

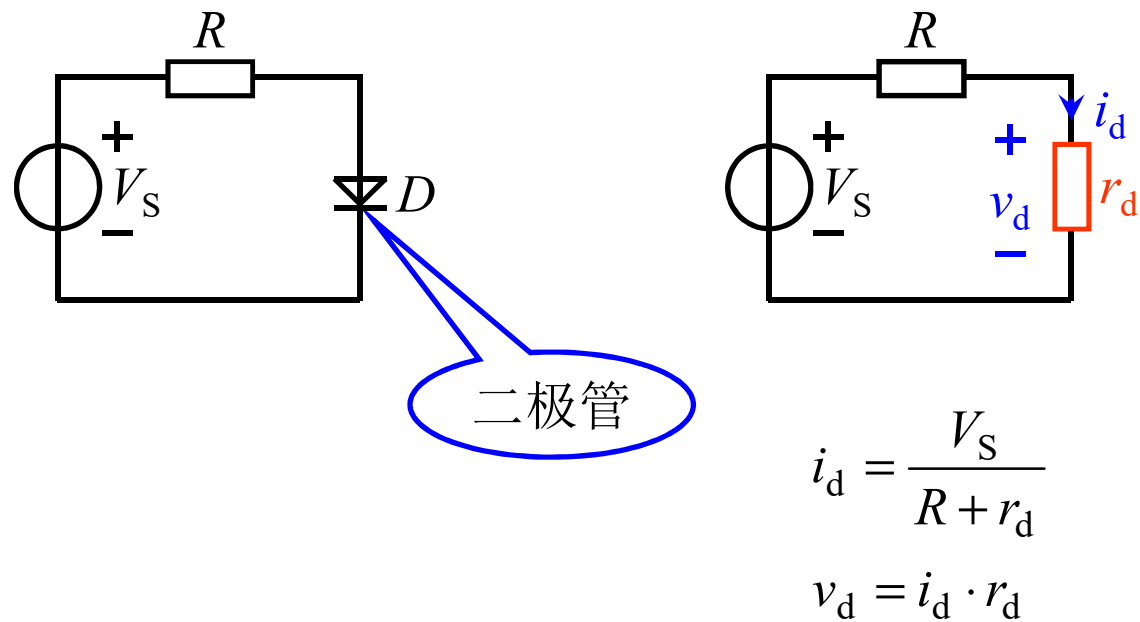
电路分析与电子技术基础

电子器件基础

(3.1 ~ 3.3)

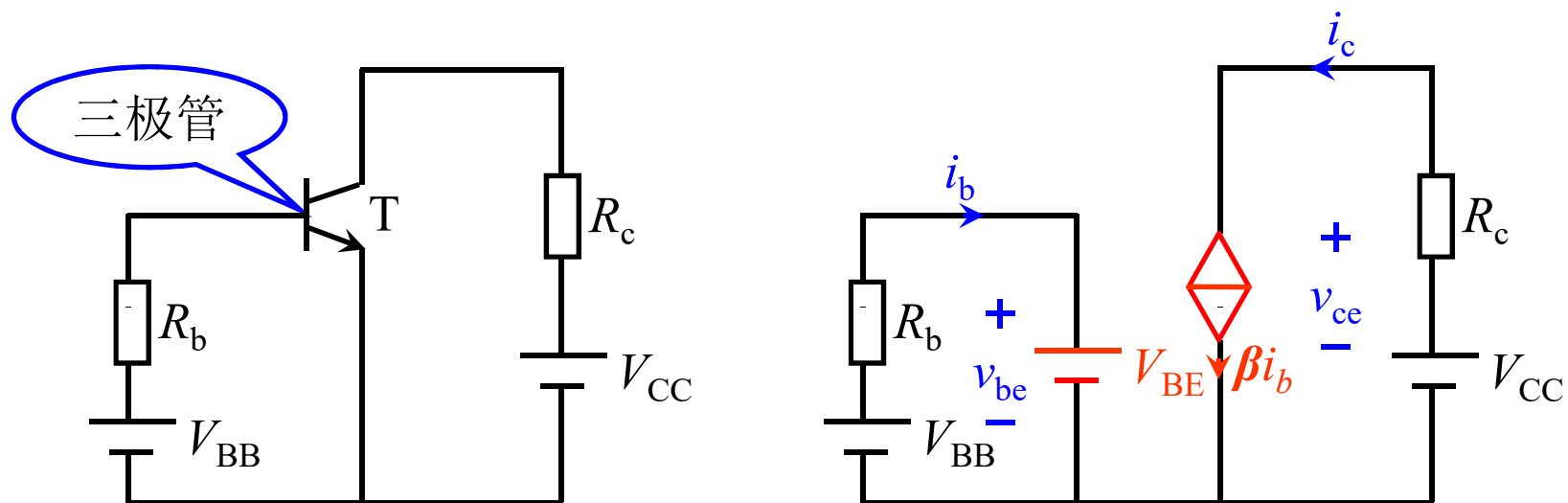
电子电路（快速入门）

ü 注意电路模型，用电路原理的分析/计算方法求解电子电路。



电子电路（快速入门）

注意电路模型，用电路原理的分析/计算方法求解电子电路。



$$v_{be} = V_{BE} , \quad i_b = \frac{V_{BB} - v_{be}}{R_b}$$

$$i_c = \beta \cdot i_b , \quad v_{ce} = V_{CC} - i_c \cdot R_c$$

n 电子器件基础

ü 常用器件

无源器件：电阻、电容、电感；

半导体（分立）器件：二极管、三极管、场效应管 ...

集成电路。

ü 电子器件的基本电气特性

电压特性、电流特性

（伏安特性、 $V \sim I$ ）

温度、速度特性

n 电子器件基础

- ✓ 伏安特性

- ✓ 半导体材料与 PN 结

- ✓ 半导体二极管 (3.1)

- ✓ 晶体三极管 (3.2)

- ✓ 场效应管 (3.3)

- ✓ 集成电路中的电子器件

✓ 伏安特性

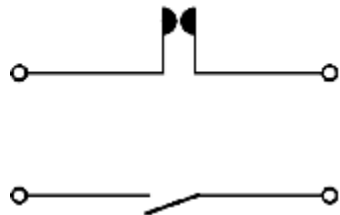
ü 伏安特性：

器件（或电路）的端口电压与端口电流之间的函数关系。

（一般针对两端点）

伏安特性曲线。

Ø 伏安特性（开关）

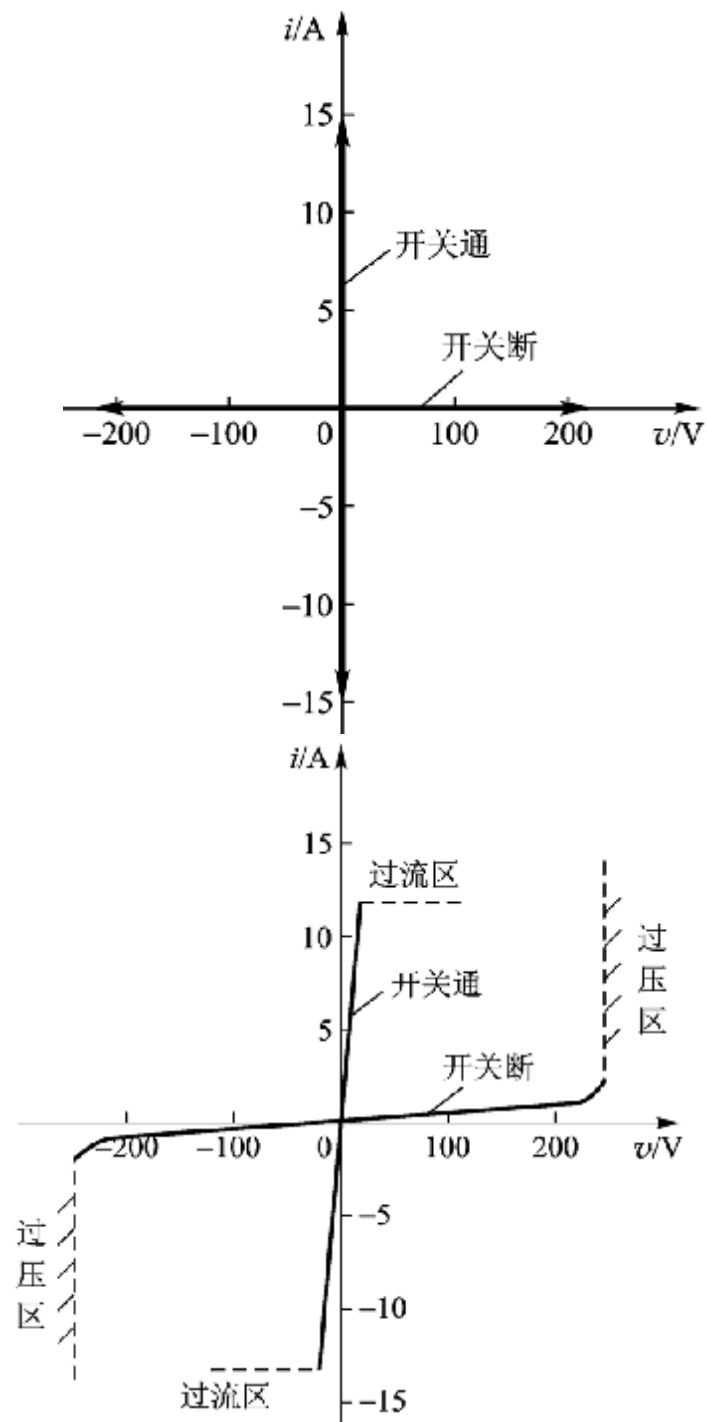


$$V = I \cdot R \approx I \cdot 0 = 0$$

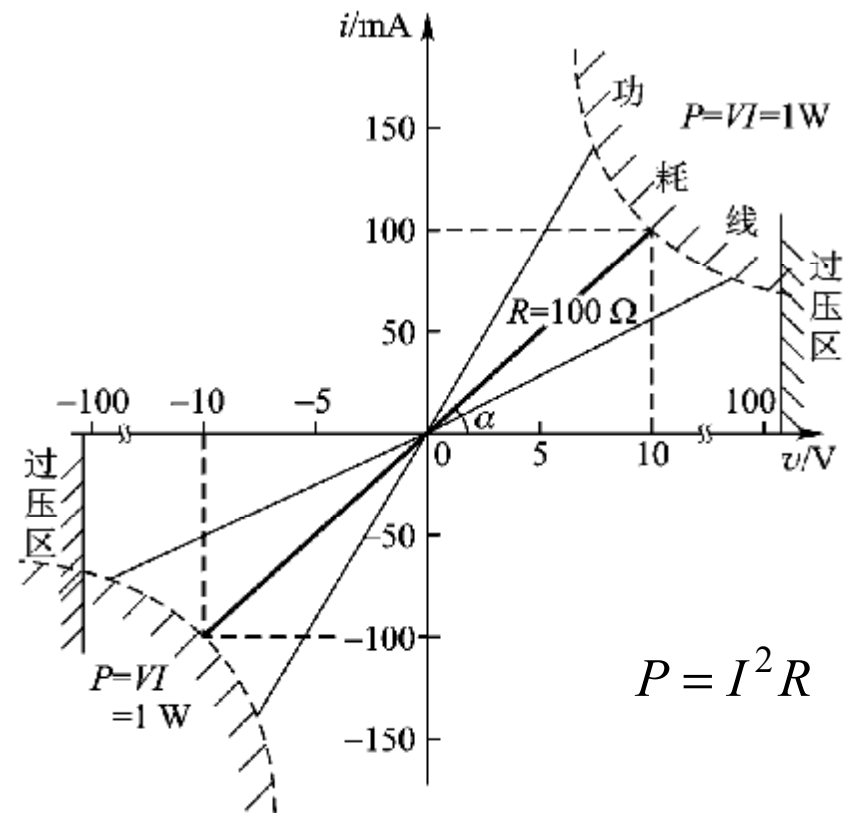
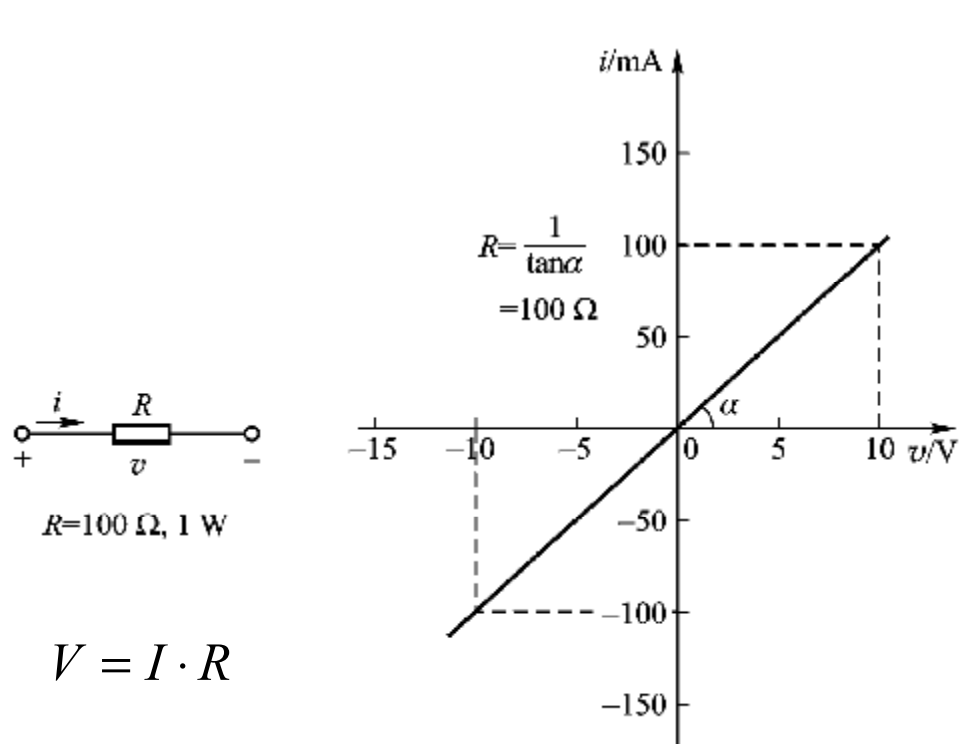
$$R = \frac{V}{I} = \frac{1}{\tan a}$$

