

第一章

半导体器件

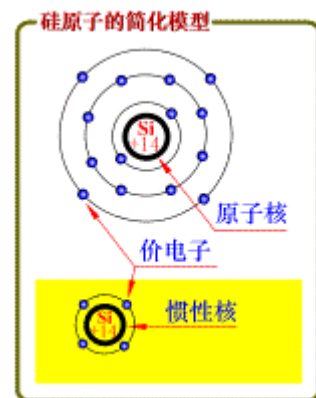
§ 1、1 半导体的基础知识

自然界的各种物质就其导电性能来说，可以分为导体、绝缘体和半导体三大类。所谓半导体，顾名思义，就是它的导电能力介乎导体和绝缘体之间。

1.1.1. 本征半导体

纯净晶体结构的半导体我们称之为**本征半导体**。常用的半导体材料有：硅和锗。它们都是四价元素，原子结构的最外层轨道上有四个价电子，当把硅或锗制成晶体时，它们是靠**共价键**的作用而紧密联系在一起。

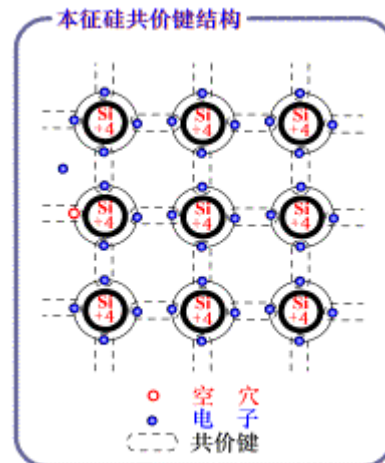
共价键中的一些价电子由于热运动获得一些能量，从而摆脱共价键的约束成为自由电子，同时在共价键上留下空位，我们称这些空位为**空穴**，它带正电。在外电场作用下，自由电子产生定向移动，形成电子电流；



一般来说，共价键中的价电子不完全象绝缘体中价电子所受束缚那样强，如果能从外界获得一定的能量（如光照、升温、电磁场激发等），一些价电子就可能挣脱共价键的束缚而成为自由电子，将这种物理现象称作为**本征激发**。

本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现，同时又不间断复合，在一定温度下达到动态平衡，载流子便维持一定数目。温度愈高，载流子数目愈多，导电性能也就愈好。所以，温度对半导体器件性能的影响很大。

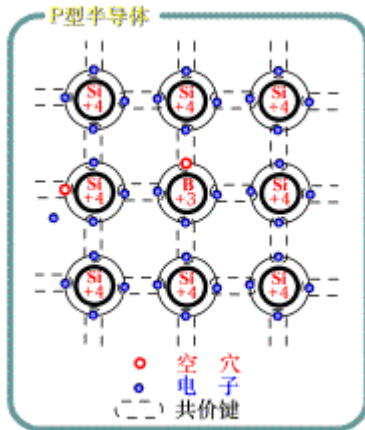
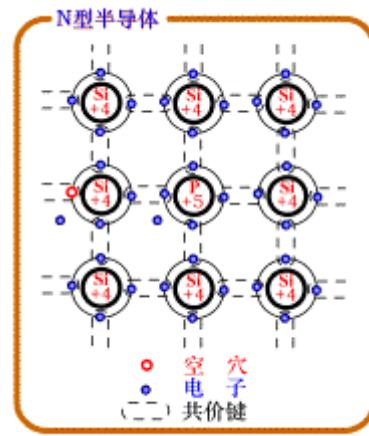
动画演示 [两种载流子](#)



1.1.2. 掺杂半导体

相对而言，本征半导体中载流子数目极少，导电能力仍然很低。但如果其中掺入微量的杂质，所形成的杂质半导体的导电性能将大大增强。由于掺入的杂质不同，杂质半导体可以分为**N型**和**P型**两大类。

