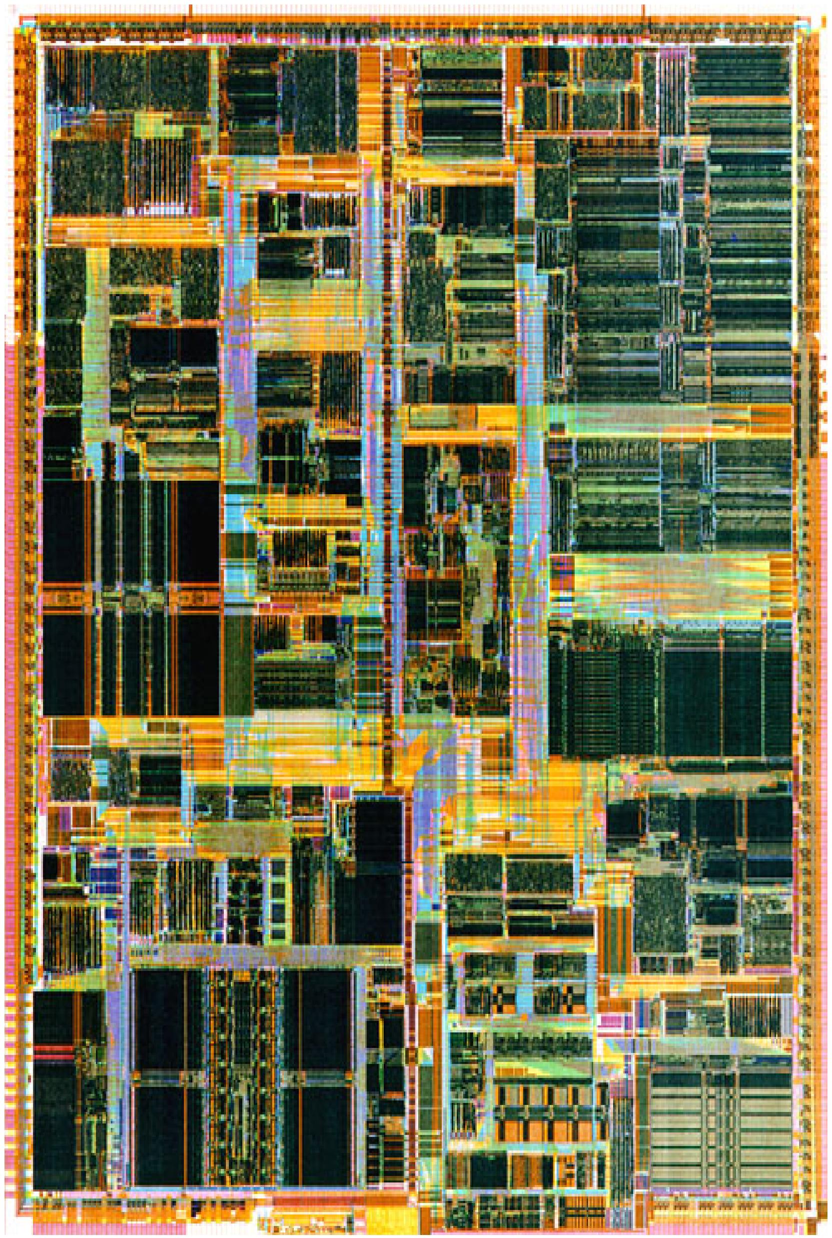


半导体
集成电路

学校：西安理工大学

院系：自动化学院电子工程系

专业：电子、微电

时间：秋季学期

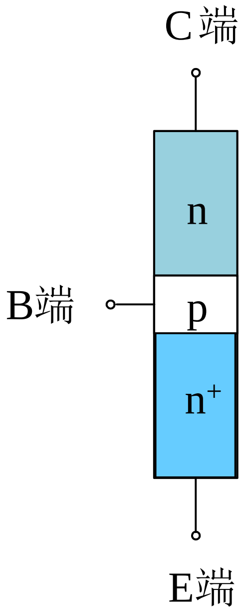
上节课内容要点

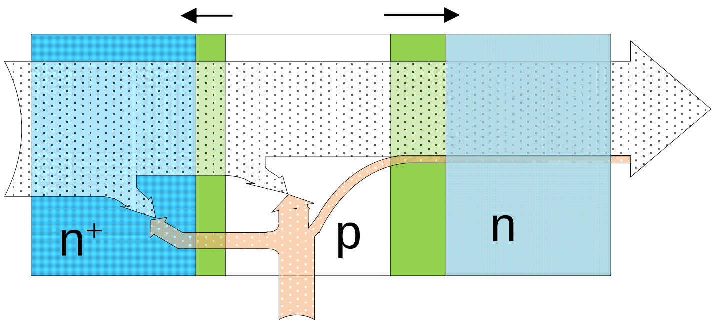
1. 双极型晶体管的单管结构和工作原理

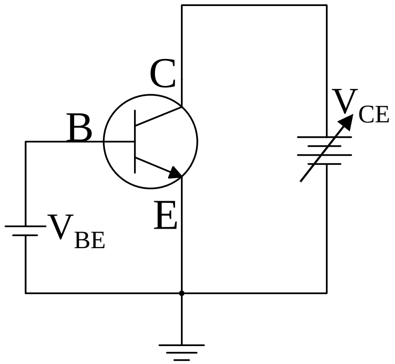
2. 双极集成晶体管的结构与制造工艺