$$P = I^2 R$$

ü 安全工作区：过压/过流/过热



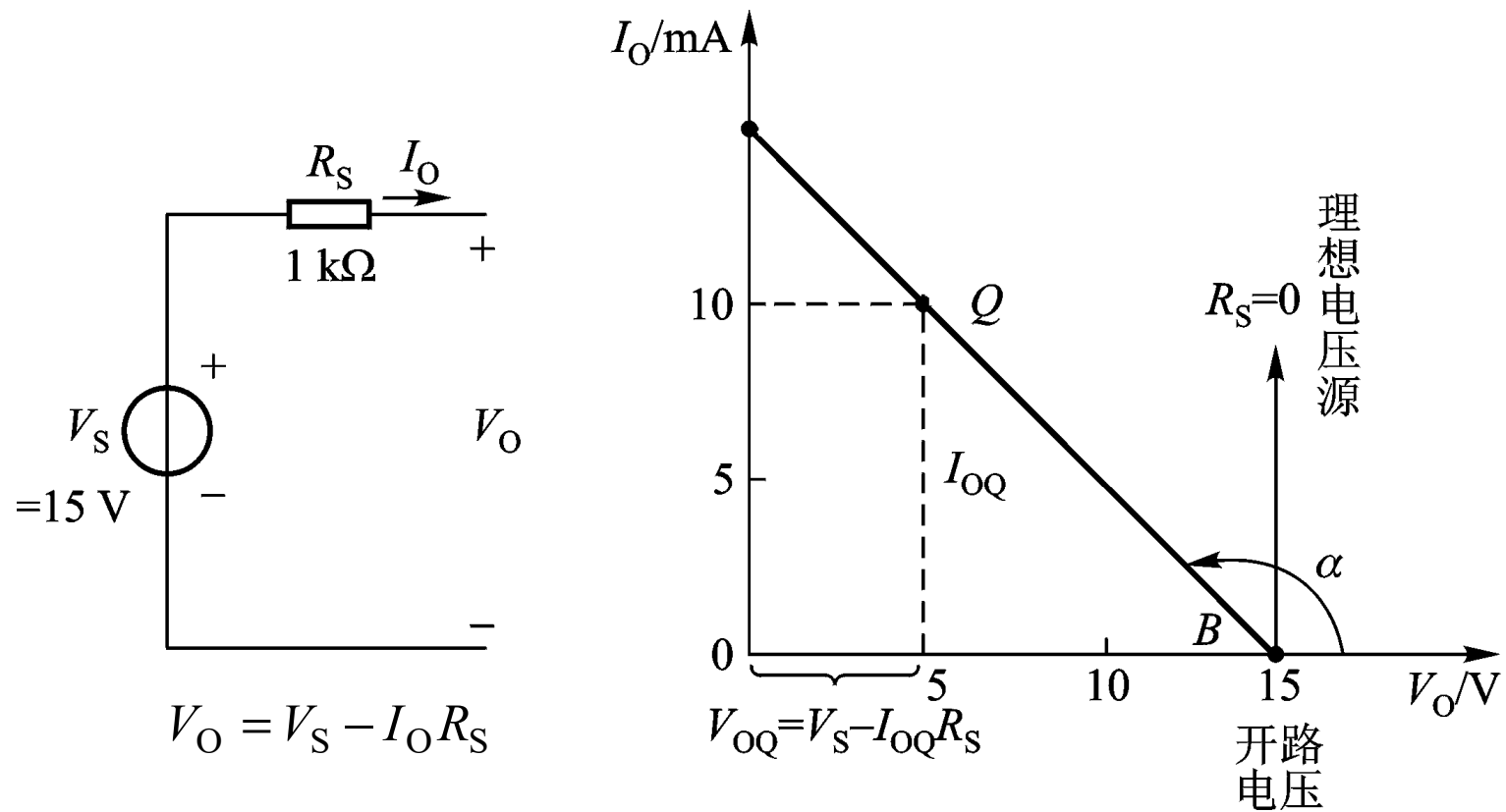
Ø 伏安特性（线性电阻）



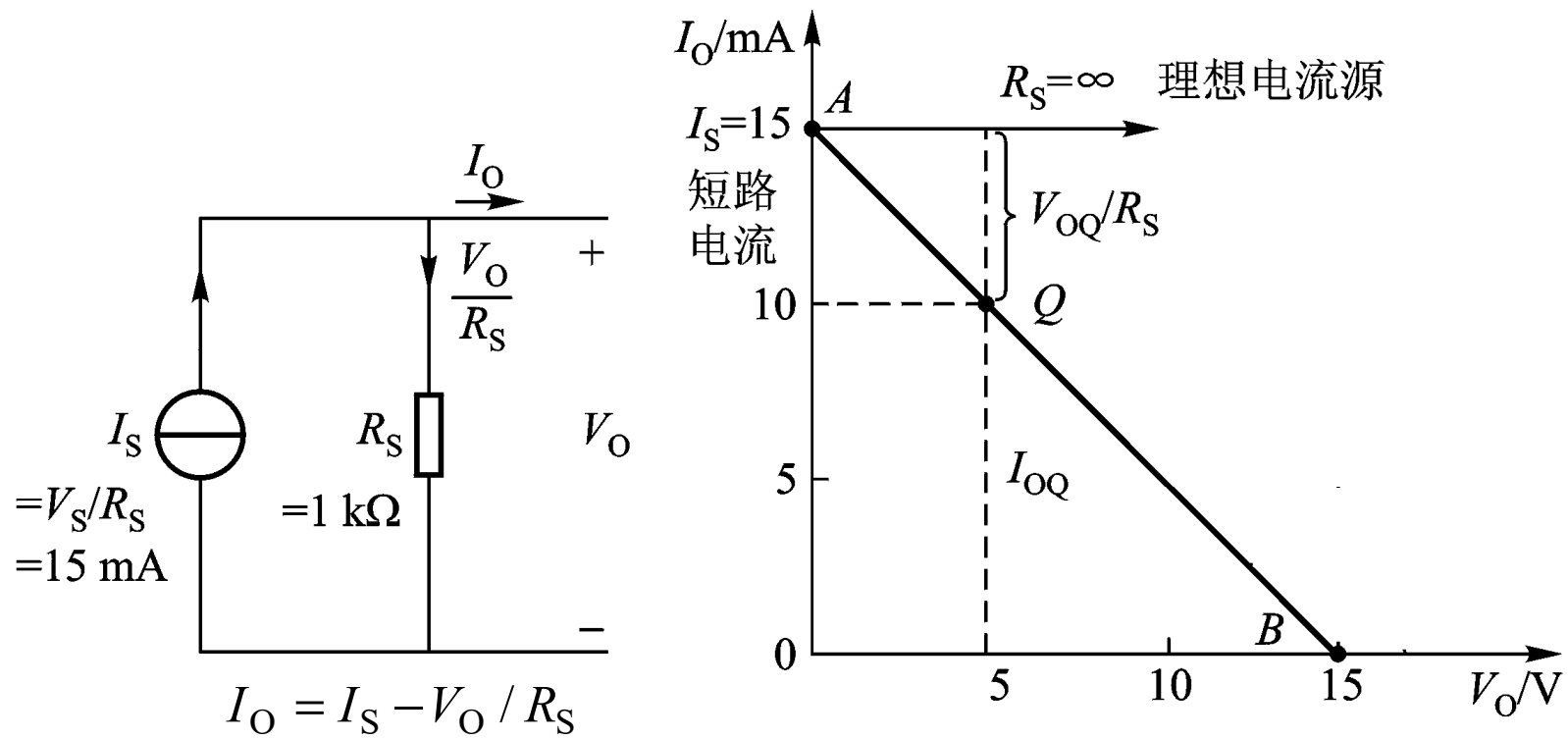
Ü 安全工作区：过压/过流/过热

Ü 指标：线性性、温度（T）特性

Ø 伏安特性（电压源）



Ø 伏安特性（电流源）

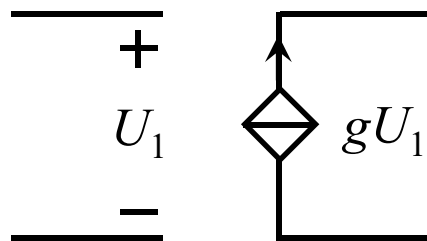


Ø 伏安特性（受控源）

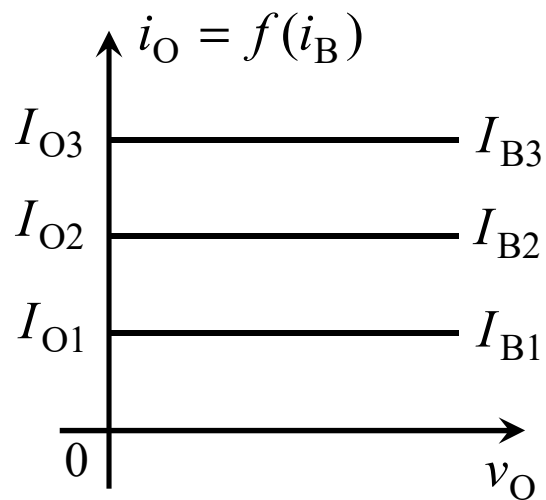
ü 输出电压或输出电流受电路中其它部分电压或电流控制的电源。

（VCVS、VCCS、CCVS、CCCS）

（四端元件）



ü 线性受控源。



✓ 半导体材料与 PN 结

ü 电子技术发展到今天这样的水平，首先要归功于半导体材料的发现和半导体器件制造工艺的不断完善。

ü 无论是制造单个半导体器件，还是制造大规模集成电路，都需要用半导体材料作为芯片，并且都以 PN 结作为器件的核心。

Ø 半导体

Ü 半导体：导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。

导体： $r < 1.75 \times 10^{-6} \Omega / \text{cm}$

绝缘体： $r > 10^{12} \sim 10^{16} \Omega / \text{cm}$

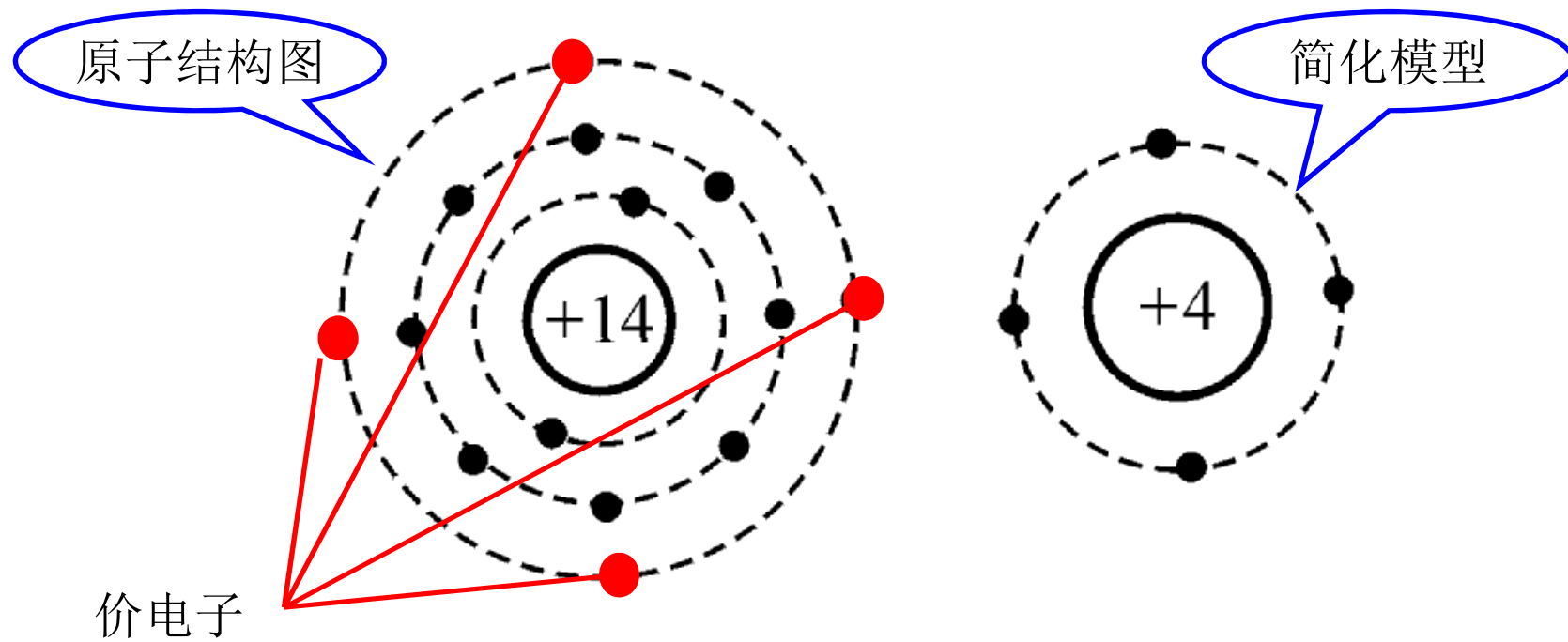
半导体： $1.75 \times 10^{-6} \Omega / \text{cm} < r < 10^{12} \Omega / \text{cm}$

Ü 导电能力可变（温度、掺杂浓度、光照等）；
导电能力可控。

Ü 自然界中蕴含丰富的半导体材料：
硅（Si）、锗（Ge）、砷化镓（GaAs）。

∅ 半导体（本征半导体）

ü 本征半导体：不含任何杂质的半导体。



⌀ 半导体（本征半导体）

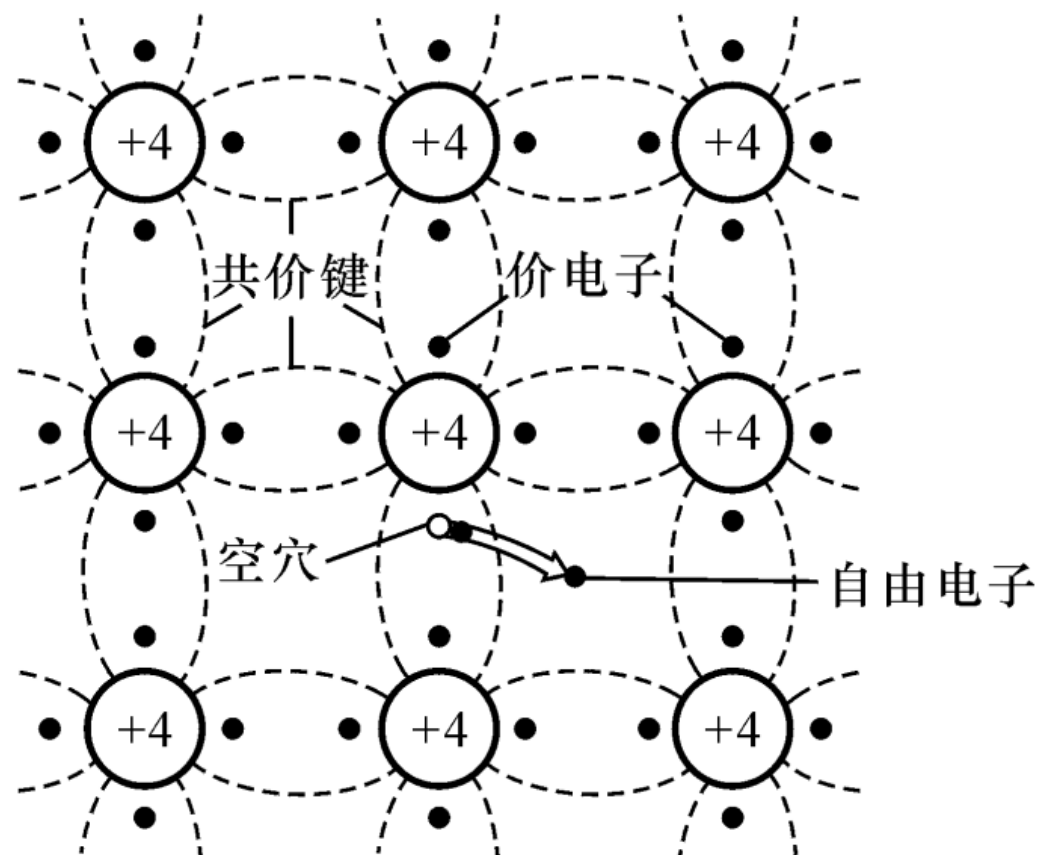
ü 共价键、价电子

ü 热（本征）激发：
成对的电子/空穴（载流子）

ü 复合

ü 空穴和电子浓度

$$n_i = p_i = AT^{3/2}e^{-E_G/2kT}\text{cm}^{-3}$$



ü 热力学温度零度、无外界能量激发：本征半导体 = 绝缘体

ü 温度特性

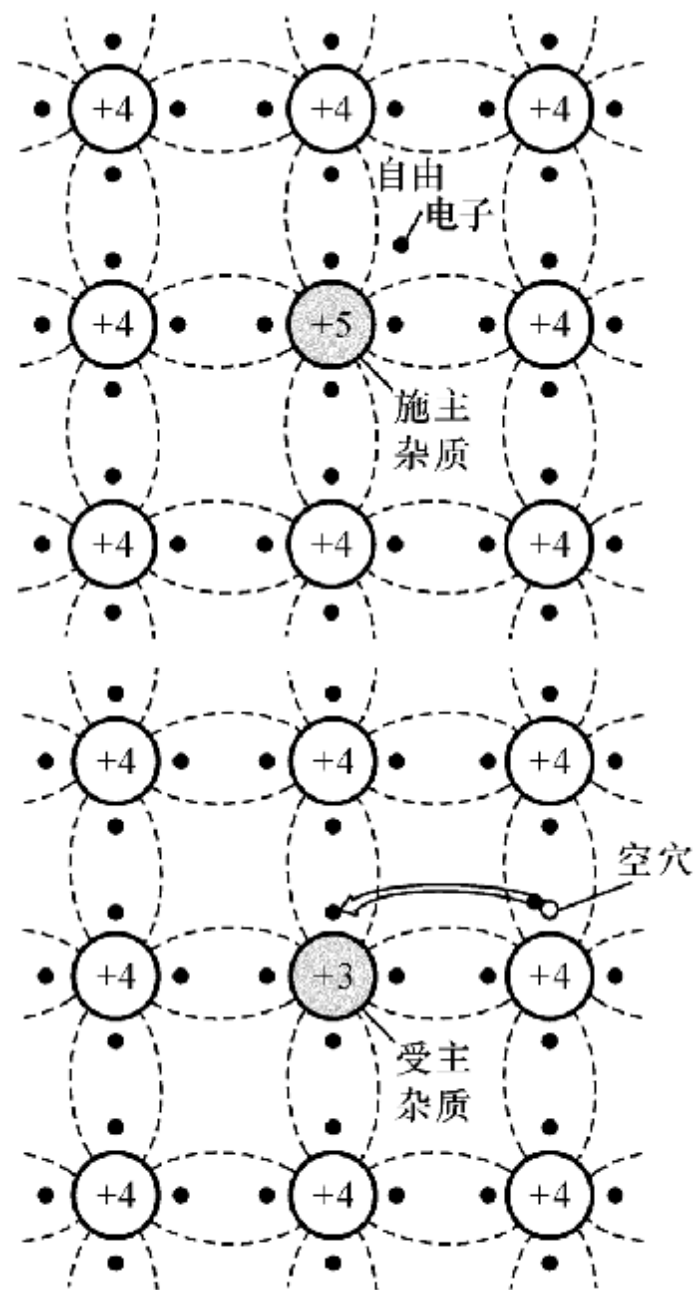
❌ 半导体（杂质半导体）

ü N 型半导体

掺5价元素（磷、砷等）；
多子（施主原子）：电子；
少（数载流子）子：空穴。

ü P 型半导体

掺3价元素（硼、镓等）；
多子（受主原子）：空穴；
少（数载流子）子：电子。



Ø 半导体（杂质半导体）

ü 杂质半导体特性：

少子浓度取决于本征激发/复合；多子浓度取决于掺杂。

导电能力由多子浓度决定；

两种载流子的浓度之积为常数，与掺杂程度无关；

（半导体中，掺入杂质越多，少子越少）

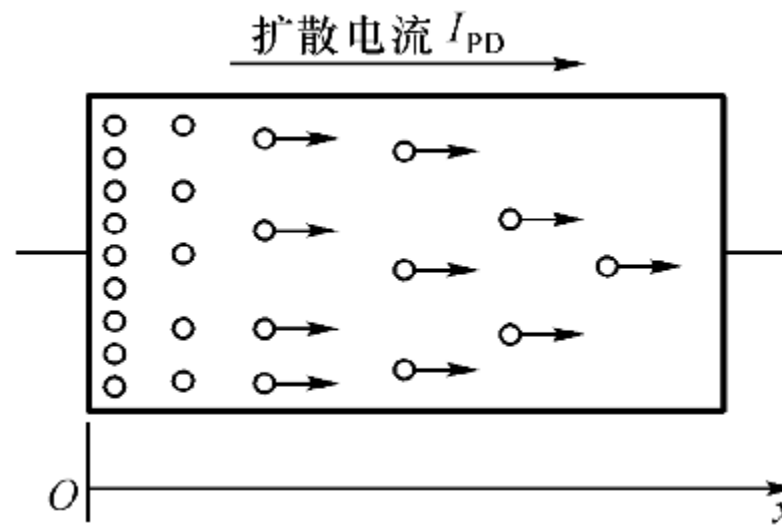
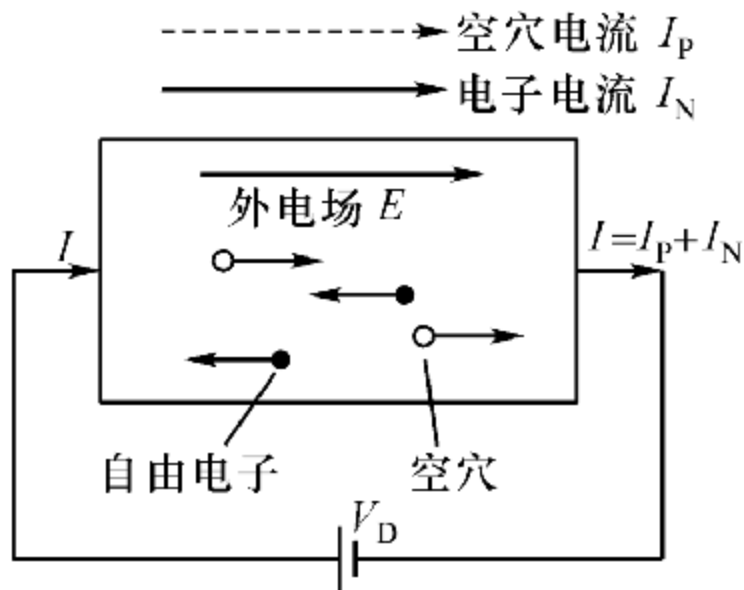
Ø 载流子的定向运动

ü 漂移运动：在外电场作用下的定向运动。

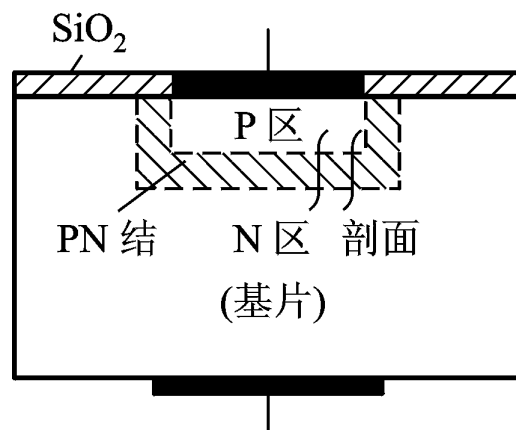
（空穴顺电场方向运动，电子逆电场方向运动）

ü 扩散运动：由半导体内部载流子浓度差引起的定向运动。

（载流子由浓度高的区域向浓度低的区域扩散）



Ø PN 结



Ü PN 结

两种不同类型的杂质半导体组合，在交界面附近形成的空间电荷层。

Ü 形成步骤：

N 区和 P 区存在着多数载流子的浓度差；

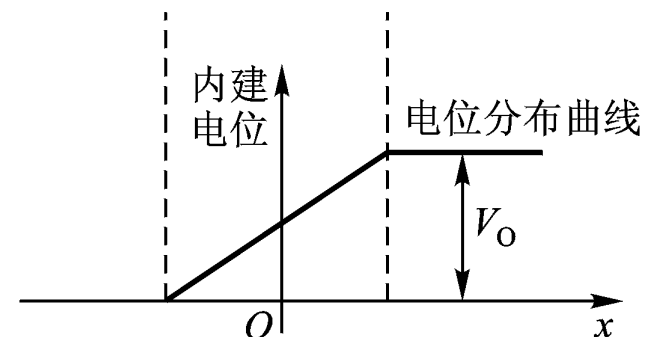
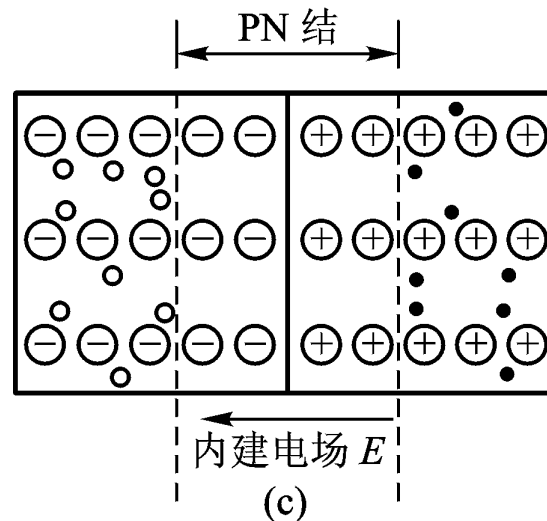
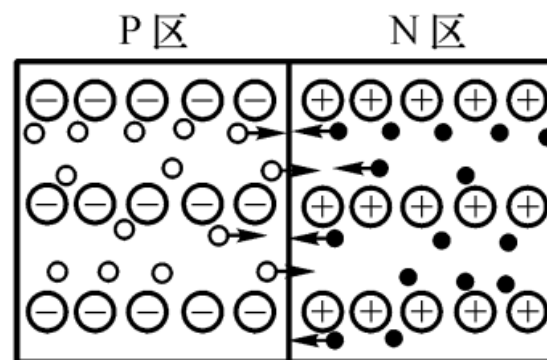
产生扩散运动；

形成了空间电荷层和内电场；

内电场阻碍多子的扩散运动；

内电场有利于少子的漂移运动；

扩散运动、漂移运动达到动态平衡。



Ø PN 结

ü PN 结的其它名词定义：

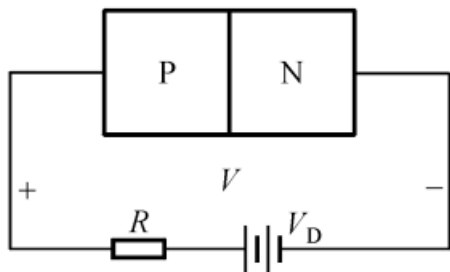
空间电荷层（正负离子）、阻挡层（多子）、耗尽层（载流子）、势垒区（势能）

ü 不对称 PN 结

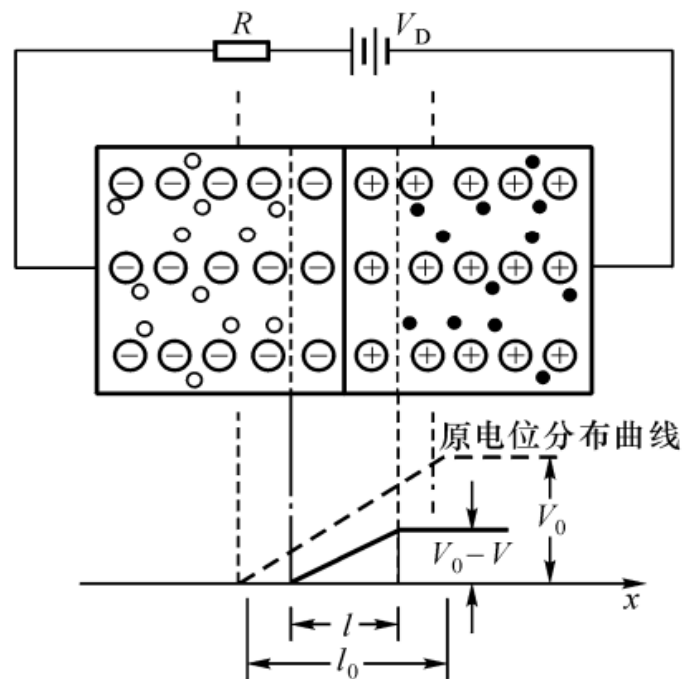
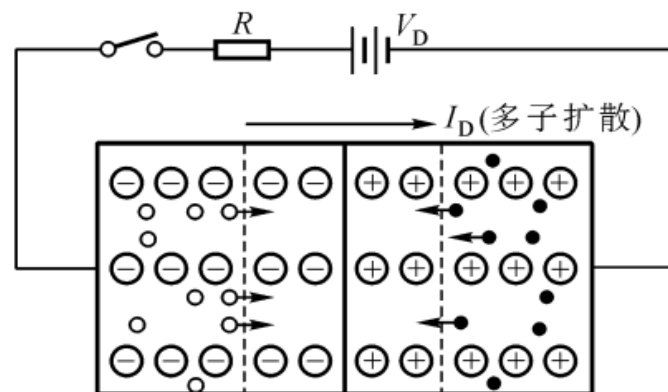


