

## 第2章 半导体器件

2.1 半导体材料及PN结

2.2 半导体二极管

2.3 双极型晶体三极管

2.4 场效应管

小 结

## 2.1 半导体材料及PN结

### 2.1.1 半导体的导电特性

### 2.1.2 杂质半导体

### 2.1.3 PN结

## 2.1 半导体材料及PN结

- 电子电路的主要功能
  - 利用电信号实现信息的传递与设备的控制
- 实现控制的核心——**半导体材料**
  - 导电的原理：自由电子的定向移动
  - **半导体**——常温下导电能力介于导体和绝缘体之间
    - 多数物质都不是绝对的导体或绝缘体
    - 导电能力随环境显著变化（温度、压力、光照等）
    - 常温下导电能力弱，热力学零度时为绝缘体

## 2.1.1 半导体的导电特性

**本征半导体** — 纯净的半导体。如硅、锗单晶体。

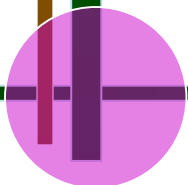
**载流子** — 自由运动的带电粒子。

**共价键** — 相邻原子共有价电子所形成的束缚。

不导电——无自由电子

**离子键** — 原子失去或获得电子生成离子，带相反电荷的相邻离子受静电力吸引。

固态不导电，电解液导电

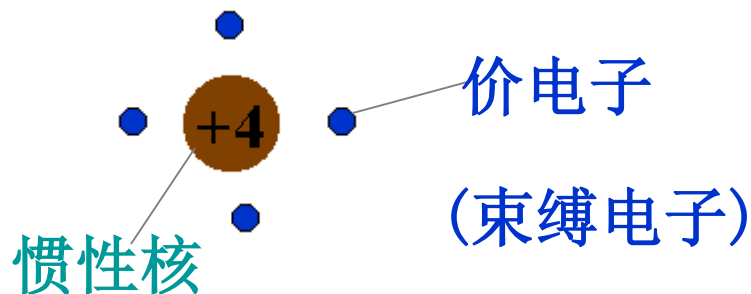


问题：为什么硅用的比锗多？

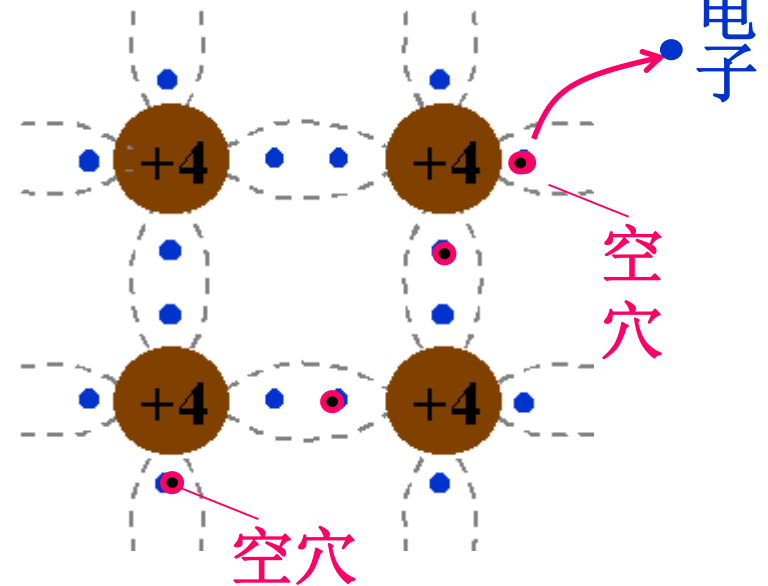
## 硅(锗)的原子结构



## 简化模型



## 硅(锗)的共价键结构



空穴可在共价键内移动

注意区分结构稳定和电中性

## 本征激发:

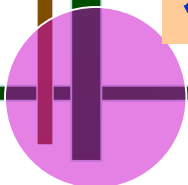
在室温或光照下价电子获得足够能量摆脱共价键的束缚成为自由电子，并在共价键中留下一个空位(空穴)的过程。

## 复 合:

自由电子和空穴在运动中相遇重新结合成对消失的过程。

## 漂 移:

自由电子和空穴在电场作用下的定向运动。



## 两种载流子

电子(自由电子)

空穴

## 两种载流子的运动

自由电子(在共价键以外)的运动

空穴(在共价键以内)的运动

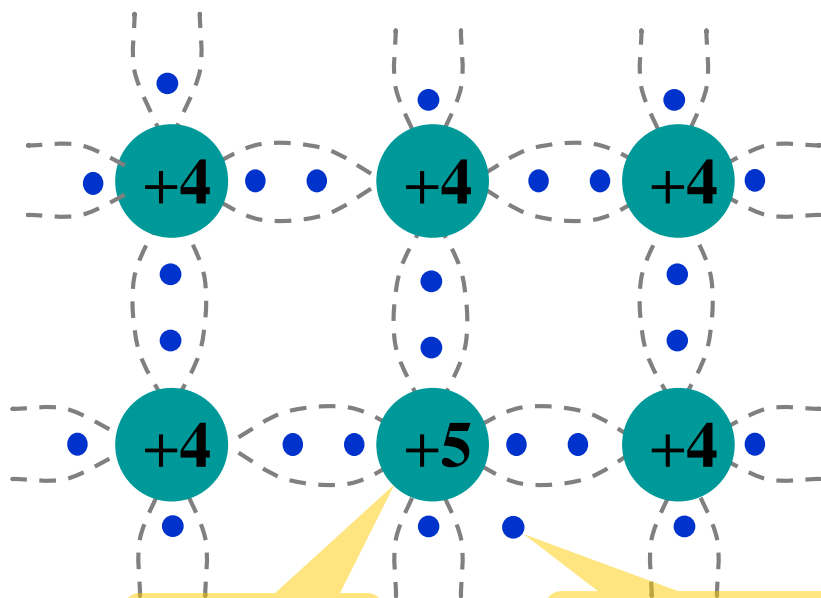
### 结论:

1. 本征半导体中电子空穴成对出现，且数量少；
2. 半导体中有电子和空穴两种载流子参与导电；
3. 本征半导体导电能力弱，并与温度有关。

## 2.1.2 杂质半导体

### 一、N 型半导体和 P 型半导体

N 型



磷原子

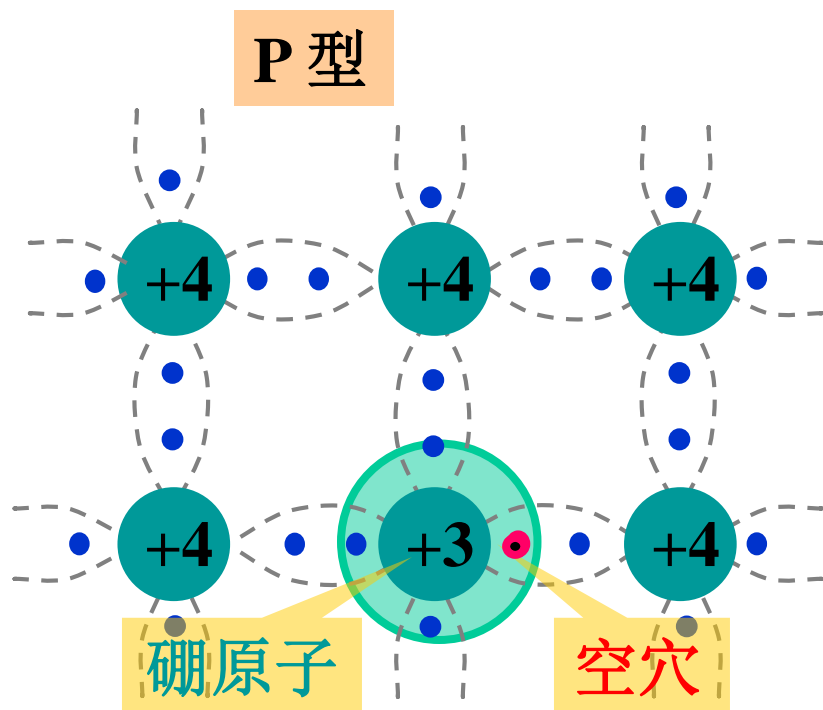
自由电子

电子为多数载流子

空穴为少数载流子

载流子数  $\approx$  电子数





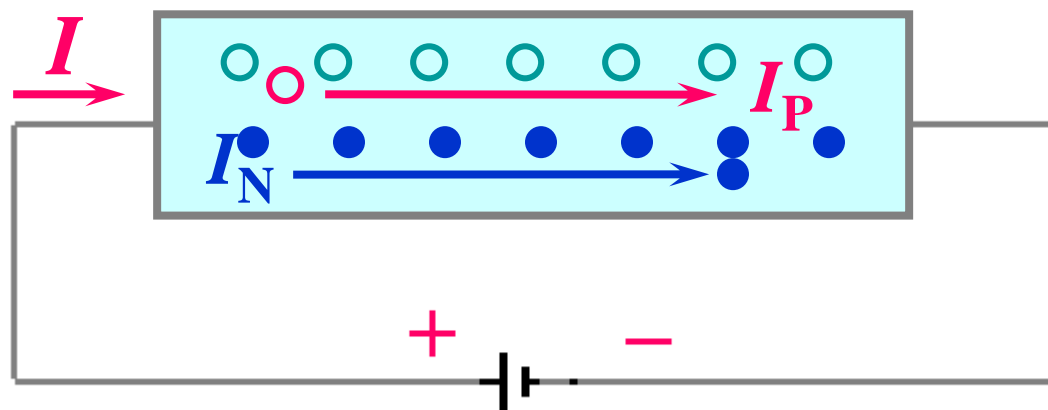
空穴 — 多子

电子 — 少子

载流子数  $\approx$  空穴数



## 二、杂质半导体的导电作用



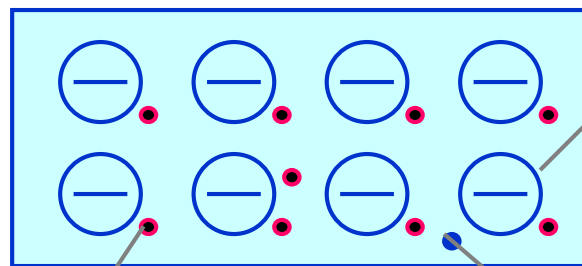
$$I = I_P + I_N$$

N 型半导体  $I \approx I_N$

P 型半导体  $I \approx I_P$

### 三、P型与N型半导体的简化示意图

P型

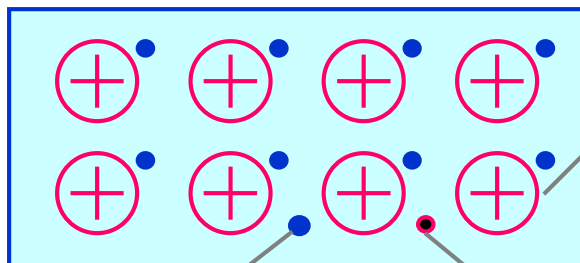


负离子

多数载流子

少数载流子

N型



正离子

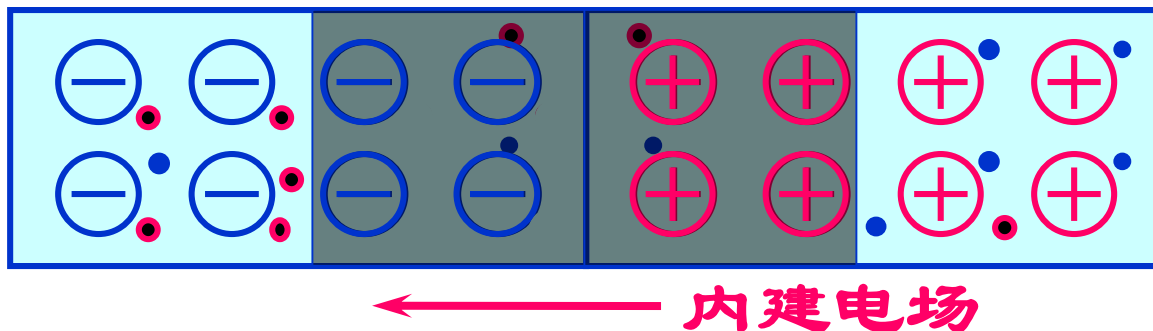
多数载流子

少数载流子

## 2.1.3 PN 结

### 一、PN 结 (PN Junction) 的形成

#### 1. 载流子的浓度差引起多子的扩散



#### 2. 复合使交界面形成空间电荷区 (耗尽层)

空间电荷区特点:

无载流子, 阻止扩散进行, 利于少子的漂移。

### 3. 扩散和漂移达到动态平衡，耗尽层稳定

扩散：浓度差； 漂移：内电场作用

扩散电流 等于 漂移电流，

总电流  $I = 0$ 。

问题：

1. 掺杂浓度高 or 掺杂浓度低，哪种半导体空间电荷区（耗尽层）宽？
2. 当温度升高时，空间电荷区（耗尽层）变宽 or 变窄？

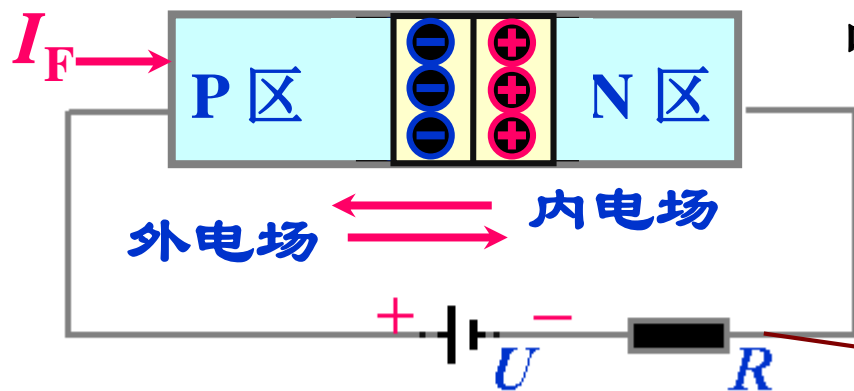
## 二、PN 结的单向导电性

### 1. 外加正向电压(正向偏置)— forward bias

P(+), N(-)

扩散运动加强形成正向电流  $I_F$

外电场使多子向 PN 结移动，  
中和部分离子使空间电荷区变窄。

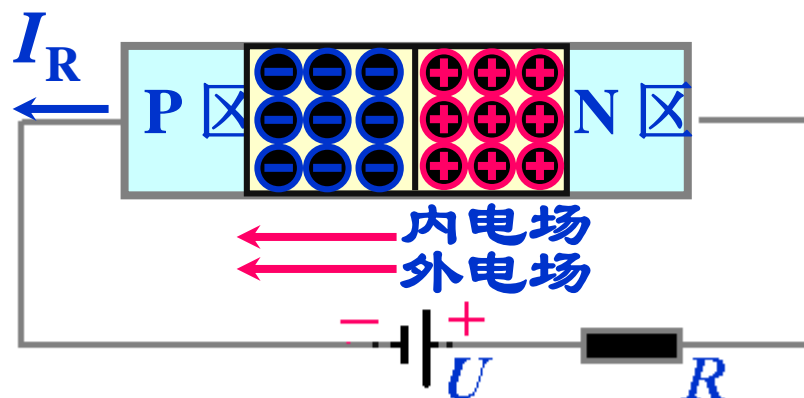


$$I_F = I_{\text{多子}} - I_{\text{少子}} \approx I_{\text{多子}}$$

限流电阻

## 2. 外加反向电压(反向偏置) — reverse bias

P(-), N(+)



漂移运动加强形成反向电流  $I_R$

$$I_R = I_{\text{少子}} \approx 0$$

外电场使少子背离 PN 结移动，  
空间电荷区变宽。

PN 结的单向导电性：正偏导通，呈小电阻，电流较大；  
反偏截止，电阻很大，电流近似为零。

## 三、PN 结的伏安特性

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

反向饱和  
电流

温度的  
电压当量

玻尔兹曼  
常数

$$U_T = \frac{kT}{q}$$

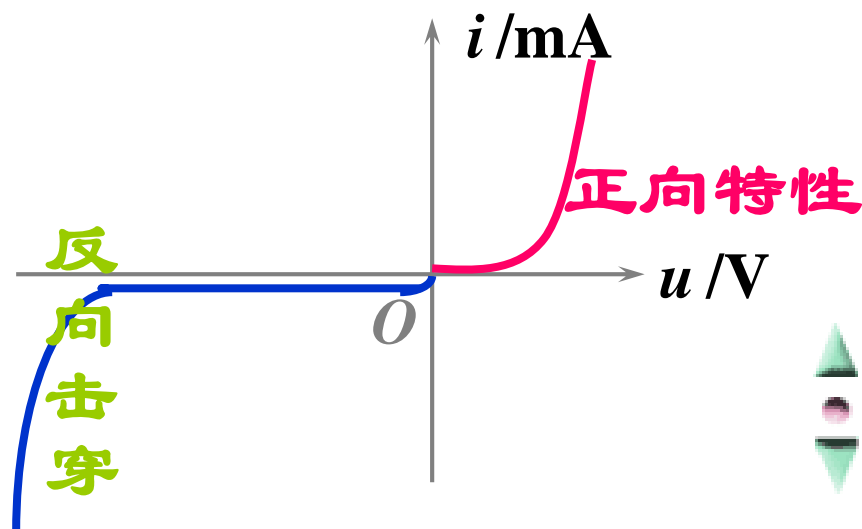
电子电量

当  $T = 300 (27^\circ\text{C})$  :

$$U_T = 26 \text{ mV}$$

加正向电压时  $i \approx I_s e^{u/U_T}$

加反向电压时  $i \approx -I_s$





## 2.2 半导体二极管

2.2.1 二极管的结构和类型

2.2.2 二极管的伏安特性

2.2.3 二极管的主要参数

2.2.4 二极管常用电路模型

2.2.5 稳压二极管

2.2.6 二极管的应用举例



## 2.2.1 二极管的结构和类型

构成：PN 结 + 引线 + 管壳 = 二极管 (Diode)