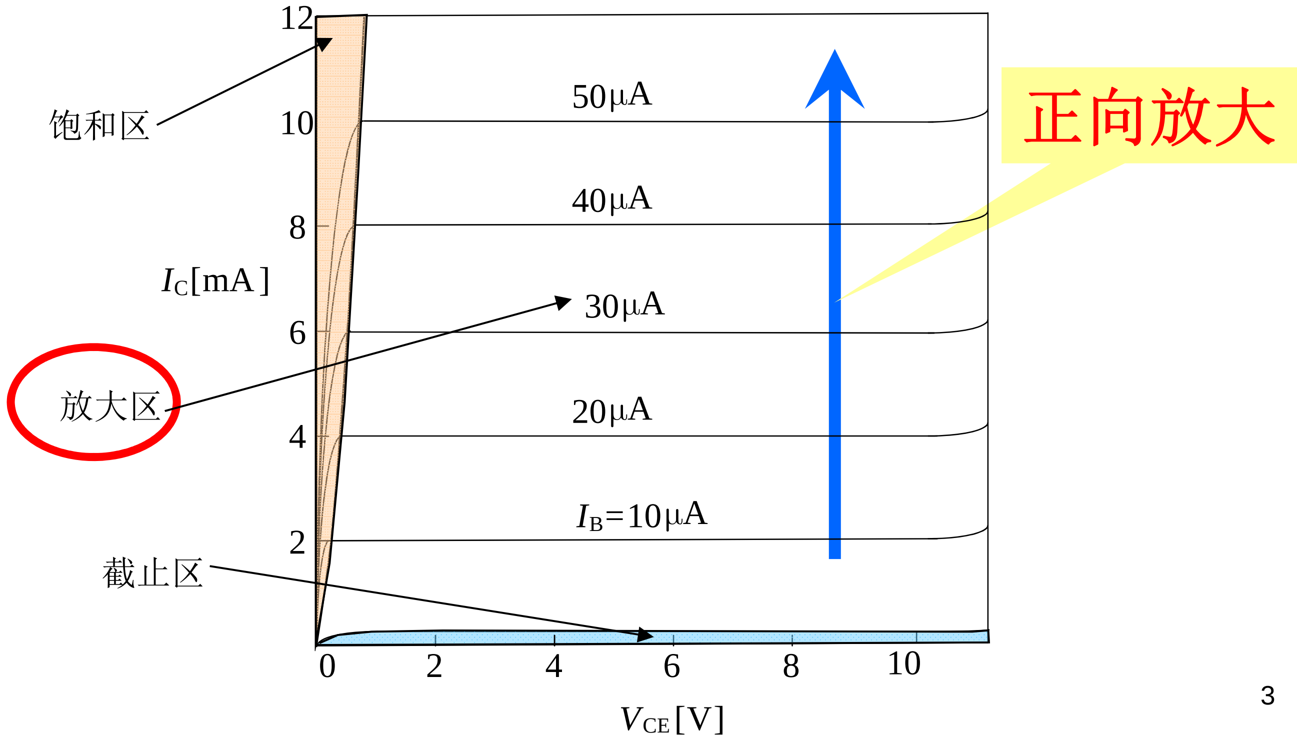
◆单管结构和工作原理

当$V_{BE}>V_t, V_{CE}-V_{BE}>0$ (发射结正偏、集电结反偏）



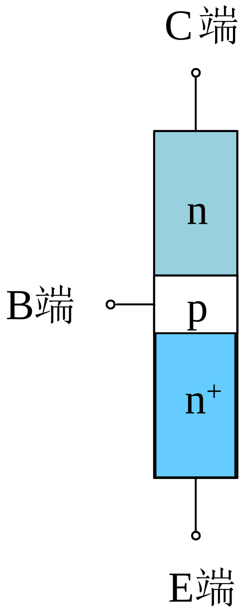


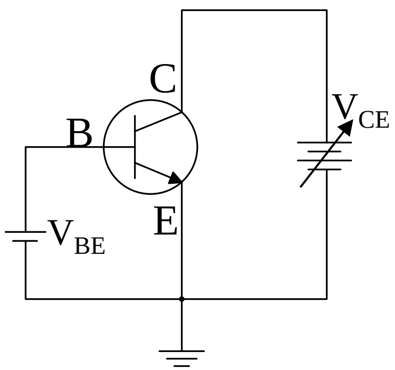


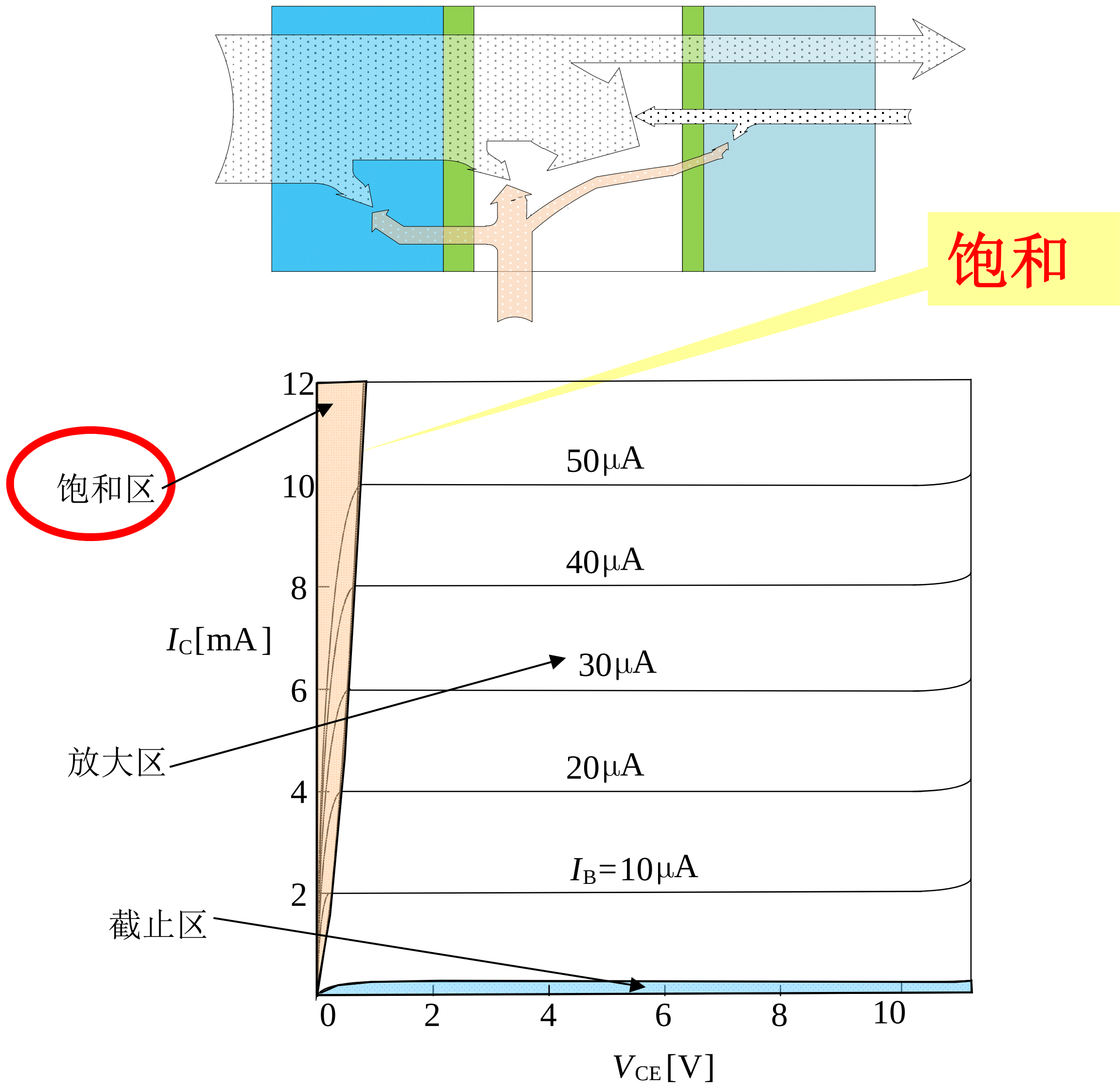


◆单管结构和工作原理

当$V_{BE}>V_t$, $V_{CE}-V_{BE}<0$ (发射结正偏、集电结正偏)