PN 结（单向导电性）

外加正向电压



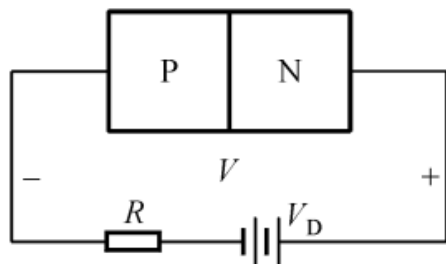
外电场与内电场方向相反；
多子扩散运动增强；
少子漂移运动可忽略；
PN 结变窄，内电场下降；
正向电流 \approx 扩散电流；
对外呈现低阻；
外电流的外控作用强，温控作用弱。



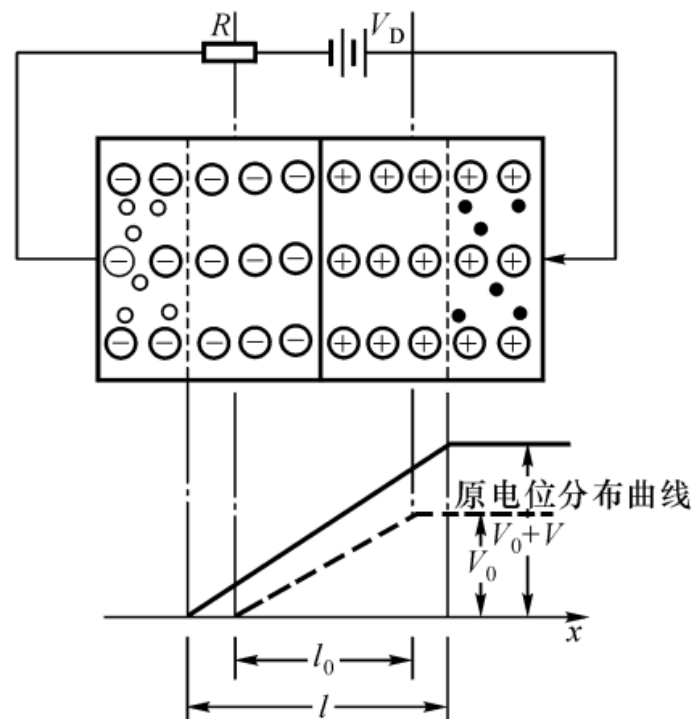
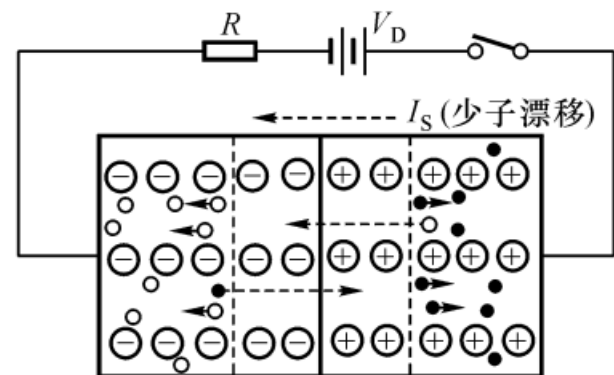
Ø PN 结（单向导电性）

PN 结具单向导电性

ü 外加反向电压



外电场与内电场方向相同；
多子扩散运动大大减少；
少子漂移运动占优；
PN 结变厚，内电场增强；
反向电流 \approx 漂移电流；
对外呈现高阻；
外电流的温控作用强。



PN 结（伏安特性）

$$I = I_S(e^{V/V_T} - 1), \quad V_T = kT/q$$

常温下： $T = 300\text{K}$, $V_T = 26\text{mV}$

正向特性

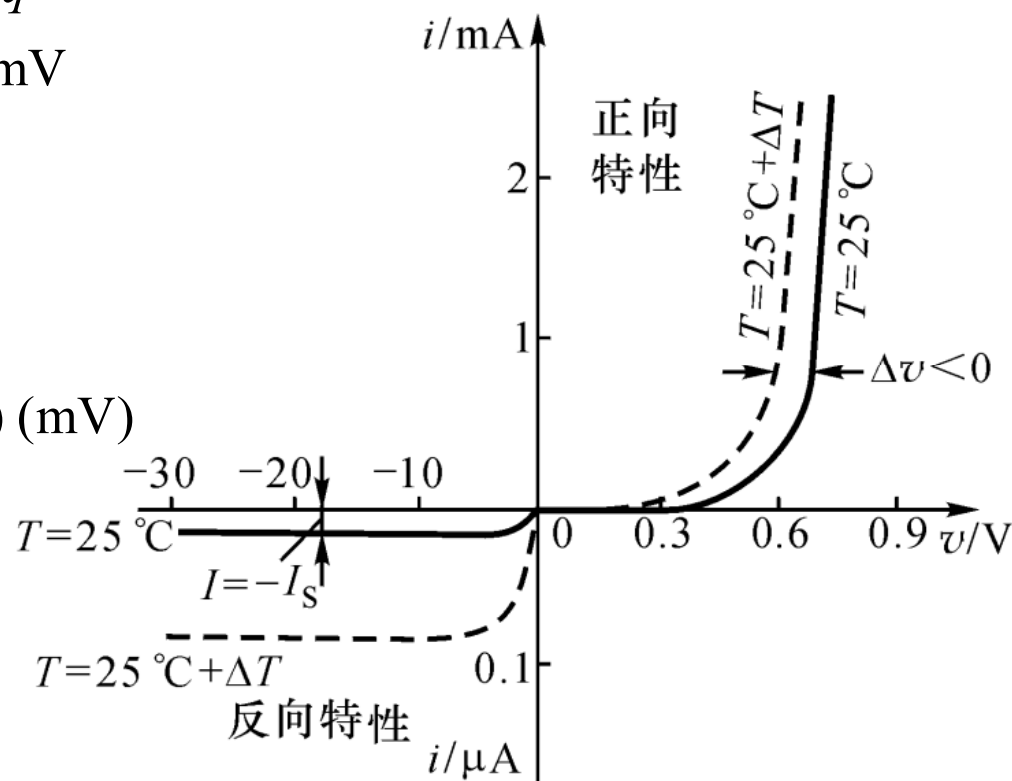
$$I \approx I_S e^{V/V_T}$$

$$V = V_T \ln(I/I_S) \approx 60 \lg(I/I_S) \text{ (mV)}$$

反向特性

$$I \approx I_S$$

温度对伏安特性的影响



Ø PN 结（击穿特性）

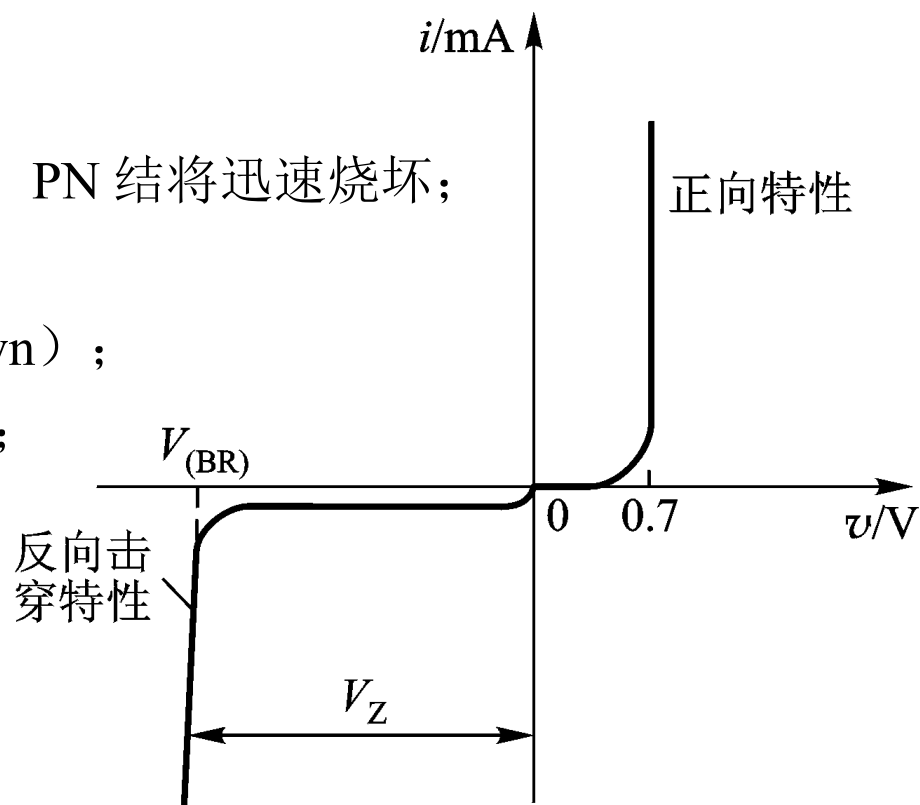
ü 当反偏电压超过反向击穿电压 V_{BR} 时，反向电流将急剧增大，而反向电压值 V_Z 却增加很少；

ü 若对反向电流的增加不加限制，PN 结将迅速烧坏；

ü 雪崩击穿（Avalanche Breakdown）；

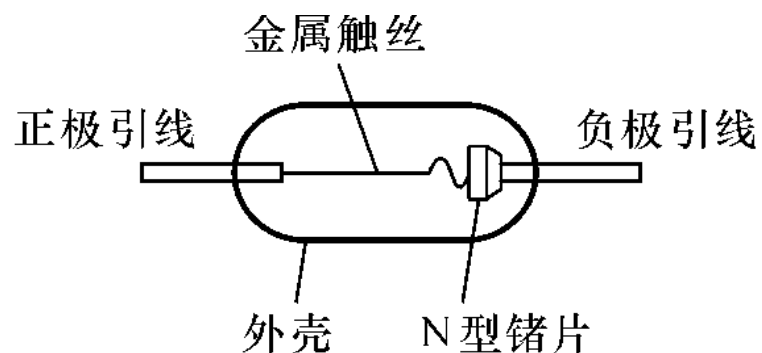
齐纳击穿（Zener Breakdown）；


ü 击穿反向电压的温度特性。



✓ 半导体二极管

ü 半导体二极管（简称二极管），由 PN 结、相应的电极引线和管壳封装而成。



ü 电路符号：  正极 负极

ü 按结构分类：点接触型、面接触型、平面型；
按材料分类：锗二极管、硅二极管。

Ø 二极管（伏安特性）

$$i = I_S(e^{v/V_T} - 1), \quad V_T = kT/q$$

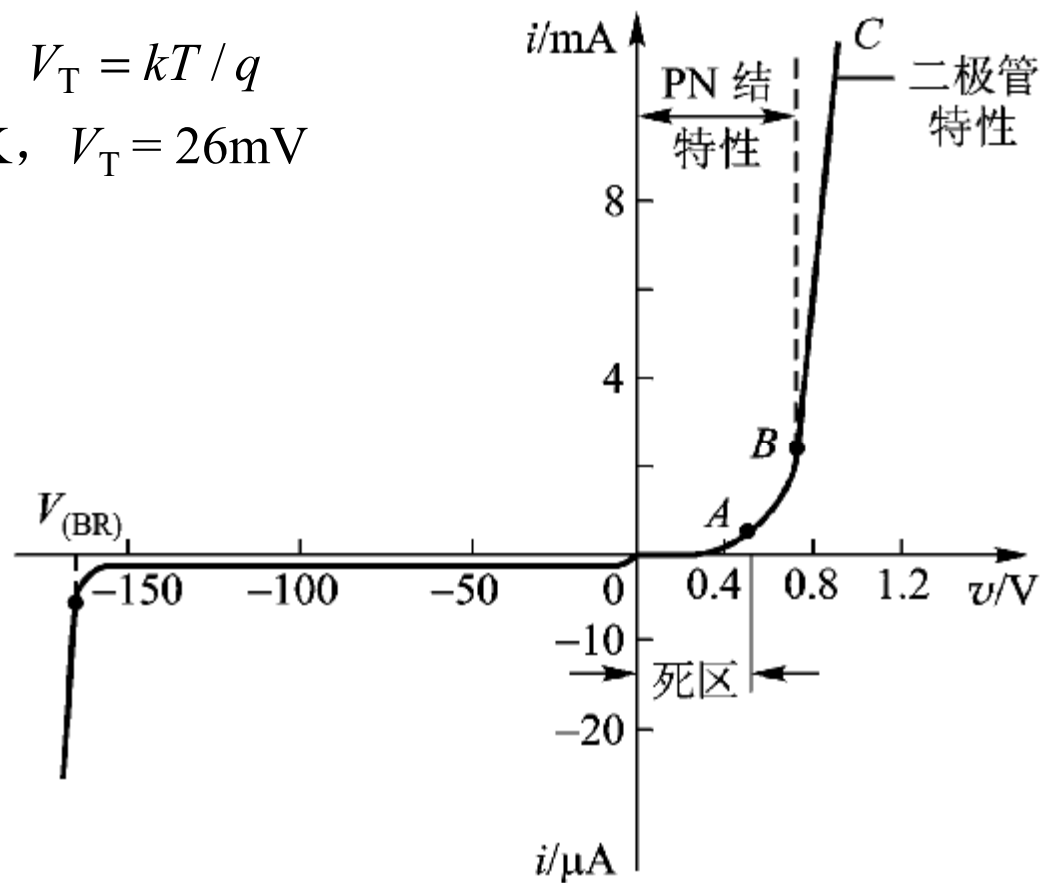
常温下：T = 300K, $V_T = 26\text{mV}$

ü 死区

ü 恒压区

ü 截止区

ü 反向击穿区



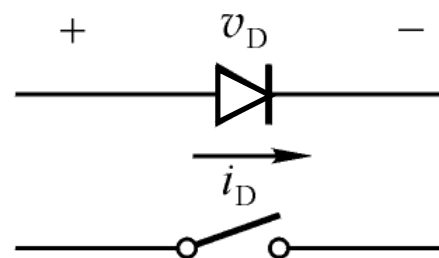
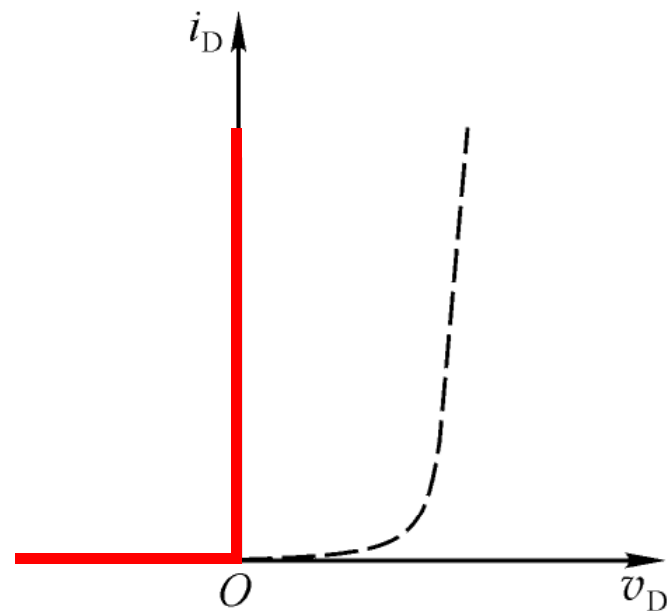
Ø 二极管（理想模型）

ü 正偏：二极管导通压降为零。

ü 反偏：二极管截止电流为零。

ü 二极管相当理想开关。

如何判断二极管的工作区域？

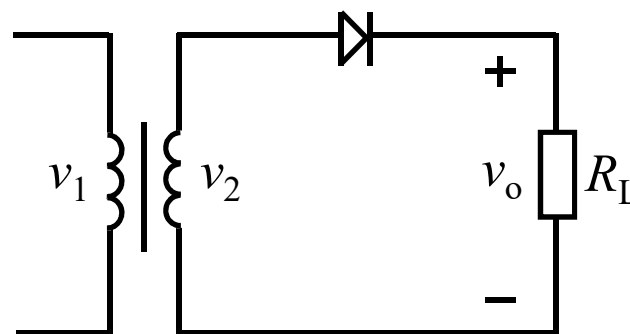


【例1.1】

右图所示电路。

已知： $v_2 = \sqrt{2} \sin \omega t$

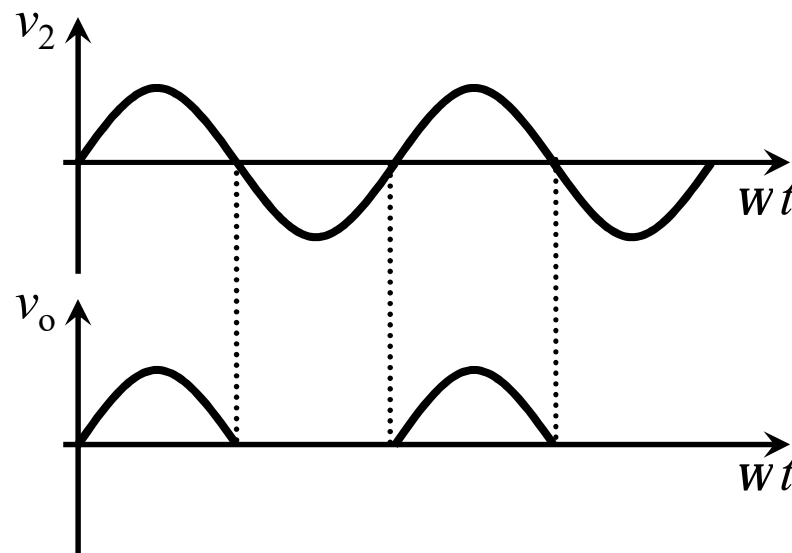
要求画出输出 v_o 的波形。



解：采用理想二极管模型分析。

单相半波整流电路

整流：交流电转换成直流电的过程。



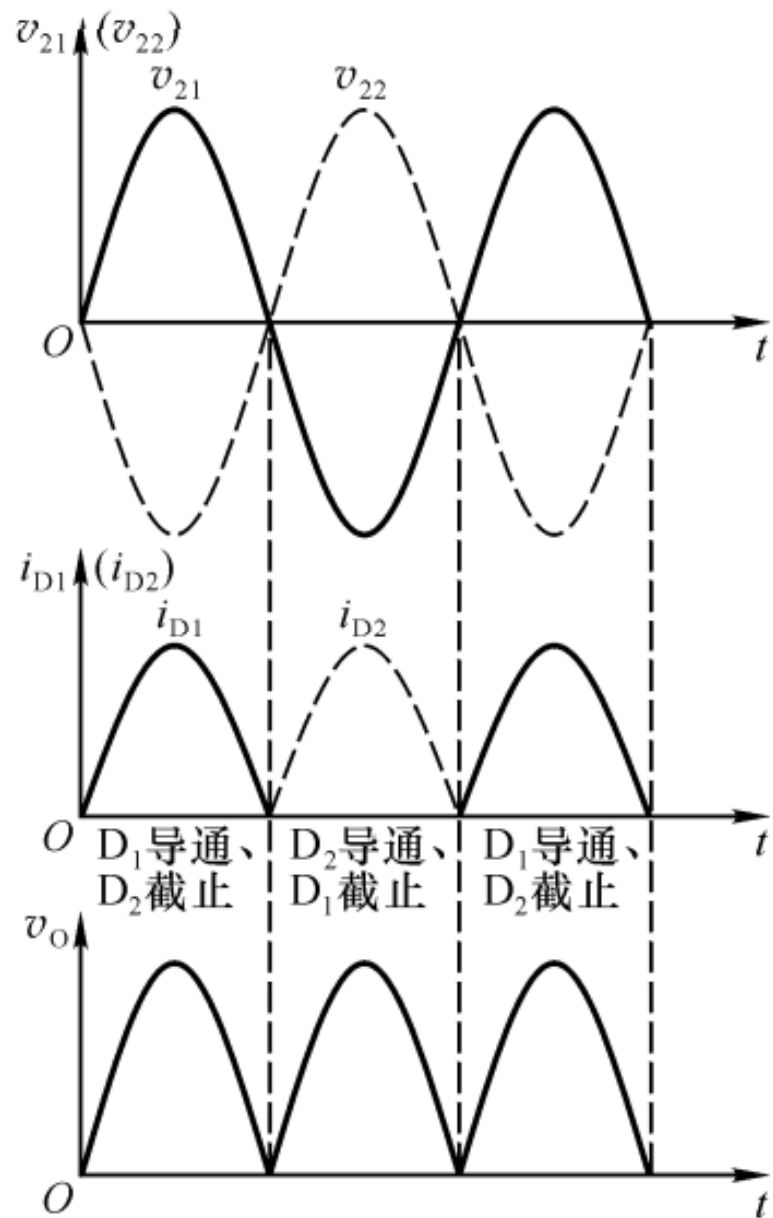
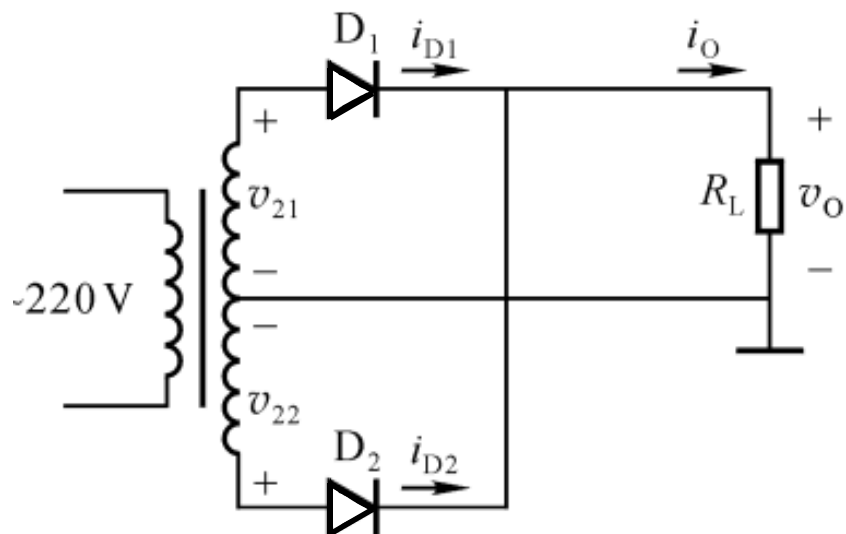
【例1.2】