N型半导体中掺入的杂质为磷或其他五价元素，磷原子在取代原晶体结构中的原子并构成共价键时，多余的第五个价电子很容易摆脱磷原子核的束缚而成为自由电子，于是半导体中的自由电子数目大量增加，自由电子成为多数载流子，空穴则成为少数载流子。



P型半导体中掺入的杂质为硼或其他三价元素，硼原子在取代原晶体结构中的原子并构成共价键时，将因缺少一个价电子而形成空穴，于是半导体中的空穴数目大量增加，空穴成为多数载流子，而自由电子则成为少数载流子。

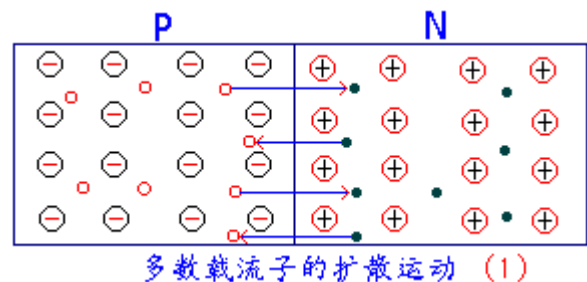
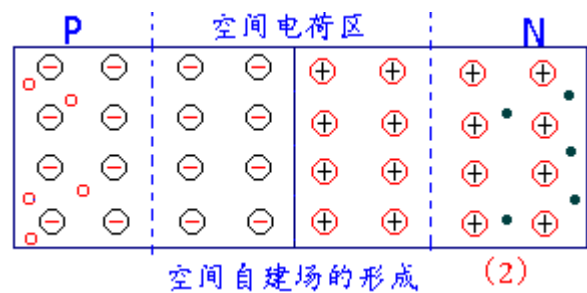
§ 1、2 PN 结

1. 2. 1 异形半导体接触现象

在形成的 P—N 结中，由于两侧的电子和空穴的浓度相差很大，因此它们会产生扩散运动：电子从 N 区向 P 区扩散；空穴从 P 区向 N 区扩散。因为它们都是带电粒子，它们向另一侧扩散的同时在 N 区留下了带正电的空穴，在 P 区留下了带负电的杂质离子，这样就形成了空间电荷区，也就是形成了**电场**(自建场)。

它们的形成过程如图 (1)，(2) 所示

在电场的作用下，载流子将作漂移运动，它的运动方向与扩散运动的方向相反，阻止扩散运动。电场的强弱与扩散的程度有关，扩散的越多，电场越强，同时对扩散运动的阻力也越大，当扩散运动与漂移运动相等时，通过界面的载流子为 0。此时，PN 结的交界区就形成一个缺少载流子的高阻区，我们又把它称为**阻挡层**或**耗尽层**。



1. 2. 2 PN 结的单向导电性

1. PN 结外加正向电压

PN 结外加正向电压的接法是 P 区接电源的正极，N 区接电源的负极。这时外加电压形成电场的方向与自建场的方向相反，从而使阻挡层变窄，扩散作用大于漂移作用，多数载流子向对方区域扩散形成正向电流，方向是从 P 区指向 N 区。如图 (1) 所示

这时的 PN 结处于导通状态，它所呈现的电阻为正向电阻，正向电压越大，

电流也越大。它的关系是指数关系： $I_D = I_S e^{\frac{U}{U_T}}$

其中： I_D 为流过 PN 结的电流， U 为 PN 结两端的电压，

$U_T = kT/q$ 称为温度电压当量，其中， k 为波尔兹曼常数， T 为绝对温度， q 为电子电量，在室温下 (300K) 时 $U_T = 26\text{mV}$ ， I_S 为反向饱和电流。

