

高等医药院校教材

供药学类专业用

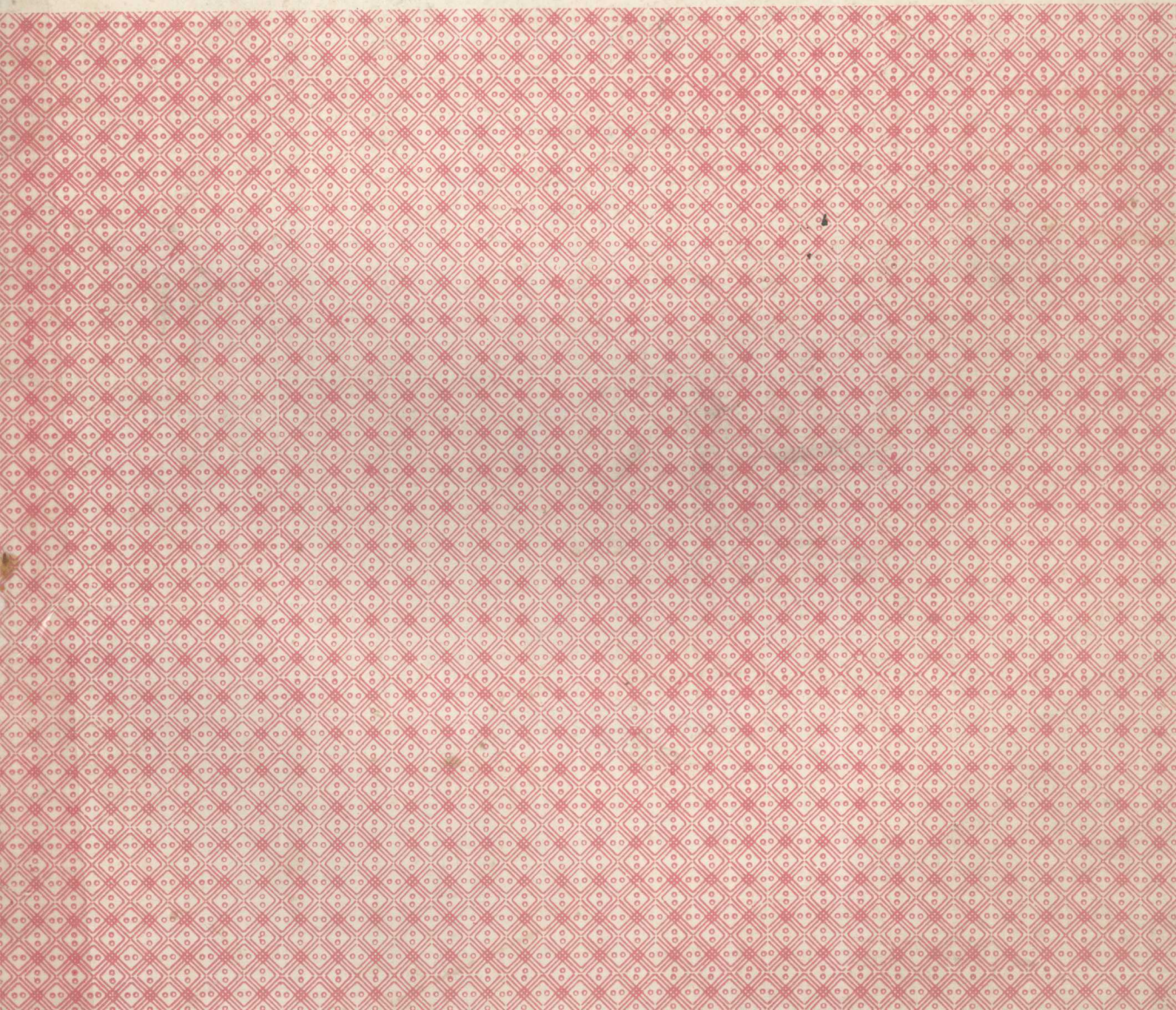
# 物理学

下册

第二版

王鸿儒 主编

人民卫生出版社



高等医药院校教材

(供药学类专业用)

# 物 理 学

下 册

(电子学基础)

**主编：**王鸿儒（北京医科大学）

**编写：**（按姓氏笔划为序）

何有清（沈阳药学院）

沈明元（华西医科大学）

张学贤（中国药科大学）

奚才清（上海医科大学）

舒辰慧（北京医科大学）



93 年 2 月 1 0



人 民 卫 生 出 版 社

4  
5.2

740721

# 目 录

第十五章 晶体管的基本工作原理	1
§ 15-1 半导体的导电特性	1
一、半导体的导电特性	1
二、PN结的单向导电性	1
§ 15-2 晶体二极管	3
一、二极管的伏安特性	3
二、二极管的主要参数	4
§ 15-3 稳压管	4
一、稳压管的稳压作用	5
二、稳压管的主要参数	5
§ 15-4 晶体三极管	5
一、晶体三极管的结构和符号	5
二、三极管的放大作用	6
三、三极管的特性曲线	8
四、三极管的主要参数	10
§ 15-5 场效应管	12
一、结型场效应管	12
二、结型场效应管的特性曲线	13
三、场效应管的主要参数	14
*四、绝缘栅场效应管	15
习题十五	16
第十六章 晶体管放大器	17
§ 16-1 基本放大器	17
一、基本放大电路的组成	17
二、放大电路的基本工作原理	18
三、放大电路的图解分析法	18
四、放大电路的等效电路分析法	22
§ 16-2 放大器静态工作点的稳定	24
一、温度对放大器工作点的影响	24
二、静态工作点的稳定措施	25
§ 16-3 多级放大器	26
一、级间耦合方式	26
二、多级放大器的电压放大倍数	27
三、多级放大器的输入阻抗和输出阻抗	28
四、多级放大器的通频带	29
五、信噪比	30
§ 16-4 场效应管放大器	30
§ 16-5 负反馈放大器	33
一、负反馈的基本概念	33
二、电流串联负反馈 恒流源	34
三、电压串联负反馈 射极输出器	36
四、电压并联负反馈	37
五、负反馈对放大器性能的影响	38
§ 16-6 直流放大器	41
一、直流放大器的级间耦合	41
二、差分放大器	43
*三、调制式直流放大器	48
习题十六	51
第十七章 运算放大器	55
§ 17-1 集成运算放大器的结构与特性	55
一、集成运算放大器简介	55
二、运算放大器的主要性能参数	56
三、理想运放	56
§ 17-2 集成运放组成的基本电路	57
一、反相比例运算电路	57
二、同相比例运算电路	58
三、差分运算电路	59
§ 17-3 集成运放在信号运算方面的应用	59
一、加法器和减法器	59
二、积分运算	60
三、微分运算	60
四、对数与反对数运算	61
五、乘法与除法运算	62
§ 17-4 运算放大器在分析仪器中的应用	62
一、电流测量	62
二、电位(势)测量	64
三、电阻或电导测量	64
四、换能器输出的比较	65
五、恒电压源	66
六、恒电流源	66
习题十七	67