下图所示电路。

要求画出输出 v_o 的波形。

解：采用理想二极管模型分析。

全波整流电路



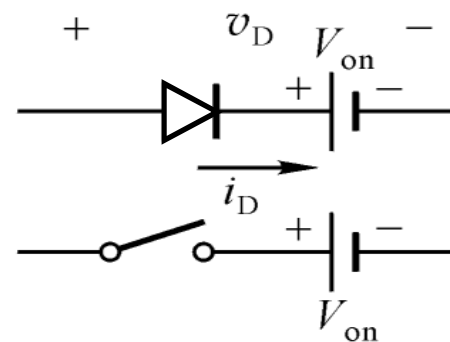
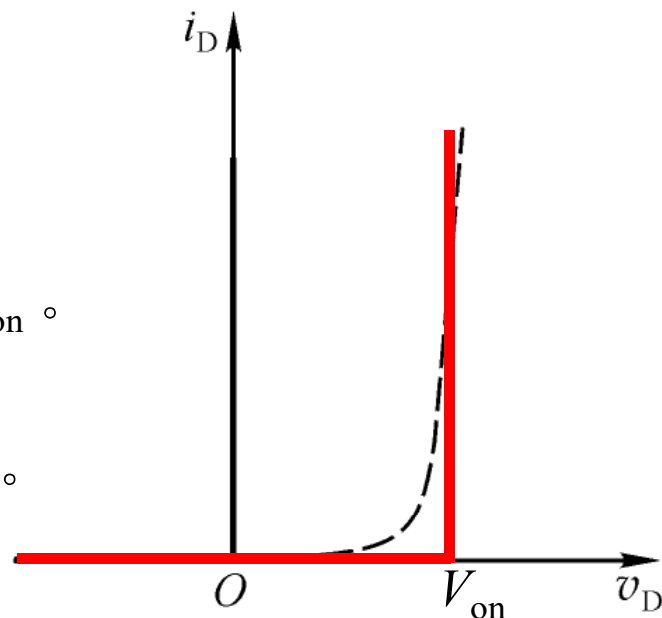
Ø 二极管（常规模型）

ü 正偏：二极管正向偏压大于 V_{on} 。

ü 反偏：二极管反偏或正向偏压小于 V_{on} 。

ü 二极管相当理想开关与恒压源的串联。

如何判断二极管的工作区域？

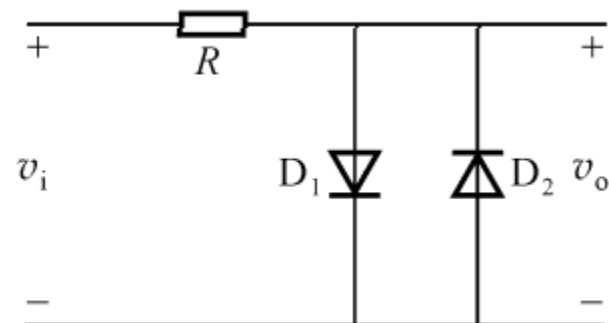


【例1.3】

右图所示电路。

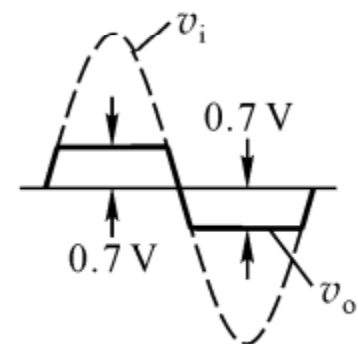
分析：输出 v_o 的波形。

解：采用常规二极管模型分析。



限幅电路

限幅：限制输出信号的幅度。

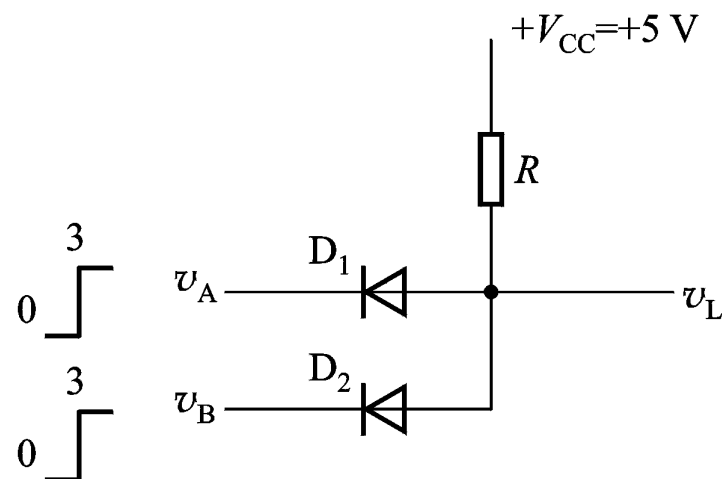


【例1.4】

右图所示电路。

已知：输入 v_A 、 v_B 。

求：输出 v_L 。



二极管门电路

采用常规二极管模型分析。

（采用理想二极管模型分析）

v_A	v_B	D_1	D_2	v_L
0 ₀	0 ₀	导通	导通	0.7 ₀
0 ₀	3 ₁	导通	截止	0.7 ₀
3 ₁	0 ₀	截止	导通	0.7 ₀
3 ₁	3 ₁	导通	导通	3.7 ₁

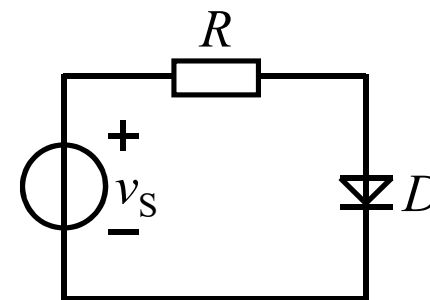
Ø 二极管（图解法）

ü 图解法的前提：

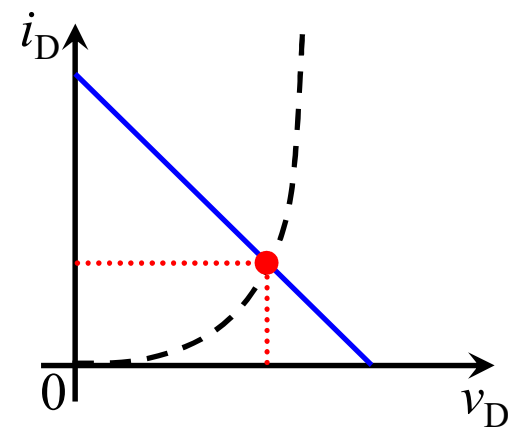
外电路（除器件外）的伏安特性曲线图；
器件自身的伏安特性曲线图。

ü 优点：直观、简单；

缺点：不精确。



$$v_D = v_S - i_D \cdot R$$



Ø 稳压二极管

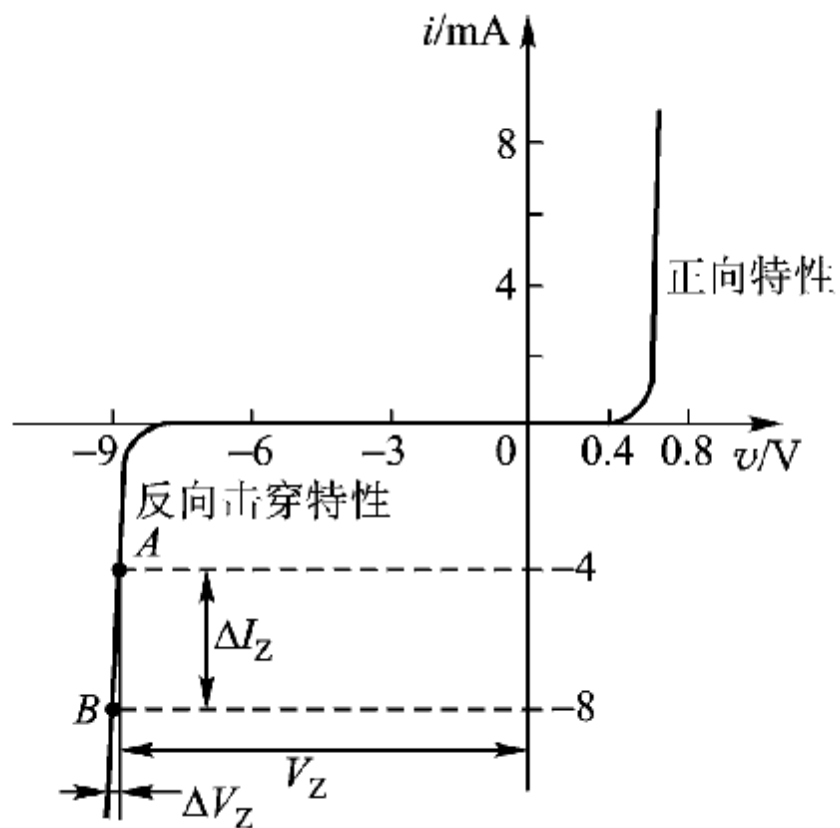
ü 主要参数:

稳定电压 V_Z ;

动态电阻 r_d ;

最大允许耗散功率 P_{Zmax} ;

温度系数

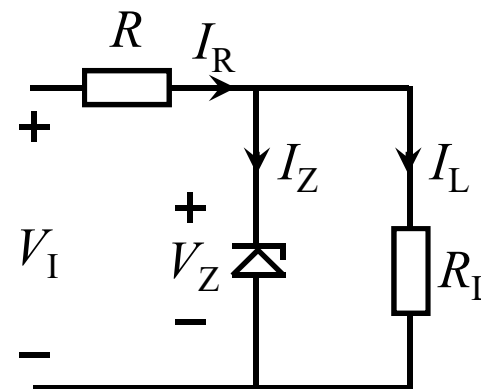


【例1.5】

右图所示电路。

已知： $V_I = 12\text{V}$ ， $R_L = 600\Omega$ ， $P_{Z\max} = 150\text{mW}$ ，
正常工作时 $V_Z = 6\text{V}$ ， $I_Z = 10\text{mA}$ 。

要求：（1）确定限流电阻 R ；
（2）若 R_L 变化，检验稳压管能否正常工作。



稳压管正常工作：（1）反向电压；（2）电流；（3）功率。

解：根据正常工作要求计算 R ：

$$I_R = I_Z + I_L = 20 \text{ mA}$$

$$R = \frac{V_I - V_Z}{I_R} = \frac{12 - 6}{20} = 300 \Omega$$

检验负载开路时稳压管的功耗：

$$I_Z = I_R - I_L = 20 \text{ mA}$$

$$P_Z = I_Z \cdot V_Z = 20 \times 6 = 120 \text{ mW} < P_{Z\max}$$

结论 ...

Ø 发光二极管

ü 器件符号：

ü 伏安特性与一般二极管相似；

开启电压 $1.3\sim 2.4\text{V}$ ，反压一般大于 3V ；



ü 由磷砷化镓（GaAsP）、磷化镓（GaP）等半导体制成的 PN 结正偏工作时，多子大量复合，释放出能量，其中一部分以光能的形式体现。

ü 光谱范围窄，光的波长与所用材料有关；

发光亮度与正向电流（毫安级）成正比。

ü 优点：功耗小，易于和集成电路匹配，驱动简单，响应时间快（点亮或熄灭 ns 级），寿命长，耐冲击等。

Ø 光电二极管

Ü 正常应用时：

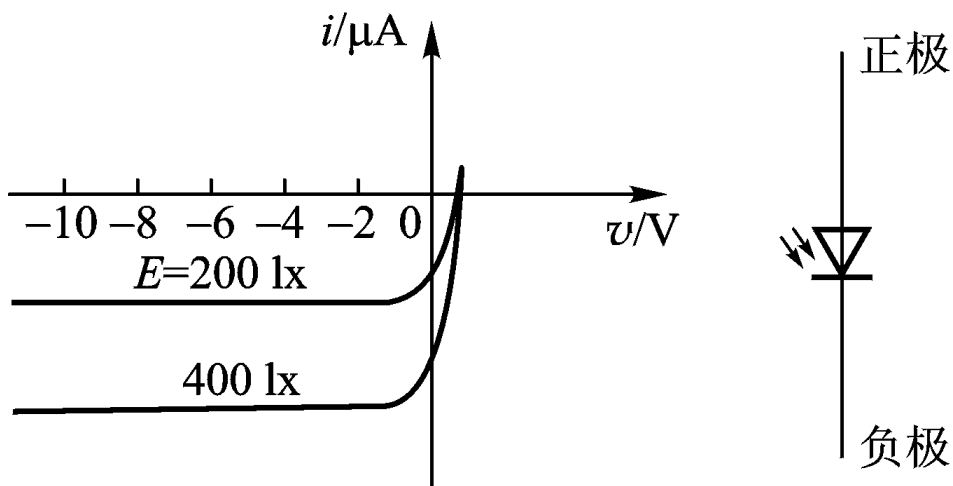
光电二极管工作在反向偏置状态；

无光照时只有很小的反向饱和电流 I_S （暗电流）；

有光照射时，光电二极管受光激发，产生大量电子—空穴对，形成较大的光生电流，且随光照强度的增加而增大。

Ü 特性要求：

线性性、 I_S 要求较大。



Ø 肖特基二极管

ü 内部有一个金属结面。

ü 器件符号:



ü 显著特点:

导通电压 (V_{on}) 很低, 仅为 0.3V 左右;

导通时存贮的非平衡少数载流子数量少, 关断时间很短, 工作频率高。

✓ 晶体三极管

ü 晶体三极管，简称晶体管、三极管。

ü 内部参与导电有自由电子、空穴两种极性载流子。

双极型晶体管（Bipolar Junction Transistor — BJT）

ü 分类：

材料：硅三极管、锗三极管；

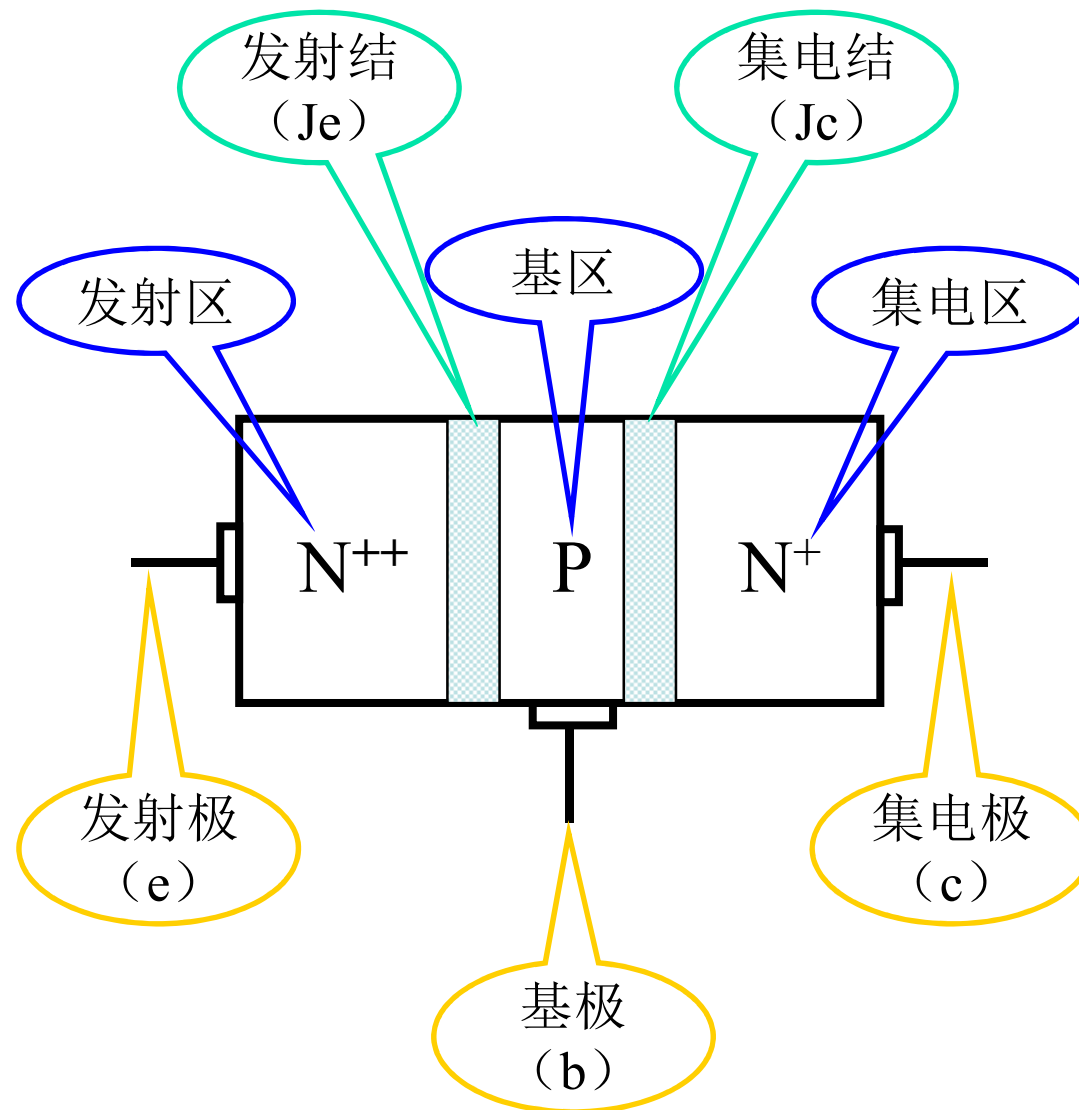
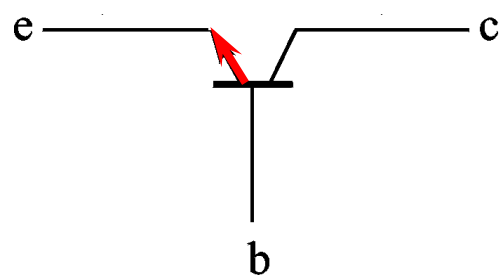
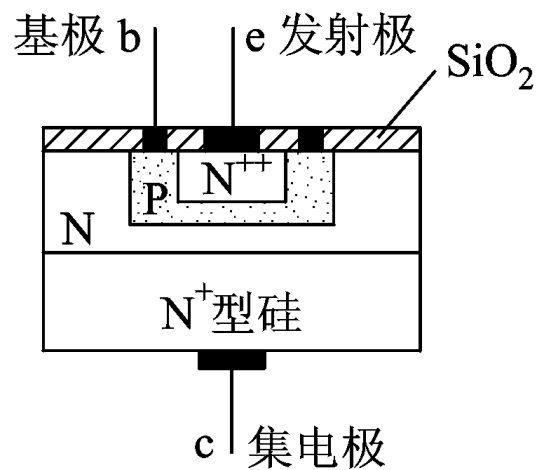
掺杂：NPN 型、PNP 型；