符号：A (anode)  C (cathode)

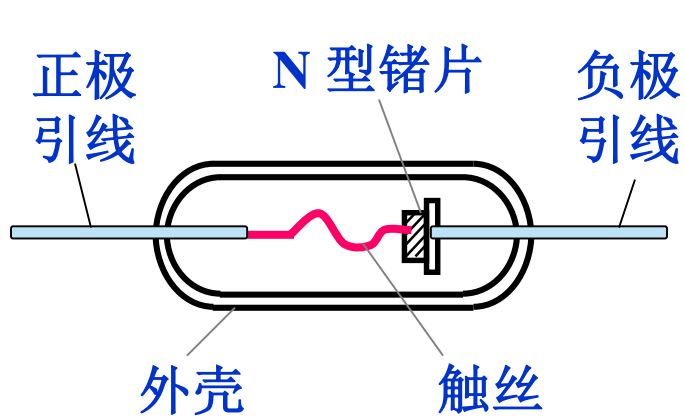
分类：

按材料分 { 硅二极管  
锗二极管

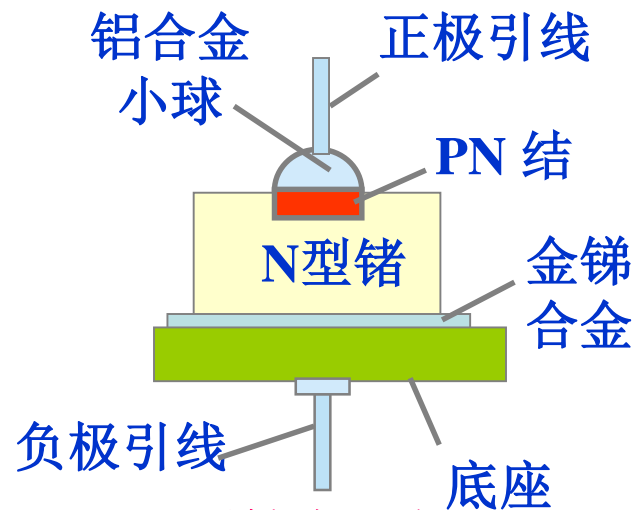
按结构分 { 点接触型  
面接触型  
平面型



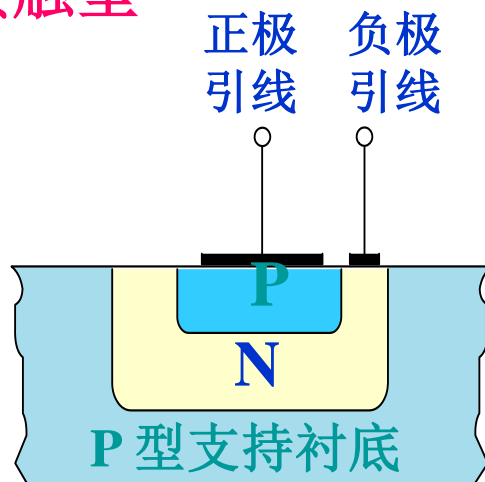
# 模 拟 电 子 技 术



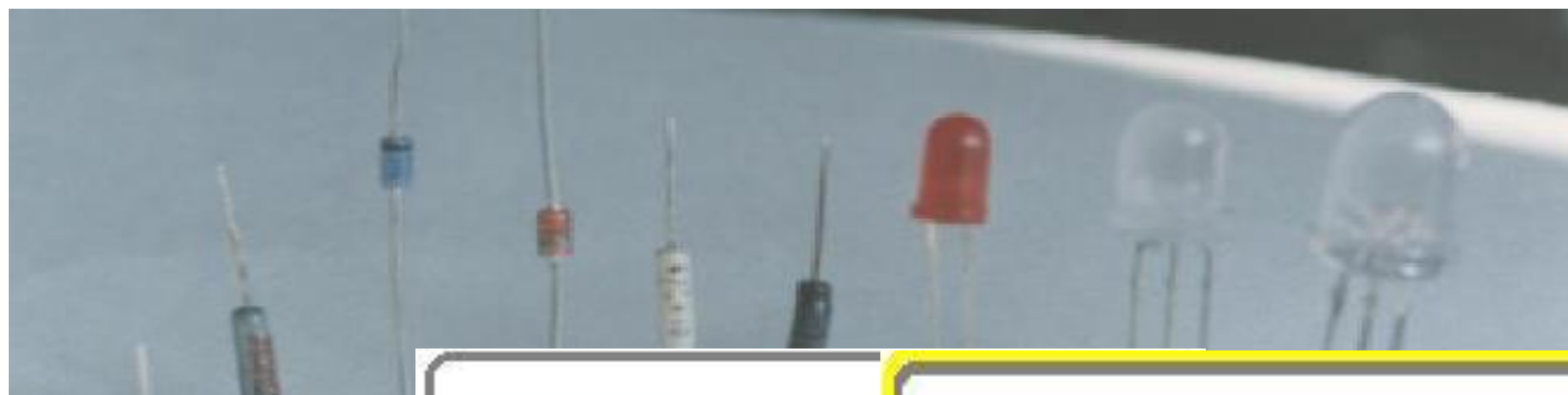
点接触型



面接触型



集成电路中平面型



整流  
型号  
主要  
30  
符号



整流  
型号  
主要  
30  
符号



整流二极管  
型号: 2CP4  
符号:



## 2.2.2 二极管的伏安特性

### 一、PN 结的伏安方程

$$i_D = I_S (e^{u_D / U_T} - 1)$$

反向饱和  
和电流

温度的  
电压当量

玻尔兹曼  
常数

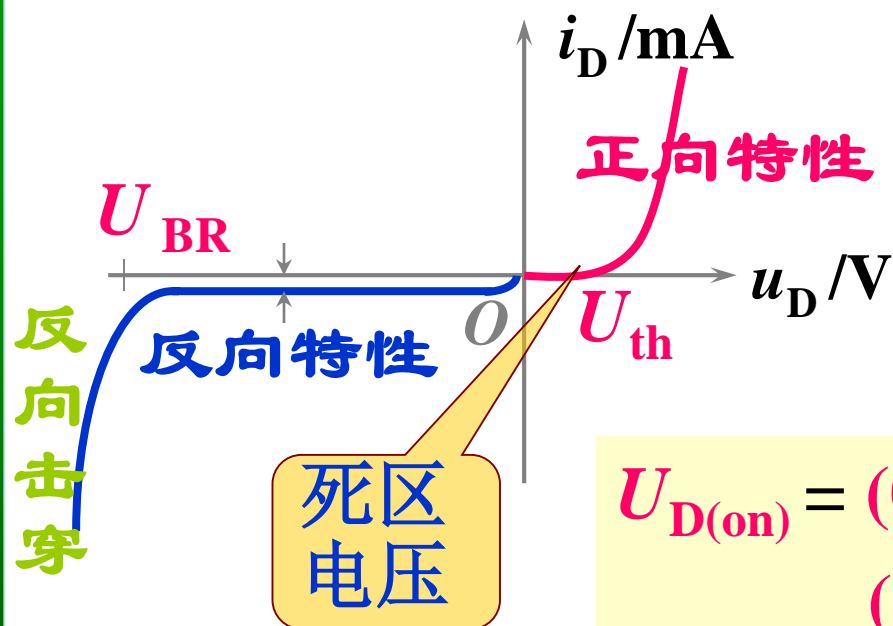
$$U_T = \frac{kT}{q}$$

电子电量

当  $T = 300 (27^\circ\text{C})$  :

$$U_T = 26 \text{ mV}$$

## 二、二极管的伏安特性



死区:  $0 < U < U_{th}$

$$i_D = 0$$

$U_{th} = 0.5 \text{ V}$  (硅管)

$0.1 \text{ V}$  (锗管)

正向导通区:  $U > U_{th}$

$i_D$  急剧上升

$U_{D(on)} = (0.6 \sim 0.8) \text{ V}$  硅管  $0.7 \text{ V}$   
 $(0.2 \sim 0.4) \text{ V}$  锗管  $0.3 \text{ V}$

$|U_{BR}| > |U| > 0$

$i_D = I_S < 0.1 \mu\text{A}$  (硅) 几十  $\mu\text{A}$  (锗)

$|U| > |U_{BR}|$

反向电流急剧增大 (反向击穿)

## 反向击穿类型：

**电击穿** — PN 结未损坏，断电即恢复。

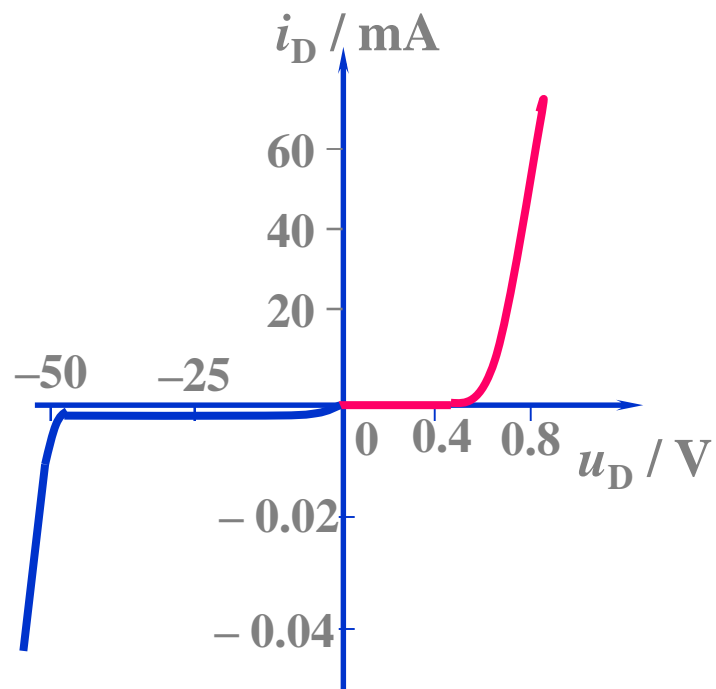
**热击穿** — PN 结烧毁。

## 反向击穿原因：

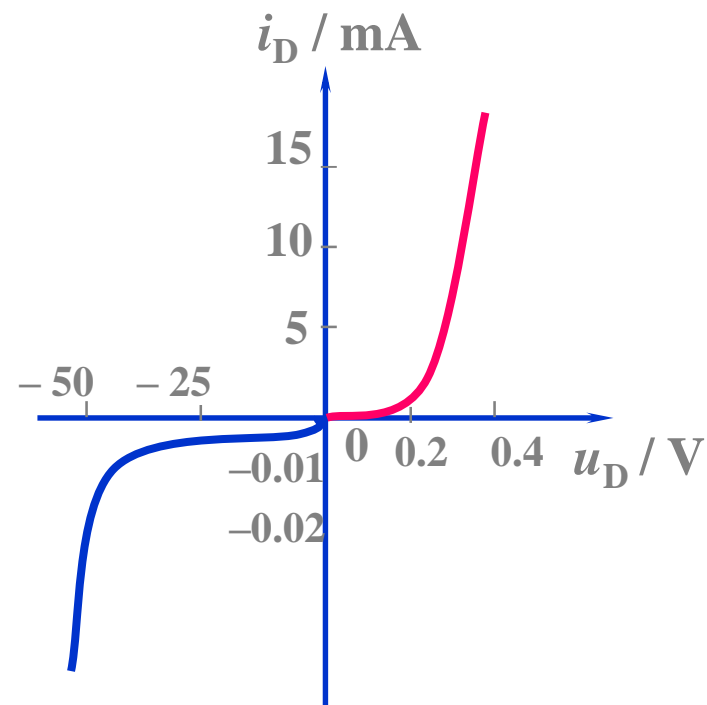
**齐纳击穿：** 反向电场太强，将电子强行拉出共价键。  
(Zener) (击穿电压  $< 4\text{V}$ ，负温度系数，多见于高浓度掺杂)

**雪崩击穿：** 反向电场使电子加速，动能增大，撞击使自由电子数突增。  
(击穿电压  $> 7\text{V}$ ，正温度系数，多见于低浓度掺杂)

击穿电压在  $4\text{V}-7\text{V}$  之间时，两种击穿可能同时存在，电压温度系数趋近零。



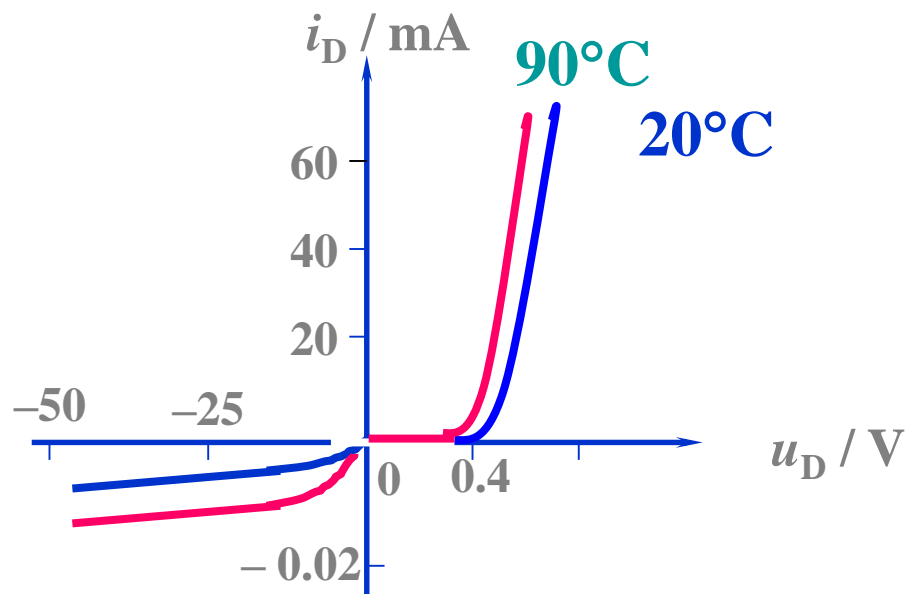
硅管的伏安特性



锗管的伏安特性



## 温度对二极管特性的影响

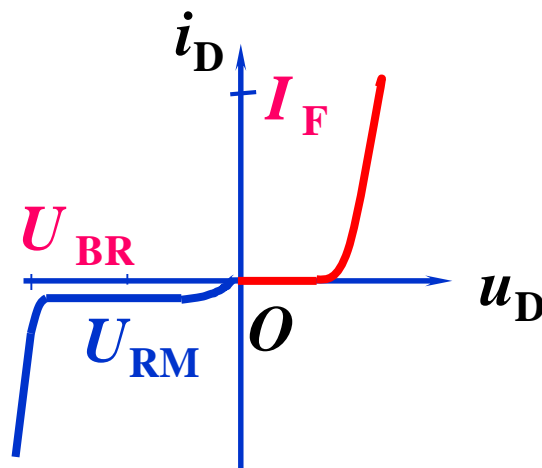


$T$  升高时,

$U_{D(\text{on})}$  以  $(2 \sim 2.5) \text{ mV}/^\circ\text{C}$  下降

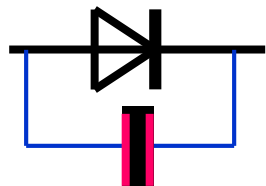
负温度系数

### 2.2.3 二极管的主要参数



- 2.  $I_F$  — 最大整流电流 (最大正向平均电流)
- 2.  $U_{RM}$  — 最高反向工作电压, 为  $U_{BR} / 2$
- 3.  $I_R$  — 反向电流 (其值越小, 单向导电性越好)
- 4.  $f_M$  — 最高工作频率 (超过时单向导电性变差)

## 影响工作频率的原因 — PN 结的电容效应



### 结论:

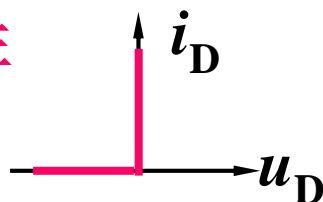
1. 低频时，因结电容很小，对 PN 结影响很小。  
高频时，因容抗增大，使结电容分流，导致单向导电性变差（电容通高频阻低频）。
2. 结面积小时结电容小，工作频率高。