<b>第十八章 正弦波振荡器</b> .....	68	二、 <i>J-K</i> 触发器(主从型) .....	91
§ 18-1 自激振荡器原理 .....	68	三、计数器 .....	92
一、选频放大器 .....	68	§ 19-6 单稳态触发器 .....	93
二、自激振荡条件 .....	68	§ 19-7 无稳态触发器 .....	95
§ 18-2 <i>LC</i> 振荡器 .....	69	§ 19-8 数字显示 .....	96
一、变压器反馈式振荡器 .....	69	一、荧光数码管 .....	96
二、电感反馈式振荡器 .....	70	二、液晶显示器 .....	97
三、电容反馈式振荡器 .....	71	三、半导体数码管 .....	97
§ 18-3 <i>RC</i> 振荡器 .....	72	* § 19-9 模拟量和数字量的转换 .....	98
一、 <i>RC</i> 桥式振荡器 .....	72	习题十九 .....	98
二、 <i>RC</i> 移相式振荡器 .....	75	<b>第二十章 直流稳压电源</b> .....	100
§ 18-4 石英晶体振荡器 .....	75	§ 20-1 整流电路 .....	100
一、石英晶体的压电效应及等效电路 .....	75	一、半波整流电路 .....	100
二、石英晶体振荡器 .....	77	二、全波整流电路 .....	101
习题十八 .....	77	三、桥式整流电路 .....	102
<b>第十九章 脉冲数字电路</b> .....	80	四、倍压整流电路 .....	104
§ 19-1 脉冲信号 .....	80	§ 20-2 滤波器 .....	105
§ 19-2 晶体管的开关特性 .....	81	一、电容滤波器 .....	105
一、晶体管的开关作用 .....	81	二、电感电容滤波器 .....	107
二、应用举例 .....	82	三、 $\pi$ 型滤波器 .....	107
三、加速电容在开关电路中的作用 .....	82	§ 20-3 稳压电路 .....	108
§ 19-3 门电路 .....	83	一、并联式稳压电路 .....	108
一、基本概念 .....	83	二、串联式晶体管稳压电路 .....	109
二、与门电路 .....	84	三、稳压电源的过载保护电路 .....	112
三、或门电路 .....	85	四、稳压电源的主要技术指标 .....	113
四、非门电路 .....	86	五、集成稳压电源 .....	114
五、复合门电路 .....	86	* § 20-4 可控硅整流电路简介 .....	115
§ 19-4 集成逻辑( <i>TTL</i> )“与非”门 电路 .....	87	一、可控硅的结构和工作原理 .....	115
一、工作原理 .....	87	二、可控硅整流电路 .....	116
二、主要参数 .....	88	习题二十 .....	117
§ 19-5 双稳态触发器 .....	89	<b>习题答案</b> .....	120
一、 <i>R-S</i> 触发器 .....	89	<b>中英文名词对照</b> .....	122

## 第十五章 晶体管的基本工作原理

晶体二极管、晶体三极管、场效应管、集成运算放大器等，均为半导体器件。半导体器件是电子电路中的关键部件。构成半导体器件的共同基础是PN结。本章首先介绍PN结，然后介绍晶体二极管、稳压管、晶体三极管和场效应管的基本结构、工作原理和主要参数。

### § 15-1 半导体的导电特性

#### 一、半导体的导电特性

半导体的电导率介于导体与绝缘体之间。纯净半导体叫作**本征半导体**，例如锗或硅，这种半导体大多数是单晶结构，所以也叫晶体。在室温状态，由于晶体中束缚电子受热激发获得足够能量，使少量电子脱离束缚成为自由电子，同时在原有位置上出现相等数量的**空穴**。自由电子和空穴不断地产生，也不断地复合。

当有外电场作用时，自由电子沿着与电场相反的方向运动。同时，在空穴邻近的电子由于热运动脱离原来的原子而填充了这些空穴，但在原处留下了新的空穴。这样，空穴也在运动，它的运动方向与电子的运动方向相反。因此，可以把空穴看作带正电的粒子。半导体之所以能够导电，就是因为内部具有这两种载流子的缘故。

由于本征半导体中，电子-空穴对非常少，实用价值不大。为了提高半导体的导电性能，在本征半导体中掺入合适的其他元素，即所谓杂质，这种半导体叫作**杂质半导体**。杂质半导体分为两种类型：一种叫作**N型半导体**，一种叫作**P型半导体**。

1. **N型半导体** 在纯净的硅单晶中掺入少量五价元素（如磷、砷或锑等），即构成**N型半导体**。如掺入磷后，在常温下就会出现大量被排斥在共价键以外的自由电子。由于半导体中自由电子浓度的大大提高，导电能力明显增强。在这种半导体中，占支配地位的载流子是电子，所以电子是多数载流子，简称**多子**；空穴是少数载流子，简称**少子**。这种半导体主要依靠自由电子导电，所以叫作**电子型半导体**或**N型半导体**。磷原子提供了一个自由电子，故称它为**施主原子**。

2. **P型半导体** 在纯净的硅单晶中掺入少量的三价元素（如硼、铝或镓等），即构成**P型半导体**。如掺入硼后，晶体中就有一些共价键缺少电子而形成空穴，使空穴数量大大增加。因此，在全部载流子中，占绝大多数的是空穴，而电子是少数载流子。这种半导体主要靠空穴导电，所以叫作**空穴型半导体**或**P型半导体**。硼原子提供了空穴，可以接受一个电子，所以硼原子叫作**受主原子**。

#### 二、PN结的单向导电性

单块N型或P型半导体，从外部电路反映出来的现象看，仅是电流比本征半导体大，因此，单块半导体不能构成我们所需要的晶体管器件。晶体管的最基本的结构是一块P型半导体和一块N型半导体的结合。

1. *PN* 结的形成 当 *P* 型半导体与 *N* 型半导体结合时, 由于 *P* 型中的空穴浓度大, *N* 型中自由电子浓度大(如图 15-1(a)), 在交界面处, 空穴将由 *P* 区向 *N* 区扩散, 自由电子则由 *N* 区向 *P* 区扩散(如图 15-1(b))。随着扩散的进行, *P* 区的空穴数减少, 界面左方形成一层负离子层; *N* 区自由电子数减少, 界面右方形成一层正离子层。其结果是在交界面处形成一个空间电荷区, 由此产生一个由 *N* 区指向 *P* 区的自建电场(如图 15-1(c))。很明显, 这个电场阻碍多子的扩散运动, 所以空间电荷区有阻止多子继续扩散的趋势。另一方面, 自建电场驱使 *N* 区和 *P* 区的少子沿着与扩散方向相反的方向运动。少子在自建电场作用下的这种运动叫作漂移运动。少子漂移形成的电流叫作漂移电流。