2. PN 结外加反向电压

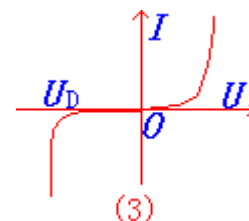
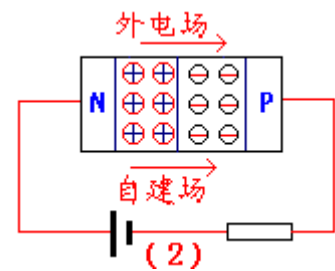
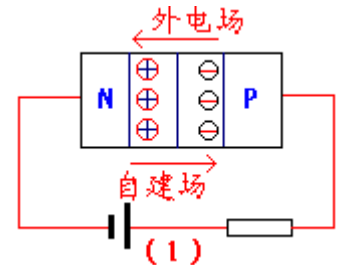
它的接法与正向相反，即 P 区接电源的负极，N 区接电源的正极。此时的外加电压形成电场的方向与自建场的方向相同，从而使阻挡层变宽，漂移作用大于扩散作用，少数载流子在电场的作用下，形成漂移电流，它的方向与正向电压的方向相反，所以又称为反向电流。

因反向电流是少数载流子形成，故反向电流很小，即使反向电压再增加，少数载流子也不会增加，反向电压也不会增加，因此它又被称为反向饱和电流。即： $I_D = -I_S$

此时，PN 结处于截止状态，呈现的电阻为反向电阻，而且阻值很高。

由以上我们可以看出：PN 结在正向电压作用下，处于导通状态，在反向电压的作用下，处于截止状态，因此 PN 结具有单向导电性。它的电

流和电压的关系通式为： $I_D = I_S (e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$



它被称为伏安特性方程，如图 (3) 所示为伏安特性曲线。

3. PN 结的击穿

PN 结处于反向偏置时，在一定的电压范围内，流过 PN 结的电流很小，但电压超过某一数值时，反向电流急剧增加，这种现象我们就称为反向击穿。

击穿形式分为两种：雪崩击穿和齐纳击穿。

对于硅材料的 PN 结来说，击穿电压 $> 7\text{V}$ 时为雪崩击穿， $< 4\text{V}$ 时为齐纳击穿。在 4V 与 7V 之间，两种击穿都有。由于击穿破坏了 PN 结的单向导电性，因此一般使用时要避免。

需要指出的是，发生击穿并不意味着 PN 结烧坏。

4. PN 结的电容效应

由于电压的变化将引起电荷的变化，从而出现电容效应，PN 结内部有电荷的变化，因此它具有电容效应，它的电容效应有两种：势垒电容和扩散电容。

●势垒电容是由阻挡层内的空间电荷引起的。

●扩散电容是 PN 结在正向电压的作用下，多数载流子在扩散过程中引起电荷的积累而产生的。

PN 结正偏时，扩散电容起主要作用，PN 结反偏时，势垒电容起主要作用。


5. 半导体二极管

(1) 二极管的结构和分类

半导体二极管是由 PN 结加上引线 and 管壳构成的。它的类型很多。

按制造材料分：硅二极管和锗二极管。

■按管子的结构来分有：点接触型二极管和面接触型二极管。

二极管的逻辑逻辑符号为：**阳极**  **阴极**

(2) 二极管的特性

正向特性

当正向电压低于某一数值时，正向电流很小，只有当正向电压高于某一值时，二极管才有明显的正向电流，这个电压被称为导通电压，我们又称它为门限电压或死区电压，一般用 U_{on} 表示，在室温下，硅管的 U_{on} 约为 0.6—0.8V，锗管的 U_{on} 约为 0.1—0.3V，我们一般认为当正向电压大于 U_{on} 时，二极管才导通。否则截止。