**晶体二极管并非任何时候都单向导电**

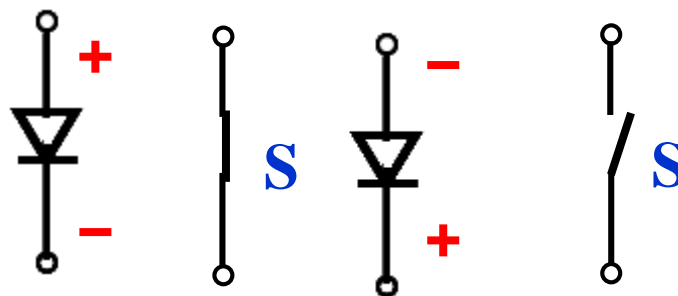
## 2.2.4 二极管的常用电路模型

### 一、理想二极管模型

特性

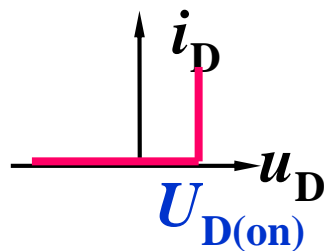


符号及  
等效模型

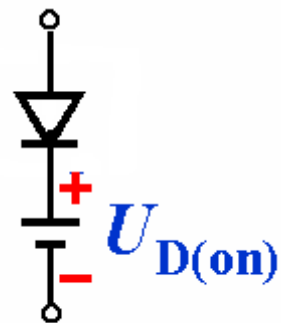


正偏导通,  $u_D = 0$ ; 反偏截止,  $i_D = 0$   $U_{BR} = \infty$

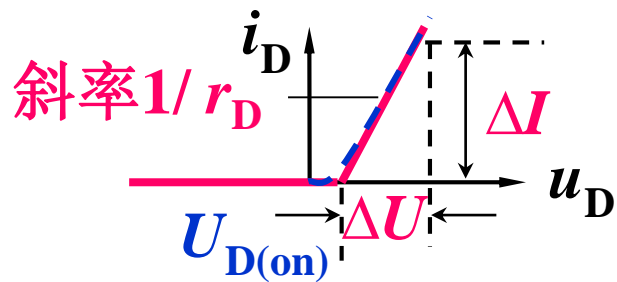
## 二、二极管的恒压降模型



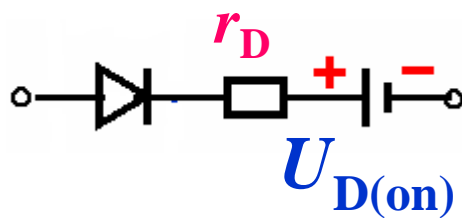
$$u_D = U_{D(on)} \begin{cases} 0.7 \text{ V (Si)} \\ 0.3 \text{ V (Ge)} \end{cases}$$



## 三、二极管的折线近似模型



$$r_D = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$



- 半导体二极管的型号(补充)

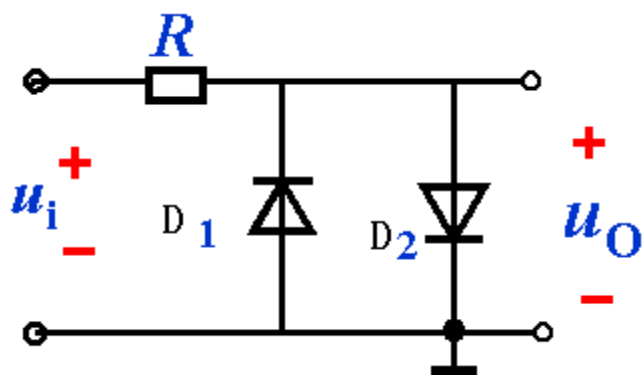
- 国家标准对半导体器件型号的命名举例如下：

2 A P 9

- — 用数字代表同类型器件的不同型号
- — 用字母代表器件的类型，**P**代表普通管
- — 用字母代表器件的材料，**A**代表**N**型**Ge**
- **B**代表**P**型**Ge**，**C**代表**N**型**Si**，**D**代表**P**型**Si**
- — **2**代表二极管，**3**代表三极管

例：  $u_i = 2 \sin \omega t$  (V)，分析二极管的限幅作用。

$u_i$  较小，宜采用恒压降模型



$$|u_i| < 0.7 \text{ V}$$

$D_1$ 、 $D_2$  均截止  $u_O = u_i$

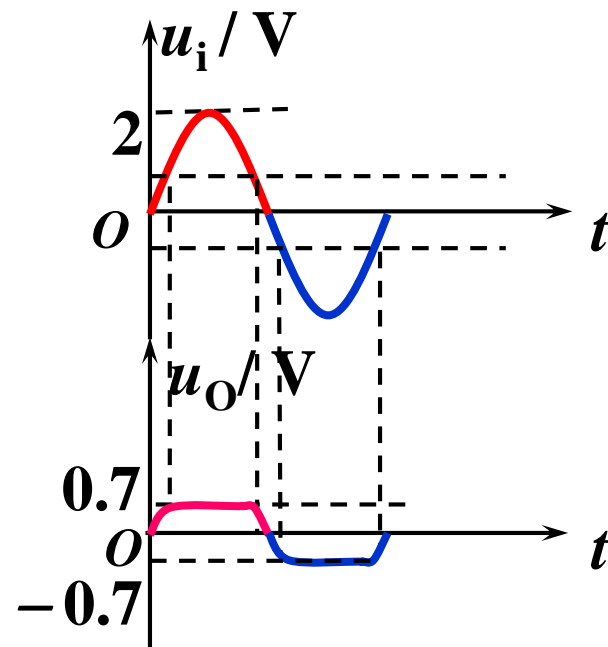
$$u_i \geq 0.7 \text{ V}$$

$D_2$  导通  $D_1$  截止  $u_O = 0.7 \text{ V}$

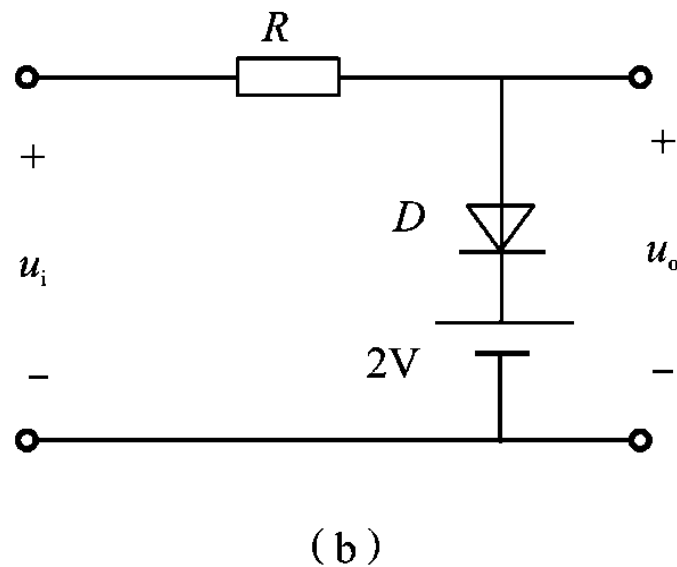
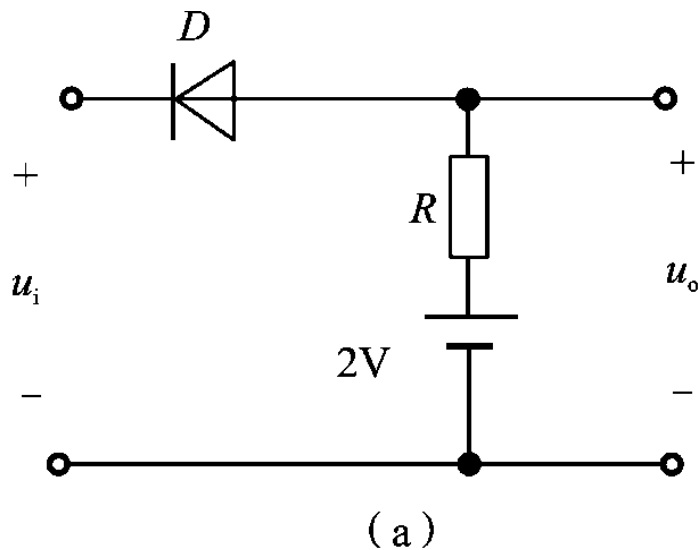
$$u_i < -0.7 \text{ V}$$

$D_1$  导通  $D_2$  截止  $u_O = -0.7 \text{ V}$

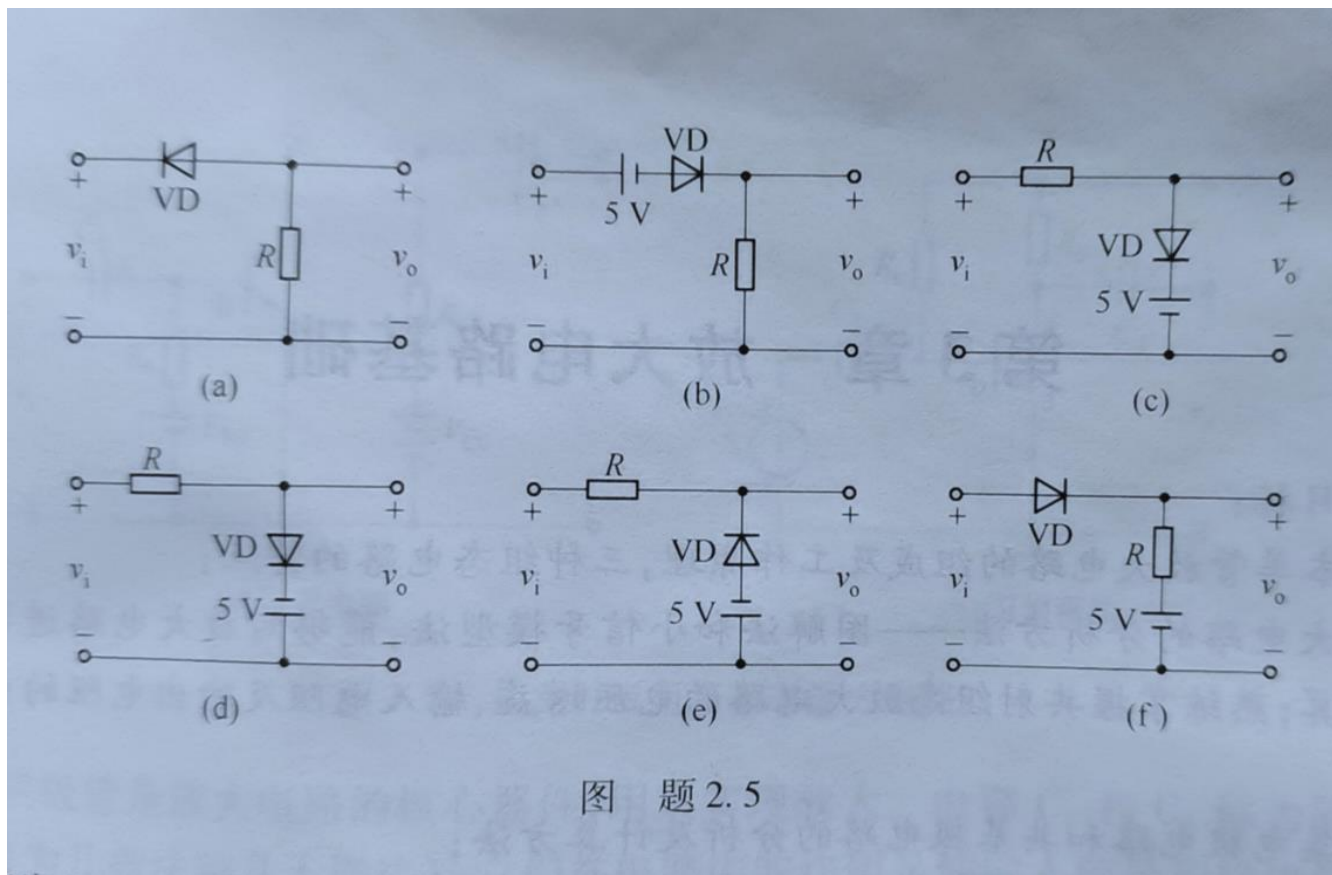




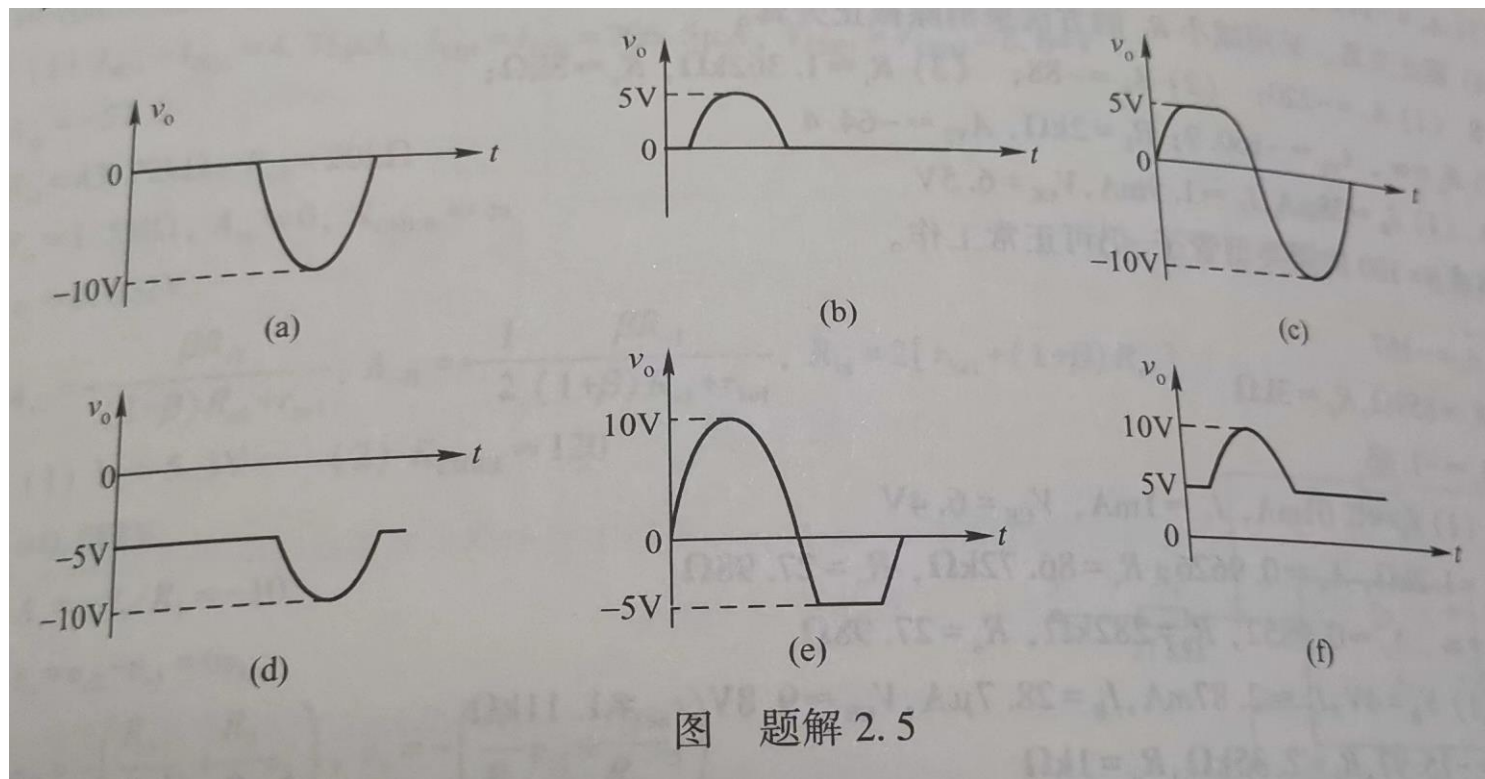
**练习：**已知  $u_i = 4 \sin \omega t$  (V)，二极管为理想二极管，画出  $u_o$  的波形。



练习：已知  $u_i = 10 \sin \omega t$  (V)，二极管为理想二极管，画出  $u_o$  的波形。



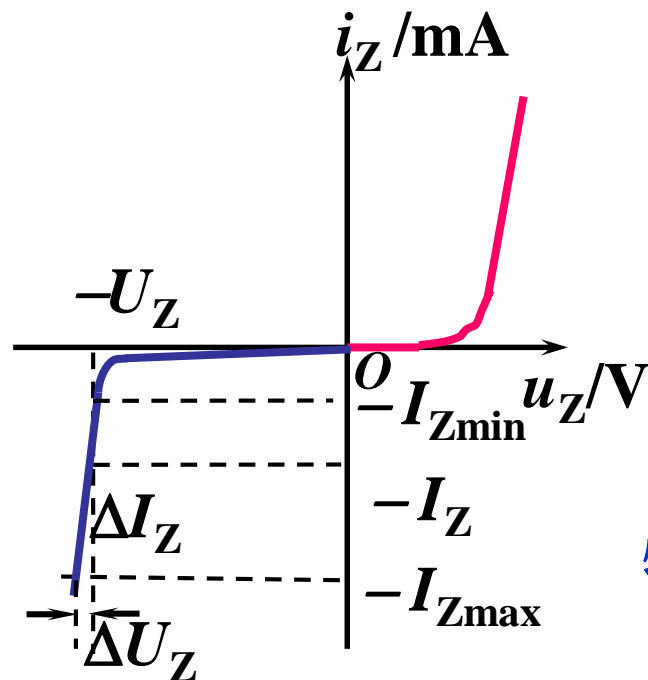
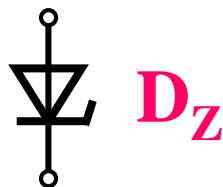
**练习：**已知  $u_i = 10 \sin \omega t$  (V)，二极管为理想二极管，画出  $u_o$  的波形。