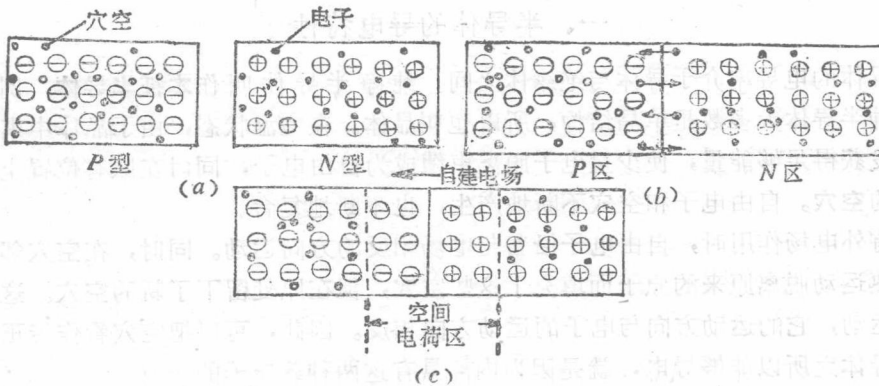


图 15-1 *PN* 结的形成

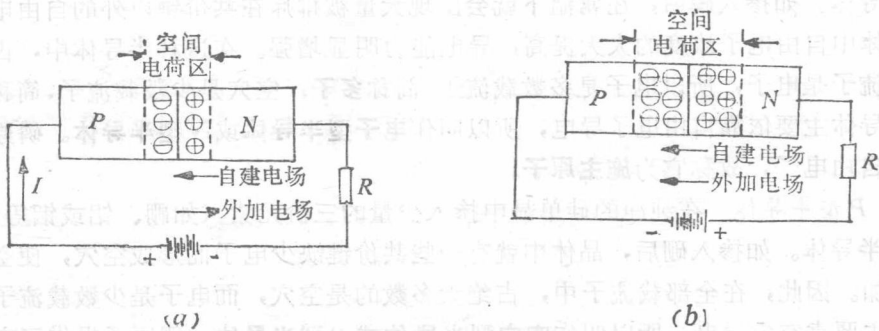


图 15-2 *PN* 结的单向导电性

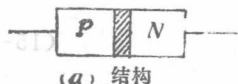
当多子的扩散运动与少子的漂移运动达到动态平衡时, 空间电荷区的厚度就确定下来, 自建电场也达到一个稳定值。空间电荷区有阻挡扩散运动的作用, 所以叫作阻挡层。在动态平衡时的空间电荷区, 就是 *PN* 结。

## 2. *PN* 结的单向导电性

(1) 在 *PN* 结两端加正向电压或叫正向偏置时(如图 15-2(a)), 外加电场与自建电

场方向相反，因而削弱了自建电场，使阻挡层变窄，有利于扩散运动，而不利于漂移运动。这样，P区和N区的多子就能顺利地通过PN结，电路内形成较大的电流，叫作**正向电流**。PN结所呈现的电阻叫作**正向电阻**，其值很小。至于少子运动形成的漂移电流是非常小的，它对总电流的影响可以忽略。这时，PN结呈**导通状态**。

(2) 在PN结两端加反向电压或叫反向偏置时（如图15-2(b)），外加电场与自建电场方向一致，因而加强了自建电场，使阻挡层加宽，多子受阻挡层阻止，扩散无法进行。但是，少子将在外加电场作用下通过PN结，故电路中有微小的电流，叫作**反向电流**，PN结所呈现的电阻叫作**反向电阻**，其值很大。这时电路中几乎没有电流，故称PN结处于**反向截止状态**。



(a) 结构



(b) 符号

图 15-3 晶体二极管的结构和符号

由以上分析可知，PN结具有**单向导电性**，这是它的一个重要特性。

## § 15-2 晶体二极管

PN结加上电极引线，再用管壳封装就构成二极管。通常用图15-3中的符号表示，箭头指向表示正向导通方向，即电流方向。它有两个电极：由P型半导体引出的电极叫**正极或阳极**，由N型半导体上引出的电极叫**负极或阴极**。

### 一、二极管的伏安特性

二极管的性能常用伏安特性来表示。所谓伏安特性，就是指加在二极管两端的电压和通过二极管的电流之间的数量关系。

1. **正向特性** 二极管的特性曲线如图15-4所示。坐标中第一象限内的曲线为正向特性曲线。当正向电压较小 ( $< 0.5V$ ) 时，外电场还不足以克服自建电场对多子扩散运动所造成的阻力，二极管呈现很大的电阻，正向电流很小，如图15-4中OA段，这一段范围叫作**死区**，相应的电压叫作**死区电压**。硅二极管的死区电压一般在  $0.5V$  左右，锗二极管一般略低于  $0.2V$ 。当外加电压大于死区电压后，自建电场被大大削弱，二极管内阻变小，电流随电压的增大而迅速上升，如图15-4中AB段，这就是二极管的正常工作区。在正常工作时的硅管压降通常为  $0.6 \sim 0.7V$ ，锗管压降为  $0.2 \sim 0.3V$ 。

2. **反向特性** 第三象限内的曲线是反向特性曲线。在外加反向电压时，反向电流很小。反向电压增加而反向电流几乎不变，如图15-4中OD段所示。这是因为反向电流由少子形成，而少子的数量又很小所致。在这种情况下的电流又叫作**反向饱和电流**。反向饱和电流既然由少子形成，当然对温度的变化就很敏感，温度升高时，反向饱和电流明显增大。

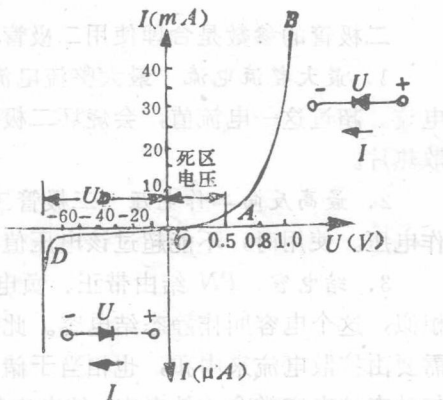


图 15-4 晶体二极管的伏安特性曲线

当反向电压增加到某一定数值  $U_r$  时, 过强的外加电场把 PN 结内被束缚的价电子从共价键上强行拉出, 从而产生大量的电子和空穴; 或者由于外加电场的作用使通过 PN 结的少数载流子加速, 动能急剧增大, 以致能把共价键的价电子撞击出来, 并引起连锁反应, 也能产生大量的电子和空穴。两种情况都能造成反向电流突然增大, 这种现象叫作反向击穿。相应的电压叫作**反向击穿电压**。二极管在电路中正常工作时, 反向电压不能超过击穿电压, 否则将导致二极管失去单向导电性而损坏。

3. 伏安特性的表达式 根据固体物理中有关 PN 结的研究, 可以得出晶体二极管电流  $I$  与端电压  $U$  的关系式, 即

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{q}{kT} U\right) - 1 \right] \quad (15-1)$$

其中  $q$  是电子的电量, 等于  $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ;  $T$  是绝对温度, 单位是  $\text{K}$ ;  $k$  为玻尔兹曼常量, 等于  $1.38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $I_s$  为反向饱和电流, 是一个与外加电压无关的系数。

在  $25^\circ\text{C}$  时,  $\frac{q}{kT} = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 298} \approx 39 \text{V}^{-1}$ , 或写成  $U_T = kT/q \approx 26 \text{mV}$ 。式