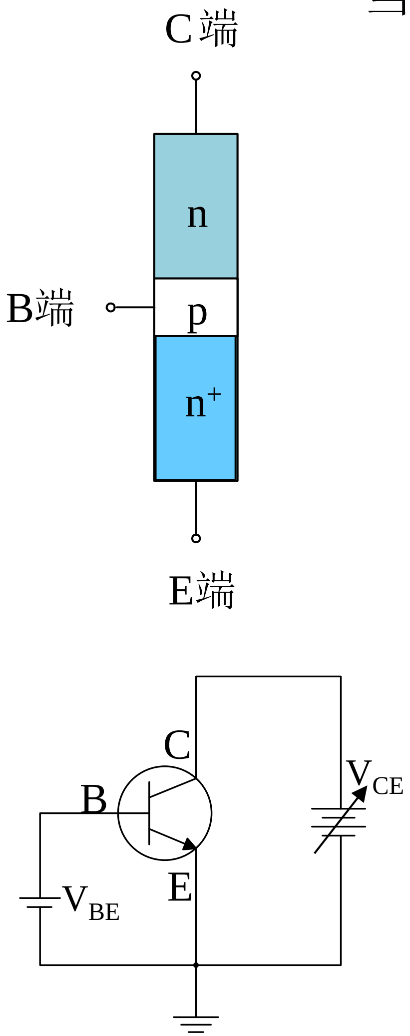


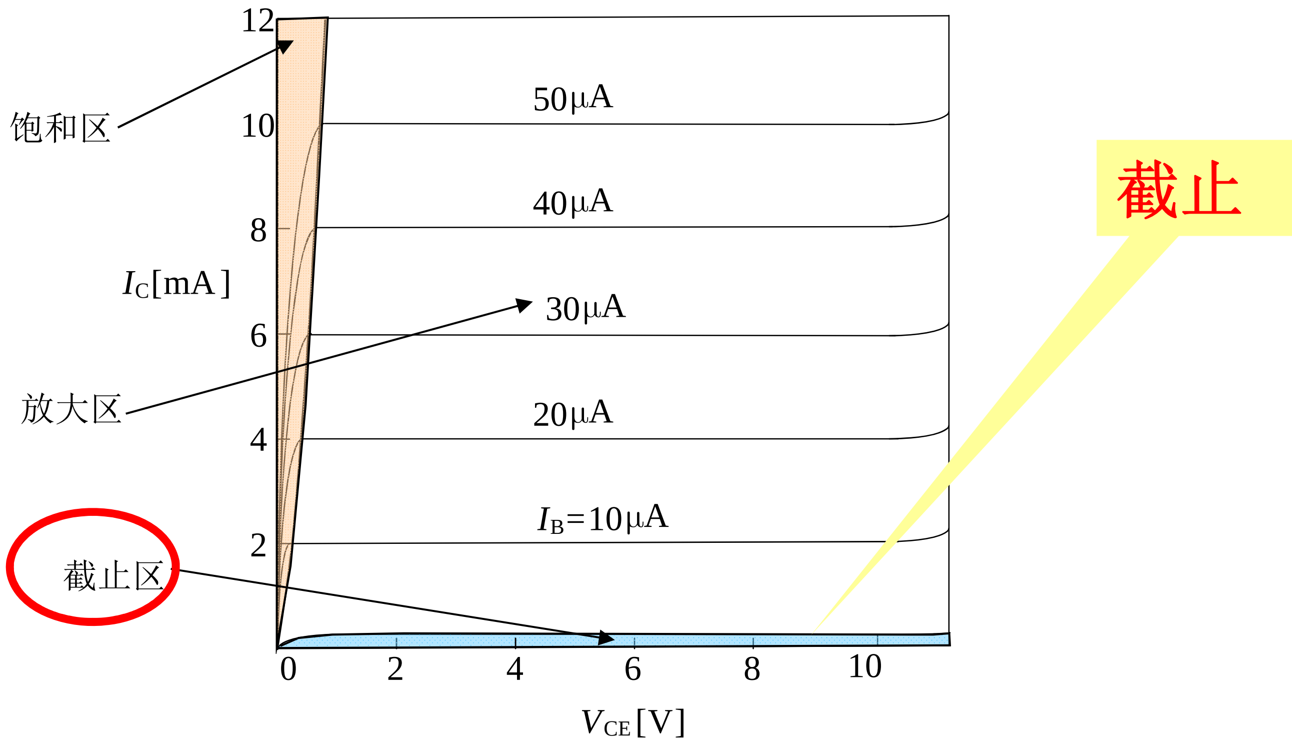




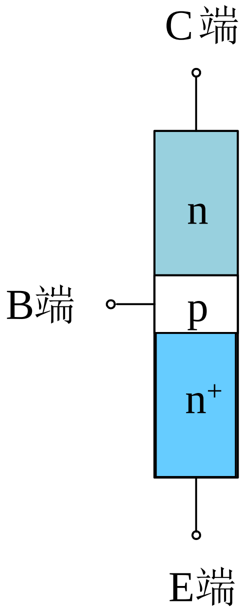
◆单管结构和工作原理

当$V_{BE}<V_t$,$V_{CE}-V_{BE}>0$ (发射结反偏、集电结反偏)





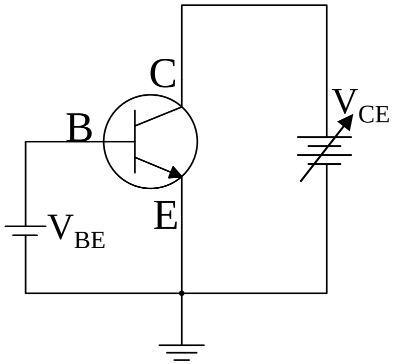
◆单管结构和工作原理



当$V_{BE}<V_t$,$V_{CE}-V_{BE}<0$ (发射结反偏、集电结正偏）

反向工作区

?



◆单管结构和工作原理(基本要求)

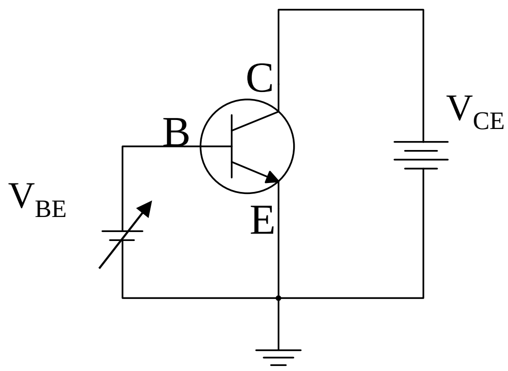
当$V_{BE}>V_t, V_{CE}-V_{BE}>0$ (发射结正偏、集电结反偏）

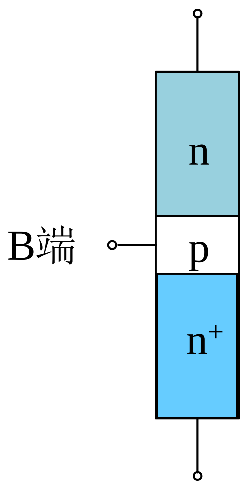
当$V_{BE}>V_t, V_{CE}-V_{BE}>0$ (发射结正偏、集电结正偏）