## 2.2.6 稳压二极管

### 一、伏安特性

符号



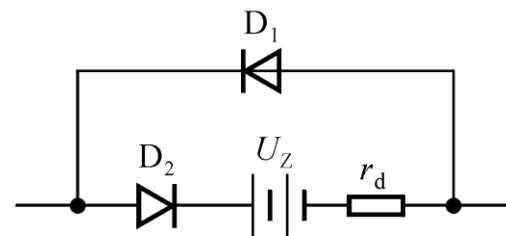
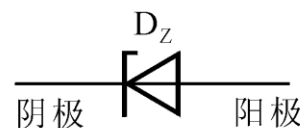
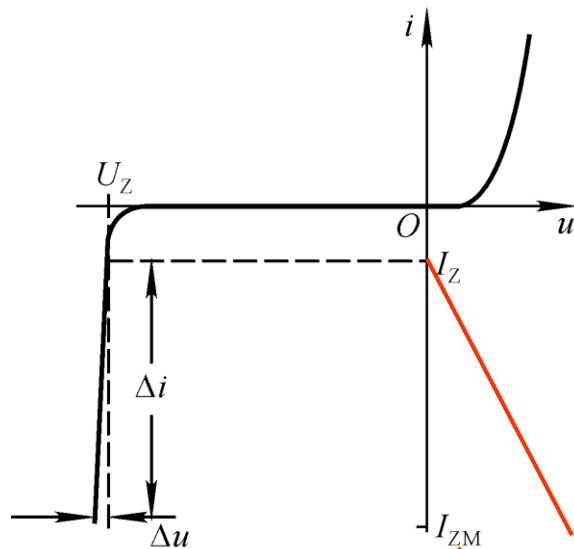
特性

工作条件：反向击穿

## 2.2.6 稳压二极管



由一个PN结组成，  
反向击穿后在一定的电流范围内  
端电压基本不变，  
为稳定电压。



进入稳压区的最小电流

不至于损坏的最大电流

## 二、主要参数

1. 稳定电压  $U_Z$       流过规定电流时稳压管两端的反向电压值。
2. 稳定电流  $I_Z$       越大稳压效果越好，小于  $I_{\min}$  时不稳压。
3. 最大工作电流  $I_{ZM}$        $P_{ZM} = U_Z I_{ZM}$   
最大耗散功率  $P_{ZM}$
4. 动态电阻  $r_Z$       几  $\Omega \sim$  几十  $\Omega$

$r_Z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$  越小稳压效果越好。



## 5. 稳定电压温度系数 $C_T$

$$C_T = \frac{\frac{\Delta U_Z}{U_Z}}{\Delta T} \times 100\%$$

一般,

$U_Z < 4\text{ V}$ ,  $C_{TV} < 0$  (为齐纳击穿) 具有负温度系数;

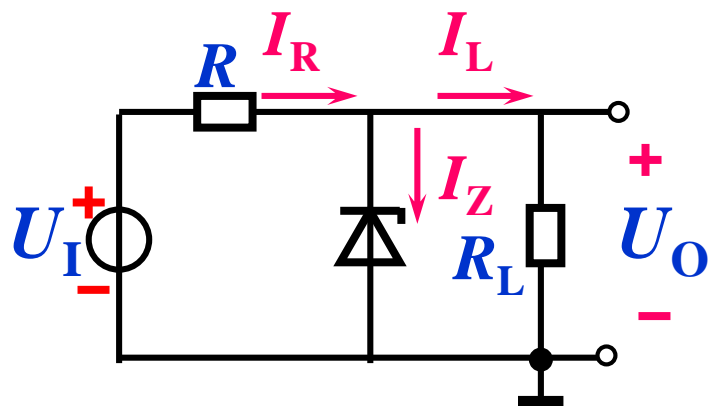
$U_Z > 7\text{ V}$ ,  $C_{TV} > 0$  (为雪崩击穿) 具有正温度系数;

$4\text{ V} < U_Z < 7\text{ V}$ ,  $C_{TV}$  很小。





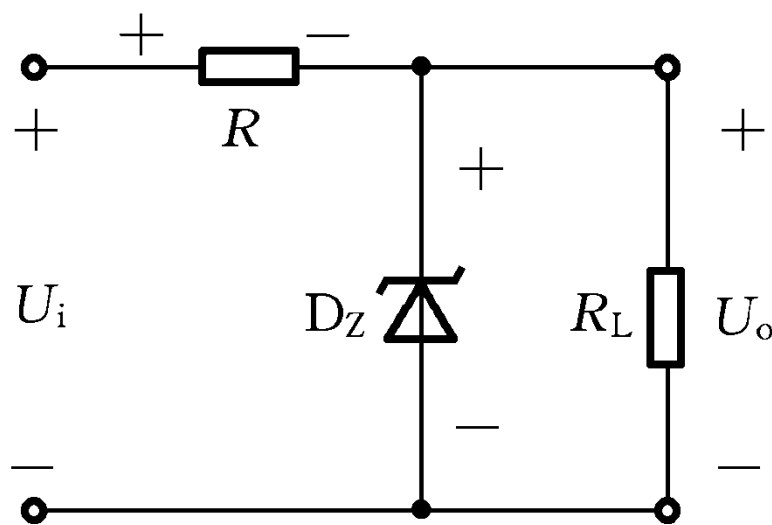
例：分析简单稳压电路的工作原理，  
 $R$  为限流电阻。



$$I_R = I_Z + I_L$$

$$U_O = U_I - I_R R$$

当直流输入电压 $U_i$ 波动或负载改变引起 $U_o$ 增大, 此时 $U_z$ 亦增大,  $I_z$ 剧增, 使 $I_R$ 增大  
(  $I_R = I_0 + I_z$  ), 使 $R$ 两端的电压降增大, 从而抑制了 $U_o$ 的增大, 达到稳定 $U_o$ 的目的。



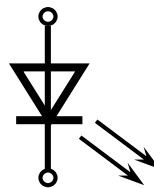
稳压管起着电流的自动调节作用, 而限流电阻起着电压调整作用。

## 补充： 发光二极管与光敏二极管

### 一、发光二极管 LED (Light Emitting Diode)

#### 1. 符号和特性

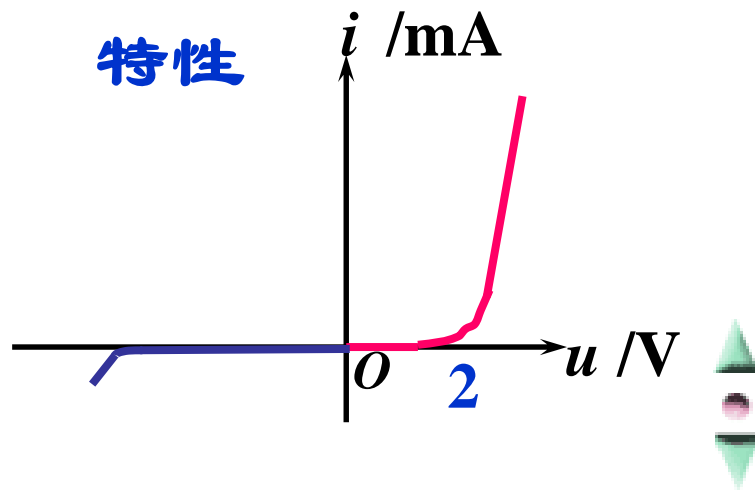
符号



工作条件： 正向偏置

一般工作电流几十 mA，  
导通电压 (1 ~ 2) V

特性



## 2. 主要参数

电学参数:  $I_{FM}$ ,  $U_{BR}$ ,  $I_R$

光学参数: 峰值波长  $\lambda_p$ , 亮度  $L$ , 光通量  $\Phi$

发光类型: 可见光: 红、黄、绿  
不可见光: 红外光

显示类型: 普通 LED, 七段 LED,  
点阵 LED




# 模 拟 电 子 技 术



发光二极管

型号: 5133D

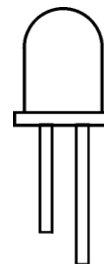
规格:  $\phi 5$   
红光

符号: 



发光二极管

$\phi 8$  双色



(a)

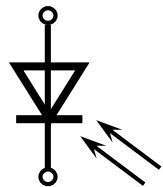


(b)

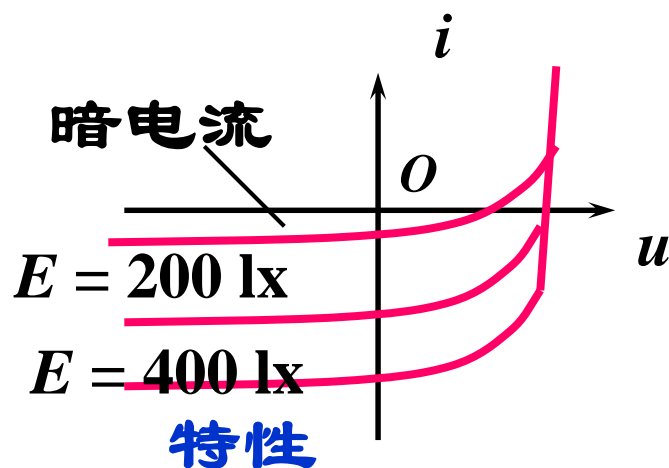


## 二、光敏二极管

### 1. 符号和特性



符号



### 2. 主要参数

电学参数:

暗电流, 光电流, 最高工作范围

光学参数:

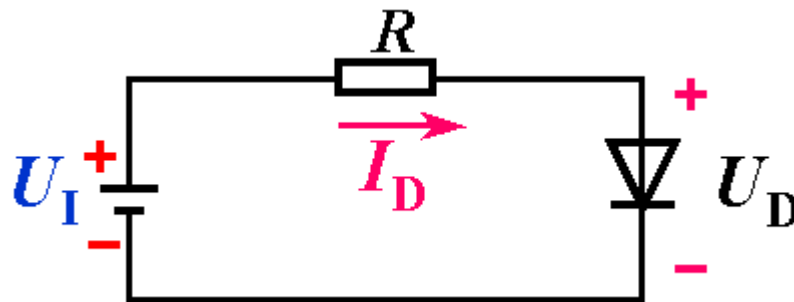
光谱范围, 灵敏度, 峰值波长

工作条件:  
反向偏置



实物照片

## 补充：选择二极管限流电阻

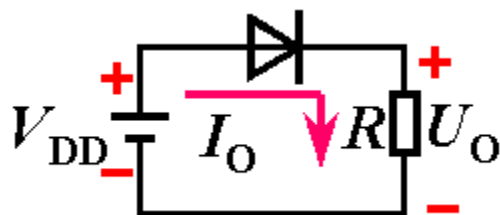


### 步骤：

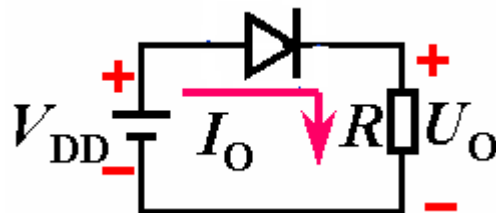
1. 设定工作电压(如  $0.7\text{ V}$ ;  $2\text{ V}$  (**LED**);  $U_Z$ )
2. 确定工作电流(如  $1\text{ mA}$ ;  $10\text{ mA}$ ;  $5\text{ mA}$ )
3. 根据欧姆定律求电阻  $R = (U_I - U_D) / I_D$   
( $R$  要选择**标称值**)

## 2.2.6 二极管应用举例

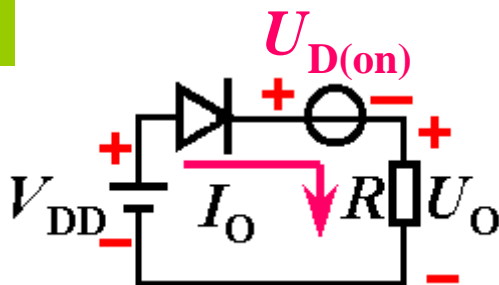
**例 1:** 下图电路中，硅二极管， $R = 2\text{ k}\Omega$ ，分别用二极管理想模型和恒压降模型求出  $V_{\text{DD}} = 2\text{ V}$  和  $V_{\text{DD}} = 10\text{ V}$  时  $I_{\text{O}}$  和  $U_{\text{O}}$  的值。



实际电路



理想模型



恒压降模型



[解] 1.  $V_{DD} = 2 \text{ V}$

理想  $U_O = V_{DD} = 2 \text{ V}$      $I_O = V_{DD} / R = 2 / 2 = 1 \text{ (mA)}$

恒压降  $U_O = V_{DD} - U_{D(on)} = 2 - 0.7 = 1.3 \text{ (V)}$

$$I_O = U_O / R = 1.3 / 2 = 0.65 \text{ (mA)}$$

2.  $V_{DD} = 10 \text{ V}$

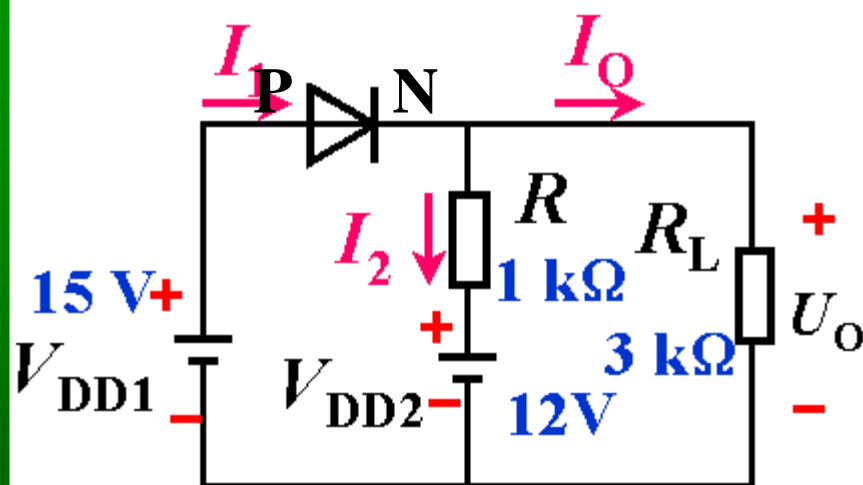
理想  $I_O = V_{DD} / R = 10 / 2 = 5 \text{ (mA)}$

恒压降  $U_O = 10 - 0.7 = 9.3 \text{ (V)}$

$$I_O = 9.3 / 2 = 4.65 \text{ (mA)}$$

$V_{DD}$  大,  
采用理想模型  
 $V_{DD}$  小,  
采用恒压降模型

**例2:** 试求电路中电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_O$  和输出电压  $U_O$  的值。



解：假设二极管断开

$$U_P = 15\text{ V}$$

$$U_N = \frac{3}{1+3} \times 12 = 9\text{ (V)}$$

$U_P > U_N$  二极管导通

等效为  $0.7\text{ V}$  的恒压源

$$U_O = V_{DD1} - U_{D(on)} = 15 - 0.7 = 14.3 \text{ (V)}$$

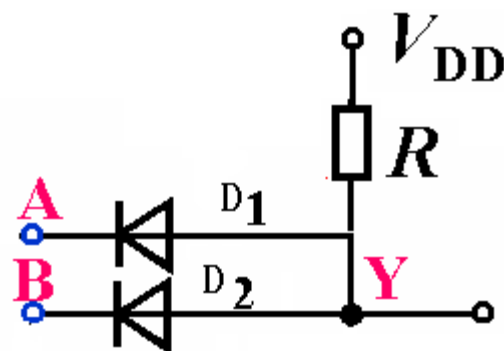
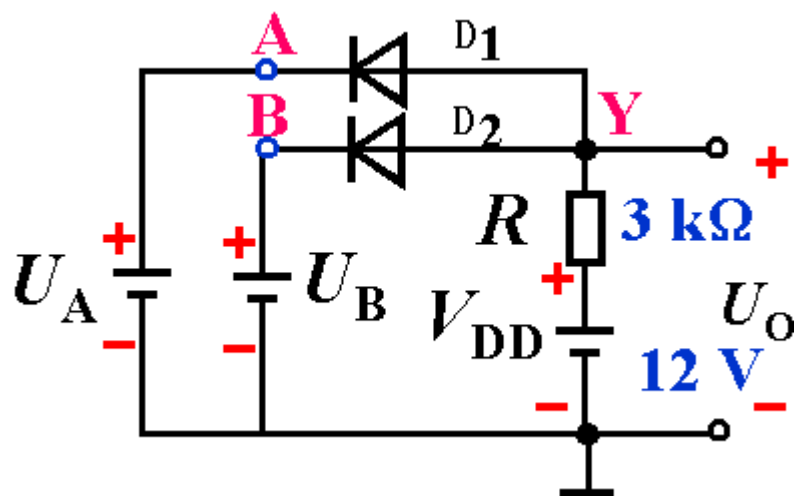
$$I_O = U_O / R_L = 14.3 / 3 = 4.8 \text{ (mA)}$$