反向特性

二极管的反向电压一定时，反向电流很小，而且变化不大（反向饱和电流），但反向电压大于某一数值时，反向电流急剧变大，产生击穿。

温度特性

二极管对温度很敏感，在室温附近，温度每升高 1 度，正向压将减小 2—2.5mV，温度每升高 10 度，反向电流约增加一倍。

(3) 二极管的主要参数

我们描述器件特性的物理量，称为器件的特性。二极管的特性有：

最大整流电流 I_F 它是二极管允许通过的最大正向平均电流。

最大整流电流 I_F 它是二极管允许通过的最大正向平均电流

最大反向工作电压 U_R 它是二极管允许的最大工作电压，我们一般取击穿电压的一般作 U_R

反向电流 I_R 二极管未击穿时的电流，它越小，二极管的单向导电性越好。

最高工作频率 f_M 它的值取决于PN结电容的大小，电容越大，频率约高。

二极管的直流电阻 R_D 加在管子两端的直流电压与直流电流之比，我们就称为直流电阻，它可表示为： $R_D=U_f/I_f$ 它是非线性的，正反向阻值相差越大，二极管的性能越好。

二极管的交流电阻 r_a 在二极管工作点附近电压的微变化与相应的微变化电流值之比，就称为该点的交流电阻。

(4) 稳压二极管

稳压二极管是一种特殊的面接触型二极管，其特性和普通二极管类似，但它的反向击穿是可逆的，不会发生“热击穿”，而且其反向击穿后的特性曲线比较陡直，即反向电压基本不随反向电流变化而变化，这就是稳压二极管的稳压特性。稳压二极管的主要参数为**稳压值 U_Z** 和**最大稳定电流 I_{ZM}** ，稳压值 U_Z 一般取反向击穿电压。稳压二极管使用时一般需串联限流电阻，以确保工作电流不超过最大稳定电流 I_{ZM} 。

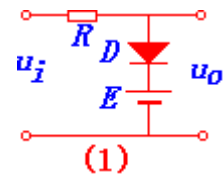
(5) 二极管的应用

二极管的运用，主要是利用它的单向导电性。它导通时，我们可用短线来代替它，它截止时，我们可认为它断路。因此，在应用电路中，关键是判断二极管的导通或截止。

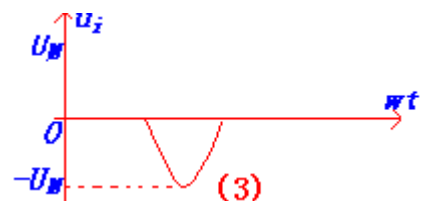
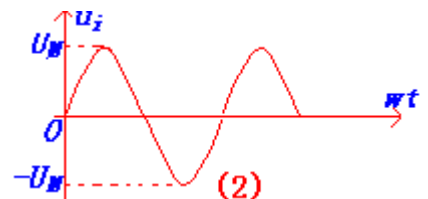
a. 限幅电路

当输入信号电压在一定范围内变化时，输出电压也随着输入电压相应的变化；当输入电压高于某一个数值时，输出电压保持不变，这就是限幅电路。我们把开始不变的电压称为限幅电平。它分为上限幅和下限幅。

限幅电路如图（1）所示。改变E值就可以改变限幅电平。如输入电压波形图如图（2）。

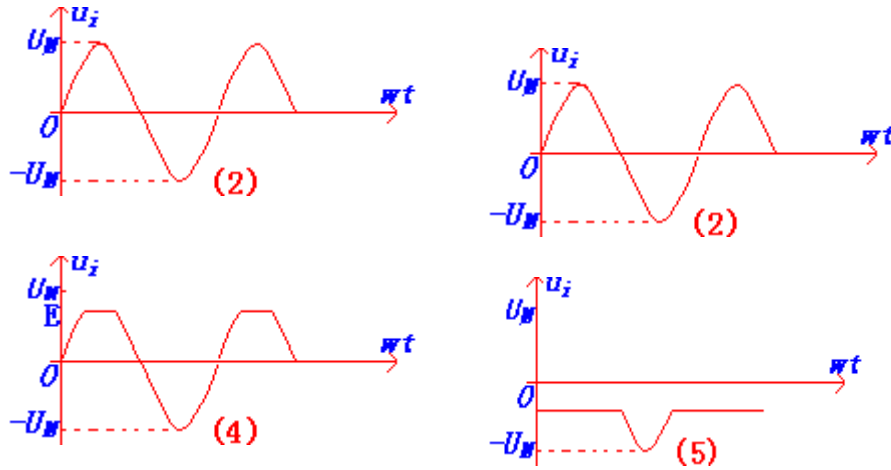


当 $E=0$ 时限幅电平为 $0V$ 。 $u_i>0$ 时二极管导通， $u_o=0$ ， $u_i<0$ 时，二极管截止， $u_o=u_i$ ，它的波形图为：如图（3）所示