频率：高、低；

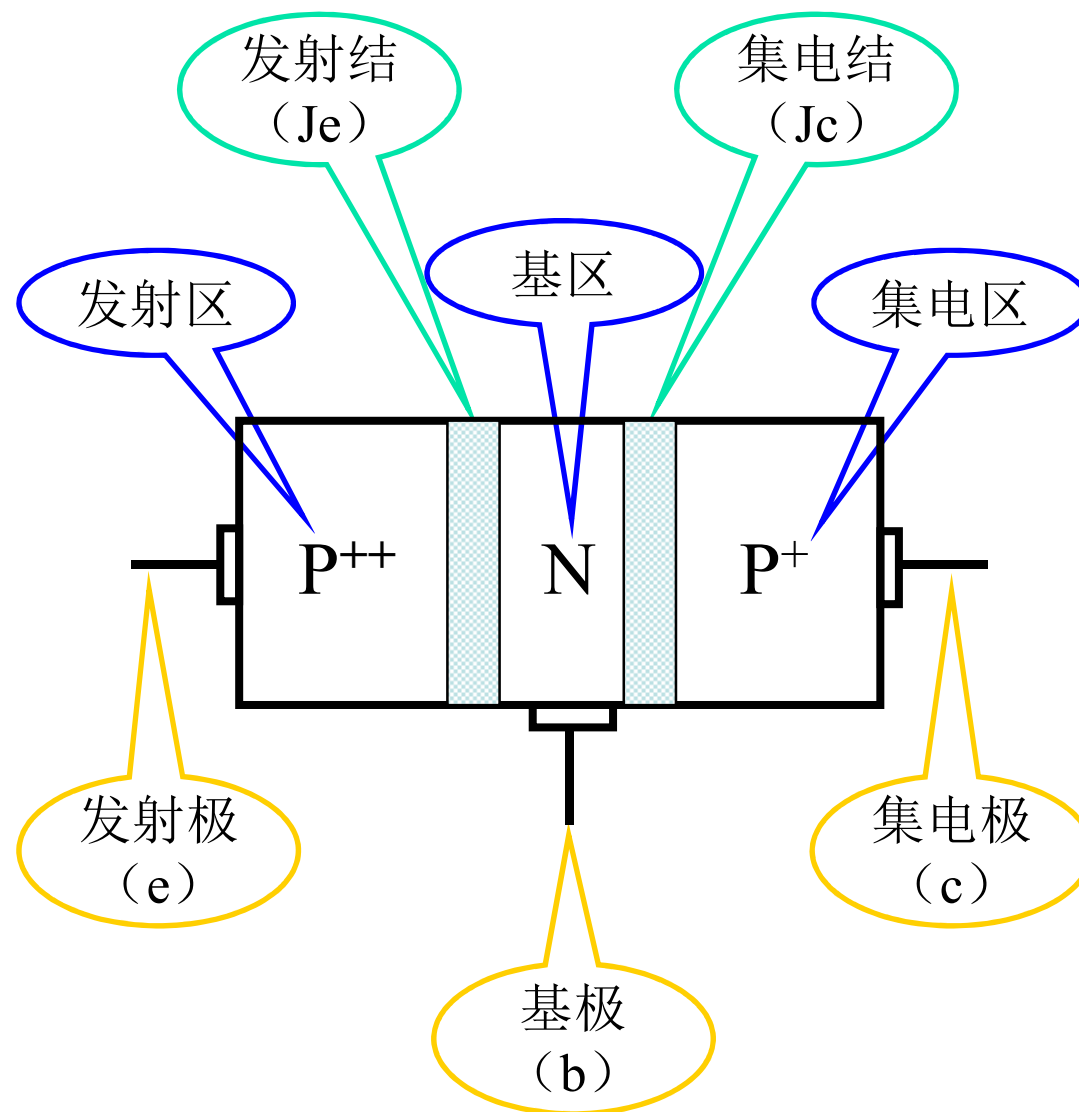
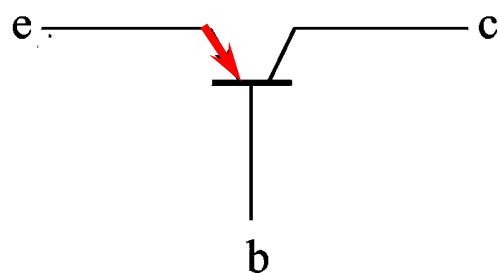
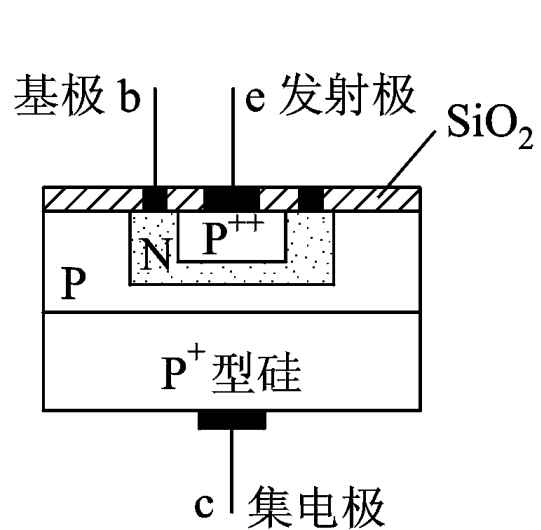
功率：大、中、小

...

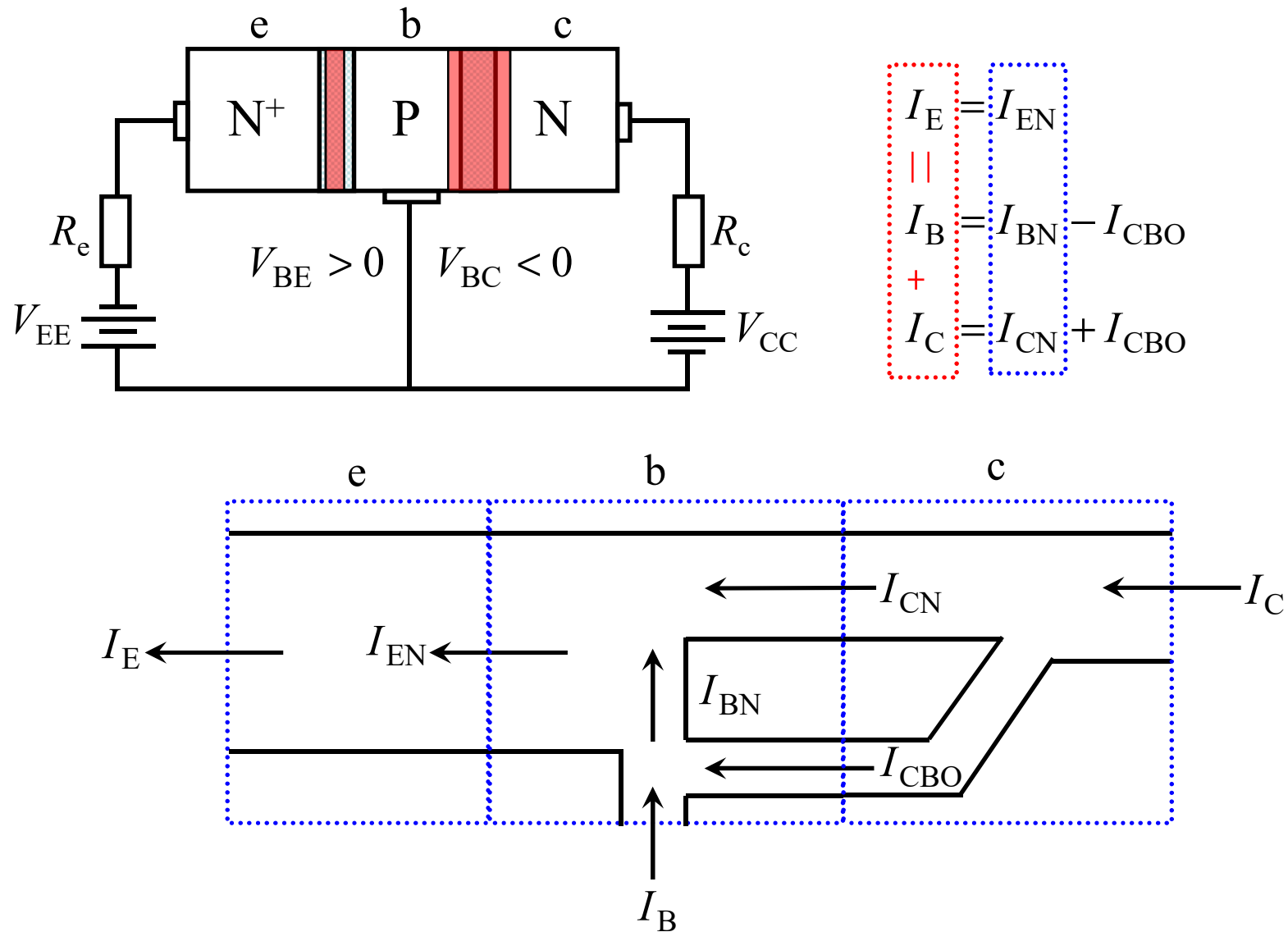
Ø 晶体三极管（NPN 型）



Ø 晶体三极管（PNP 型）



∅ 晶体三极管（电流分配）



Ø 晶体三极管（工作区域）

ü 四个工作区域：

ü 放大区的条件：

发射结正偏，集电结反偏。

$$I_E = I_C + I_B$$

Je	Jc	状态
反偏	反偏	截止
反偏	正偏	倒置
正偏	反偏	放大
正偏	正偏	饱和

Ø 晶体三极管（电路组态）

ü 放大系统（电路）的组成：

（输入）信号源、（输出）负载、（供电）电源、放大电路。

ü 三种基本组态：

共基极（CB、共基组态）；

共发射极（CE、共射组态）；

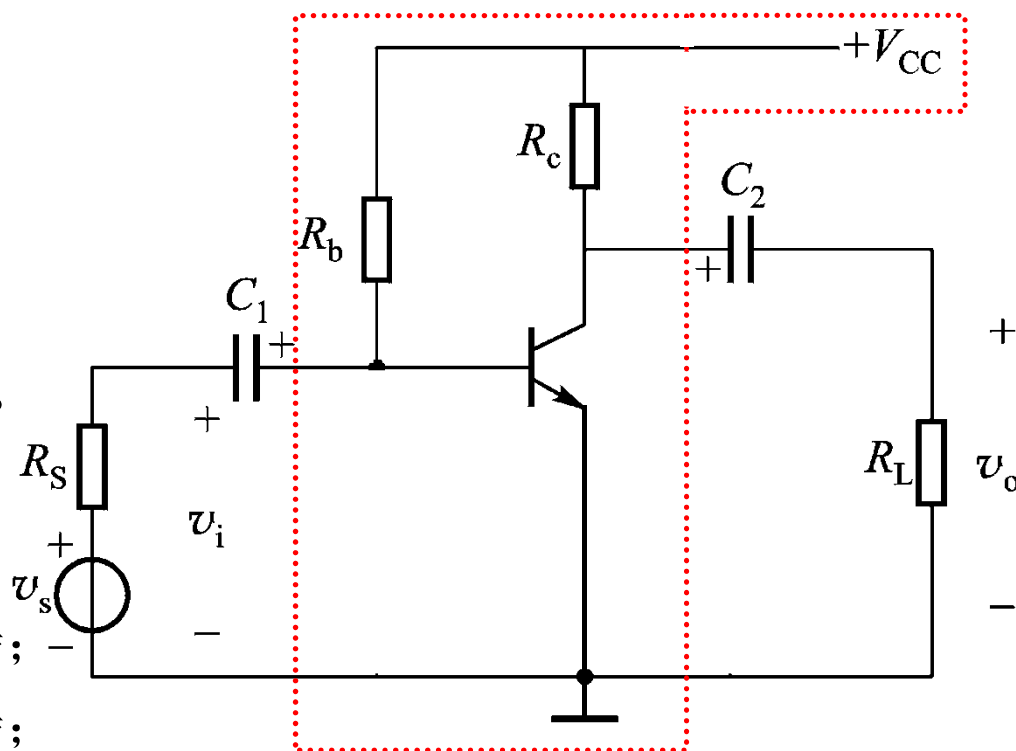
共集电极（CC、共集组态）。

ü 组态区分依据：

一极连输入端，一极连输出端；

第三极作为输入输出的公共端；

“公共的极”即为组态形式。



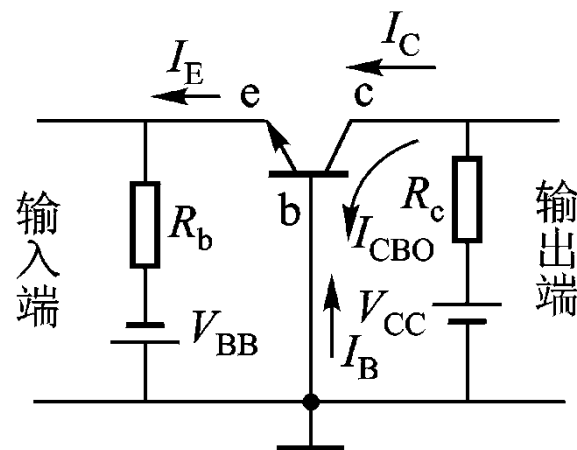
Ø 晶体三极管（共基组态）

ü 右图所示电路。

输入：e

输出：c

公共端：b



ü 共基直流电流放大倍数： $\bar{a} = \frac{I_{CN}}{I_{EN}}$

（e 区自由电子能到达 c 区的比例，一般为0.95 ~ 0.995）

$$I_C \approx \bar{a} I_E$$

$$I_B \approx (1 - \bar{a}) I_E$$

一定条件下，输入/输出电流成线性关系，三极管是一种电流控制器件。

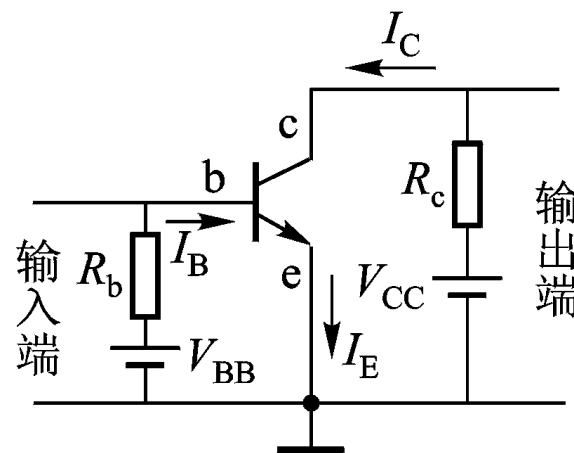
Ø 晶体三极管（共射组态）

ü 右图所示电路。

输入：b

输出：c

公共端：e



ü 共射直流电流放大倍数： $\bar{\beta} = \frac{I_{CN}}{I_{BN}}$

（e 区自由电子能到达 c 区，与被 b 区复合的比例，一般比较大）

$$\begin{aligned} I_C &\approx \bar{a} I_E & I_C &\approx \bar{\beta} I_B & \Rightarrow \bar{a} &= \frac{\bar{b}}{1 + \bar{b}}, & \bar{b} &= \frac{\bar{a}}{1 - \bar{a}} \\ I_B &\approx (1 - \bar{a}) I_E & I_E &\approx (1 + \bar{\beta}) I_B \end{aligned}$$

一定条件下，输入/输出电流成线性关系，三极管是一种电流控制器件。

Ø 晶体三极管（共集组态）

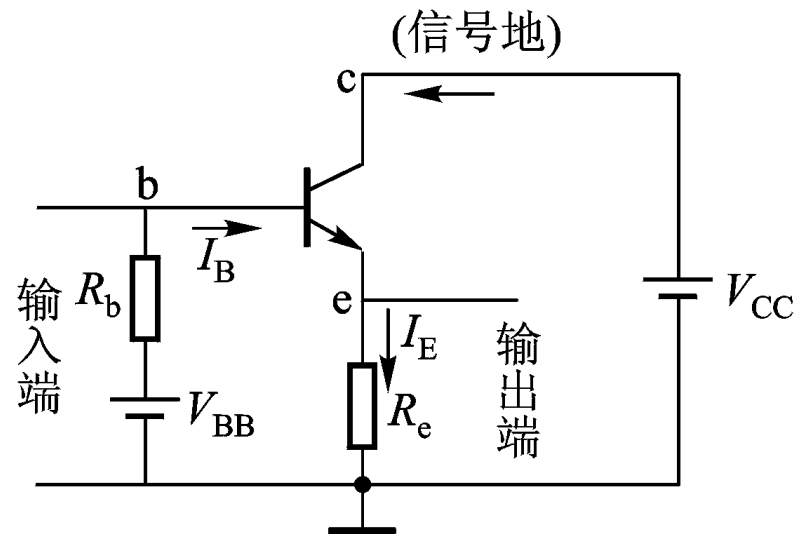
ü 右图所示电路。

输入：b

输出：e

公共端：c

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



一定条件下，输入/输出电流成线性关系，三极管是一种电流控制器件。

❖ 晶体三极管（伏安特性）

☺ 通过专用仪器（如晶体管特性图示仪），可直接显示伏安特性曲线。

☺ 共射极输入特性： $i_B = f(v_{BE})|_{v_{CE}=C}$

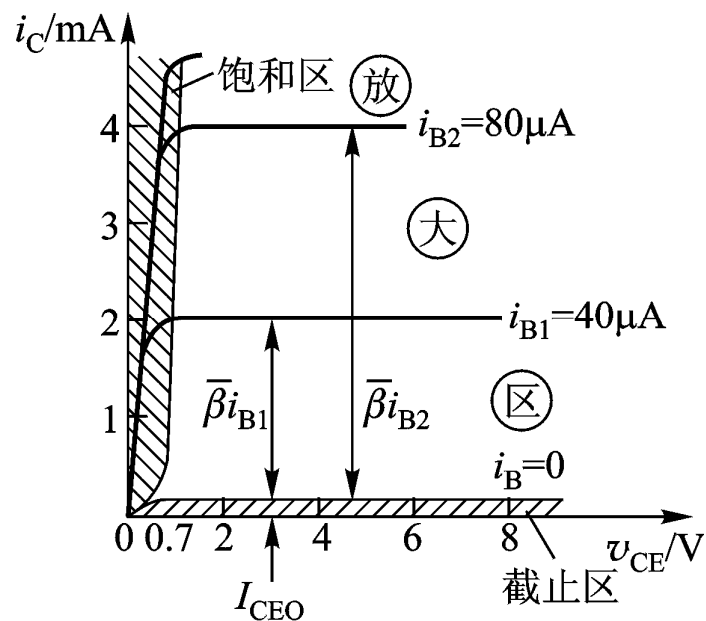
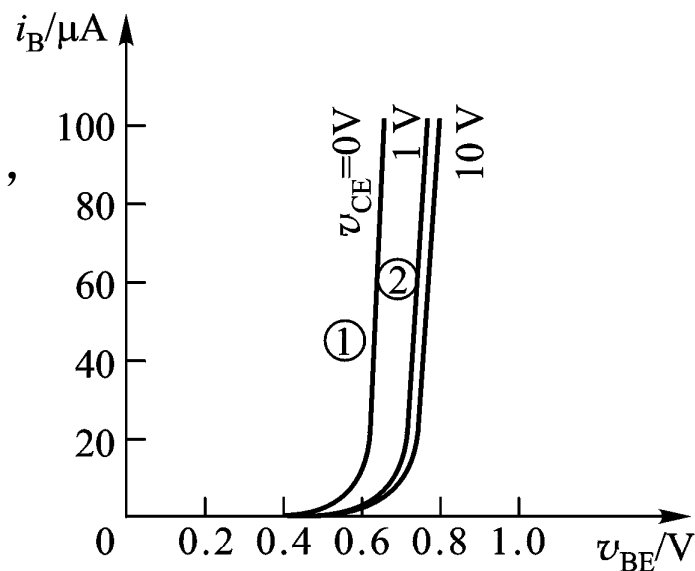
$V_{CE} = 0V$ 时

V_{CE} 增长时

$V_{CE} > 1V$ 后

☺ 共射极输出特性： $i_C = f(v_{CE})|_{i_B=C}$

饱和区、放大区、截止区



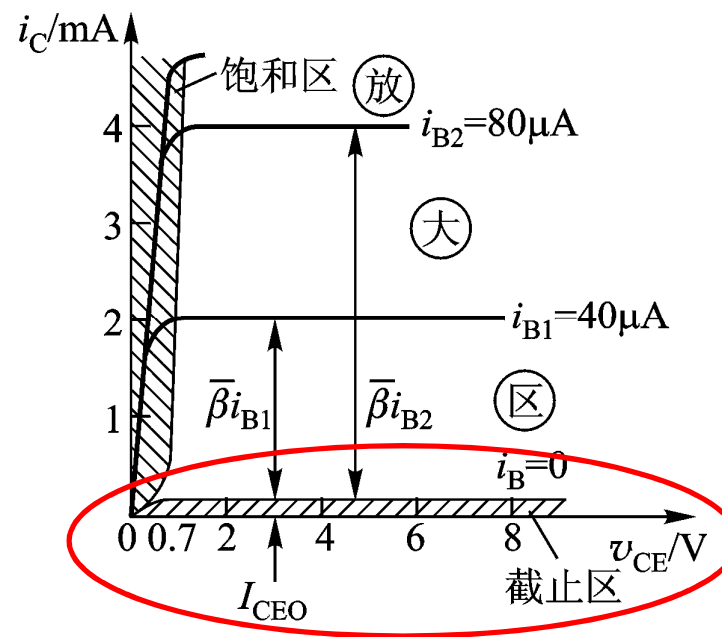
Ø 晶体三极管（截止区）

ü 截止区的判断依据：

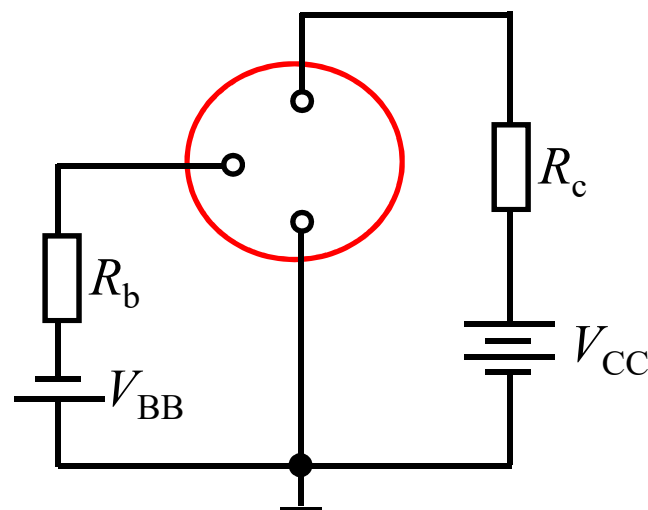
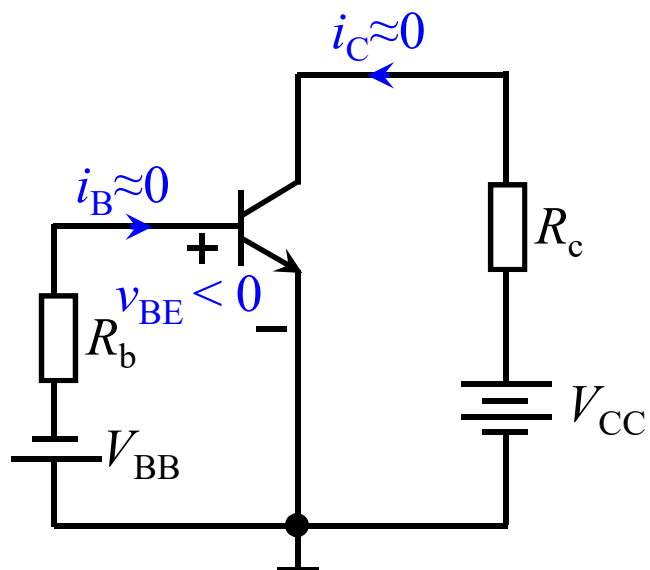
发射结、集电结均为反偏；