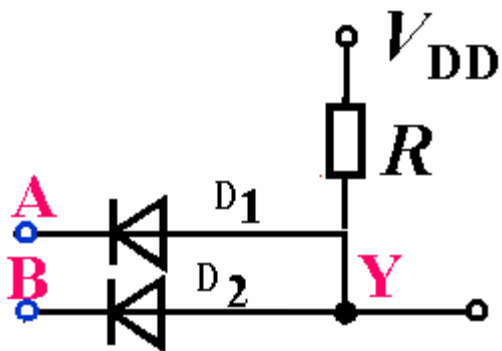
$$I_2 = (U_O - V_{DD2}) / R = (14.3 - 12) / 1 = 2.3 \text{ (mA)}$$

$$I_1 = I_O + I_2 = 4.8 + 2.3 = 7.1 \text{ (mA)}$$



**例3:** 二极管构成“门”电路，设  $D_1$ 、 $D_2$  均为理想二极管，当输入电压  $U_A$ 、 $U_B$  为低电压 0 V 和高电压 5 V 的不同组合时，求输出电压  $U_O$  的值。



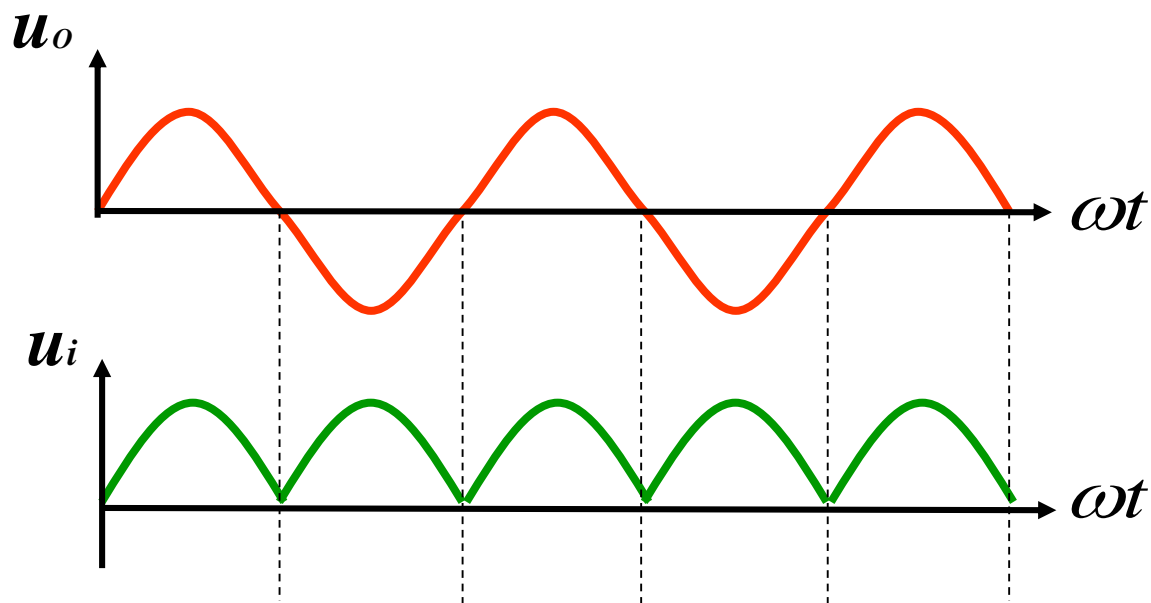


真值表

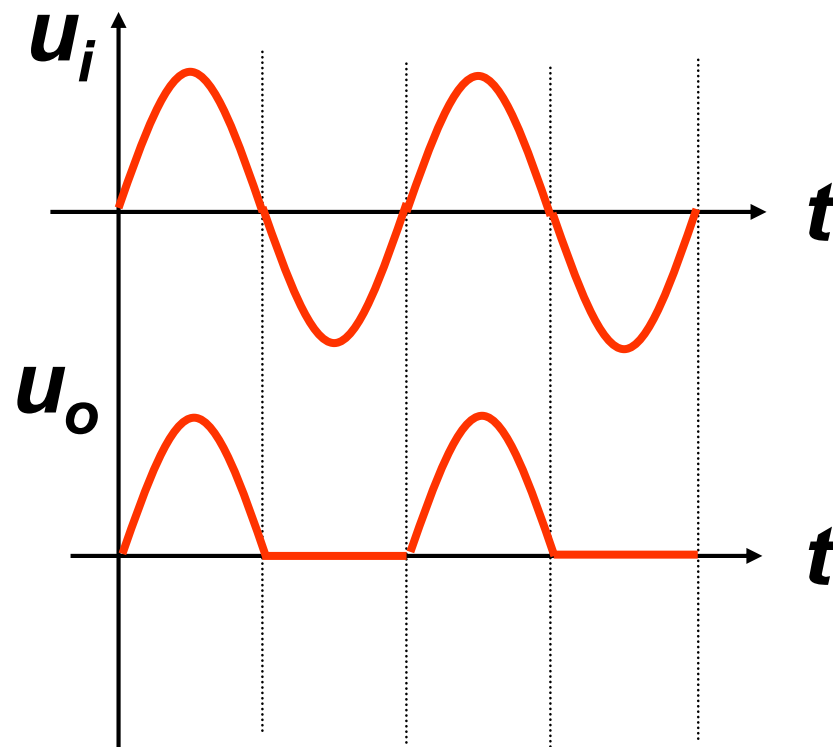
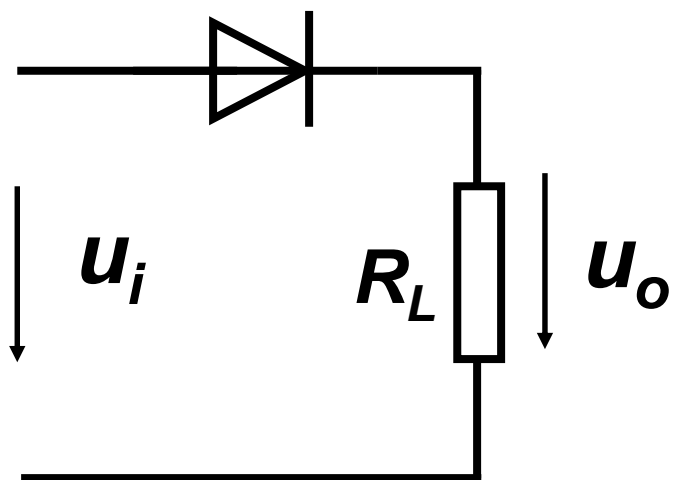
A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

输入电压		理想二极管		输出电压
$U_A$	$U_B$	$D_1$	$D_2$	
0 V	0 V	正偏 导通	正偏 导通	0 V
0 V	5 V	正偏 导通	反偏 截止	0 V
5 V	0 V	反偏 截止	正偏 导通	0 V
5 V	5 V	正偏 导通	正偏 导通	5 V

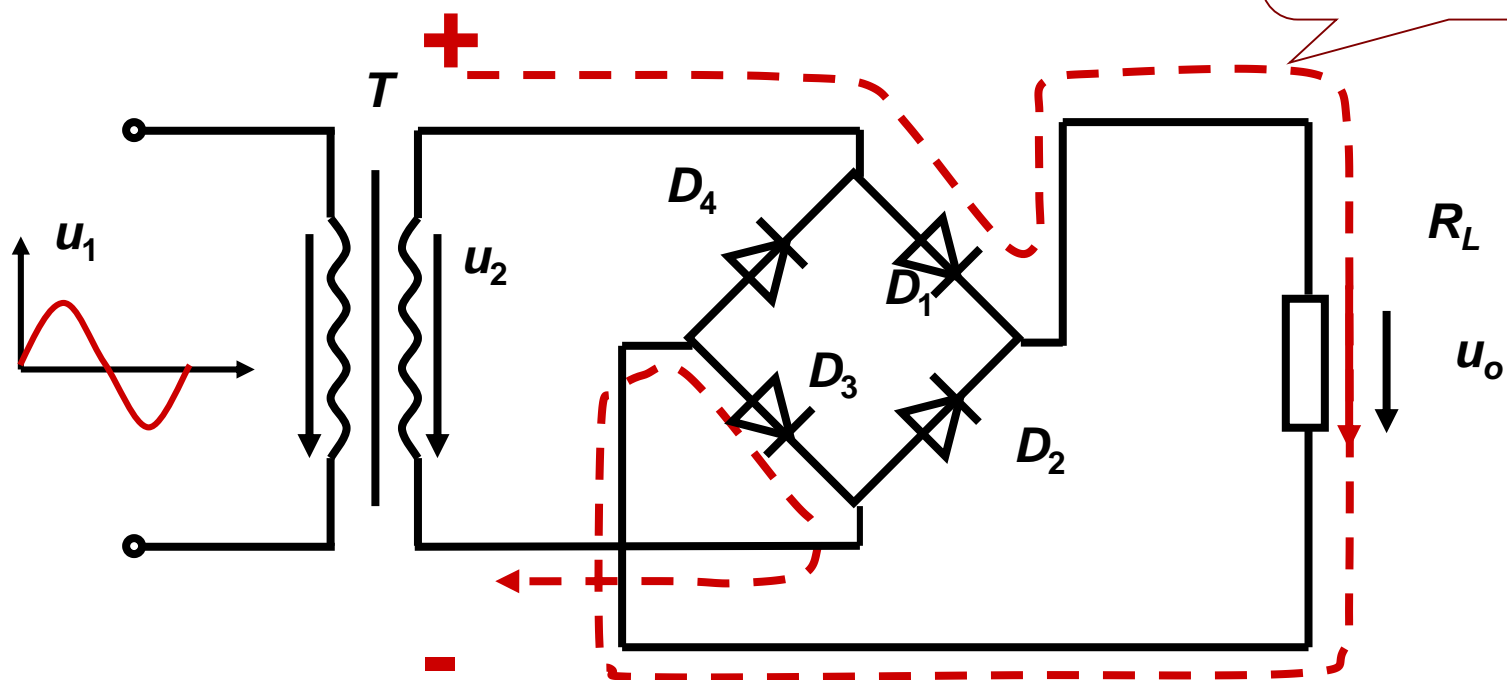
## 二极管的整流



## 二极管半波整流

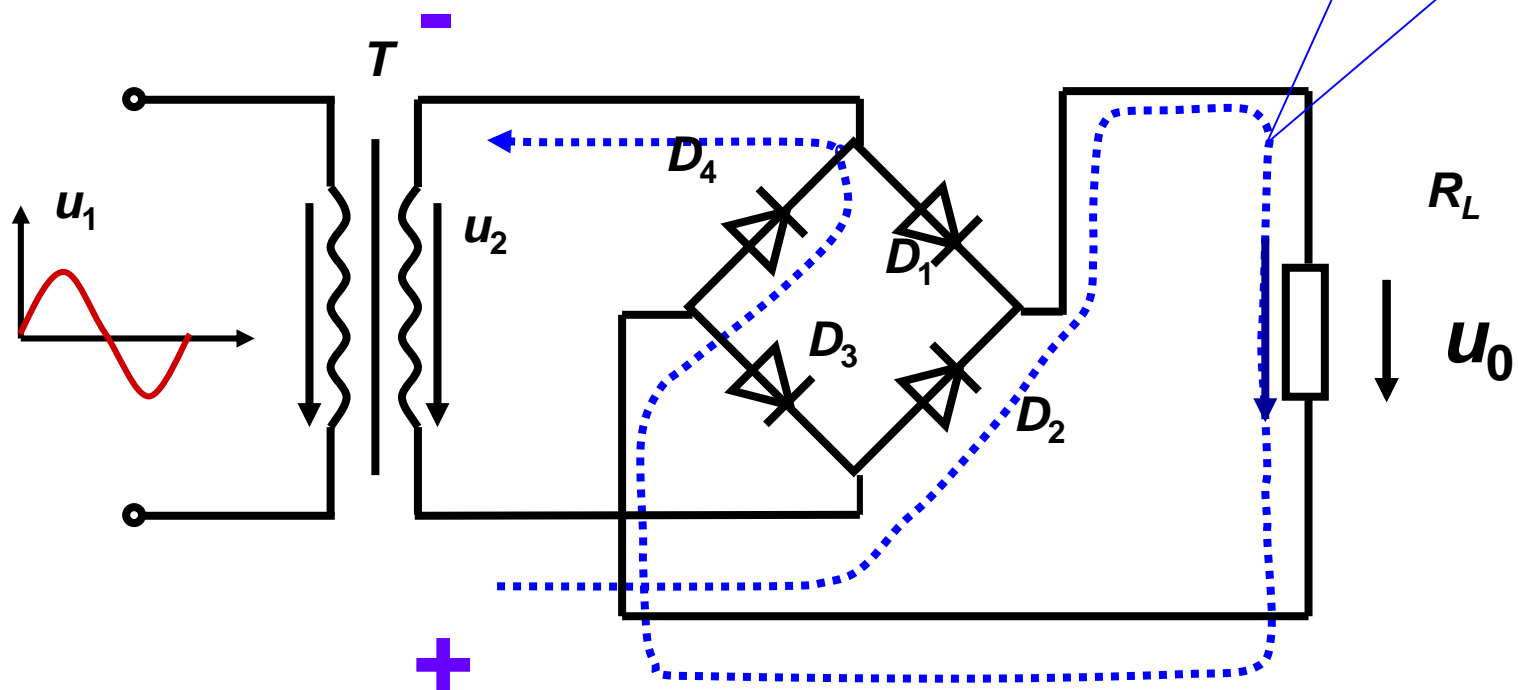


## 桥式整流电路

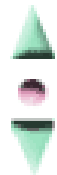




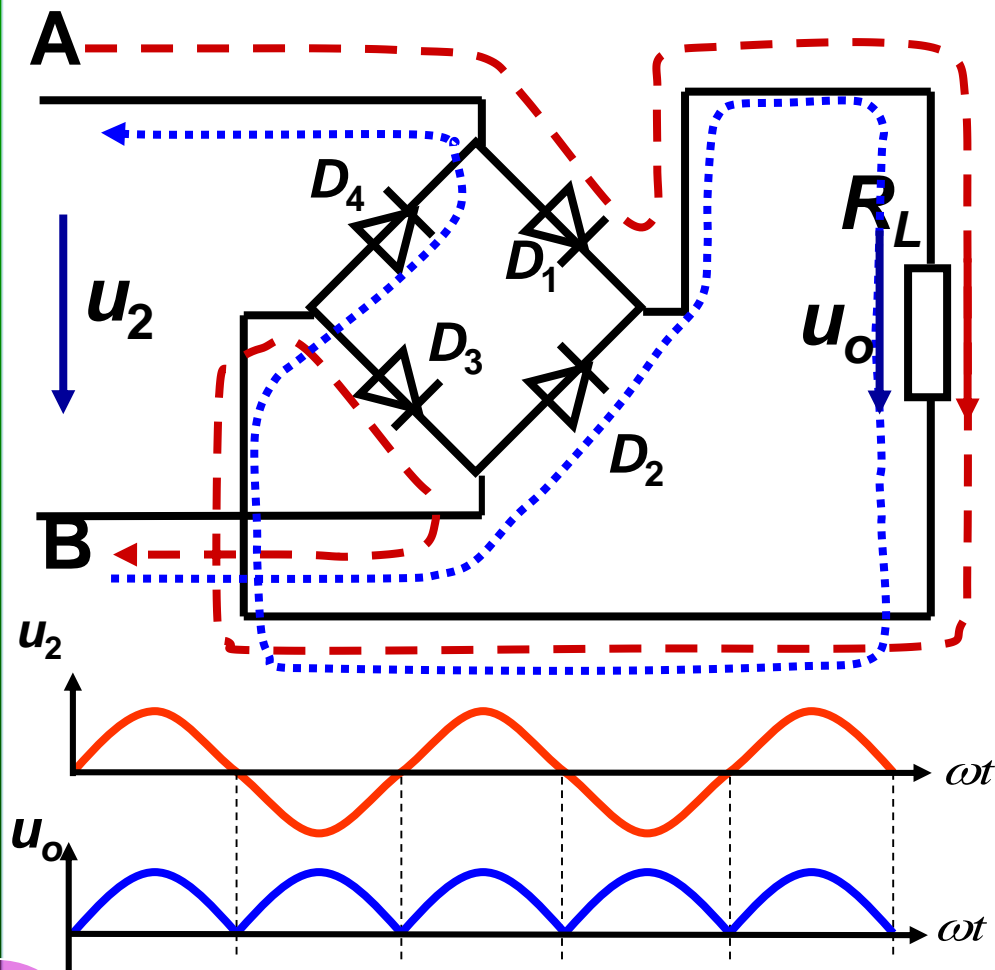
## 桥式整流电路



$u_2$ 负半周时  
电流通路



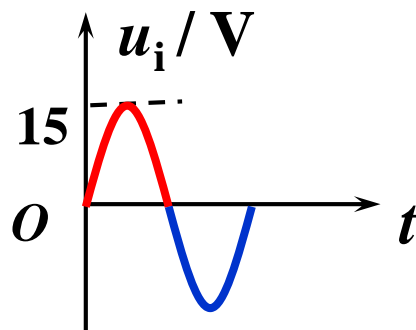
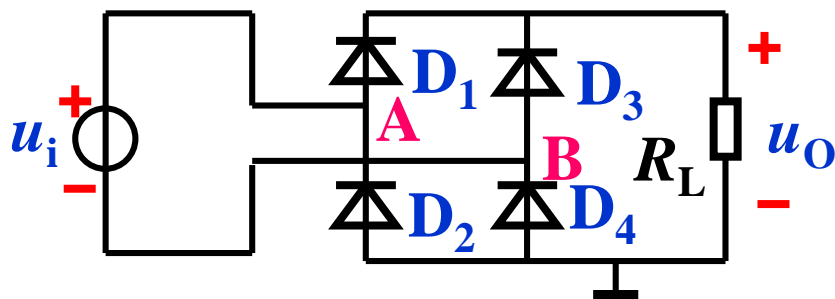
## 桥式整流电路输出波形及二极管上电压波形