(15-1) 也可写成

$$I = I_s [\exp(U/U_T) - 1] \quad (15-2)$$

如果  $U$  为正数且比  $26 \text{mV}$  大得多, 则  $\exp(U/U_T) \gg 1$ ,  $I \approx I_s \exp(U/U_T)$ , 即管子的电流与电压成指数关系, 它适用于正向特性  $OB$  段。二极管的端电压只要稍微增加一点, 电流就会增加很多。若  $U$  为负数且其绝对值也比  $26 \text{mV}$  大得多, 则  $\exp(U/U_T) \ll 1$ ,  $I \approx -I_s$ , 基本上是一个常数, 即表明反向饱和电流与所加电压无关, 适用于反向特性  $OD$  段。

## 二、二极管的主要参数

二极管的参数是合理使用二极管的重要依据。其主要参数有:

1. **最大整流电流** 最大整流电流是指二极管长期使用所允许通过的最大正向平均电流。超过这一电流值, 会烧坏二极管。对于大功率二极管, 为了防止过热, 通常要加散热片。

2. **最高反向工作电压** 二极管工作时所能承受的反向电压峰值, 叫作最高反向工作电压。使用时, 不能超过该电压值, 通常最高反向工作电压低于反向击穿电压。

3. **结电容** PN 结由带正、负电荷的两个离子层组成, 这与极板带电时的电容器相似, 这个电容叫作静态结电容。此外, 当空间电荷区由薄变厚时, 这个区域中的多子需要由扩散电流来中和, 也相当于储有电荷的电容器, 这个电容叫作动态结电容。静态与动态结电容常合称结电容。结电容的存在造成高频电流容易通过, 失去了单向导电性, 因此限制了二极管的最高使用频率。

## § 15-3 稳压管

稳压管是一种经过特殊工艺制成的晶体二极管, 它与普通二极管不同之处在于它工作在反向击穿区。



## 一、稳压管的稳压作用

图 15-5 (a) 是稳压管的符号, 图 15-5 (b) 是稳压管的伏安特性曲线。由图可见, 当反向电压增至  $U_{zmin}$ , 稳压管产生反向击穿。这时, 即使反向电压增加很小, 也会引起反向电流  $I_z$  急剧增加。从特性曲线  $AB$  段来看, 虽然流过稳压管的电流在很大范围内变化, 但它两端的电压  $U_z$  基本上不变, 这就是**稳压作用**, 这段特性曲线就是稳压管的正常工作区。当然, 在稳压管击穿时, 如果不加限制, 也会同一般二极管一样, 由于电流急剧增加而被烧坏。因此, 在电路中要串联限流电阻, 限制流过稳压管的电流, 使其不超过允许的数值。这样, 稳压管的击穿是可以恢复的, 并且此时的击穿状态即使被长时间地利用, 也不致过热损坏。

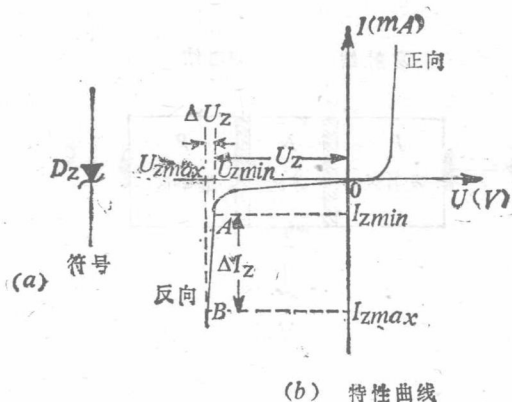


图 15-5 稳压管的符号和特性曲线

## 二、稳压管的主要参数

1. 稳定电压  $U_z$  稳定电压  $U_z$  是指稳压管正常工作的电压。这一参数具有较大的分散性, 即使是同一型号的稳压管, 由于工艺问题, 它的稳压值也稍有差异。例如 2CW18 稳压管的稳定电压在 10V 至 12V 之间。

2. 最大稳定电流  $I_{zmax}$  和最小稳定电流  $I_{zmin}$   $I_{zmax}$  是指稳压管的最大工作电流, 超过此值即超过管子的允许耗散功率;  $I_{zmin}$  是指稳压管的最小工作电流, 低于此值,  $U_z$  不再稳定。一般  $I_{zmin}$  为 1~2mA。

3. 动态电阻  $r_z$  动态电阻  $r_z$  是衡量稳压管性能好坏的指标, 它是稳压管在正常工作区电压变化量与电流变化量的比值, 即

$$r_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} \quad (15-3)$$

动态电阻越小, 即稳压管的伏安特性曲线的  $AB$  段越陡, 电压稳定性越好。

4. 电压温度系数 温度变化 1°C 时, 稳定电压变化的百分数叫作电压温度系数。

一般说来, 稳定电压低于 6V 的稳压管, 电压温度系数是负的; 稳定电压高于 6V 的稳压管, 电压温度系数是正的。6V 左右的稳压管, 其稳定电压受温度影响很小, 比较稳定。

## § 15-4 晶体三极管

### 一、晶体三极管的结构和符号

晶体三极管简称三极管或晶体管。根据使用材料的不同, 可分为硅管和锗管。按其

内部结构的不同，又可分为 *NPN* 型和 *PNP* 型两种。它们的基本结构和符号如图 15-6 所示。

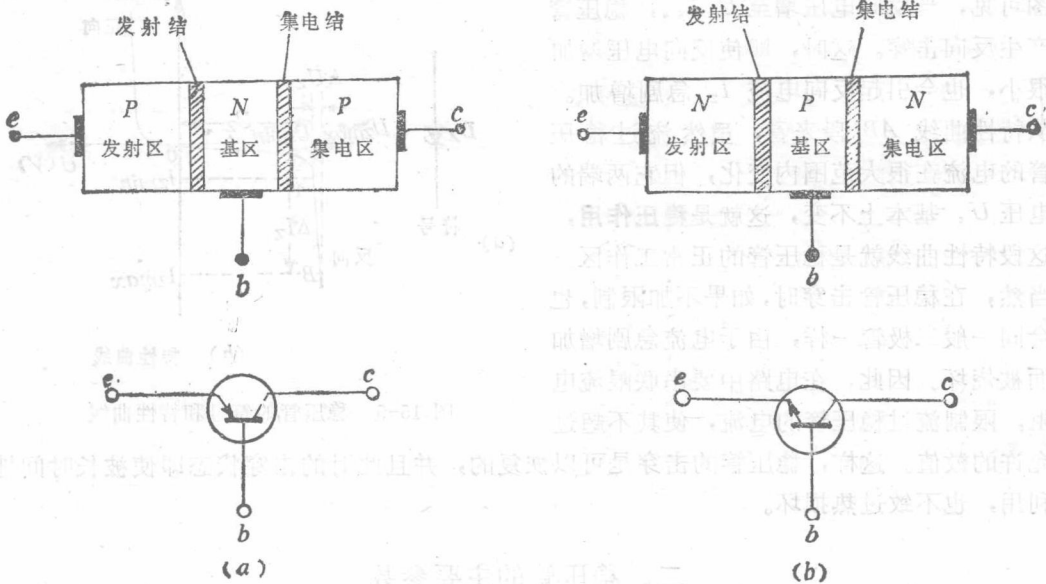


图 15-6 晶体三极管的结构和符号

由图可见，无论是 *PNP* 型或是 *NPN* 型三极管，均分为三个区域，即发射区、基区和集电区。每区各引出一根电极，相应地分别叫作**发射极**  $e$ 、**基极**  $b$  和**集电极**  $c$ 。