当$V_{BE}<V_t, V_{CE}-V_{BE}<0$ (发射结反偏、集电结反偏）

当$V_{BE}<V_t, V_{CE}-V_{BE}<0$ (发射结反偏、集电结正偏）

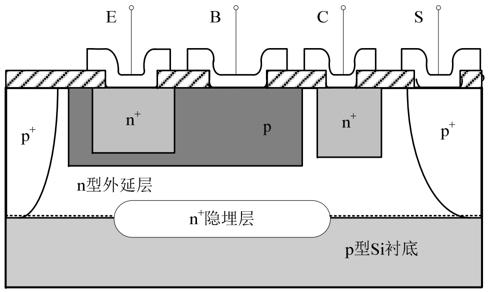
→ 对应的工作状态

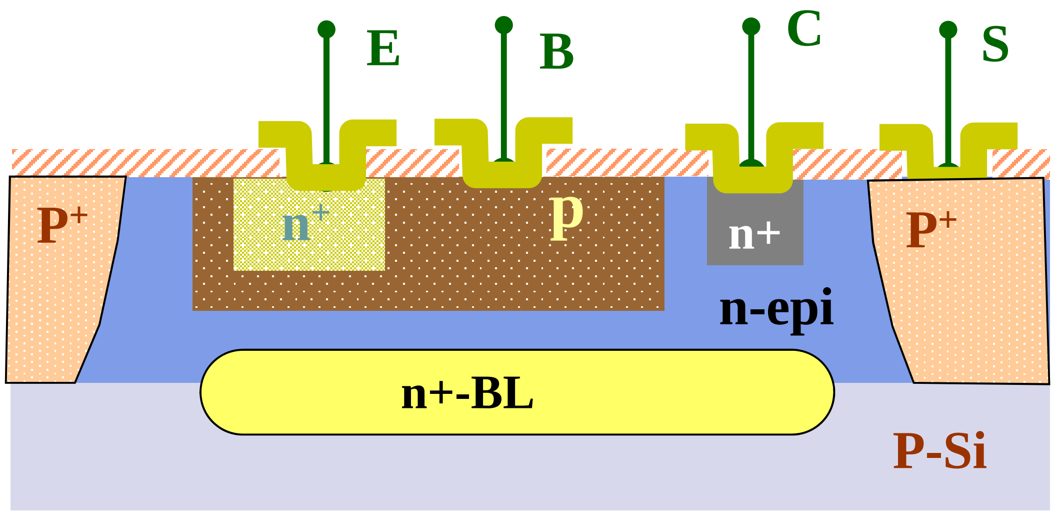


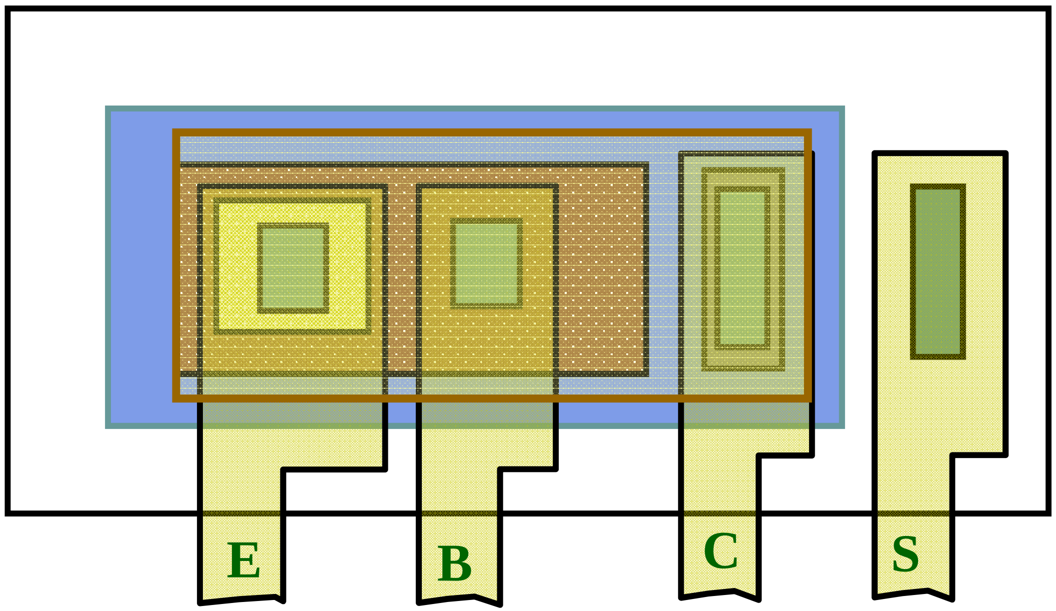


➢思考：反向工作区的电流传输图

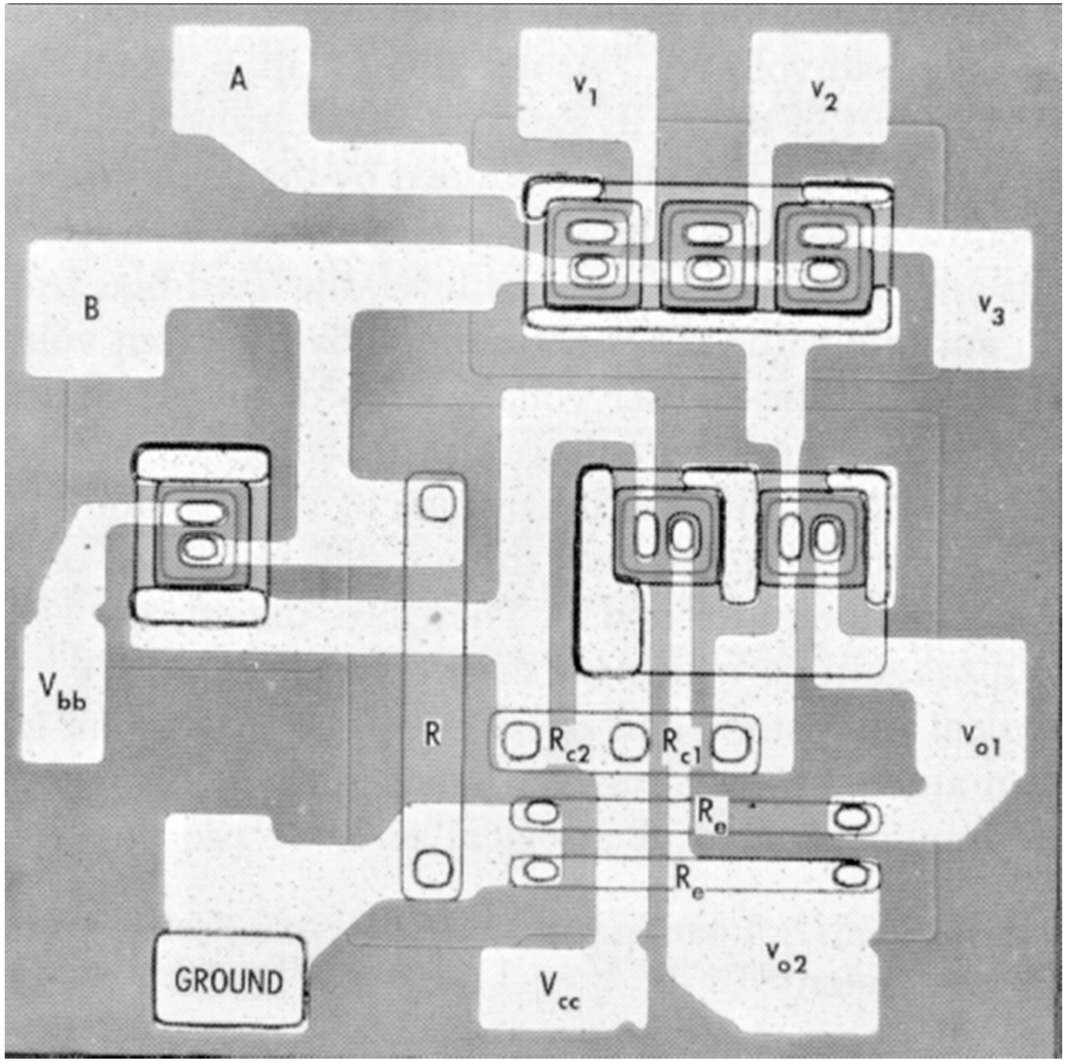
◆双极集成晶体管的结构与制造工艺(基本要求）



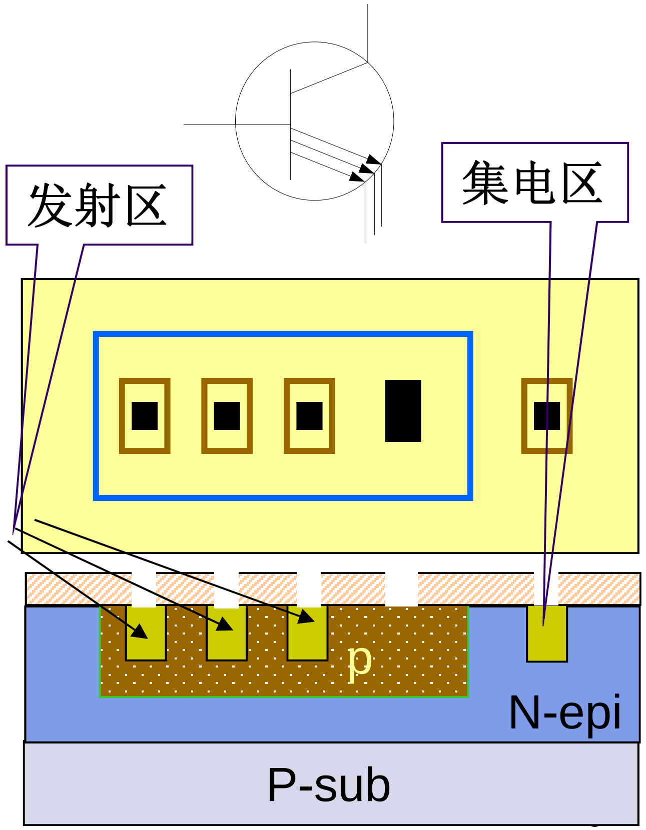




➢思考：看到平面版图画出电路图和结构图



?