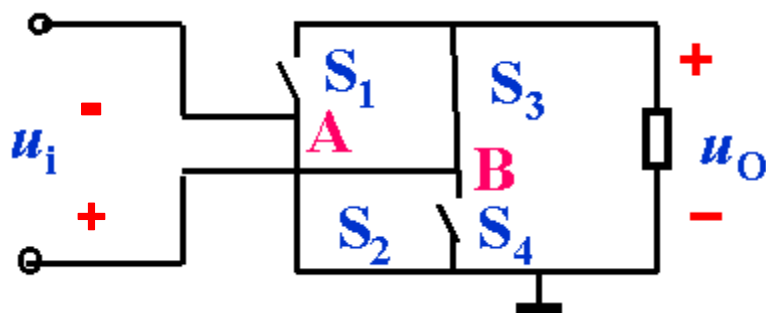
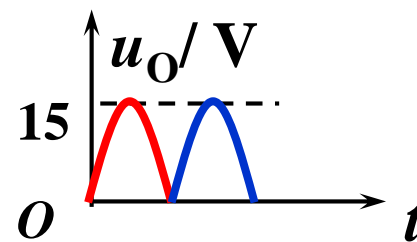
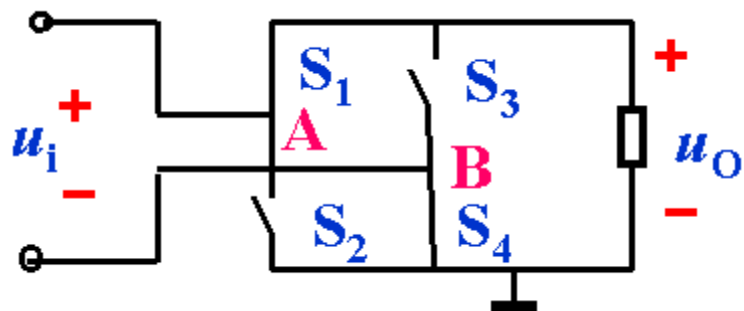
$u_2 > 0$ 时	$u_2 < 0$ 时
$D_1, D_3$ 导通 $D_2, D_4$ 截止 电流通路: $A \rightarrow D_1 \rightarrow R_L \rightarrow D_3 \rightarrow B$	$D_2, D_4$ 导通 $D_1, D_3$ 截止 电流通路: $B \rightarrow D_2 \rightarrow R_L \rightarrow D_4 \rightarrow A$
输出是脉动的直流电压！	

**例4：**画出硅二极管构成的桥式整流电路在  $u_i = 15\sin\omega t$  (V) 作用下输出  $u_o$  的波形。

(按理想模型)

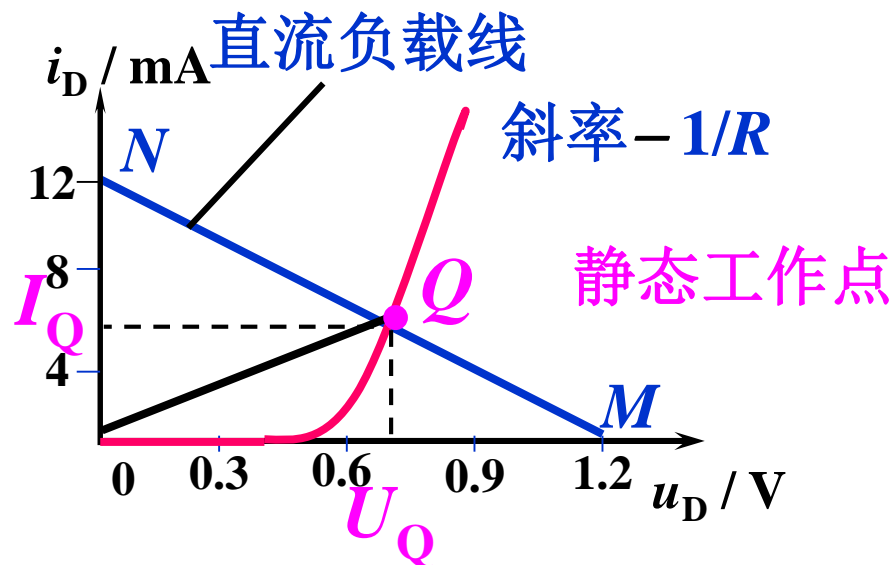
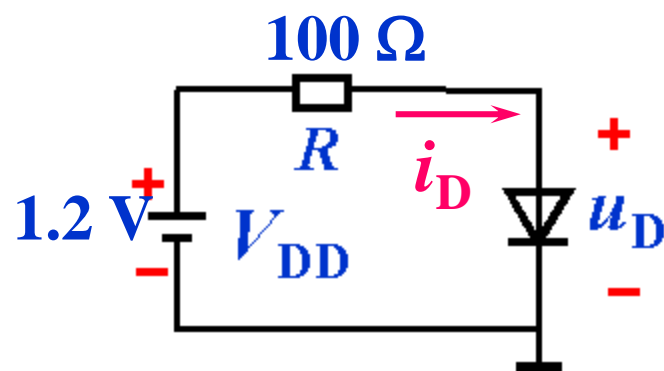


# 模 拟 电 子 技 术



# 补充： 图解法和微变等效电路法

## 一、二极管电路的直流图解分析



$$\begin{cases} u_D = V_{DD} - i_D R \\ i_D = f(u_D) \end{cases} \quad \text{斜率 } 1/R_D$$

也可取  $U_Q = 0.7 \text{ V}$

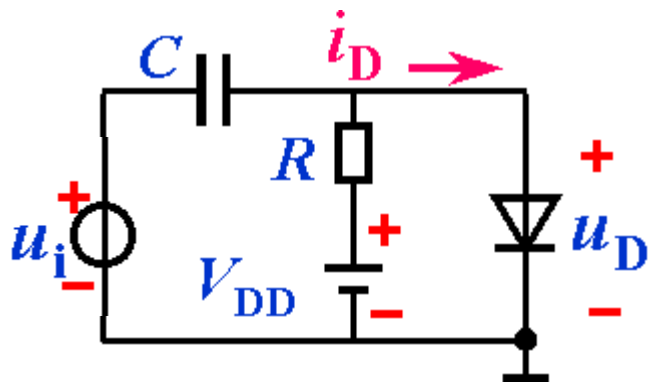
$$I_Q = (V_{DD} - U_Q) / R = 5 \text{ (mA)}$$

二极管直流电阻  $R_D$

$$R_D = \frac{U_Q}{I_Q} = 0.7 / 5 = 0.14 \text{ (k}\Omega\text{)} = 140 \text{ (}\Omega\text{)}$$

## 二、交流图解法

电路中含直流和小信号交流电源时, 二极管中含交、直流成分



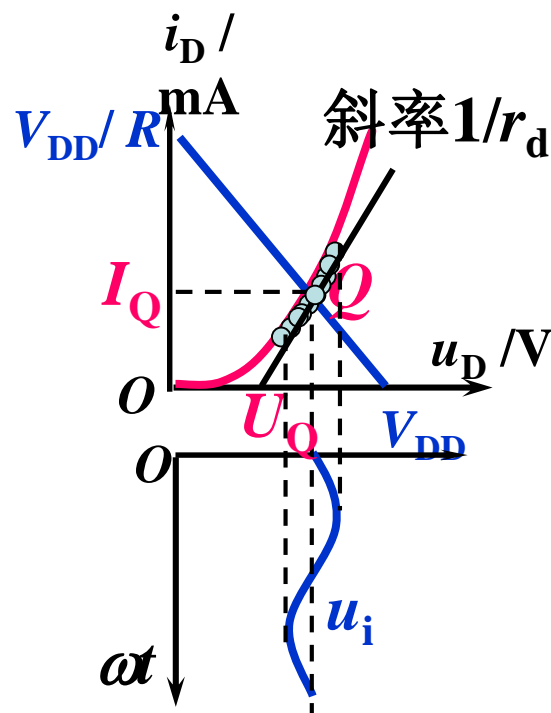
$C$  隔直流 通交流

当  $u_i = 0$  时  $i_D = I_Q$

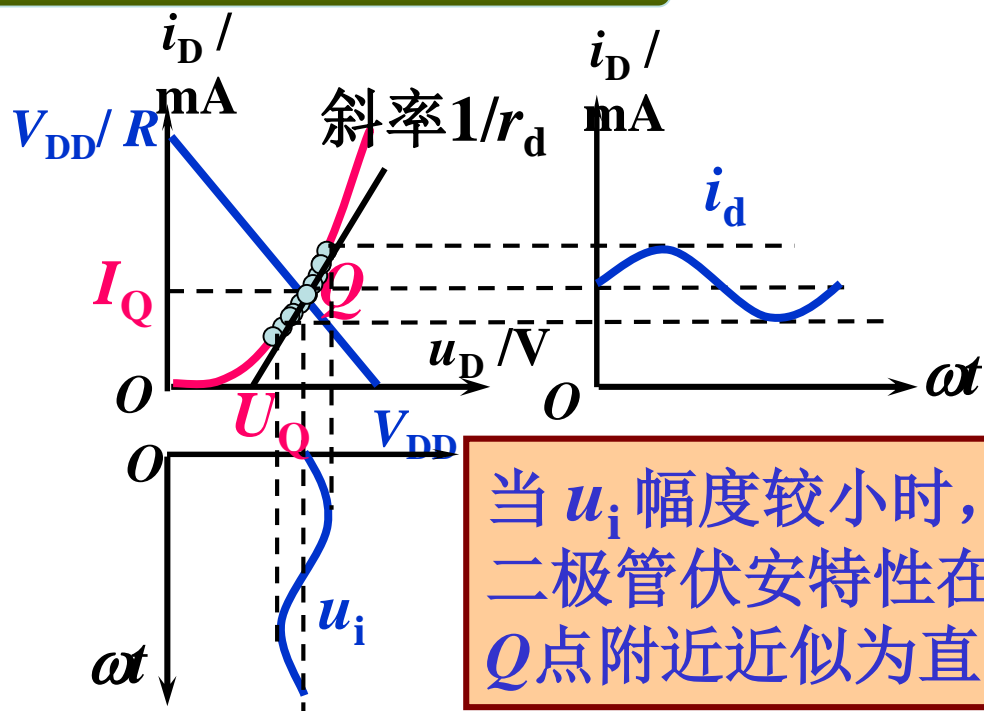
$U_Q = 0.7 \text{ V}$  (硅),  $0.3 \text{ V}$  (锗)

$$I_Q = \frac{V_{DD} - U_Q}{R}$$

设  $u_i = \sin \omega t$



# 模 拟 电 子 技 术



$$\therefore i_D = I_S (e^{u_D/U_T} - 1)$$

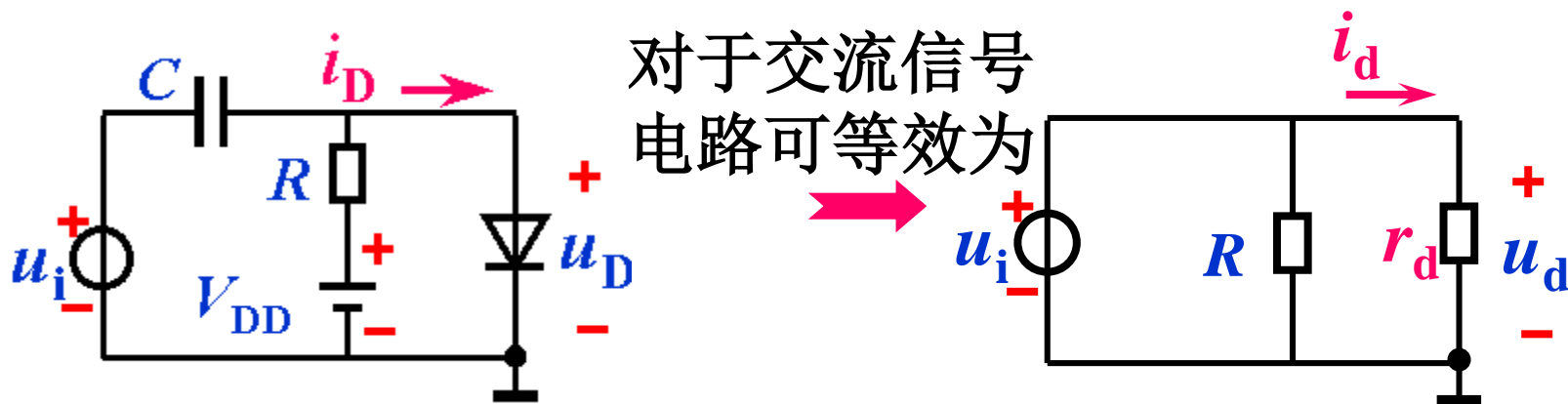
$$\begin{aligned} i_D &= I_Q + i_d \\ u_D &= U_Q + u_d \end{aligned}$$

$$\frac{1}{r_d} = \frac{I_S}{U_T} e^{\frac{U_Q}{U_T}} \approx \frac{I_Q}{U_T}$$

$$r_d = U_T / I_Q = 26 \text{ mV} / I_Q$$



### 三、微变等效电路分析法



例：  $u_i = 5\sin\omega t$  (mV),  $V_{DD} = 4$  V,  $R = 1$  k $\Omega$ ,  
求  $i_D$  和  $u_D$ 。

[解] 1. 静态分析 令  $u_i = 0$ , 取  $U_Q \approx 0.7$  V

$$I_Q = (V_{DD} - U_Q) / R = 3.3 \text{ mA}$$

## 2. 动态分析

$$r_d = 26 / I_Q = 26 / 3.3 \approx 8 (\Omega)$$

$$I_{dM} = U_{dM} / r_d = 5 / 8 \approx 0.625 (\text{mA})$$

$$i_d = 0.625 \sin \omega t$$

## 3. 总电压、电流

$$u_D = U_Q + u_d = (0.7 + 0.005 \sin \omega t) \text{ V}$$

$$i_D = I_Q + i_d = (3.3 + 0.625 \sin \omega t) \text{ mA}$$



## 2.3 双极型半导体三极管 (Semiconductor Transistor)

2.3.1 BJT的结构及类型

2.3.2 BJT的电流放大作用

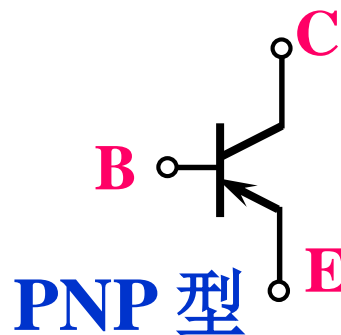
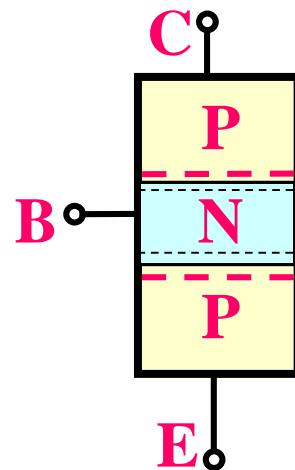
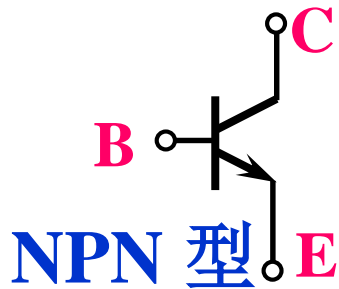
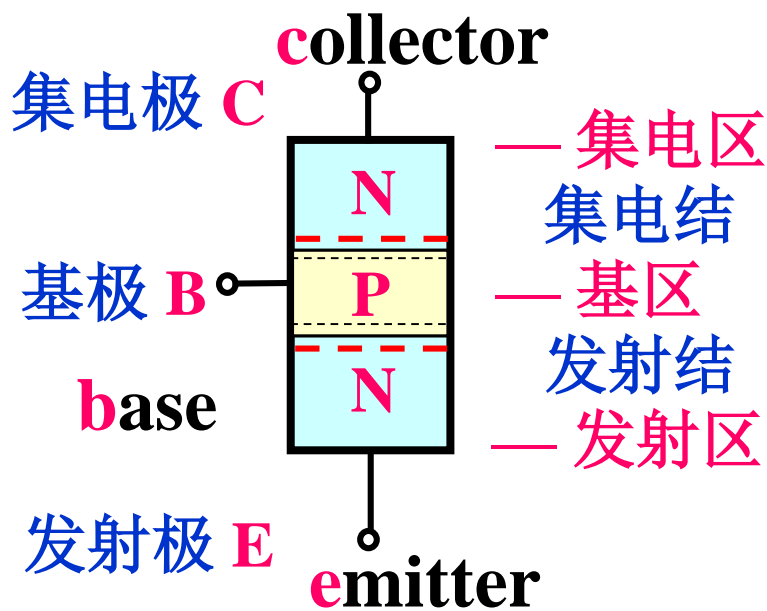
2.3.3 BJT的特性曲线