两种类型的三极管符号相近，唯一的差别是它们的发射极箭头方向，此方向是三极管工作时发射极直流电流的实际方向。

为保证三极管具有放大能力，无论哪种类型都必须满足下述三个条件：

1. 发射区杂质浓度远大于基区杂质浓度，以便发射更多的载流子；
2. 基区必须做得很薄，约为几微米至几十微米，而且杂质浓度低；
3. 集电区面积大于发射区的面积，以便收集载流子。

这样形成了两个靠得很近的 *PN* 结。基区和发射区之间的 *PN* 结叫作**发射结**  $J_1$ ，基区和集电区之间的 *PN* 结叫作**集电结**  $J_2$ 。这种结构使基极起着控制多子流动的作用。

两种类型的三极管，其工作原理是相同的。应用较广的是 *NPN* 型硅三极管。因此，本书中的讨论都以硅 *NPN* 型为主。

## 二、三极管的放大作用

要使三极管能够正常工作，必须在各电极间加偏置电压。通常在三极管的发射极  $e$  和基极  $b$  间由电源  $E_b$  供给一个较小的正向电压  $U_{be}$ 。（正端接  $b$ ，负端接  $e$ ），叫作**基极电压或偏压**， $U_{be}$  一般为零点几伏，而在发射极  $e$  和集电极  $c$  之间由电源  $E_c$  供给一个较大的反向电压  $U_{ce}$ 。（正端接  $c$ ，负端接  $e$ ），一般为几伏到十几伏。电路连接方法如图 15-7 所示，其中发射极是公共接地端，这种接法叫作**共发射极接法**，这是放大

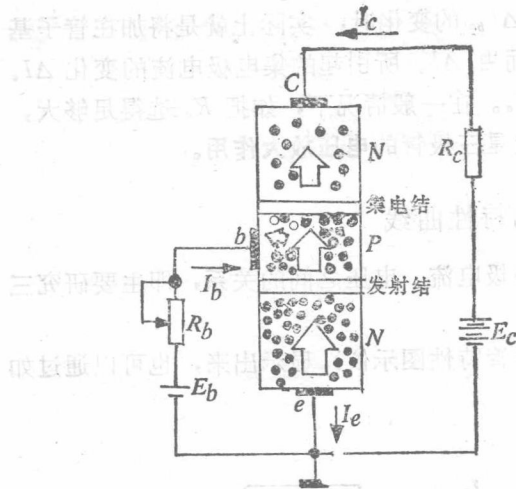


图 15-7 NPN型三极管共发射极电路

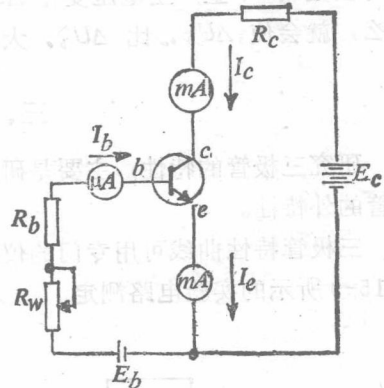


图 15-8 三极管电流的测试电路

电路中最常用的一种连接方法。从电势上看，发射极电势低于基极电势，而基极电势低于集电极电势。这时加在发射结上的是正向电压，而加在集电结上的是反向电压。图 15-7 中，由基极  $b$ 、限流电阻  $R_b$ 、电源  $E_b$ 、发射极  $e$  和发射结构成**基极回路**，又称为**输入回路**。由集电极  $c$ 、集电极负载电阻  $R_c$ 、电源  $E_c$ 、发射极  $e$  和集电结构成**集电极回路**，又称**输出回路**。

三极管的发射结在正向电压  $U_b$  作用下，使发射结电场削弱。这样，发射结的多子（自由电子）在外加正电压作用下，不断地越过发射结扩散到基区，同时基区的多子（空穴）也会进入发射区。由此可见，三极管中的电流是由两种不同的载流子在相反的方向越过  $PN$  结的运动而形成的。由于基区掺杂较少，它的空穴浓度远比发射区的自由电子浓度小，因而由基区的多子所形成的电流和发射区的多子所形成的电流相比，可以略去不计，即认为发射区电流  $I_e$ 。主要是由发射区的多子（自由电子）所形成的电子流。

由于基区很薄，而且集电结处于较强的反向电压作用下，因此，由发射区扩散到基区的电子将受到反向电压的吸引，大部分扩散到集电区，形成集电极电流  $I_c$ 。

另外，还有少数进入基区的电子（约占 1~10%）与基区中空穴相遇而复合，这部分电子无法再继续扩散。同时，空穴因与电子复合而减少，基极电源  $E_b$  将不断地向基区补充空穴而形成基极电流  $I_b$ 。

显然， $I_c$ 、 $I_b$ 、 $I_e$  三者符合基尔霍夫第一定律，即  $I_c = I_e - I_b$ 。基极电流  $I_b$  小，集电极电流  $I_c$  大，它们之间存在着比例关系，其比例主要由基区中空穴的浓度和基区的厚度决定。基极电流有很小的变化  $\Delta I_b$ ，就能引起集电极电流很大的变化  $\Delta I_c$ ，即  $\Delta I_b \ll \Delta I_c$ ，这就是三极管的**电流放大作用**。

三极管的电流  $I_c$ 、 $I_b$ 、 $I_e$  之间的关系和它的放大作用，可用图 15-8 所示的电路进行实验而得到证实。通过调节  $R_b$  不断地改变基极电流  $I_b$  的大小，并测出相应的一组  $I_b$  和  $I_c$  的数值，可以表明它们满足  $I_c = I_e - I_b$  的电流分配关系。并从  $\Delta I_c$  与

相应的  $\Delta I_b$  的比值表明三极管的电流放大作用。

再从电压的情况来看，当基极电流发生  $\Delta I_b$  的变化时，实际上就是将加在管子基极与发射极之间的电压产生  $\Delta U_{be}$  的变化，而由  $\Delta I_b$  所引起的集电极电流的变化  $\Delta I_c$  也将在负载  $R_c$  上产生电压变化  $\Delta U_{R_c} = R_c \Delta I_c$ 。在一般情况下，如把  $R_c$  选得足够大，那么，就会使  $\Delta U_{R_c}$  比  $\Delta U_{be}$  大得多，这就是三极管的**电压放大作用**。