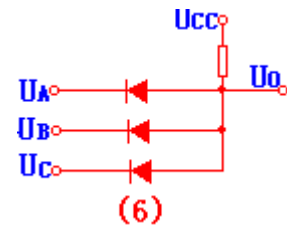
当 $0 < E < U_M$ 时, 限幅电平为 $+E$ 。 $u_i < +E$ 时, 二极管截止, $u_o = u_i$; $u_i > +E$ 时, 二极管导通, $u_o = E$, 它的波形图为: 如图(4)所示

当 $-U_M < E < 0$ 时, 限幅电平为负数, 它的波形图为: 如图(5)所示



b. 二极管门电路

二极管组成的门电路, 可实现逻辑运算。如图(6)所示的电路, 只要有一条电路输入为低电平时, 输出即为低电平, 仅当全部输入为高电平时, 输出才为高电平。实现逻辑“与”运算。



c. 其他二极管

发光二极管

发光二极管简称 LED, 它是一种将电能转换为光能的半导体器件, 主要是由 M-V 族化合物半导体如砷化镓 (GaAs), 磷化镓 (GaP) 制成。

光电二极管

光电二极管是将光能转换成电能的半导体器件。

光电耦合器件

光电耦合器件是由光电二极管和发光二极管组合起来的。

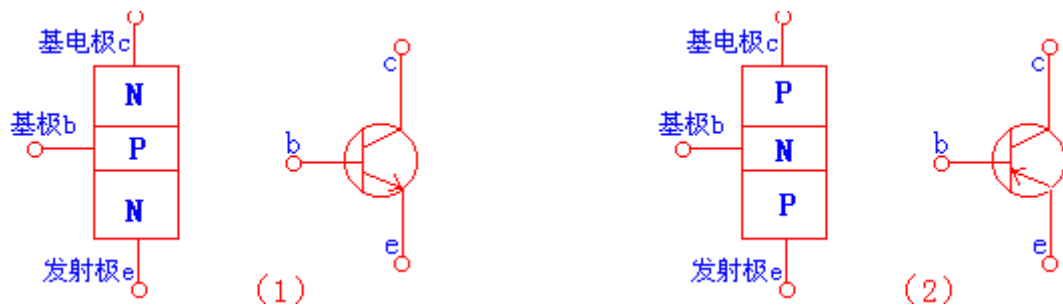
变容二极管

变容二极管是利用 PN 结的势垒电容随外加反向电压的变化特性制成的。

§ 1、3 半导体三极管

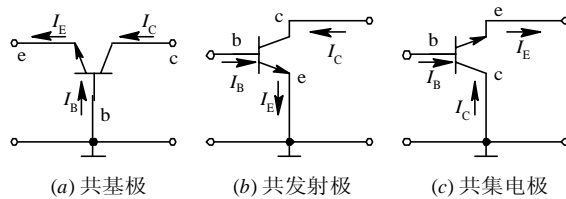
1.3.1 三极管的结构和分类

通俗来讲，三极管内部为由 P 型半导体和 N 型半导体组成的三层结构，根据分层次序分为 NPN 型和 PNP 型两大类。



不管是什么样的三极管，它们均包含三个区：发射区，基区，集电区，同时相应的引出三个电极：发射极，基极，集电极。同时又在两两交界区形成 PN 结，分别是发射结和基点结。

