{DS}(u_{BS})=C} ; \quad g_{mb} = \left. \frac{di_D}{du_{BS}} \right|_{u_{GS}(u_{DS})=C} ; \quad r_{ds} = \left. \frac{du_{DS}}{di_D} \right|_{u_{GS}(u_{BS})=C}。$$

$g_m$  反映了栅源电压对漏极电流  $i_D$  的控制能力； $g_{mb}$  反映了衬底电压  $u_{BS}$  对漏极电流  $i_D$  的控制能力； $r_{ds}$  反映了漏源电压  $u_{DS}$  对漏极电流  $i_D$  的控制能力。

(2) 直流参数：饱和漏极电流  $I_{DSS}$ 、夹断电压  $U_{GS(off)}$ 、开启电压  $U_{GS(th)}$ 。其中： $I_{DSS}$ 、 $U_{GS(off)}$  为耗尽型场效应管参数； $U_{GS(th)}$  为增强型场效应管参数。