### 三、三极管的特性曲线

研究三极管的特性，主要是研究三极管各极电流、电压之间的关系，即主要研究三极管的外特性。

三极管特性曲线可用专门的仪器（如晶体管特性图示仪）显示出来，也可以通过如图 15-9 所示的实验电路测定。

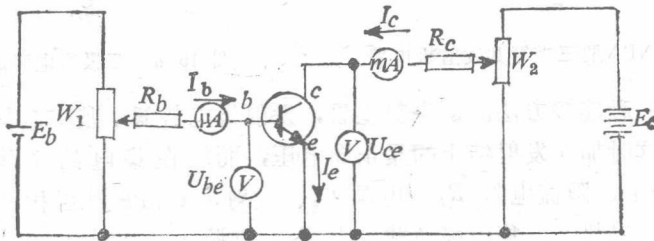


图 15-9 三极管特性的测试电路

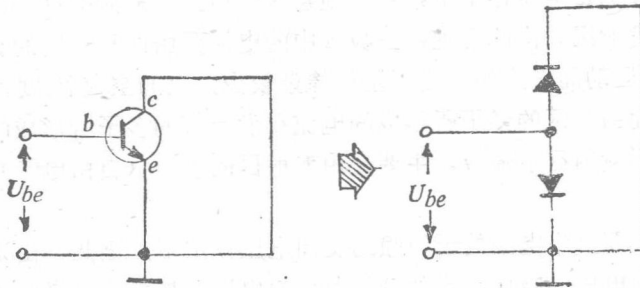


图 15-10  $U_{ce} = 0$  时三极管的等效电路

1. 输入特性曲线 所谓输入特性是指当电压  $U_{ce}$  保持定值时，输入电流  $I_b$  与输入电压  $U_{be}$  之间的函数关系，即  $I_b = f(U_{be})_{U_{ce} = \text{常数}}$ 。把这个关系叫作输入特性是因为用晶体管组成放大器时，待放大的信号是加在基极与发射极之间来引起基极电流变化的。

当  $U_{ce} = 0$  时，相当于集电极与发射极短路，这时的电路可看成  $b$ 、 $e$  之间并联了两个正向偏置的二极管(如图 15-10)。它的曲线与二极管的正向伏安特性曲线十分相似(如图 15-11)。此图中曲线 I 为  $U_{ce} = 0$  时的输入特性曲线。曲线 II 是  $U_{ce} = 2V$  时的输入特性曲线，与曲线 I 比较，在相同的  $U_{be}$  之下，特性曲线右移。这是因为集电结加上反向电压后，基区中的自由电子就进入集电区而形成集电极电流  $I_c$ ，于是在相同

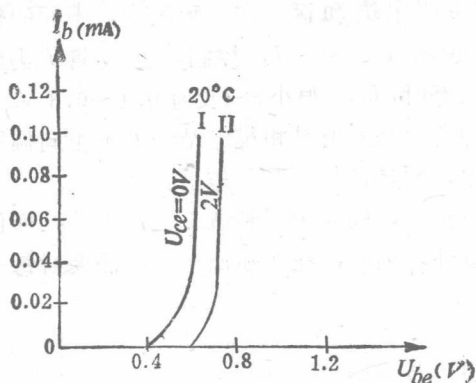


图 15-11 三极管输入特性曲线

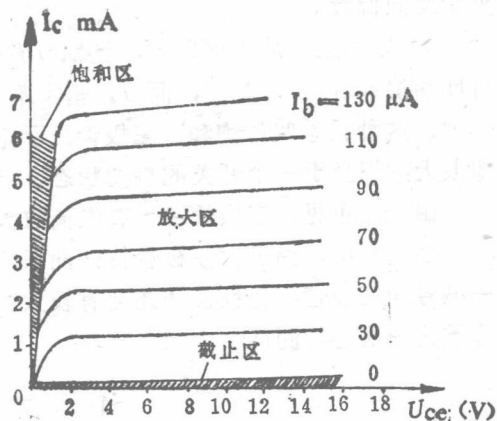


图 15-12 三极管的输出特性曲线

的  $U_{be}$  之下，基极电流  $I_b$  就要减小。

严格地说， $U_{ce}$  不同，输入特性曲线也应有所不同。但事实上，当  $U_{ce} > 1V$  以后，只要  $U_{be}$  保持不变，则注入基区的电子数一定，而集电结所加的反向电压已能把注入基区的电子中的绝大部分拉到集电极来，以致  $U_{ce}$  再增加， $I_b$  也不再明显地减小。因此，只需画出  $U_{ce} > 1V$  的一条输入特性曲线，就可以代表  $U_{ce}$  为其他更高值的情况。由于实际使用时，三极管的  $U_{ce}$  总是大于零的，因此更有实际意义的是  $U_{ce} = 2V$  的那条输入特性曲线。

从三极管的输入特性可以看出，和二极管的伏安特性一样，它也有一段“死区”。在正常工作下，硅管发射结压降  $U_{be}$  为  $0.6 \sim 0.7V$ ，锗管的  $U_{be}$  为  $0.2 \sim 0.3V$ 。

2. 输出特性曲线 所谓输出特性是指在一定基极电流  $I_b$  下，三极管的输出电流  $I_c$  与输出电压  $U_{ce}$  之间的函数关系，即  $I_c = f(U_{ce})$ ， $I_b = \text{常数}$ 。把这两者的关系叫作输出特性，是由于三极管组成的放大器放大的信号是由集电极电流和集电极电压反映出来。

图 15-12 是在不同  $I_b$  下的一族输出特性曲线。每一条特性曲线反映出在某一基极电流  $I_b$  的数值下，集电极电流  $I_c$  与集电极电压  $U_{ce}$  的关系，它们的形状都基本相似，所不同的地方只是  $I_b$  越大，对应的  $I_c$  也越大。整个曲线族可划分为三个区域：

(1) 截止区：一般认为  $I_b = 0$  的那条输出特性曲线与横轴所夹的区域为截止区。在截止区内  $I_b \leq 0$ ，说明发射结和集电结都处于反向偏置，三极管因此而失去了放大能力。

从曲线可见，在  $I_b = 0$ （相当于基极开路）时， $I_c \neq 0$ ，这个电流叫作穿透电流，用  $I_{c0}$  表示。 $I_{c0}$  是在  $U_{ce}$  作用下，从集电极到发射极的漏电流。在截止区， $I_c = I_{c0} \approx 0$ （如硅管常在  $1\mu A$  以下），相当于集电极与发射极之间存在着极大的阻抗，即三极管处于截止状态。截止状态下的三极管相当于一个断开的开关。

(2) 放大区：当  $I_b > 0A$ ，而  $U_{ce}$  又足够大时，各条输出特性曲线彼此平行且几乎平行于横轴。由图 15-12 可见，当  $I_b$  有很小变化时， $I_c$  将产生很大的变化，这时  $I_c$  的大小基本上与  $U_{ce}$  无关，而只受  $I_b$  的控制。输出特性曲线中具有这样特性的区域，叫作放大区。要使三极管工作在放大区，必须使三极管的发射结处于正向偏置，集电结

处于反向偏置。

(3) 饱和区：放大区以左，纵轴以右的部分叫作**饱和区**。在饱和区内，不同的输出特性曲线重合。 $I_c$ 不同，而  $I_e$  基本不变，说明  $I_c$  不受  $I_b$  控制，三极管失去放大作用，这种状态叫作**饱和**。三极管处于饱和状态时， $U_{ce}$  很小（一般为  $0.1 \sim 0.3 \text{ V}$ ）， $I_c$  却很大，相当于一个开关的接通状态。该区的特点是发射结和集电结都处于正向偏置。