$(V_{BE} \leq 0, V_{BC} < 0, I_B \approx 0, I_C \approx 0)$

三极管无放大能力。



ü 截止区的电路模型



Ø 晶体三极管（饱和区）

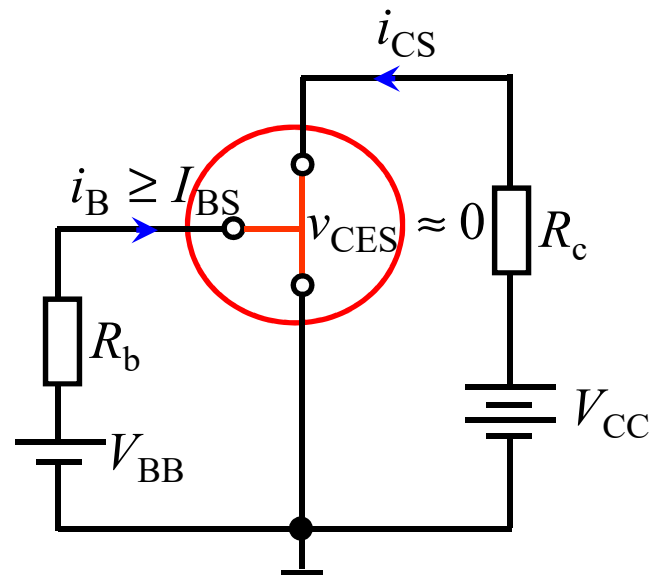
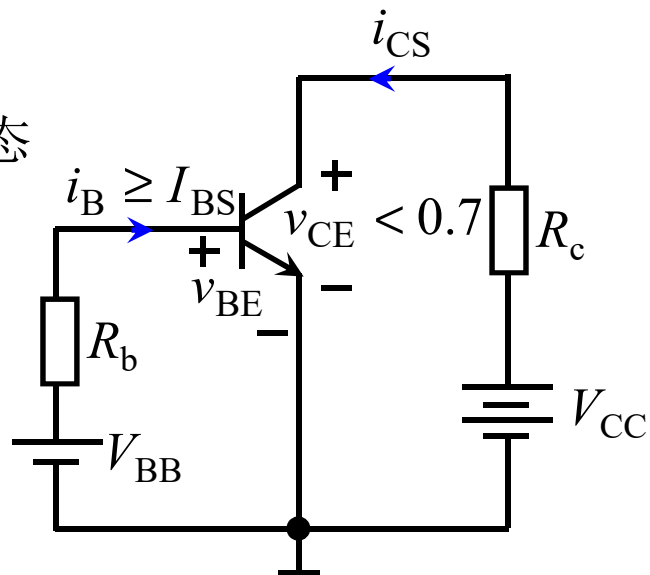
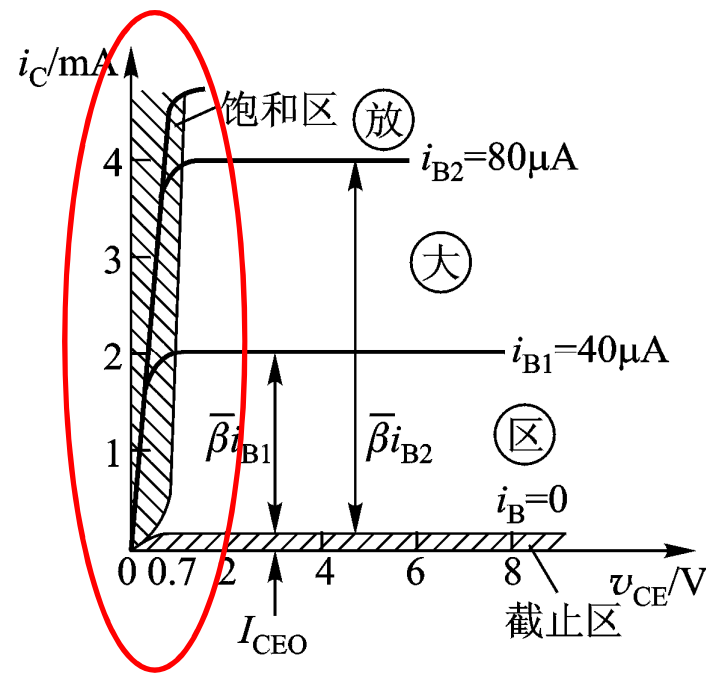
ü 饱和区的判断依据：

发射结、集电结均为正偏。

ü 饱和区特征

ü 饱和压降、临界饱和状态、深度饱和状态

ü 深度饱和状态时的电路模型



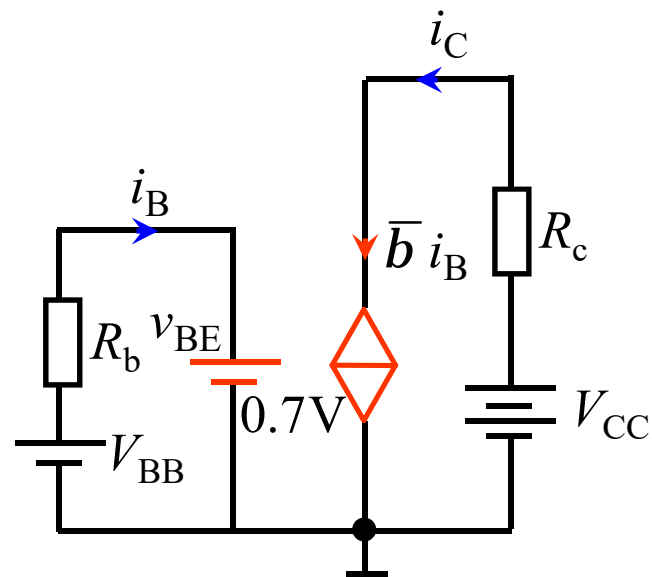
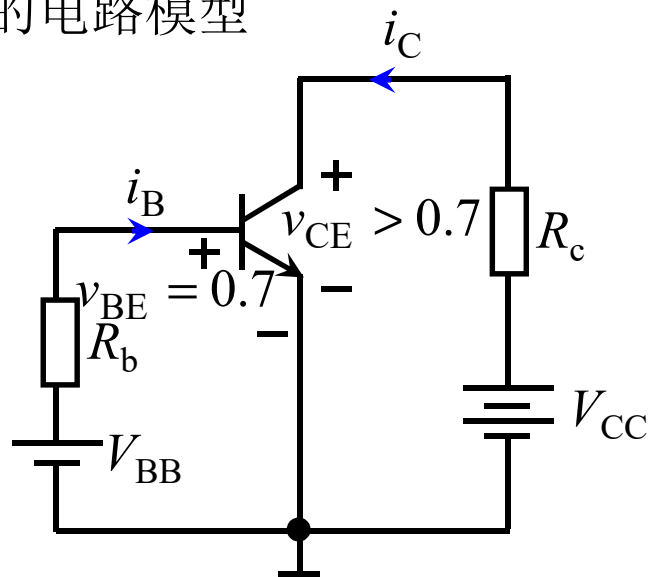
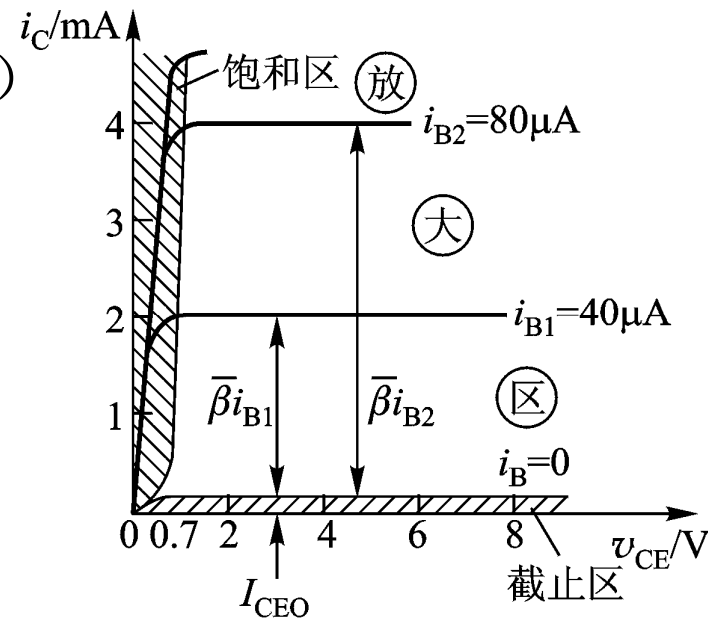
Ø 晶体三极管（放大区、恒流区）

ü 放大区的判断依据：

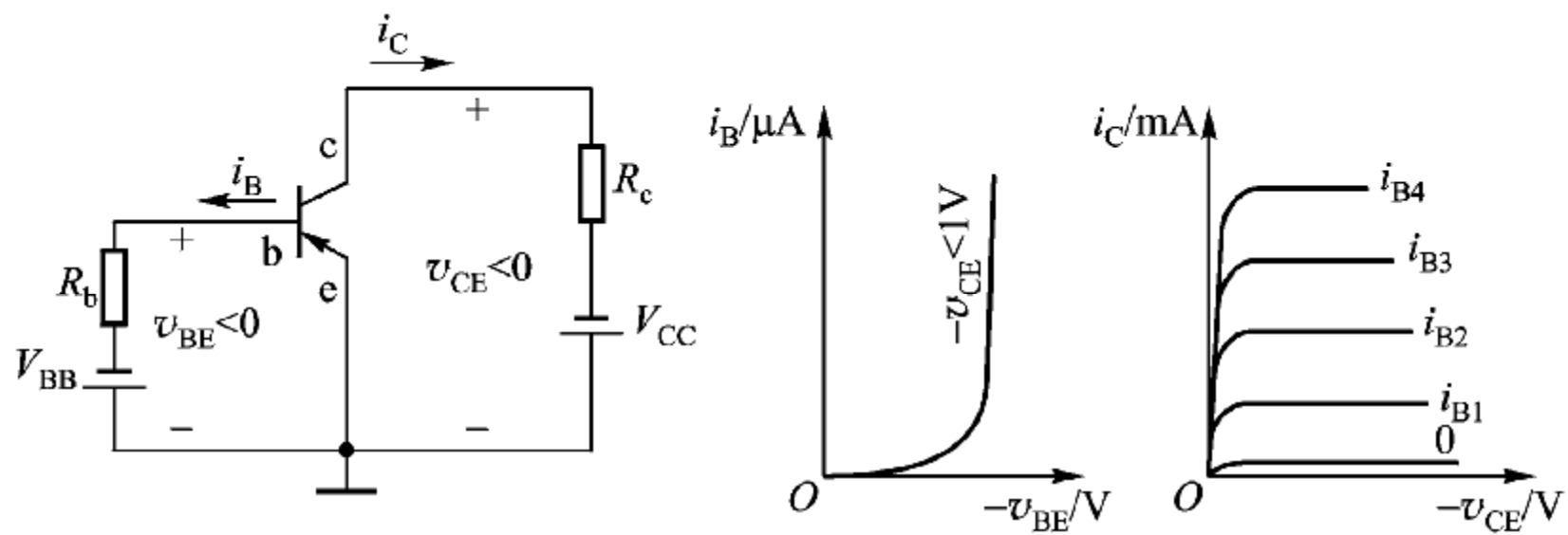
发射结正偏、集电结反偏。

ü 放大区特征

ü 放大区的电路模型



Ø 晶体三极管（PNP 型 伏安特性）



Ø 晶体三极管（电路分析）

ü 原则：以区域为依据，代入不同的模型。

ü 分析判断步骤：

（1）判断是否为截止状态？

依据：发射结是否反偏， I_B 是否小于 0 等...

（2）按放大区模型计算；

若： $V_{CE} > 0.7V$ ，说明的确为放大状态；

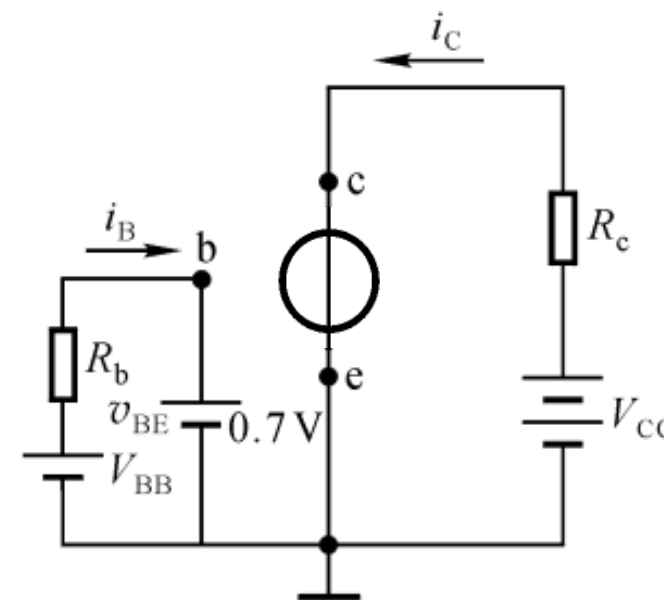
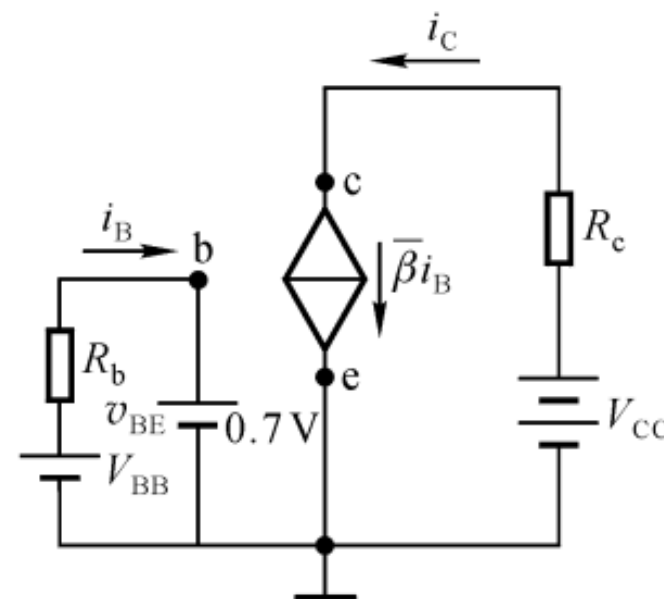
且： $I_C = \bar{\beta} I_B$

（2）按临界饱和区模型计算；

若： $I_C < \bar{\beta} I_B$ ，说明的确为饱和状态；

然后按 $V_{CES} = 0.3V$ 再重新计算。

（3）若第 2 步模型不符，需重新计算。



【例1.6-1】

右图所示电路。

已知： $V_B = 5.7\text{V}$ ， $V_C = 15\text{V}$ ， $R_b = 100\text{k}\Omega$ ， $R_c = 2\text{k}\Omega$ ， $\beta = 100$ 。

求： 电路参数。

解： 首先判断出非截止区。

按放大区模型代入， 计算得：

$$V_{BE} = 0.7\text{V}$$

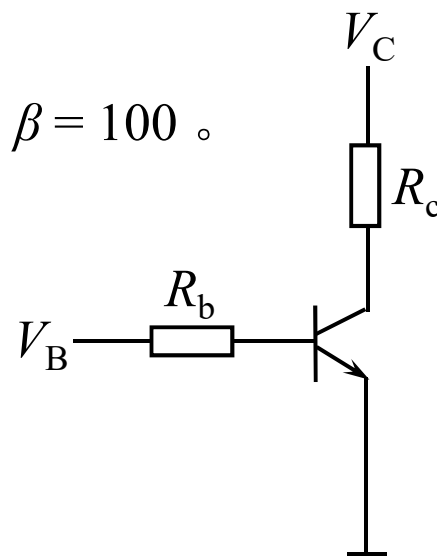
$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_b} = \frac{5.7 - 0.7}{100\text{k}} = 50\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 50\mu = 5\text{mA}$$

$$V_{CE} = V_C - I_C R_c = 15 - 5\text{m} \times 2\text{k} = 5\text{V}$$

经检验， 符合放大区条件。

结论...

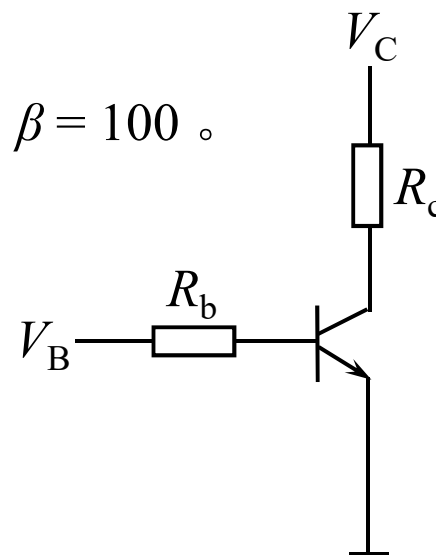


【例1.6-2】

右图所示电路。

已知： $V_B = 5.7\text{V}$ ， $V_C = 15\text{V}$ ， $R_b = 50\text{ k}\Omega$ ， $R_c = 2\text{k}\Omega$ ， $\beta = 100$ 。

求： 电路参数。



解： 首先判断出非截止区。

按放大区模型代入，计算得：

$$V_{BE} = 0.7\text{V}$$

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_b} = \frac{5.7 - 0.7}{50\text{k}} = 100\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 100\mu = 10\text{mA}$$

$$V_{CE} = V_C - I_C R_c = 15 - 10\text{mA} \times 2\text{k} = -5\text{V}$$

经检验，不符合放大区条件。

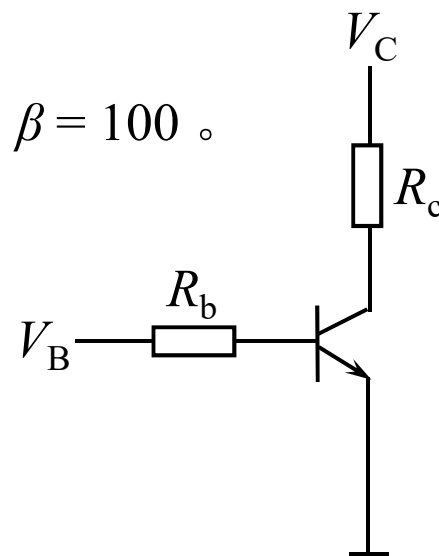
需按饱和区模型重新计算 ...

【复例1.6-2】

右图所示电路。

已知： $V_B = 5.7\text{V}$ ， $V_C = 15\text{V}$ ， $R_b = 50\text{ k}\Omega$ ， $R_c = 2\text{k}\Omega$ ， $\beta = 100$ 。

求： 电路参数。



解： 首先判断出非截止区。

按临界饱和区模型代入，计算得：

$$V_{BE} = 0.7\text{V}$$

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_b} = \frac{5.7 - 0.7}{50\text{k}} = 100\mu\text{A}$$

$$\beta I_B = 100 \times 100\mu = 10\text{mA}$$

$$I_C = (V_C - V_{CE}) / R_c = (15 - 0.7) / 2\text{k} = 7.15\text{mA}$$

经检验，符合饱和区条件。

则： $I_C = (15 - 0.3) / 2\text{k} = 7.35\text{mA}$

结论 ...