本节课内容

2.2 理想本征双极晶体管的埃伯斯-莫尔**(EM)**模型

2.2.1 一结两层二极管的**EM**模型

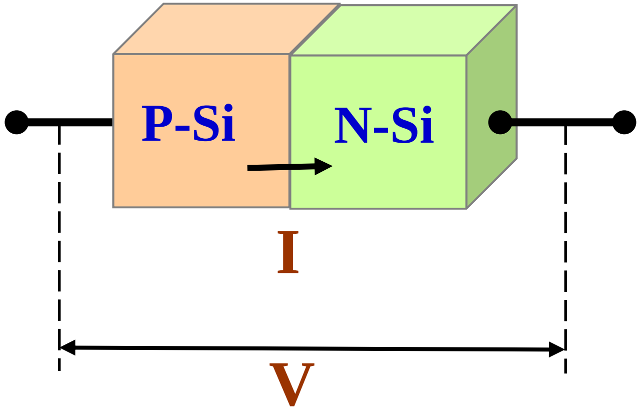
2.2.2 两结三层三极管的**EM**模型

2.2.3 三结四层三极管的**EM**模型

2.3 集成双极晶体管的有源寄生

2.2 理想本征集成双极晶体管的EM模型

2.2.1 一结两层二极管(单结晶体管)

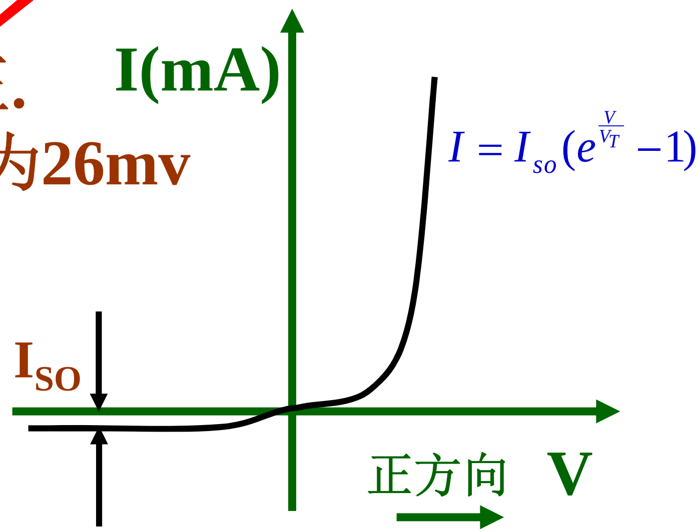


$$I = I_{s0}(e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$$

$$I_{S0} = Aq(\frac{D_n n_{P0}}{L_n} + \frac{D_P P_{n0}}{L_P})$$

热电压.

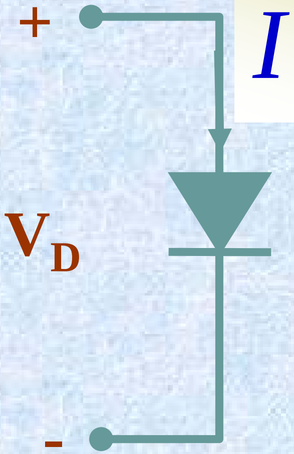
T=300K,约为26mv



A:结面积, D:扩散系数,L:扩散长度,

p_{n0},n_{p0}:平衡少子寿命

二极管的等效电路模型



$$I = I_{so}(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1)$$

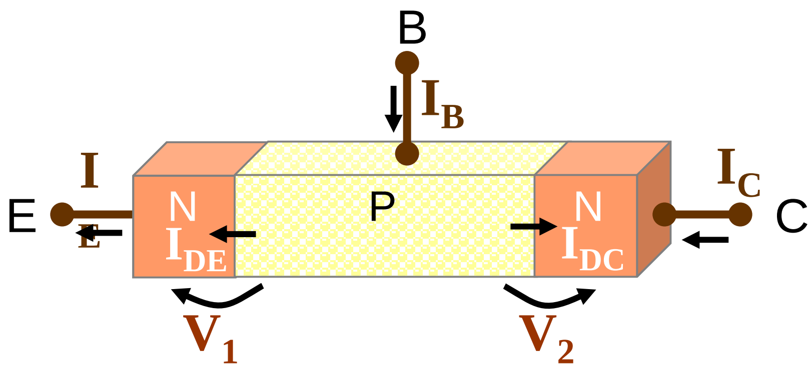
正向偏置

反向偏置

$$I_{SO} = q(\frac{D_n}{L_n} n_{p0} + \frac{D_p}{L_p} p_{n0})$$

2.2.2 两结三层三极管(双结晶体管)

假设p区很宽，忽略两个PN结的相互作用，则：



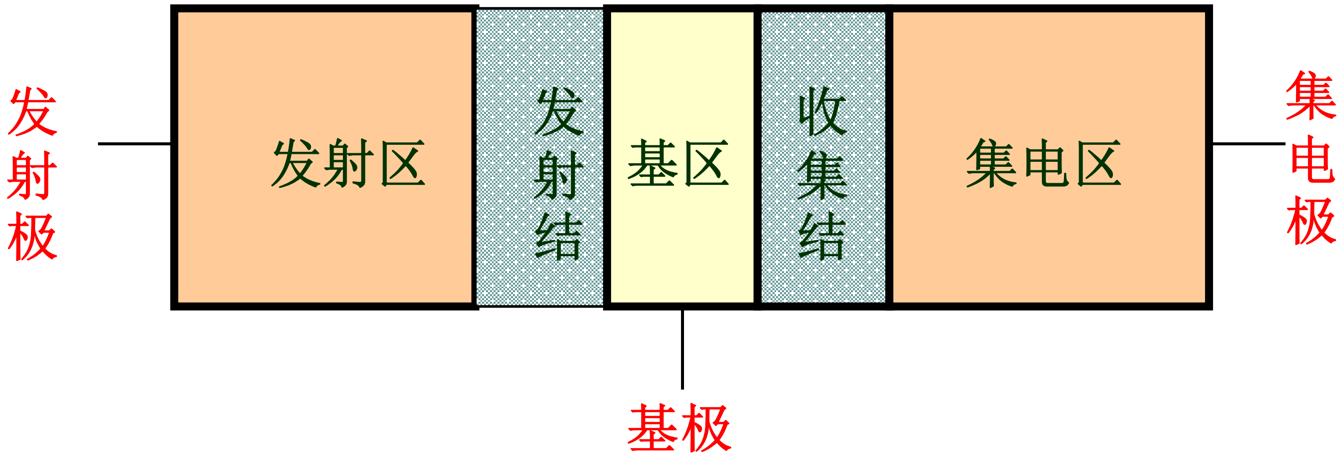
$$I_{DE} = I_{ES}(e^{\frac{V_1}{V_T}} - 1)$$

$$I_{DC} = I_{CS}(e^{\frac{V_2}{V_T}} - 1)$$

理想本征集成双极晶体管的EM模型

实际双极晶体管的结构

由两个相距很近的PN结组成：

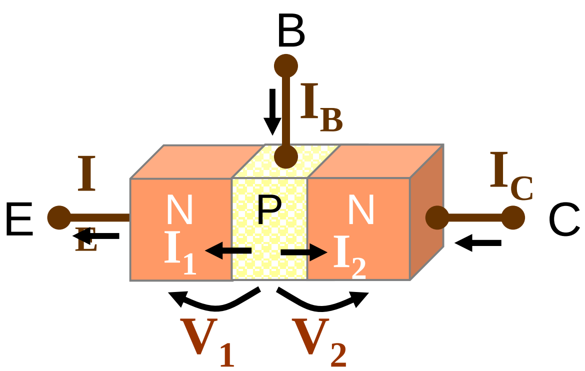


基区宽度远远小于少子扩散长度，相邻PN结之间存在着相互作用

两结三层三极管(双结晶体管)