2.3.4 BJT的主要参数

2.3.5 温度对BJT的特性及参数的影响

## 2.3.1 BJT的结构及类型

### 一、结构与符号



## 二、分类

按材料分：        硅管、锗管

按结构分：        NPN、PNP

按使用频率分：    低频管、高频管

按功率分：        小功率管  $< 500 \text{ mW}$

中功率管  $0.5 \sim 1 \text{ W}$

大功率管  $> 1 \text{ W}$

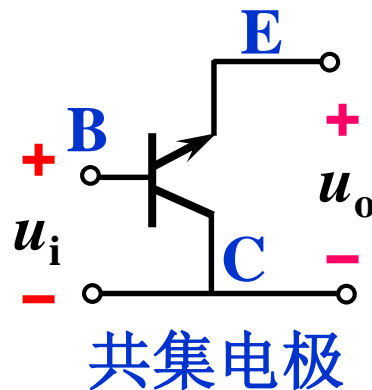
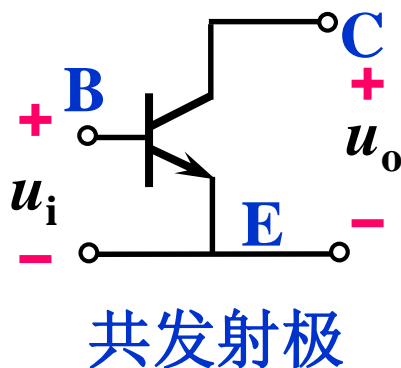
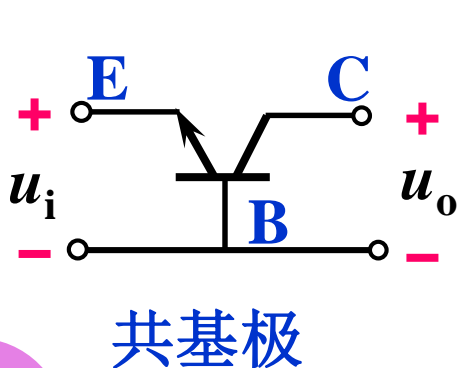


## 2.3.2 BJT的电流放大作用

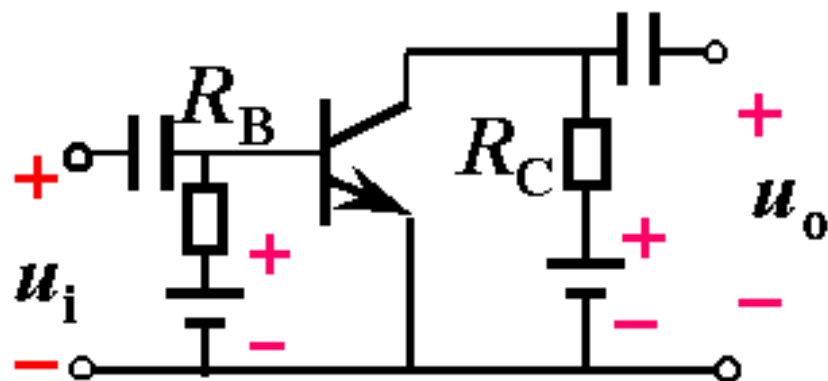
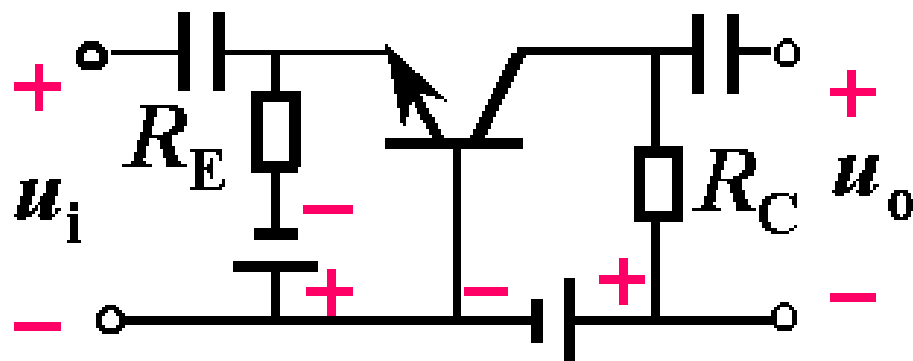
### 2. 三极管放大的条件

内部条件 {	发射区掺杂浓度高 基区薄且掺杂浓度低 集电结面积大	外部条件 {	发射结正偏 集电结反偏
--------	---------------------------------	--------	----------------

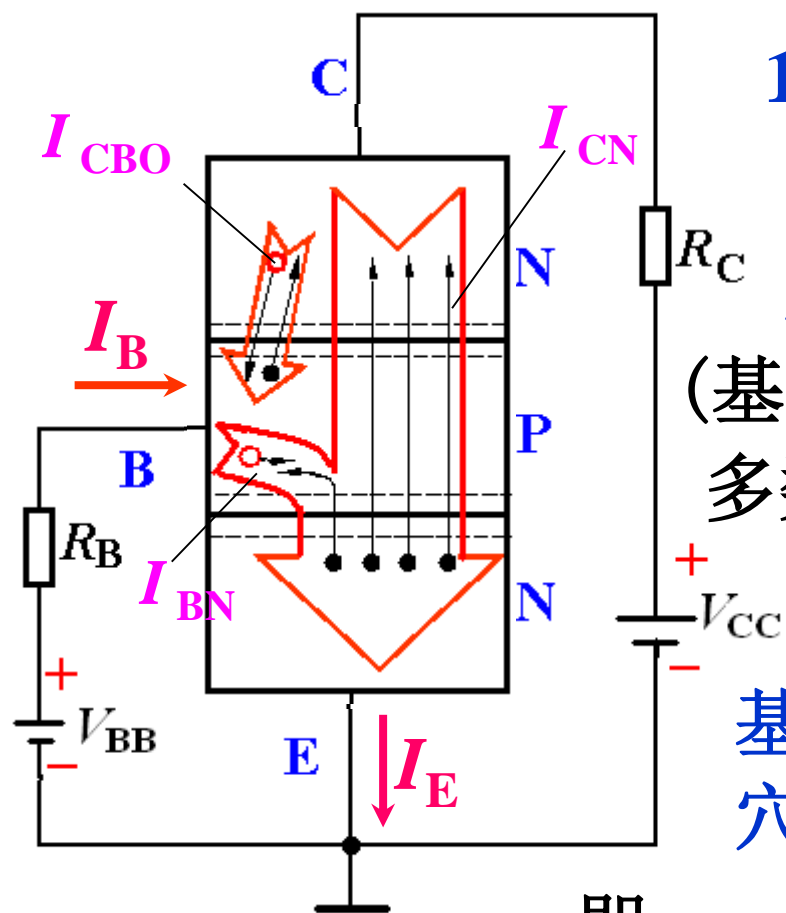
### 2. 满足放大条件的三种电路



实现电路:



## 3. 三极管内部载流子的传输过程



1) 发射区向基区注入多子电子，形成发射极电流  $I_E$ 。

2) 电子到达基区后  
(基区空穴运动因浓度低而忽略)  
多数向 BC 结方向扩散形成  $I_{CN}$ 。  
少数与空穴复合，形成  $I_{BN}$ 。

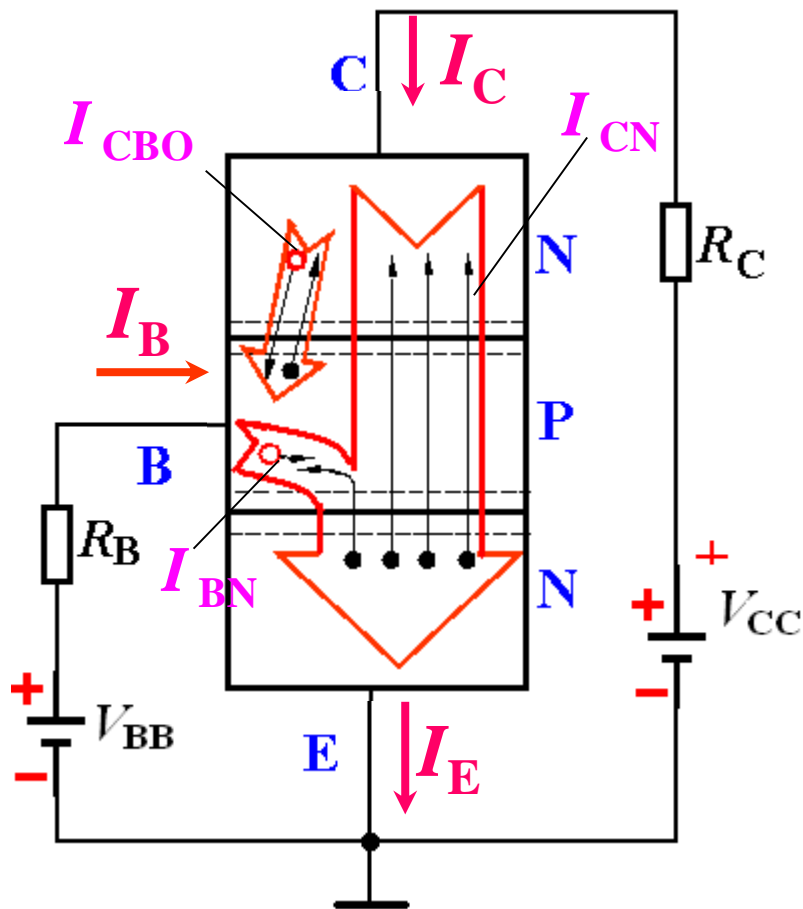
基区空穴来源 { 基极电源提供 ( $I_B$ )  
集电区少子漂移 ( $I_{CBO}$ )

即：

$$I_{BN} \approx I_B + I_{CBO}$$

$$I_B = I_{BN} - I_{CBO}$$





3) 集电区收集扩散过来的载流子形成集电极电流  $I_C$

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO}$$

## 4. 三极管的电流分配关系

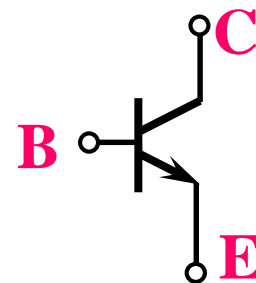
$$I_B = I_{BN} - I_{CBO} \quad I_C = I_{CN} + I_{CBO}$$

当管子制成后，发射区载流子浓度、基区宽度、集电结面积等确定，故电流的比例关系确定，即：

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CN}}{I_{BN}} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}}$$

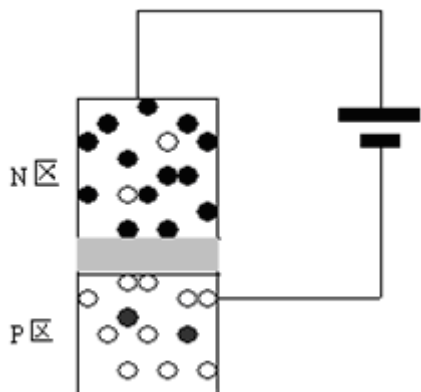
$$I_C = \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + \underbrace{I_{CEO}}_{\text{穿透电流}}$$

$$\begin{cases} I_E = I_C + I_B \\ I_C = \overline{\beta} I_B + I_{CEO} \\ I_E = (1 + \overline{\beta}) I_B + I_{CEO} \end{cases}$$



$$\Rightarrow \begin{cases} I_E = I_C + I_B \\ I_C = \overline{\beta} I_B \\ I_E = (1 + \overline{\beta}) I_B \end{cases}$$

## 晶体三极管的进一步理解



二极管单向导电性：正向电压导通，反向截止。  
截止和开关的物理断开有差异。

截止时的漏电流

P区除了因“掺杂”而产生的多数载流子“空穴”之外，还总是会有极少数的本征载流子“电子”出现。N区也是一样，除了多数载流子电子之外，也会有极少数的载流子空穴存在。PN结反偏时，能够正向导电的多数载流子被拉向电源，使PN结变厚，多数载流子不能再通过PN结承担起载流导电的功能。

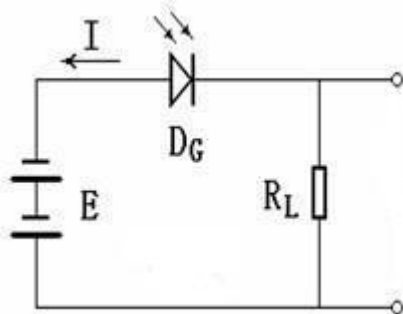
所以，此时漏电流的形成主要靠的是少数载流子，是少数载流子在起导电作用。

反偏时，少数载流子在电源的作用下能够很容易地反向穿过PN结形成漏电流。

漏电流之所以很小，是因为少数载流子的数量太少。很明显，此时漏电流的大小主要取决于少数载流子的数量。如果要想人为地增加漏电流，只要想办法增加反偏时少数载流子的数量即可。



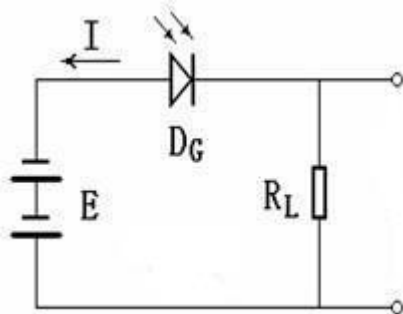
## 晶体三极管的进一步理解



当无光照时，电路中也有很小的反向饱和漏电流，一般为 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-9} \text{A}$ (称为暗电流)，此时相当于光敏二极管截止；

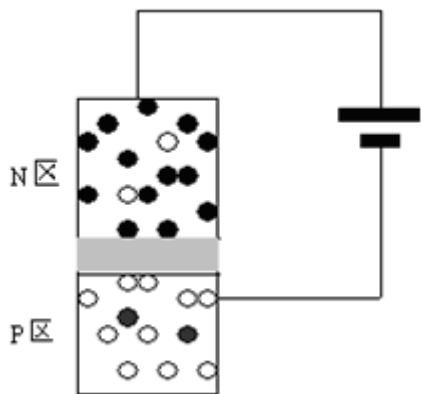
当有光照射时，PN结附近受光子的轰击，半导体内被束缚的价电子吸收光子能量而被击发产生电子—空穴对，这些载流子的数目，对于多数载流子影响不大，但对P区和N区的少数载流子来说，则会使少数载流子的浓度大大提高，在反向电压作用下，反向饱和漏电流大大增加，形成光电流，该光电流随入射光强度的变化而相应变化。光电流通过负载 $R_L$ 时，在电阻两端将得到随入射光变化的电压信号。

## 晶体三极管的进一步理解



光敏二极管工作在反偏状态，因为光照可以增加少数载流子的数量，因而光照就会导致反向漏电流的改变，人们就是利用这样的道理制作出了光敏二极管。

## 晶体三极管的进一步理解



PN结正、反偏时，多数载流子和少数载流子所充当的角色及其性质。

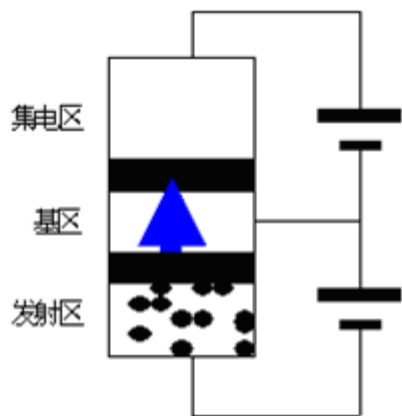
正偏时是多数载流子载流导电，反偏时是少数载流子载流导电。所以，正偏电流大，反偏电流小，PN结显示出单向电性。

**反偏时少数载流子反向通过PN结是很容易的，甚至比正偏时多数载流子正向通过PN结还要容易？**

PN结内部存在有一个因多数载流子相互扩散而产生的内电场，而内电场的作用方向总是阻碍多数载流子的正向通过，所以，多数载流子正向通过PN结时就需要克服内电场的作用，需要约0.7伏的外加电压，这是PN结正向导通的门电压。而反偏时，内电场在电源作用下会被加强也就是PN结加厚，少数载流子反向通过PN结时，内电场作用方向和少数载流子通过PN结的方向一致，也就是说此时的内电场对于少数载流子的反向通过不仅不会有阻碍作用，甚至还会有帮助作用。