Ø 晶体三极管（主要参数）

Ü 电流放大系数（倍数）

直流共射电流放大系数： $\bar{b} = \frac{I_C}{I_B}$

交流共射电流放大系数： $b = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

直流共基电流放大系数： $\bar{a} = \frac{I_C}{I_E}$

交流共基电流放大系数： $a = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$

Ø 晶体三极管（主要参数）

ü 极间反向电流

（1）集电结反向饱和电流 I_{CBO}

发射极开路时，集电极与基极间的反向饱和电流；
取决于温度和少子浓度；

（小功率硅管，小于 0.1；锗管在几至十几 μA ）

（2）穿透电流 I_{CEO}

基极开路，集射间加上一定反向电压时，从集电极穿过基区流入发射极的反向饱和电流；

是衡量三极管性能稳定与否的重要参数之一，值愈小愈好；

（小功率硅管在几 μA 以下，小功率锗管约在几十至几百 μA ）

Ø 晶体三极管（主要参数）

ü 极限参数

（1）集电极最大允许电流 I_{CM}

电流放大系数 β 下降至正常值 2/3 时的 I_C 值。

（2）集电极最大允许功率损耗 P_{CM} （等于 $I_C \times V_{CE}$ ）

取决于管子所允许的温升，与散热条件有关；

（硅管最高结温为 150°C ，锗管为 75°C ，超过这个数值将导致管子性能迅速变坏，以至烧毁）

（3）反向击穿电压 $V_{(BR)EBO}$

集电极开路， J_e 的反向击穿电压，几~十几伏。

（4） $V_{(BR)CBO}$

发射极开路， J_c 的反向击穿电压，通常为几十伏，高反压管达上千伏。

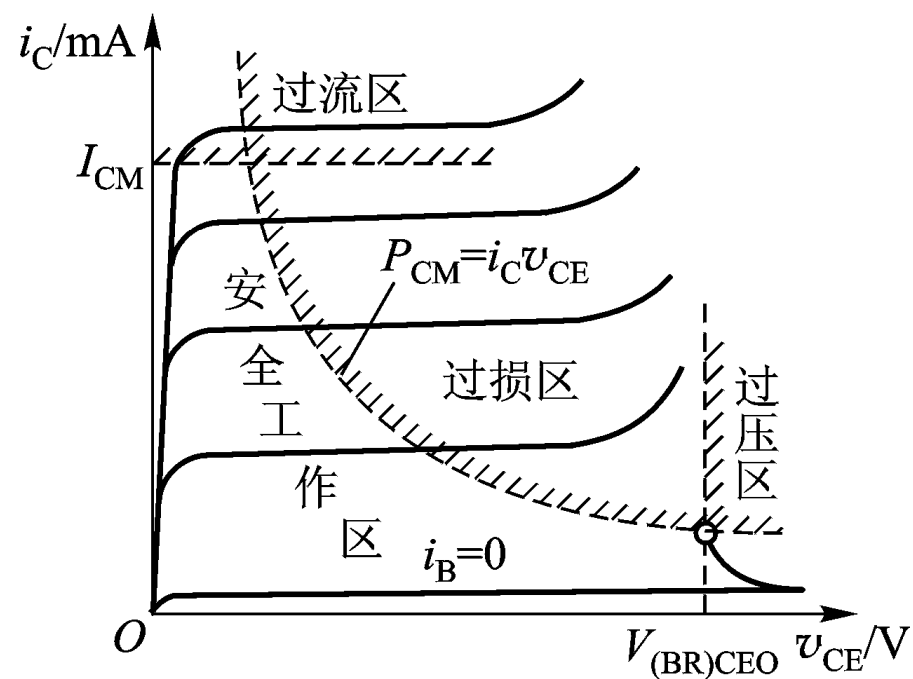
（5） $V_{(BR)CEO}$

基极开路， $J_C \sim J_E$ 间的反向击穿电压，通常比 $V_{(BR)CBO}$ 小。

Ø 晶体三极管（主要参数）

ü 安全工作范围

根据三个极限参数（ P_{CM} 、 I_{CM} 和 $V_{(BR)CEO}$ ），在输出特性曲线上画出安全工作区。

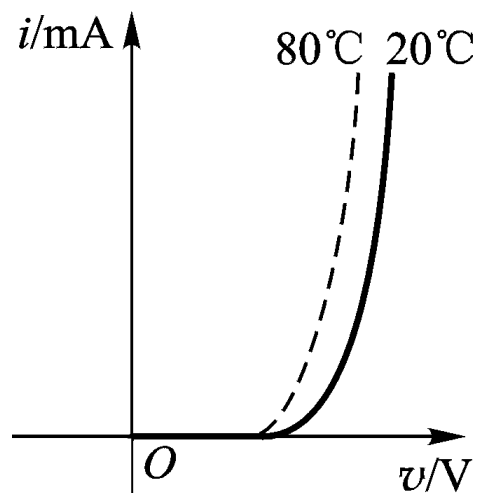


Ø 晶体三极管（主要参数）

ü 温度稳定性

（1）输入特性与温度

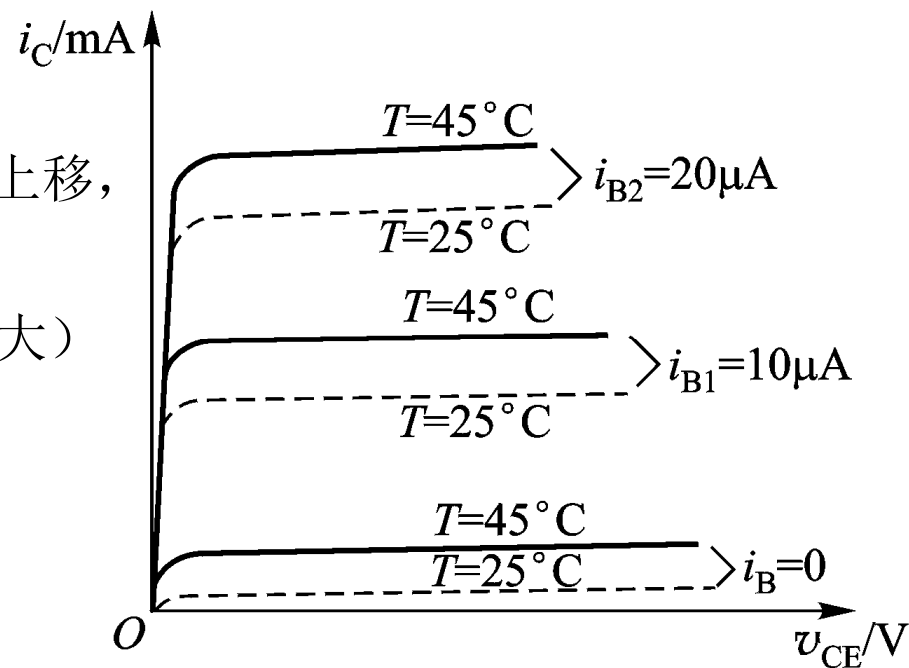
（温度升高，发射结正向压降 V_{BE} 减小，温度系数约 $-2.5\text{mV}/^\circ\text{C}$ ）



（2）输出特性与温度

（温度升高，整簇输出特性曲线都上移，曲线间距拉大， β 增大）

（ I_{CBO} 、 I_{CEO} 等均随温度升高而增大）



✓ 场效应管

ü 场效应晶体三极管，简称场效应管（Field Effect Transistor — FET）；
利用极间电压产生的电场效应来控制电流。

ü 工作电流主要由多数载流子的漂移运动形成。（单极型晶体管）

ü 优点：输入阻抗高、热稳定性好、噪声低、抗辐射能力强、体积小、
功耗低、制造工艺简单、易于大规模集成。

ü 分类：

场效应管	{	绝缘栅型	{	N 沟道	{	增强型
						耗尽型
				P 沟道	{	增强型
						耗尽型
	{	结型	{	N 沟道		
				P 沟道		

Ø N 沟道 增强型 绝缘栅型 场效应管

ü 基本结构:

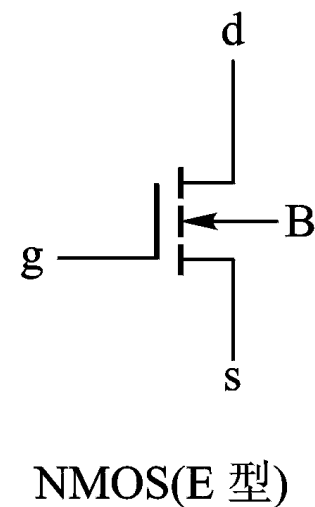
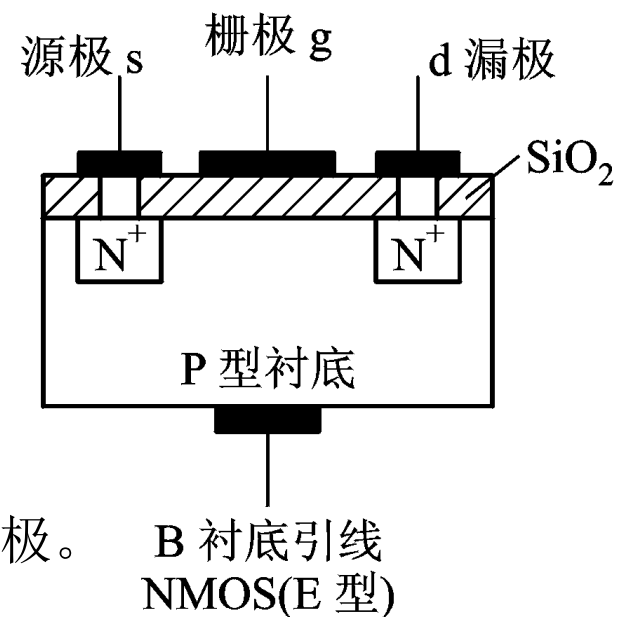
两个 N⁺ 型区域，加衬底 P 型区域，
加 SiO₂ 绝缘层，再加铝极；

MOS (Metal – Oxide – Semiconductor) ;

源 (Source)、漏 (Drain)、栅 (Gate) 三个极。

(场效应管的栅极与其它电极绝缘)

ü 器件符号:



Ø N 沟道 增强型 绝缘栅型 场效应管（工作原理）

ü $v_{GS} = 0$ 时：

漏源间只是两个反向串联的 PN 结；

漏 ~ 源间为高阻；

无导电能力。

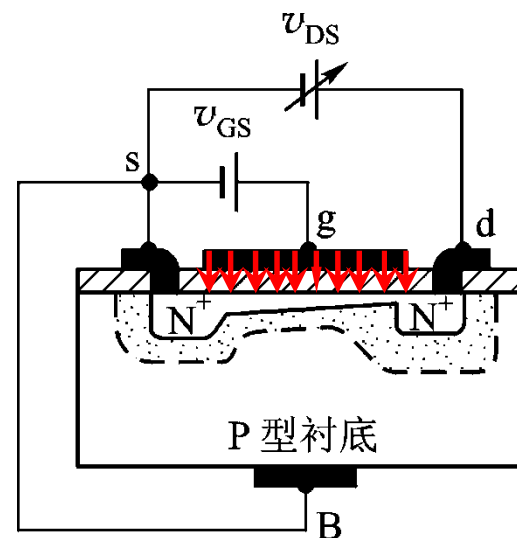
ü $v_{GS} > 0$ 时：

栅极与衬底之间将产生一个垂直电场；

P 型衬底区，在靠近漏 ~ 源间的表面将出现：电子层（反型层）；

两个 N+ 区连通，形成 N 型的导电沟道；漏 ~ 源间为低阻；

v_{GS} 越大，导电沟道越厚，等效电阻越小，则导电能力增强。



ü 开启电压 $V_{GS(th)}$ ：开始形成导电沟道所需的最小栅 ~ 源电压（ V_T ）。

Ø N 沟道 增强型 绝缘栅型 场效应管（工作机理）

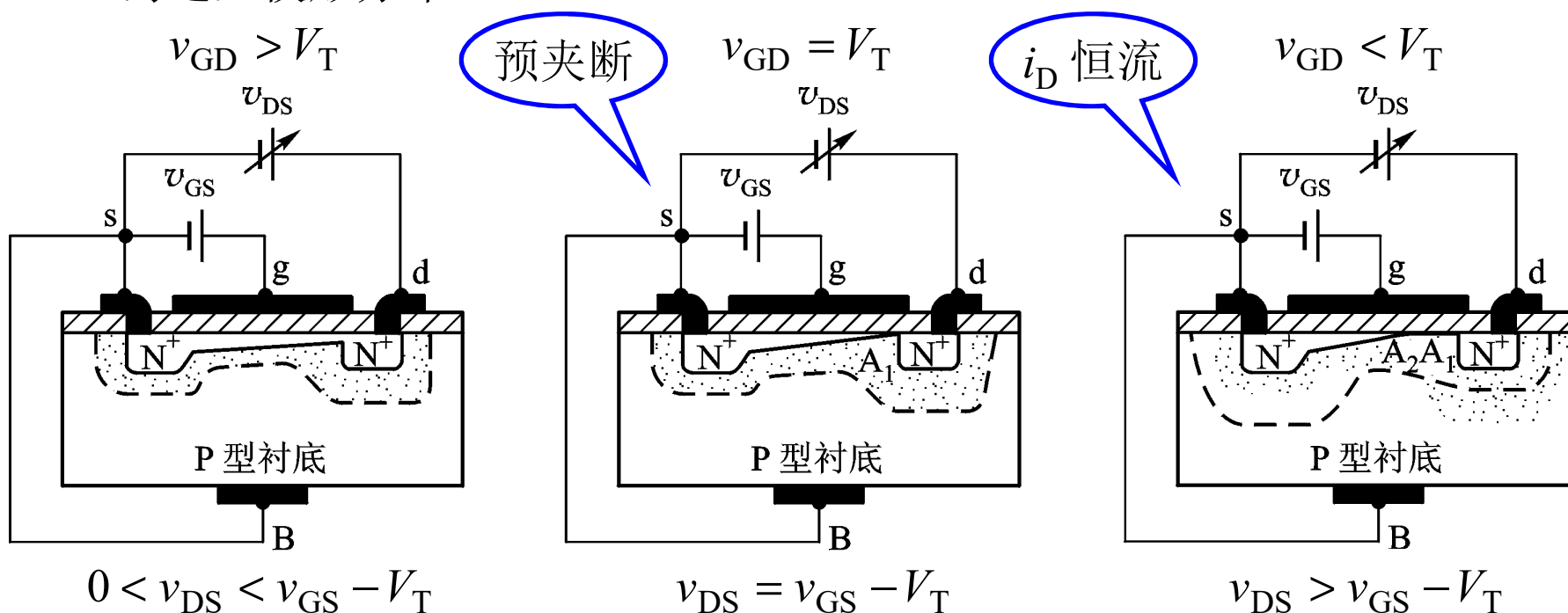
令 $v_{GS} > V_T$ ，并保持恒定，同时加上 v_{DS} ：

产生漏～源电流 i_D ；

i_D 沿沟道方向产生电压降，使沟道上的电场产生不均匀分布；

v_{GS} 最大， v_{GD} 最小（ $v_{GD} = v_{GS} - v_{DS}$ ）；

沟道呈楔形分布。



Ø N 沟道 增强型 绝缘栅型 场效应管（伏安特性）

ü 输出特性（漏极特性）： $i_D = f(v_{DS}) \Big|_{v_{GS}=\text{常数}}$

可变电阻区：
（导电沟道被预夹断之前） $R_{DS} = \frac{v_{DS}}{i_D} \Big|_{v_{GS}=\text{常数}}$

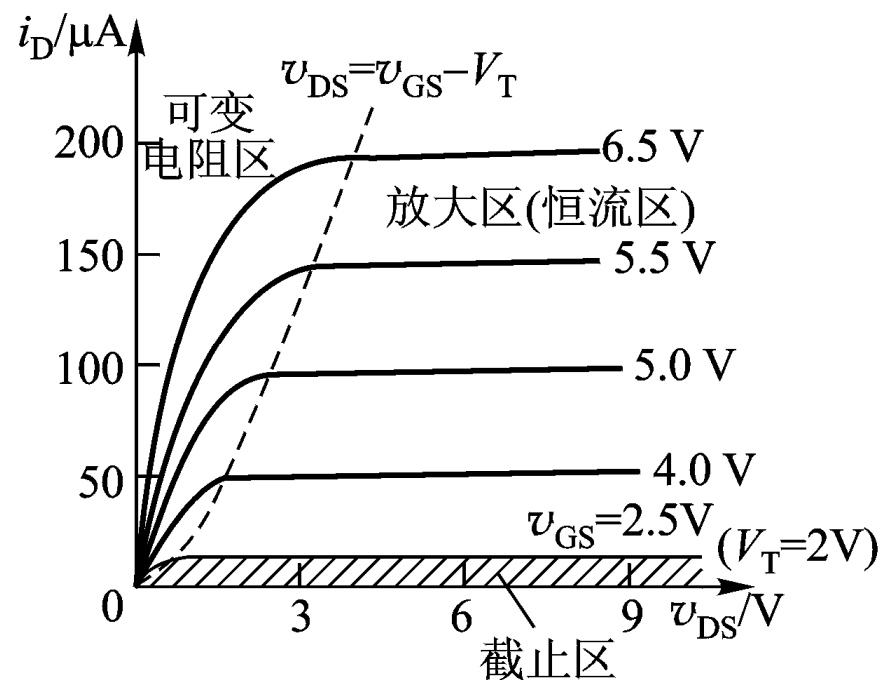
$$v_{GS} > V_T, \quad v_{GS} - v_{DS} > V_T$$

放大区、恒流区、饱和区：
（导电沟道被夹断后）

$$v_{GS} > V_T, \quad v_{GS} - v_{DS} \leq V_T$$

截止区：
（无导电沟道）

$$v_{GS} < V_T, \quad i_D \approx 0$$

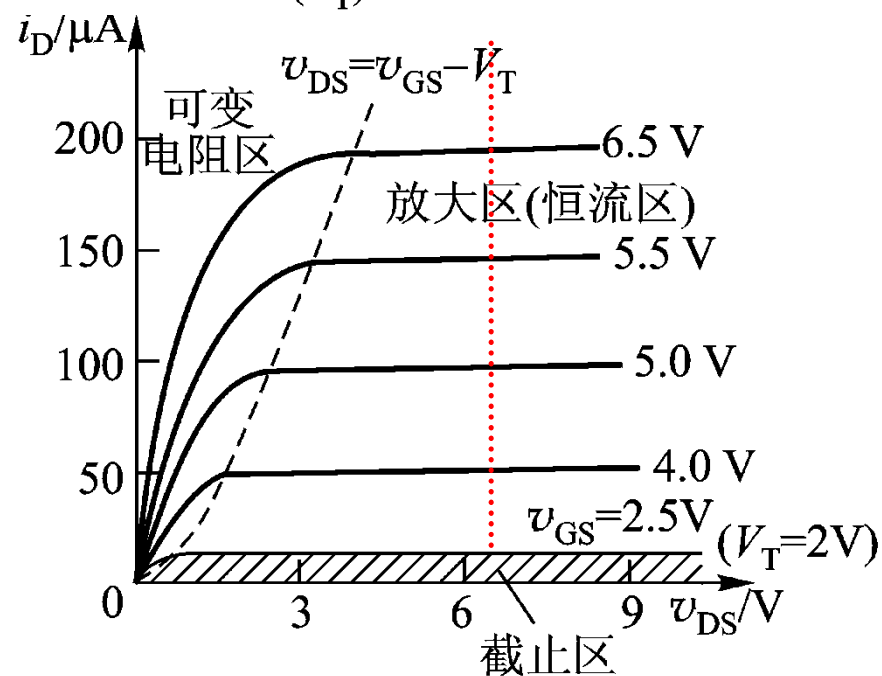
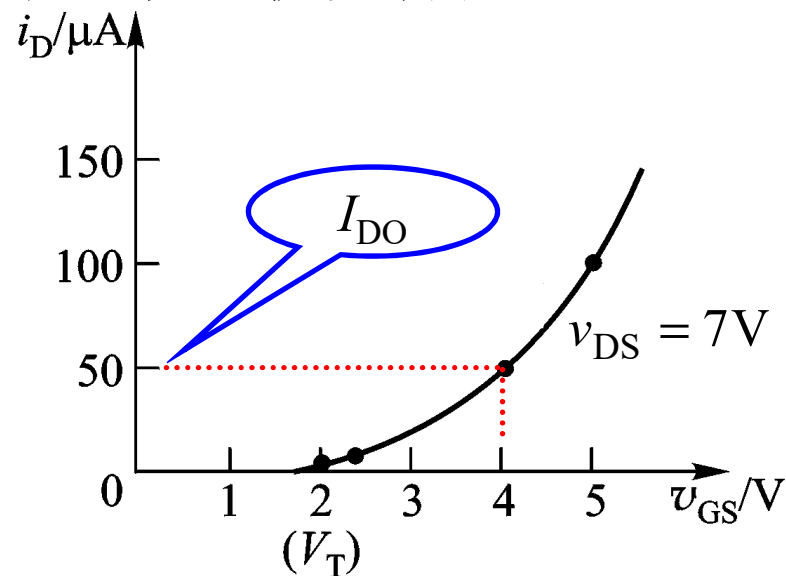


Ø N 沟道 增强型 绝缘栅型 场效应管（伏安特性）

☺ 转移特性: $i_D = f(v_{GS}) \Big|_{v_{DS}=\text{常数}}$

$$i_D = I_{DO} \left(\frac{v_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2$$