$$I_1 = I_{ES}(e^{\frac{V_1}{V_T}} - 1) + aI_{CS}(e^{\frac{V_2}{V_T}} - 1)$$

$$I_2 = bI_{ES}(e^{\frac{V_1}{V_T}} - 1) + I_{CS}(e^{\frac{V_2}{V_T}} - 1)$$



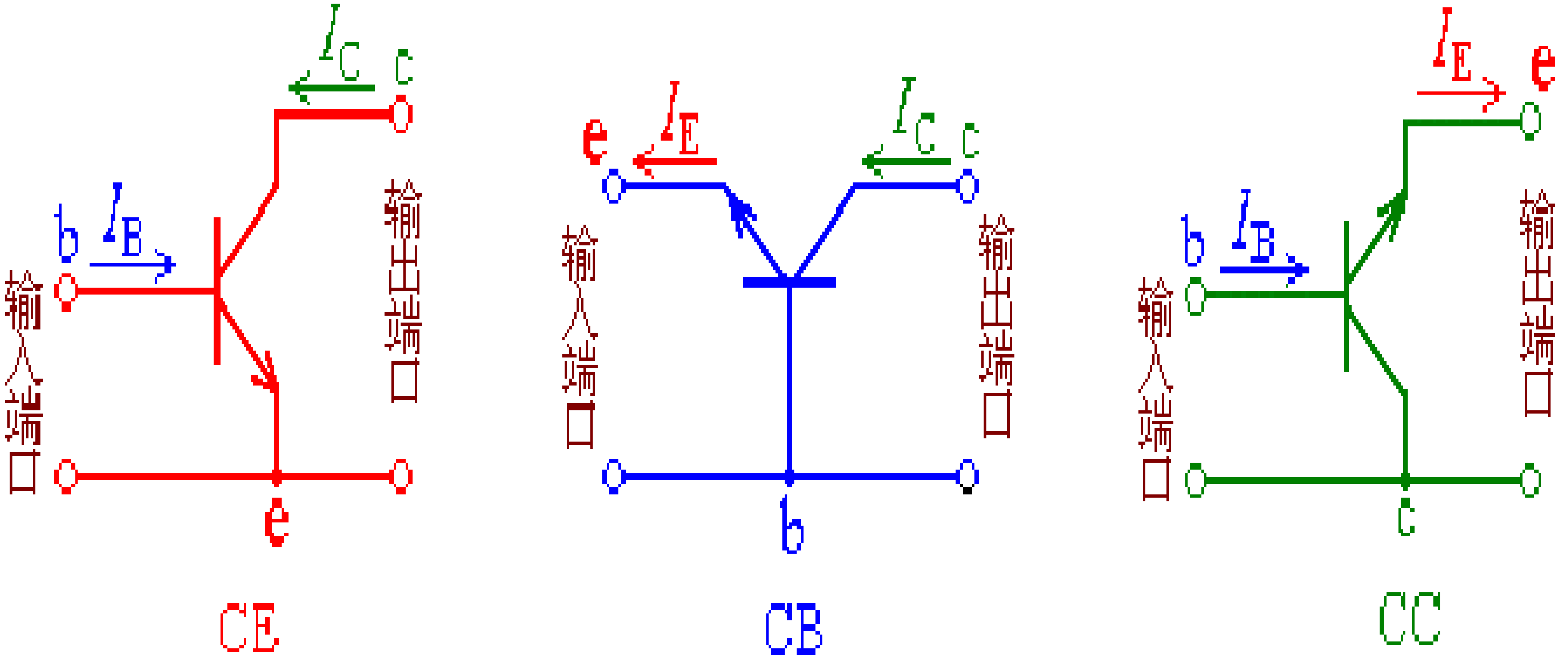
NPN管反向运用时共基极短路电流增益

$$a = \frac{I_1}{I_2}\Big|_{V1=0} = -\frac{I_E}{I_C}\Big|_{V1=0} = -\alpha_R$$

$$b = \frac{I_2}{I_1}\Big|_{V2=0} = -\frac{I_C}{I_E}\Big|_{V2=0} = -\alpha_F$$

NPN管正向运用时共基极短路电流增益

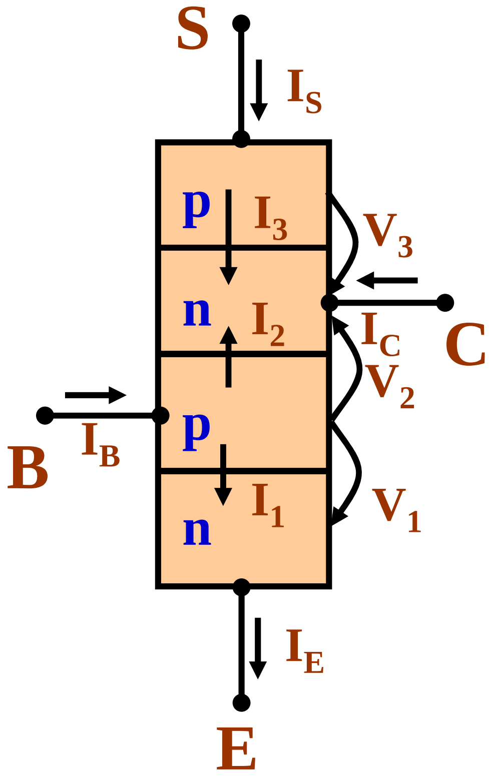
理想本征集成双极晶体管的EM模型



$$I_C = \beta I_B \qquad I_C = \alpha I_E \qquad I_E = I_B/(1-\alpha)$$

BJT的三种组态

2.2.3 三结四层结构(多结晶体管)



$$I_1 = I_{ES}(e^{\frac{V_1}{V_T}} - 1) + aI_{CS}(e^{\frac{V_2}{V_T}} - 1)$$

$$I_2 = bI_{ES}(e^{\frac{V_1}{V_T}} - 1) + I_{CS}(e^{\frac{V_2}{V_T}} - 1) + cI_{SS}(e^{\frac{V_3}{V_T}} - 1)$$

$$I_3 = dI_{CS}(e^{\frac{V_2}{V_T}} - 1) + I_{SS}(e^{\frac{V_3}{V_T}} - 1)$$

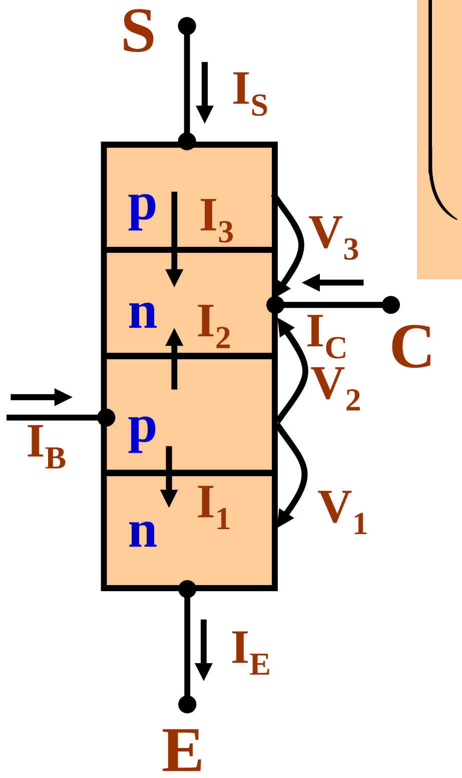
$$a = \frac{I_1}{I_2}\bigg|_{\substack{V_1 = 0 \\ V_3 = 0}} = -\alpha_R \qquad b = \frac{I_2}{I_1}\bigg|_{\substack{V_2 = 0 \\ V_3 = 0}} = -\alpha_F$$

$$c = \frac{I_2}{I_3}\bigg|_{\substack{V_1 = 0 \\ V_2 = 0}} = -\alpha_{SR} \qquad d = \frac{I_3}{I_2}\bigg|_{\substack{V_2 = 0 \\ V_3 = 0}} = -\alpha_{SF}$$

2012/11/27

理想本征集成双极晶体管的EM模型

三结四层结构(多结晶体管)