三极管的三种连接方式



1.3.2 三极管的放大作用

把两个二极管背靠背的连在一起，是没有放大作用的，要想使它具有放大作用，必须满足以下条件：1. 发射区中进行重掺杂；2. 基区做得很薄；3. 集电极面积大。

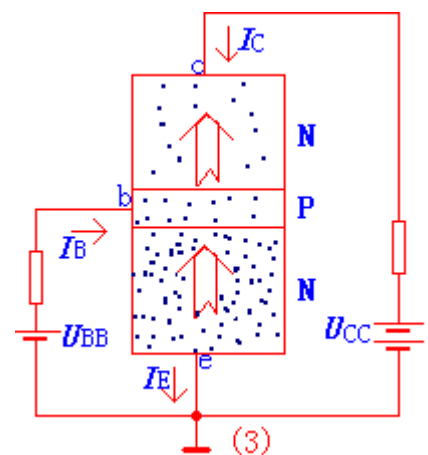
1. 载流子的传输过程

因为发射结正向偏置，且发射区进行重掺杂，所以发射区的多数载流子扩散注入至基区，又由于集电结的反向作用，故注入至基区的载流子在基区形成浓度差，因此这些载流子从基区扩散至集电结，被电场拉至集电区形成集电极电流。而留在基区的很少。

因为基区做的很薄。

此外，因为集电结反向偏置，所以集电区中的空穴和基区中的电子（均为少数载流子）在结电场作用下做漂移运动。

上述载流子的传输过程如图（3）所示。



2. 电流的分配关系

由于载流子的运动，从而产生相应电流，它们的关系如下：

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

$$I_E = \beta I_B + I_{CBO}$$

$$I_{CBO} = (1 - \beta) I_{CBO}$$

其中： I_{CBO} 为发射结少数载流子形成的反向饱和电流； I_{CBO} 为 $I_B=0$ 时，集电极和发射极之间的穿透电流。 α 为共基极电流的放大系数， β 为共发射极电流的放大系数。它们可定义为：

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

放大系数有两种（直流和交流），但我们一般认为，它们二者是相等的，不区分它们。

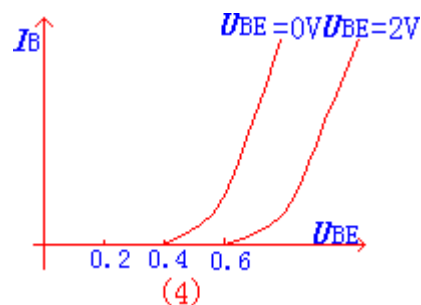
3. 三极管的特性曲线

以NPN管共发射极为例

(1). 输入特性

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

它与PN结的正向特性相似，三极管的两个PN结相互影响，因此，输出电压 U_{CE} 对输入特性有影响，且 $U_{CE} > 1$ 时这两个PN结的输入特性基本重合。我们用 $U_{CE}=0$ 和 $U_{CE} > 1$ ，两条曲线表示，如图（4）所示



(2). 输出特性

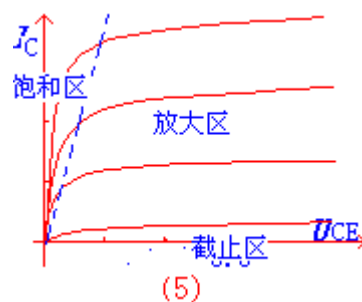
$$I_C = f(U_{CE}) |_{I_B = \text{常数}}$$

它的输出特性可分为三个区：

（如图（5）的特性曲线）

(1) 截止区： $I_B < 0$ 时，此时的集电极电流近似为零，管子的集电极电压等于电源电压，两个结均反偏

(2) 饱和区：此时两个结均处于正向偏置， $U_{CE} = 0.3V$



(3)放大区:此时 $I_c=βI_b$, I_c 基本不随 U_{ce} 变化而变化, 此时发射结正偏, 集电结反偏。

4. 三极管主要参数

(1). 放大系数

它主要是表征管子放大能力。它有共基极的放大系数和共发射极的放大系数。它们二者的关系是:

$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta} \qquad \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

(2). 极间的反向电流

(a) 集电极基极间反向饱和电流 I_{CBO}

发射极开路时, 在其集电结上加反向电压, 得到反向电流。它实际上就是一个PN结的反向电流。其大小与温度有关。

锗管: I_{CBO} 为 $\mu A(10^{-6})$ 数量级,

硅管: I_{CBO} 为 $nA(10^{-9})$ 数量级。

(b) 集电极发射极间的穿透电流 I_{CEO}

基极开路时, 集电极到发射极间的电流——穿透电流。

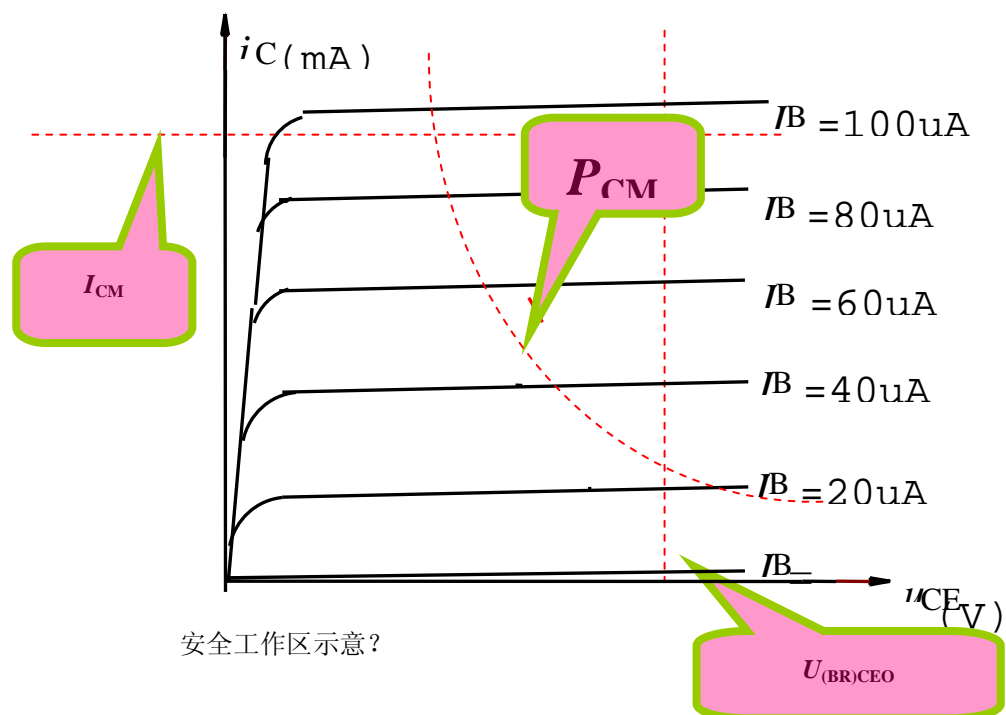
其大小与温度有关。 I_{CEO} 与 I_{CBO} 关系为: $I_{CEO} = (1+\beta)I_{CBO}$

(3). 极限参数

(a) 集电极最大允许电流 I_{CM}

I_c 增加时, β 要下降。当 β 值下降到线性放大区 β 值的 70% 时, 所对应的集电极电流称为集电极最大允许电流 I_{CM} 。

(b) 集电极最大允许功率损耗 P_{CM}



安全工作区示意?

集电极电流通过集电结时所产生的功耗，

$$P_C = I_{CQ} U_{CEQ}$$

(c) 基极开路时，集电极与发射极之间允许的最大反向电压 $U_{(BR)CEO}$ 。

(4). 参数与温度的关系

由于半导体的载流子受温度影响，因此三极管的参数受温度影响，温度上升，输入特性曲线向左移，基极的电流不变，基极与发射极之间的电压降低。输出特性曲线上移。

温度升高，放大系数也增加。