由上述可见，三极管不仅有电流放大作用，而且还具有开关作用。

必须指出，温度对三极管特性曲线的影响很大，同时由于制造工艺的缘故，即使同一型号的三极管，特性曲线还会有较大的分散性。因此，在实际使用前，需要对每一个管子逐一地进行测试。

#### 四、三极管的主要参数

三极管特性还可以用参数来表示。根据这些参数就可以正确地选择元件，设计电路。在一般情况下运用参数比运用特性曲线方便。三极管的主要参数有：

##### 1. 电流放大系数

(1) 共发射极直流电流放大系数：在共发射极电路中，当没有信号输入即所谓静态时，在集电极电压  $U_{ce} = \text{常数}$  的条件下，集电极的直流电流  $I_c$  与基极的直流电流  $I_b$  的比值，叫作**共发射极直流电流放大系数**，用  $\beta$  表示，即

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} \Big|_{U_{ce} = \text{常数}} \quad (15-4)$$

(2) 共发射极交流电流放大系数：由于实际上三极管大都在输入交流信号，所以更重要的是用电流变化量  $\Delta I_c$  和  $\Delta I_b$  来表示三极管的电流放大能力。在  $U_{ce} = \text{常数}$  条件下， $\Delta I_c$  与  $\Delta I_b$  的比值叫作**共发射极交流电流放大系数**。用  $\beta$  表示，则

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} \Big|_{U_{ce} = \text{常数}} \quad (15-5)$$

$\beta$  与  $\beta$  具有不同的含义，其值也不完全相同，但因为它们数值相差不大，在作近似估计时，常常可以混用。

一般晶体三极管的电流放大系数在  $20 \sim 200$  之间。 $\beta$  值太小，则放大作用较弱；反之， $\beta$  值太大，则三极管的线性和稳定性都较差。

##### 2. 极间反向电流

(1) 集电极-基极反向饱和电流  $I_{cbo}$ ： $I_{cbo}$  是在发射极开路时，集电结在反向电压作用下的集电极反向电流。 $I_{cbo}$  是集电区的少子（即空穴），在集电结反向电压作用下到达基区而形成的漂移电流（如图 15-13）。

(2) 集电极-发射极反向电流  $I_{ceo}$ ： $I_{ceo}$  是基极开路时，集电极与发射极之间的电流。由于该电流从集电区穿过基区到发射区，故又称**穿透电流**（如图 15-14(a)）。

当基极开路时，电源  $E_c$  加在集电结和发射结上。发射结是正向偏置，集电结是反向偏置。集电结在反向电压作用下，有少子（空穴）漂移到基区（如图 15-14(b)）。由于基极开路，扩散到基区的电子中的一小部分与集电极漂移来的空穴复合，其值是  $I_{cbo}$ ，而大部分电子被集电极拉过去。根据三极管工作原理，被集电极拉过去的电子数

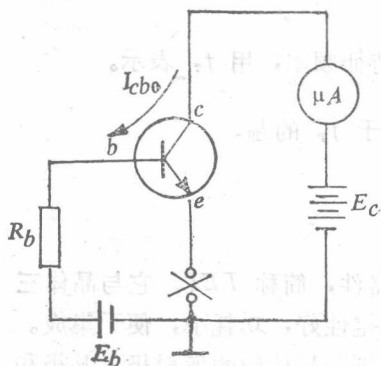


图 15-13 反向饱和电流的测量

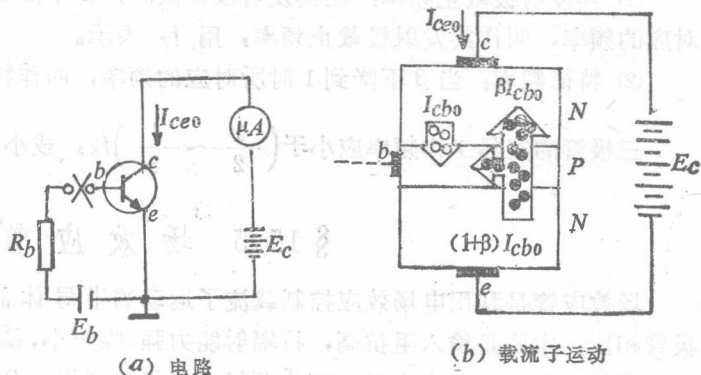


图 15-14 穿透电流的测量

量与在基区复合掉的电子数量之比为  $\beta$ ，这部分集电极电流为  $\beta I_{cbo}$ 。所以集电极与发射极之间的总电流，即穿透电流为

$$I_{cEO} = I_{cbo} + \beta I_{cbo} = (1 + \beta) I_{cbo} \approx \beta I_{cbo} \quad (15-6)$$

由于  $I_{cbo}$  和  $\beta$  受温度影响很大，因而  $I_{cEO}$  对温度更为敏感。

3. 极限参数 极限参数是三极管正常工作时不允许超过的数值。

(1) 集电极最大允许电流：当集电极电流  $I_c$  超过一定值时，三极管的  $\beta$  值要下降。一般把  $\beta$  值下降到原来的  $\frac{2}{3}$  时的集电极电流定为集电极最大允许电流，用  $I_{cM}$  表示。

(2) 反向击穿电压：常接触到以下三种反向击穿电压：

$BU_{cEO}$ ：发射极开路，集电极-基极间的反向击穿电压。

$BU_{cEO}$ ：基极开路，集电极-发射极间的反向击穿电压。

$BU_{cEO}$ ：集电极开路，发射极-基极间的反向击穿电压。

三极管工作时，加在结两端的反向电压如超过击穿电压，就可能出现很大的电流，把管子烧坏。

(3) 集电极最大耗散功率：由于集电结处于反向电压下工作，阻挡层的压降很大，所以电流通过管子产生的热量主要在集电结，它使三极管温度升高。当温度升到三极管最高允许温度时，在集电结上耗散的功率值被规定为集电极最大耗散功率，用  $P_{CM}$  表示。实际上它是加在集电极上的直流电压  $U_{ce}$  和通过集电极的电流  $I_c$  的乘积，即

$$P_{CM} = I_c U_{ce} \quad (15-7)$$

$P_{CM}$  值的大小与管子散热条件和环境温度都有关系。对大功率三极管常装有散热片，以提高  $P_{CM}$  值。锗管的最高允许温度为  $70^\circ\text{C}$ ，硅管可达  $150^\circ\text{C}$ 。

4. 频率参数 信号频率  $f$  增加到一定程度后，三极管的  $\beta$  值将随  $f$  值增加而下降

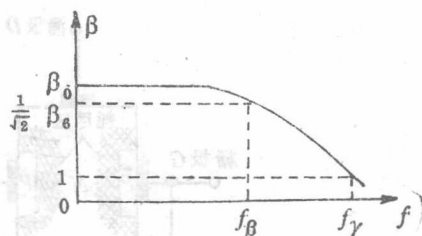


图 15-15 电流放大系数与频率间的关系

(如图 15-15)。为反映三极管高频工作性能引入频率参数。

(1) 共发射极截止频率：在共发射极接法时， $\beta$  下降到低频值  $\beta_0$  的  $1/\sqrt{2}$  倍时所对应的频率，叫作共发射极截止频率，用  $f_\beta$  表示。