$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\alpha_R & 0 \\ -\alpha_R & 1 & -\alpha_R \\ 0 & -\alpha_R & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} I_{ES}(e^{\frac{V_1}{V_T}}-1) \\ I_{CS}(e^{\frac{V_2}{V_T}}-1) \\ I_{SS}(e^{\frac{V3}{V_T}}-1) \end{bmatrix}$$

根据基尔霍夫定律，有：

$$\begin{pmatrix} I_E \\ I_B \\ I_C \\ I_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix}$$

理想本征集成双极晶体管的EM模型

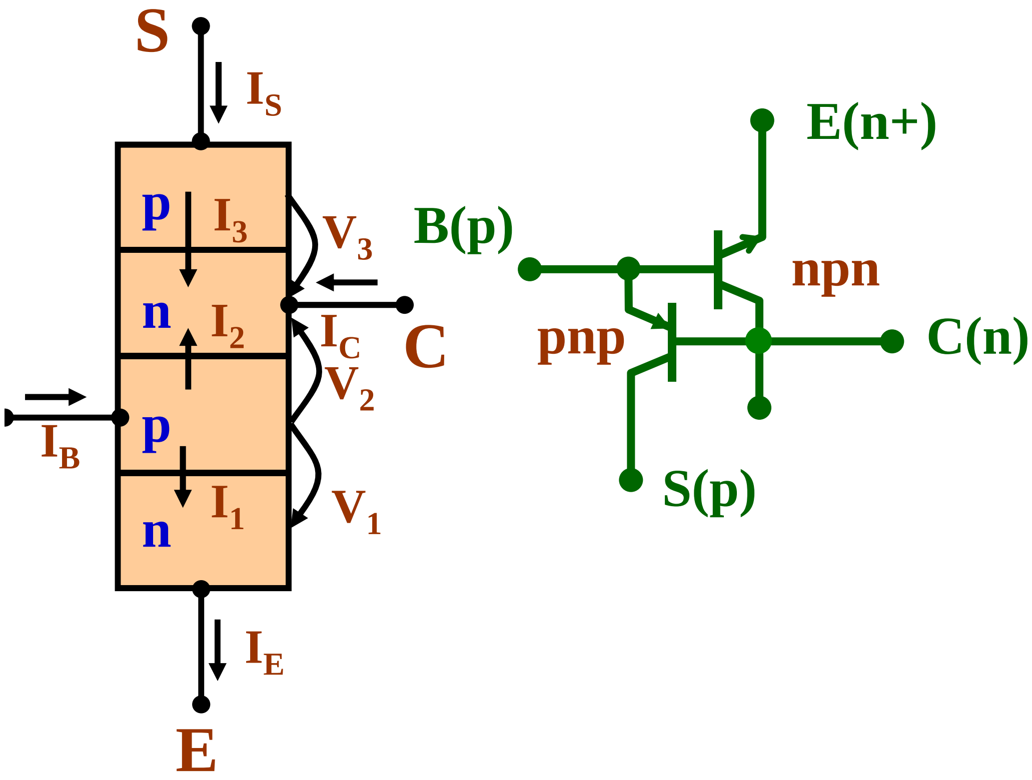
三结四层结构(多结晶体管)

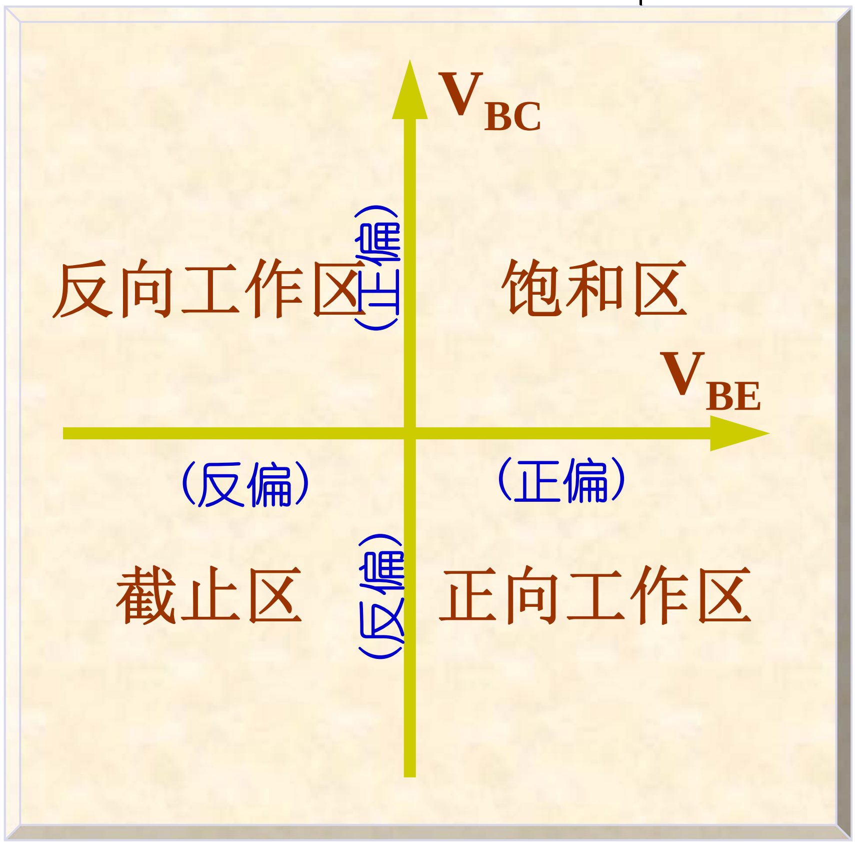
$$\begin{pmatrix} I_E \\ I_B \\ I_C \\ I_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\alpha_R & 0 \\ 1-\alpha_F & 1-\alpha_R & -\alpha_{SR} \\ \alpha_F & -(1-\alpha_{SF}) & -(1-\alpha_{SR}) \\ 0 & -\alpha_{SF} & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} I_{ES}(e^{\frac{V_1}{V_T}}-1) \\ I_{CS}(e^{\frac{V_2}{V_T}}-1) \\ I_{SS}(e^{\frac{V_3}{V_T}}-1) \end{bmatrix}$$