I_{DO} 是 $v_{GS} = 2V_T$ 时的漏极电流。

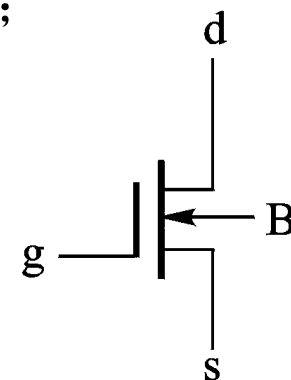


Ø N 沟道 耗尽型 绝缘栅型 场效应管（工作机理）

ü 制造过程中，已在 SiO_2 绝缘层中掺入了大量的 K^+ 、 Na^+ ；

ü 当 $v_{\text{GS}} = 0$ 时：

依靠正离子的作用，P 型衬底表面能感应出 N 型反型层，将两个 N+ 型区域连通，形成原始的 N 型导电沟道。



ü 当 $v_{\text{GS}} > 0$ (v_{DS} 保持一定值) 时：

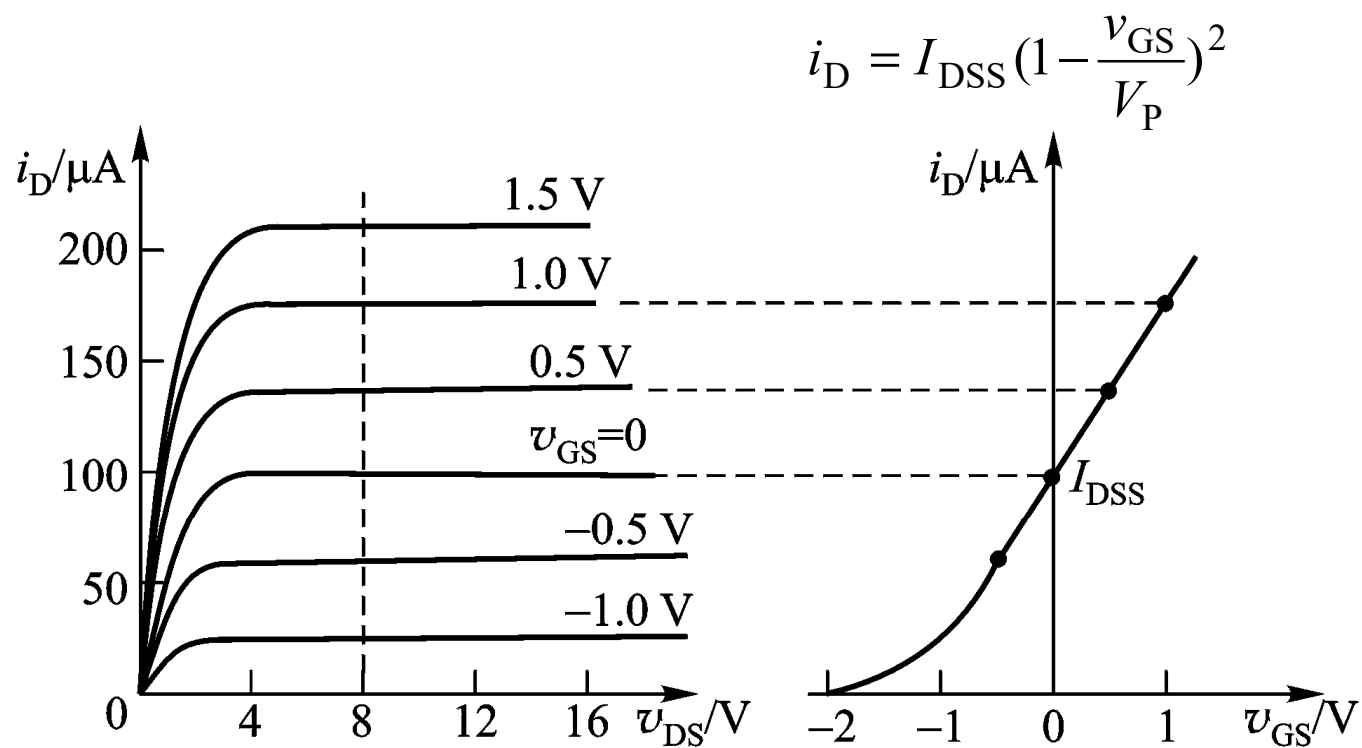
NMOS(D 型)

v_{GS} 越大，导电沟道越厚，等效电阻越小，导电能力增强；
若减少 v_{GS} ，导电沟道将变薄。

ü 夹断电压 $V_{\text{GS(off)}}$ ：使导电沟道消失所需的最小栅～源电压 (V_{p})。
(沟道被夹断， $i_{\text{D}} \approx 0$ ，场效应管截止)

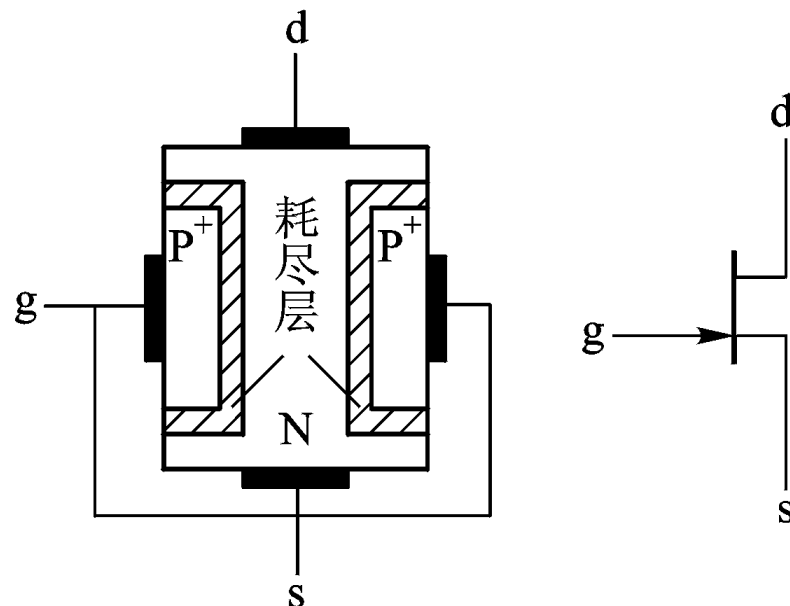
❌ N 沟道 耗尽型 绝缘栅型 场效应管（伏安特性）

I_{DSS} 是 $v_{GS} = 0$ 时的饱和漏极电流。



Ø N 沟道 结型 场效应管

ü 基本结构与符号：
(JFET)



ü 工作原理：

在 $v_{GS} = 0$ 时，存在原始的导电沟道，类似于耗尽型；

正常工作时，两个 PN 结必须反偏；

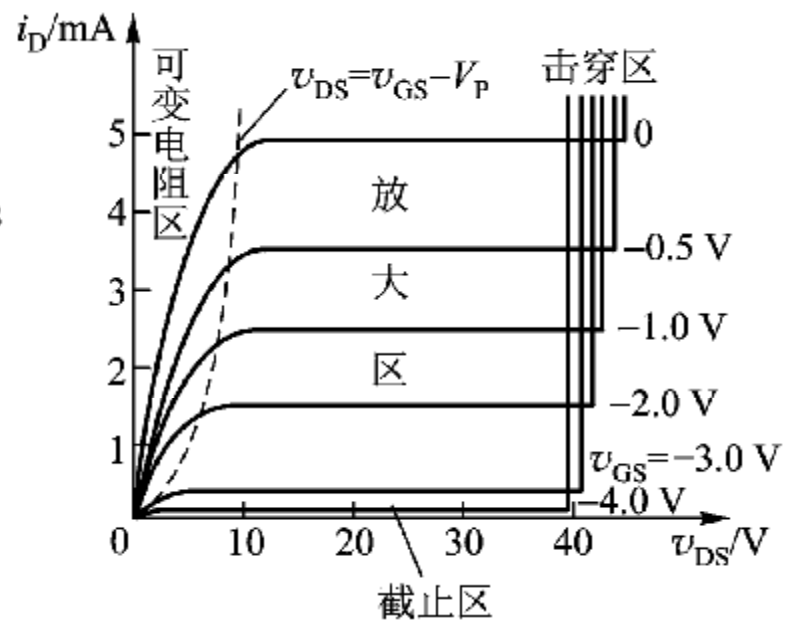
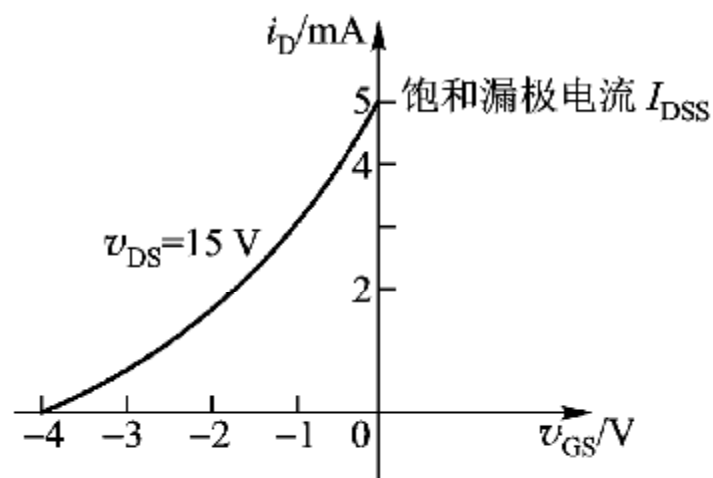
通过 v_{GS} 改变半导体内耗尽层厚度（沟道的截面积）来控制 i_D 。

（体内场效应器件）

❶ N 沟道 结型 场效应管（伏安特性）

I_{DSS} 是 $v_{GS} = 0$ 时的饱和漏极电流。

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_P}\right)^2$$



Ø 场效应管（主要参数）

Ü 直流参数

增强型管开启电压 $V_{GS(th)}$ (V_T)、耗尽型管夹断电压 $V_{GS(off)}$ (V_P)；

耗尽型管在 $v_{GS} = 0$ 时的饱和漏极电流 I_{DSS} ；

直流输入电阻 $R_{GS(DC)}$ ($v_{DS} = 0$ 时，栅源电压 v_{GS} 与栅极电流 i_G 之比)。

Ü 交流参数

低频跨导（互导） g_m （转移特性曲线的斜率）： $g_m = \frac{\Delta i_D}{\Delta v_{GS}} \Big|_{v_{DS}=\text{常数}}$

交流输出电阻 r_{ds} ： $r_{ds} = \frac{\Delta v_{DS}}{\Delta i_D} \Big|_{v_{GS}=\text{常数}}$

Ü 极限参数

最大漏源电压 $V_{(BR)DS}$ （漏极附近发生雪崩击穿时的 v_{DS} ）；

最大栅源电压 $V_{(BR)GS}$ （栅～源间 PN 结的反向击穿电压）；

最大耗散功率 P_{DM} 。

✓ 集成电路中的电子器件

ü 集成电路：同一块硅片制作特殊功能电路，包含二极管、三极管、场效应管、电阻、电容，以及各种连线。

ü 集成电路分类：

小、中、大、超大规模（SSI、MSI、LSI、VLSI）

模拟集成电路、数字集成电路。

ü 集成电路 ~ 器件之间绝缘：

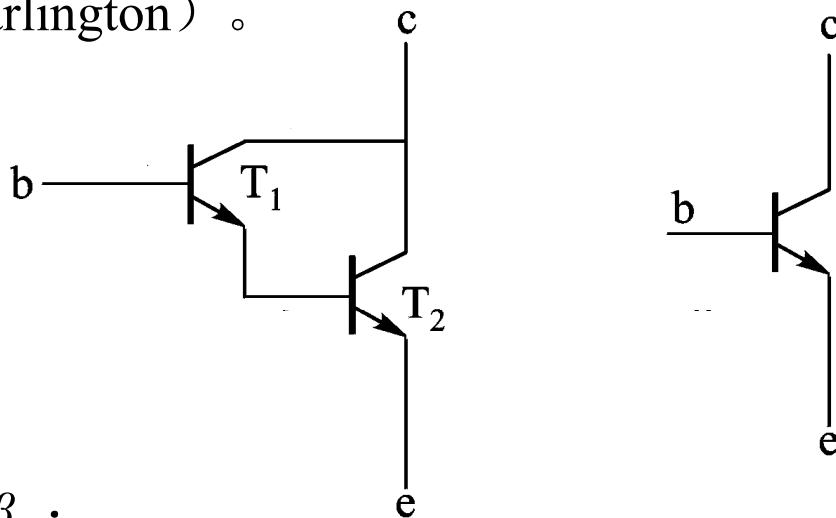
介质（如 SiO_2 ）隔离，一般用于模拟集成电路；

PN 结隔离，一般用于数字集成电路。

Ø 复合管

ü 复合管：两只（或以上）三极管（或场效应管），按一定方式连接而成；
又称达林顿管（Darlington）。

ü 常见复合管组合：



ü 结论：

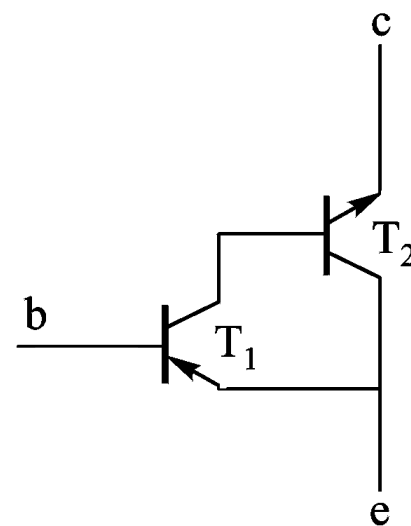
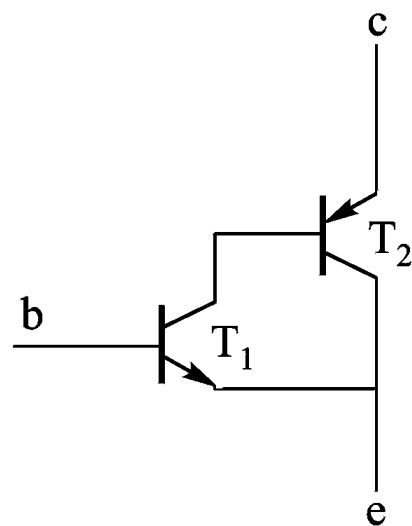
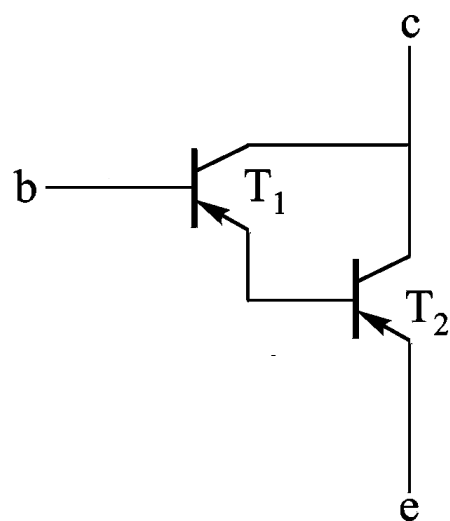
等效复合管的 $\beta \approx \beta_1 \beta_2$ ；

等效复合管的管型取决于第一只管子的类型；

等效复合管的输入电流可大大减小， T_1 可采用小功率管；

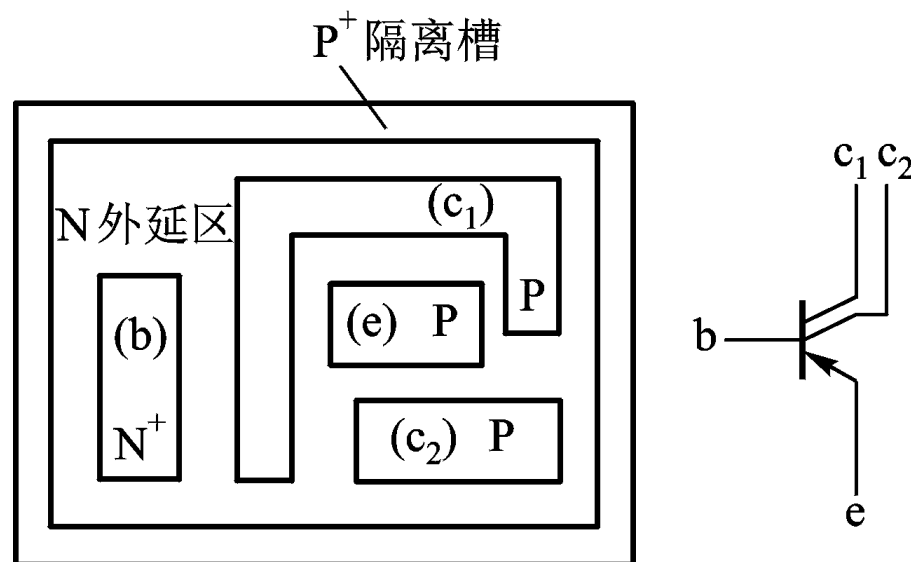
组成复合管时也可由晶体管和场效应管或多个晶体管进行复合。

Ø 复合管

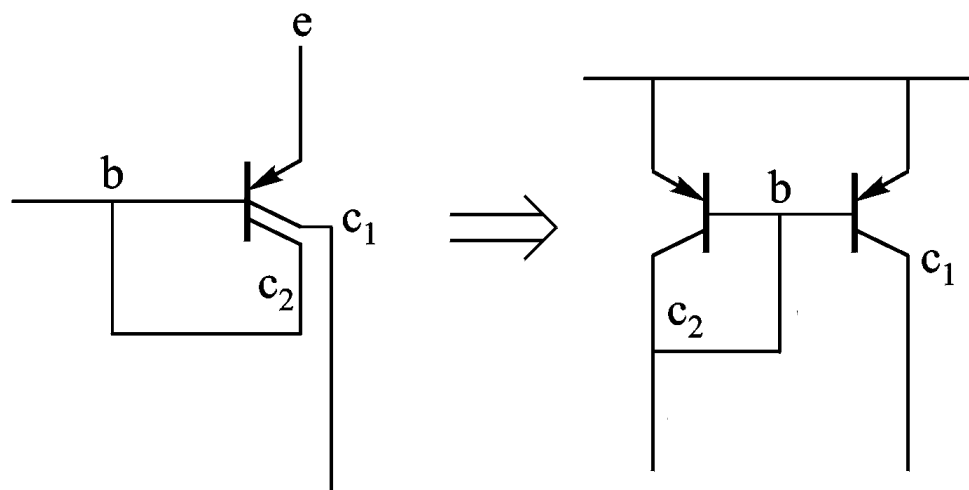


Ø多集电极管

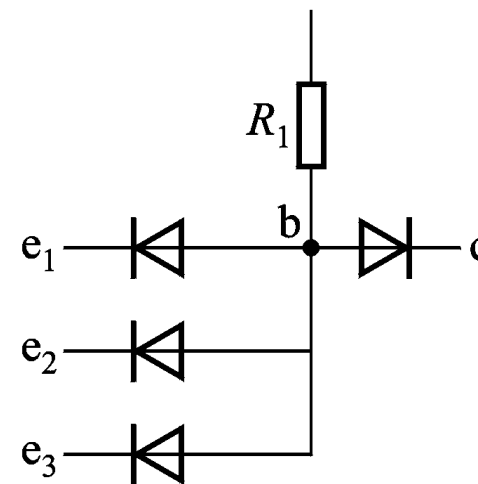
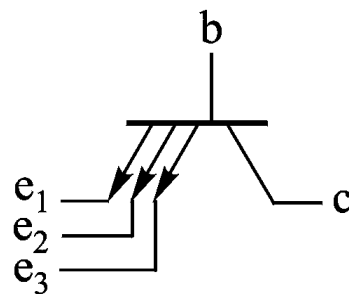
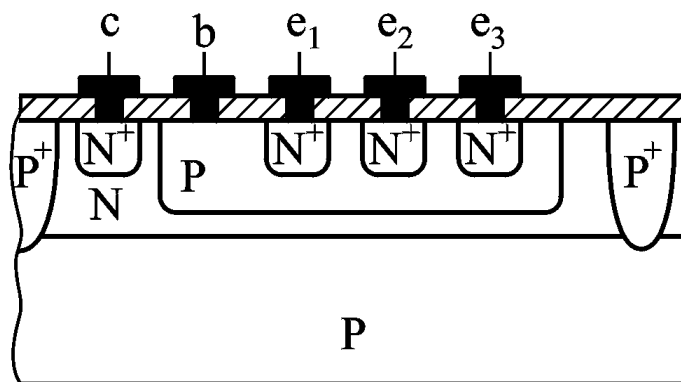
ü 集电极电流之比
约等于集电区面积之比。



ü 利用它的多个集电极可以构成多个具有比较稳定电流关系的电流源。



Ø 多发射极管



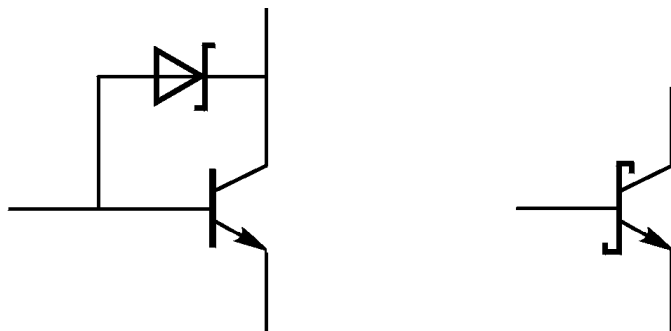
ü 多发射极三极管常作为门电路的输入级电路。

ü 在数字集成电路中，影响门电路转换速度的主要因素是晶体管的开关时间，多发射极管的引入可以加快后级晶体管存储电荷的消散，缩短开关时间，从而提高门电路的转换速度。

Ø肖特基三极管

Ü肖特基三极管：

在普通三极管的集电结上，并接一个肖特基势垒二极管（SBD）。



Ü SBD 的开启电压约为 0.3V ，正向压降约 0.4V （比普通二极管低 $0.2\sim 0.3\text{V}$ ），本身没有电荷存储效应，开关时间短；

利用肖特基三极管可以有效地限制三极管的饱和深度，缩短电路的开关时间。

Ø 下次课

带第Ⅱ册

（第Ⅰ册也需要）

✓ 本节作业

📖 习题 3 (P99)

2abcd、3a (二极管)

14、15 (三极管)

📖 题 3.2/3.3 : 图中的二极管符号不正确;

题 3.3 : 请列表说明以下各电参数的表达式 (不用画波形) :

$$v_i \quad D_1 \quad D_2 \quad i_{D1} \quad i_{D2} \quad v_{D1} \quad v_{D2} \quad v_o$$

所有的题目, 需要有解题过程 (不是给一个答案即可)。

✓ 本节作业

☺ 习题 3 (P103)

19 (场效应管)

☺ 题 3.19 : 并写出 $|V_{DS}| = 5V$ 时的转移特性表达式 (不用画...)

所有的题目，需要有解题过程（不是给一个答案即可）。