(2) 特征频率：当  $\beta$  下降到 1 时所对应的频率，叫作特征频率，用  $f_T$  表示。

三极管的实际工作频率应小于  $(\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3})f_\beta$ ，或小于  $f_T$  的  $\frac{1}{10}$ 。

## § 15-5 场效应管

场效应管是利用电场效应控制载流子运动的半导体器件，简称 *FET*。它与晶体三极管相比，主要是输入阻抗高，抗辐射能力强，噪声小，稳定性好，功耗小，便于集成。

场效应管也有三个电极，叫作源极、栅极和漏极，分别与晶体管的发射极、基极和集电极相对应。

场效应管根据结构的不同，可分为两大类：结型场效应管 (*JFET*) 和绝缘栅场效应管 (*IGFET*)。它们都是靠半导体中多数载流子来实现导电的器件。下面介绍它们的结构和工作原理。

### 一、结型场效应管

图 15-16 为结型场效应管的结构示意图。在一块 *N* 型硅棒上引出两个电极，分别叫作漏极 *D* 和源极 *S*。硅棒本身成为场效应管的电流通道。当硅棒为 *N* 型材料时叫作 *N* 型沟道。硅棒的两侧各有一块 *P* 型半导体与 *N* 型硅棒形成两个 *PN* 结，它们连接在一起引出一个电极叫作栅极 *G*。结型场效应管的符号如图 15-16 (b) 所示。

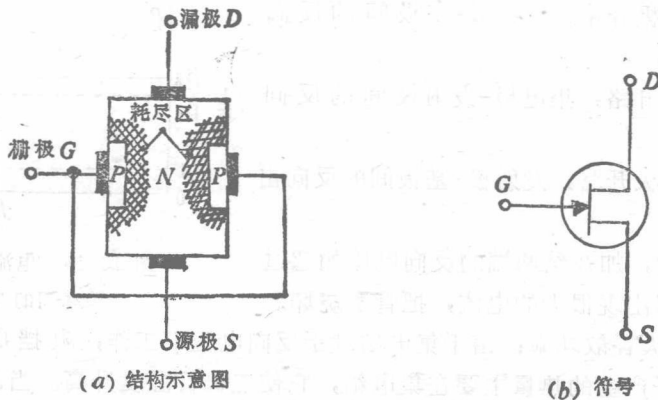


图 15-16 结型场效应管结构示意图和符号

场效应管的导电原理可用图 15-17 来说明。工作时，场效应管漏极与源极之间接电源  $E_D$ ，它的正端通过开关 *K* 和负载电阻  $R_D$  接到管子的漏极，负端接到源极。在栅极与源极之间接电源  $E_G$ ，它的负极接栅极，正极接源极，所以它们之间加的是反向电压  $U_{GS}$ 。我们知道 *PN* 结的厚度是随反向电压增大而增加的，而在 *PN* 结里的载流子(电子或空穴)很少，很难导电，所以也叫它为耗尽区。*PN* 结越厚耗尽区也越大，这时沟



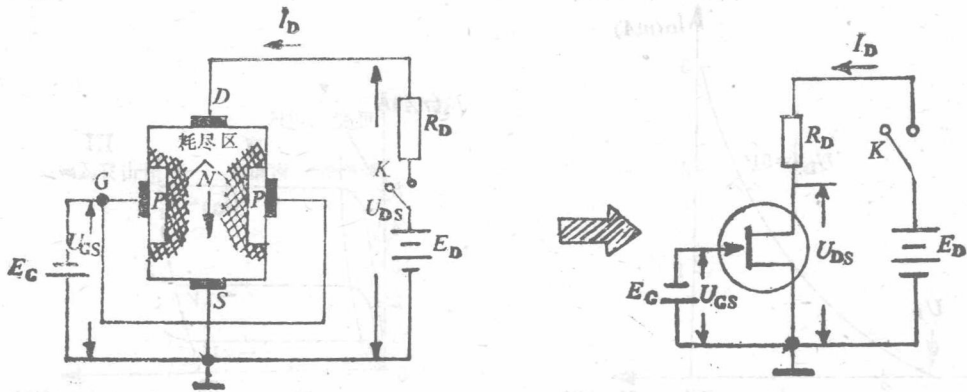


图 15-17 结型场效应管的导电原理

道就越窄。因此，沟道的宽度就受栅极与源极之间反向电压的控制。

当按下开关  $K$  时， $N$  型硅棒中的多子（自由电子）在漏源之间正向电压  $U_{DS}$  的作用下，通过两个耗尽区间的通道，形成了漏极电流  $I_D$ 。 $PN$  结之间电子的通道叫作导电沟道，这就是“ $N$ 型沟道”场效应管名称的由来。由于栅极与源极之间加反向电压，栅极与漏极之间反向电压就更大，自由电子不会由源极或漏极流向栅极，因此栅极电路中没有电流。这是场效应管与晶体三极管的一个重大区别。

由于沟道的宽度随栅源之间反向电压  $U_{GS}$  而变化，故  $I_D$  也随着发生变化。例如，当栅极电势（相对于源极）负值增大时，两个耗尽区便扩大，沟道变窄，沟道的电阻增加， $I_D$  便减小。反之，如反向电压减小， $I_D$  便增大。可以看出，这种器件是利用栅压所产生的电场来控制硅棒中的电流的，这就是“场效应管”名称的由来。

由上述可以推知，如果在栅极与源极之间接入一个信号源，那末， $I_D$  便随信号电压的变化而变化。若负载电阻  $R_D$  取得适当，便能有较大的信号电压输出，故场效应管具有放大作用。

从场效应管输入端来看，因为  $PN$  结为反向偏置，故输入电阻非常大，一般可达 100 兆欧以上，这是场效应管的特点。

同理，在  $P$  型硅棒两侧制成两个  $N$  型区域，就构成了  $P$  型沟道场效应管。

## 二、结型场效应管的特性曲线

结型场效应管的特性可用转移特性和漏极特性来表达。下面以  $N$  型沟道结型场效应管为例讨论转移特性和漏极特性。

1. 转移特性 转移特性反映结型场效应管在一定漏极电压  $U_{DS}$  下，栅极电压  $U_{GS}$  与漏极电流  $I_D$  之间的关系如图 15-18 所示，它表示  $U_{GS}$  对  $I_D$  的控制能力。这种关系叫作转移特性。

从图 15-18 可见， $I_D$  随栅极负电压的增大而减小。图中，当  $U_{GS} = 0$  时的电流叫作饱和漏电流， $U_{GS} = U_P$  时， $I_D = 0$ 。 $U_P$  叫作夹断电压，也叫作栅极截止电压。这时管内两个耗尽区完全靠拢，使漏极电流趋于零。

2. 漏极特性 漏极特性即输出特性，表示在一定栅压  $U_{GS}$  下，漏极电压  $U_{DS}$  与