理想本征集成双极晶体管的EM模型

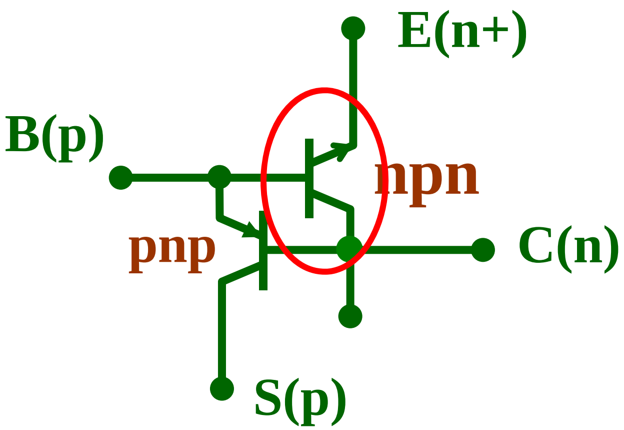
§2.3 集成双极晶体管的有源寄生效应

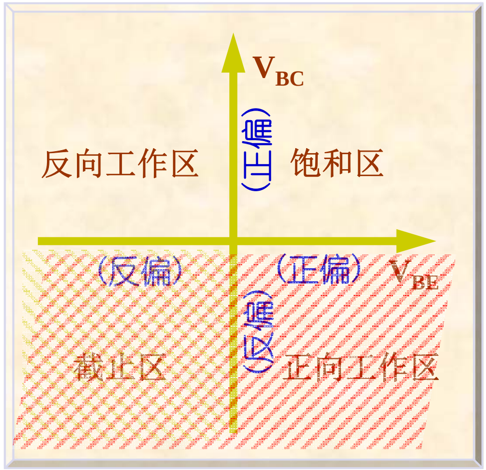
- 双极晶体管的四种工作状态





NPN管工作于正向工作区和截止区的情况





$V_{BC}<0$

正向工作区和截止区

npn管

$V_{EB\_pnp}<0$

$V_S=0$ $V_{CB\_pnp}<0$

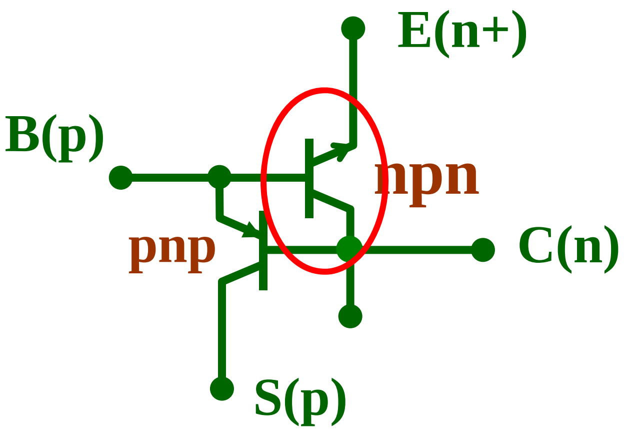
截止

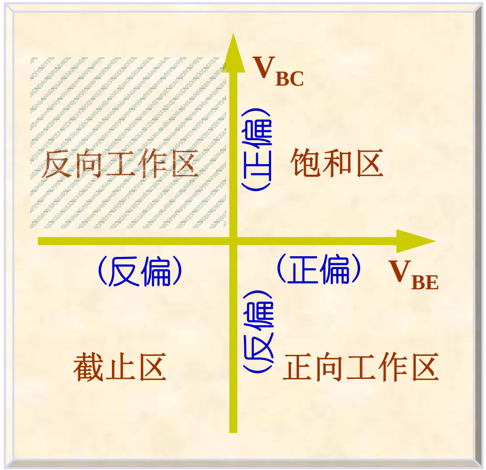
pnp管

寄生晶体管的影响可以忽略

集成双极晶体管的有源寄生效应

NPN管工作于反向工作区的情况





$V_{BC}>0$

$V_{BE}<0$

反向工作区

npn管

↔

$V_{EB\_pnp}=V_{BC\_npn}>0$

$V_S=0 \quad V_{CB\_pnp}<0$

正向工作区

pnp管

寄生晶体管对电路产生影响

集成双极晶体管的有源寄生效应

NPN管工作于反向工作区的情况

几个假设:

晶体管参数

$\alpha_F = 0.99$ $I_{ES} = 10^{-16} A$

$\alpha_R = 0.20$ $I_{CS} = 10^{-15} A$

$\alpha_{SF} = 0.70$ $I_{SS} = 10^{-13} A$

$\alpha_{SR} = 0.10$

EM模型简化

PN结正偏工作时，$V_F > 0, (e^{V_F/V_T} - 1) \approx e^{V_F/V_T}$

PN结反偏工作时，$V_R < 0, (e^{V_R/V_T} - 1) \approx -1$

$V_{SC}(V_3) < 0, \quad I_{SS}(e^{V_{SC}/V_T} - 1) \approx -I_{SS} \approx 0$

NPN管工作于反向工作区的EM方程($V_{BE}(V_1)<0, V_{BC}(V_2)>0$)

$$\begin{pmatrix} I_E \\ I_B \\ I_C \\ I_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\alpha_R & 0 \\ 1-\alpha_F & 1-\alpha_R & -\alpha_{SR} \\ \alpha_F & -(1-\alpha_{SF}) & -(1-\alpha_{SR}) \\ 0 & -\alpha_{SF} & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} I_{ES}(e^{\frac{V_1}{V_T}}-1) \\ I_{CS}(e^{\frac{V_2}{V_T}}-1) \\ I_{SS}(e^{\frac{V3}{V_T}}-1) \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} I_E \\ I_B \\ I_C \\ I_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\alpha_R & 0 \\ 1-\alpha_F & 1-\alpha_R & -\alpha_{SR} \\ \alpha_F & -(1-\alpha_{SF}) & -(1-\alpha_{SR}) \\ 0 & -\alpha_{SF} & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} -I_{ES} \\ I_{CS}e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} \\ -I_{SS} \end{bmatrix}$$

NPN管工作于反向工作区的EM方程

$$\begin{pmatrix} I_E \\ I_B \\ I_C \\ I_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\alpha_R & 0 \\ 1-\alpha_F & 1-\alpha_R & -\alpha_{SR} \\ \alpha_F & -(1-\alpha_{SF}) & -(1-\alpha_{SR}) \\ 0 & -\alpha_{SF} & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} -I_{ES} \\ I_{CS} e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} \\ -I_{SS} \end{bmatrix}$$

$$I_E \approx -\alpha_R I_{CS} e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} = -\alpha_R I_R$$

$$I_B \approx (1-\alpha_R) I_{CS} e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} = (1-\alpha_R) I_R$$

$$-I_C \approx (1-\alpha_{SF}) I_{CS} e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} = (1-\alpha_{SF}) I_R$$

$$I_S' \approx -\alpha_{SF} I_{CS} e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} = -\alpha_{SF} I_R$$

减小了集电极电流

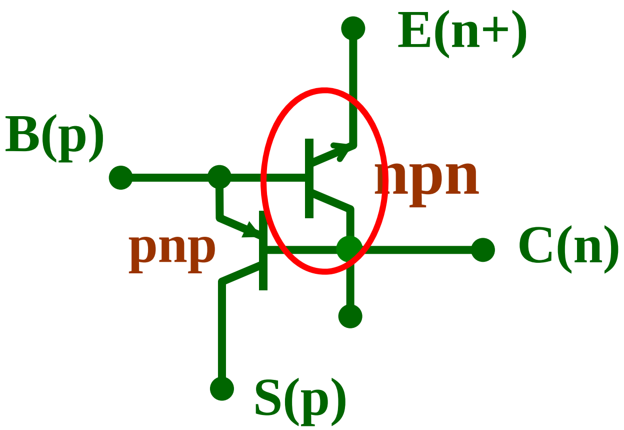
作为无用电流流入衬底

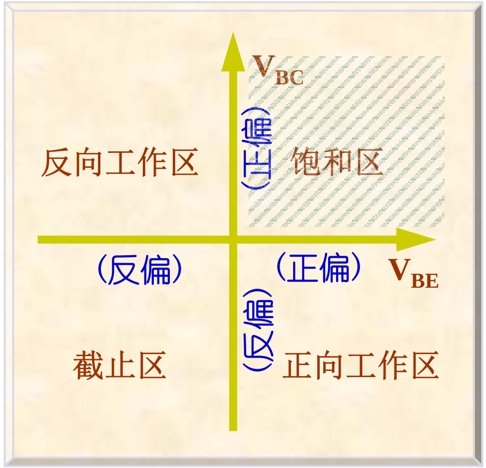
减小 α_{SF}

采用埋层和掺金工艺

集成双极晶体管的有源寄生效应

NPN管工作于饱和工作区的情况





$V_{BC}>0$

$V_{BE}>0$

饱和工作区

npn管

$V_{EB\_pnp}=V_{BC\_npn}>0$

$V_S=0$ $V_{CB\_pnp}<0$

正向工作区

pnp管

寄生晶体管对电路产生影响

2012/11/27

集成双极晶体管的有源寄生效应

NPN管工作于饱和工作区的EM方程

$$I_E \approx I_F - \alpha_R I_R$$

$$I_B \approx (1-\alpha_F)I_F + (1-\alpha_R)I_R$$

$$I_C \approx \alpha_F I_F - (1-\alpha_{SF})I_R$$

$$I_S' \approx -\alpha_{SF} I_R$$

作业:

1. P8　1-1、1-2、1-3、1-4；

2. 　p24　2-1、2-5；