**反偏时少数载流子反向通过PN结是很容易的，甚至比正偏时多数载流子正向通过PN结还要容易。**

## 晶体三极管的进一步理解



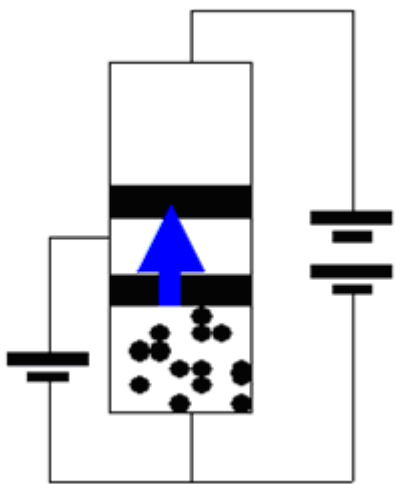
利用光照控制少数载流子的产生数量就可以实现人为地控制漏电流的大小。既然如此，人们自然也会想到能否把控制的方法改变一下，不用光照而是用电注入的方法来增加N区或者是P区少数载流子的数量，从而实现对PN结的漏电流的控制。也就是不用“光”的方法，而是用“电”的方法来实现对电流的控制。

P区的少数载流子是电子，要想用电注入的方法向P区注入电子，最好的方法就是如左图所示，在P区下面再用特殊工艺加一块N型半导体。

在基极与发射极之间加上一个足够的正向的门电压（约为0.7伏），在外加门电压作用下，发射区的电子就会很容易地被发射注入到基区，这样就实现对基区少数载流子“电子”在数量上的改变。



## 晶体三极管的进一步理解



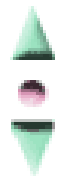
发射结加上正偏电压导通后，在外加电压的作用下，发射区的多数载流子——电子就会很容易地被大量发射进入基区。这些载流子一旦进入基区，它们在基区（P区）的性质仍然属于少数载流子的性质。

少数载流子很容易反向穿过处于反偏状态的PN结，所以，这些载流子——电子就会很容易向上穿过处于反偏状态的集电结到达集电区形成集电极电流 $I_c$ 。

集电极电流的大小更主要的要取决于发射区载流子对基区的发射与注入，取决于这种发射与注入的程度。这种载流子的发射注入程度及乎与集电极电位的高低没有什么关系。

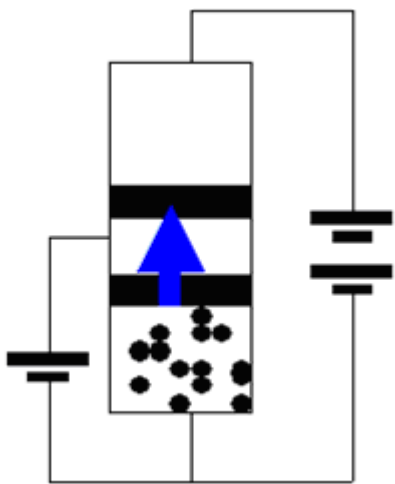
$I_c$ 的本质是“少子”电流，是通过电子注入而实现的人为可控的集电结“漏”电流。

三极管在电流放大状态下，内部的主要电流就是由载流子电子由发射区经基区再到集电区贯穿三极管所形成。也就是贯穿三极管的电流 $I_c$ 主要是电子流。



## 晶体三极管的进一步理解

$I_c$ 为什么和 $I_B$ 有关系和 $V_{CC}$ 无关？



贯穿整个管子的电子流在通过基区时，基区会对电子流进行截流。如果基区做得薄，掺杂度低，基区的空穴数就会少，那么空穴对电子的截流量就小，反之截流量就会大。很明显只要晶体管三极管的内部结构确定，这个截流比也就确定。所以，为了获大较大的电流放大倍数，使 $\beta$ 值足够高，在制作三极管时往往要把基区做得很薄，而且其掺杂度也要控制得很低。

晶体管的截流主要是靠分布在基区的带正电的“空穴”对贯穿的电子流中带负电的“电子”中和来实现。所以，截流的效果主要取决于基区空穴的数量。而且，这个过程是个动态过程，“空穴”不断地与“电子”中和，同时“空穴”又不断地会在外部电源作用下得到补充。在这个动态过程中，空穴的等效总数量是不变的。基区空穴的总数量主要取决于掺“杂”度以及基区的厚薄，只要晶体管结构确定，基区空穴的总定额就确定，其相应的动态总量就确定。这样，截流比就确定，晶体管的电流放大倍数的值就是定值。这就是为什么放大状态下，三极管的电流 $I_c$ 与 $I_b$ 之间会有一个固定的比例关系的原因。

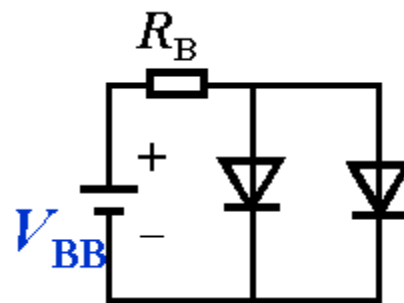
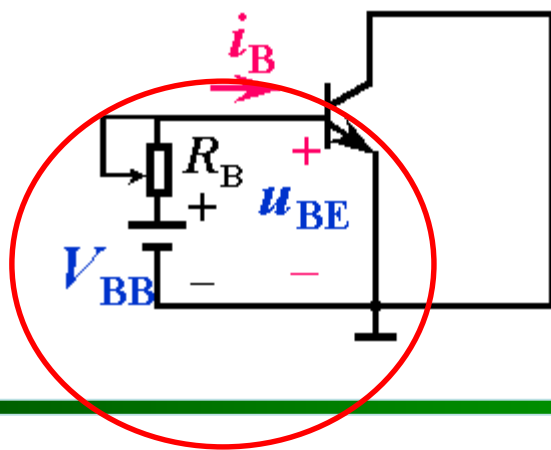
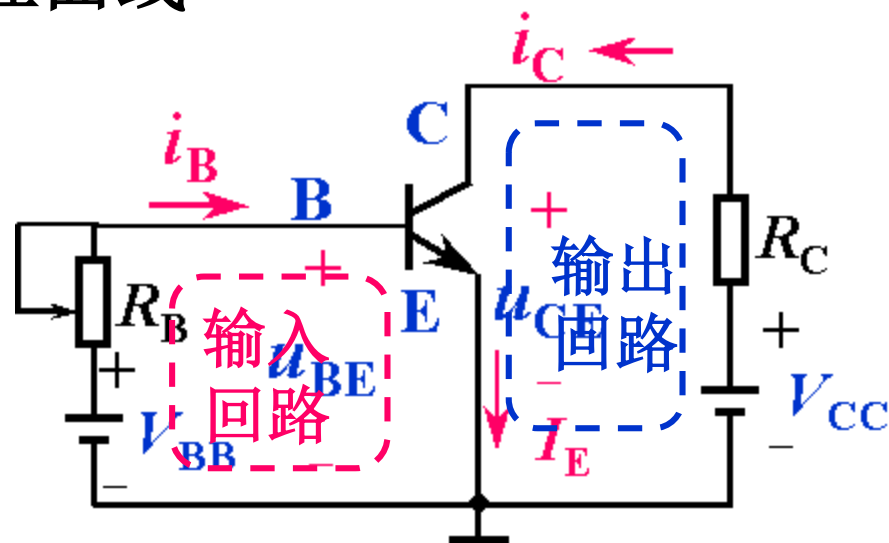
## 2.3.3 晶体三极管的特性曲线

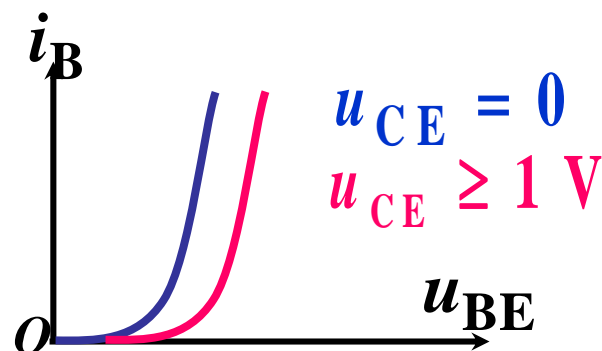
### 一、输入特性

$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{u_{CE}=\text{常数}}$$

若： $u_{CE} = 0$

与二极管特性相似





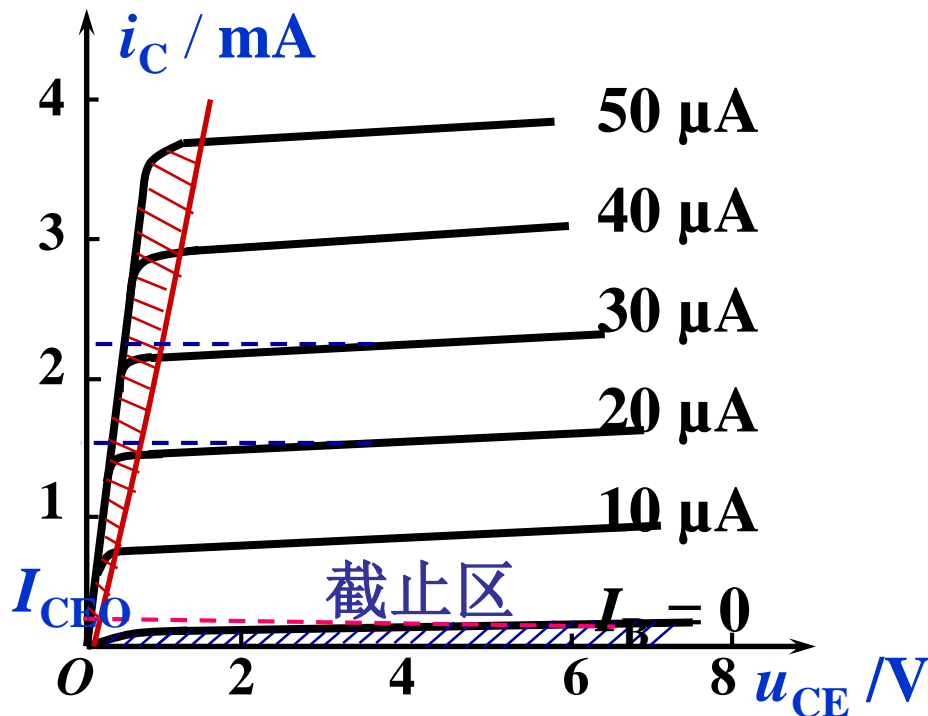
$u_{CE} > 0$  特性右移 (因集电结开始吸引电子)

$u_{CE} \geq 1 \text{ V}$  特性基本重合 (电流分配关系确定)

导通电压  $U_{BE(on)}$  { 硅管:  $(0.6 \sim 0.8) \text{ V}$  取  $0.7 \text{ V}$   
锗管:  $(0.2 \sim 0.4) \text{ V}$  取  $0.3 \text{ V}$

## 二、输出特性

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{i_B = \text{常数}}$$

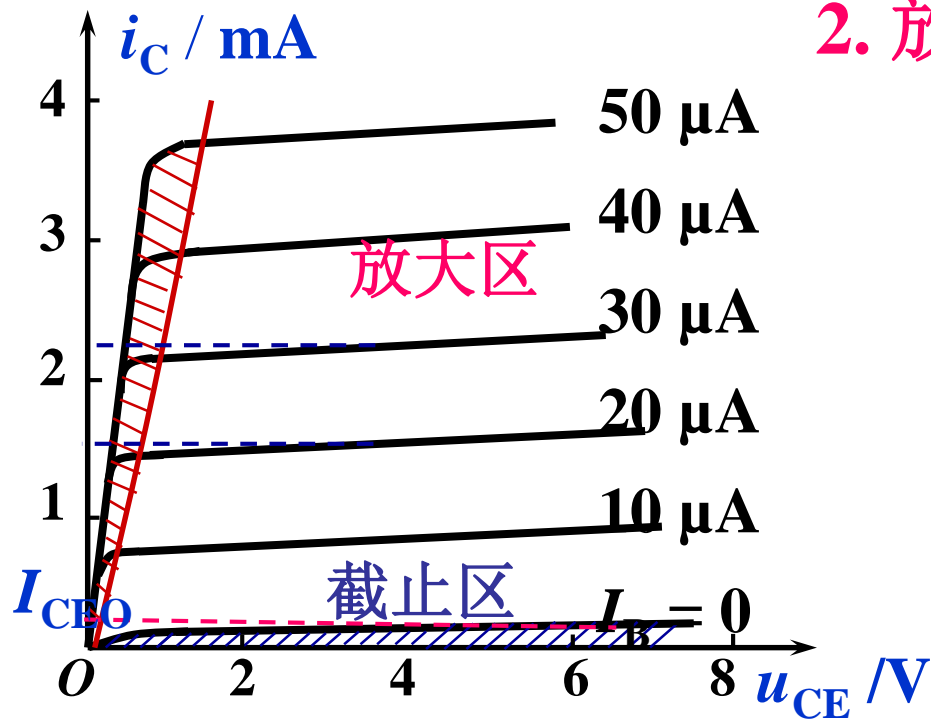


1. 截止区:

$$I_B \leq 0$$

$$I_C = I_{CEO} \approx 0$$

条件: 两个结反偏



## 2. 放大区:

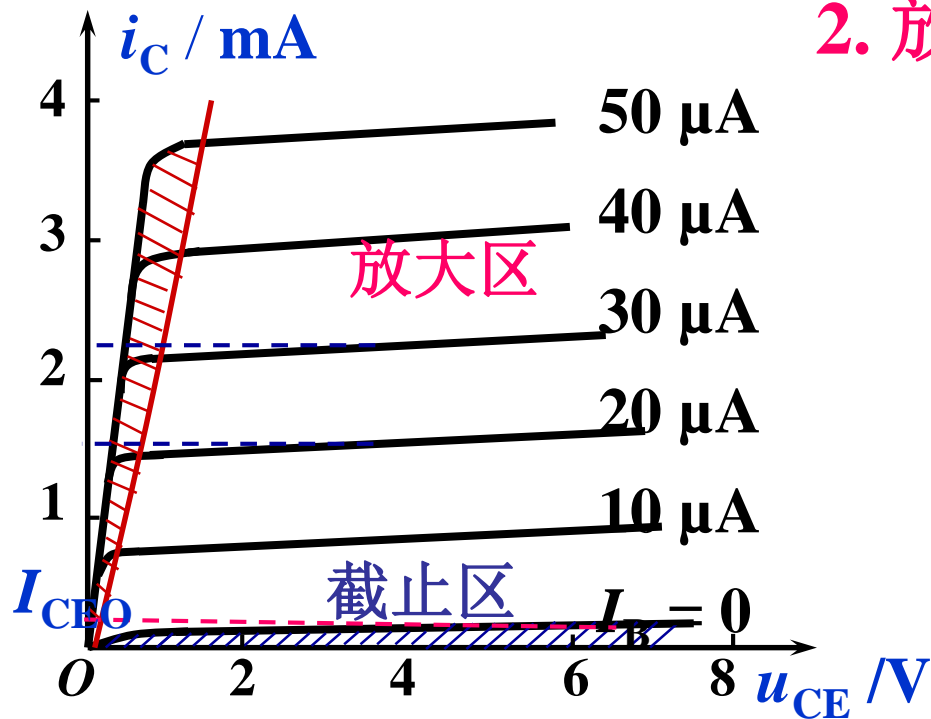
$$I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$$

条件:

发射结正偏  
集电结反偏

特点:

水平、等间隔



## 2. 放大区:

$$I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$$

条件:

发射结正偏 BE

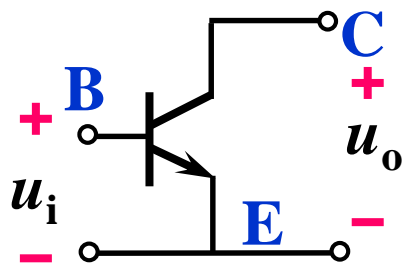
$V_B(P) > V_E(N)$

集电结反偏 BC

$V_B(P) < V_C(N)$

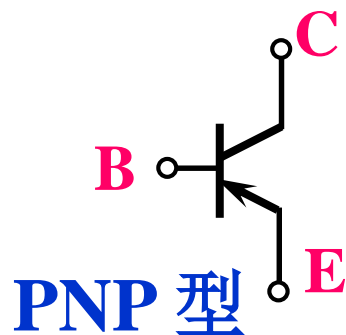
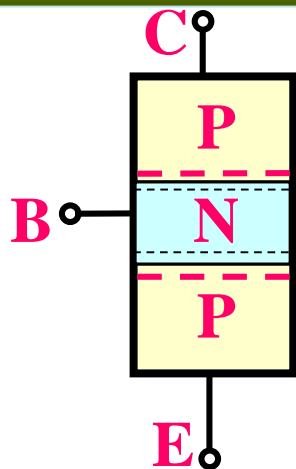
NPN B:P E C: N

$V_E < V_B < V_C$

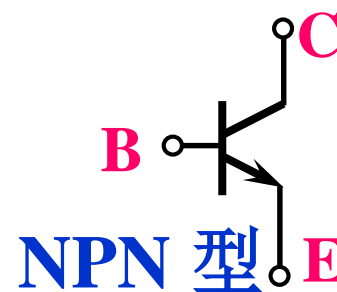
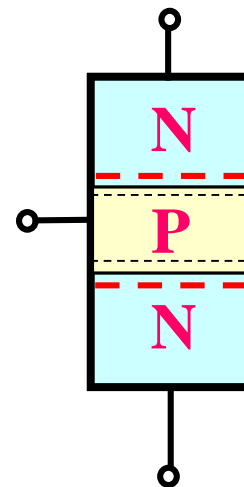


共发射极

# 模 拟 电 子 技 术

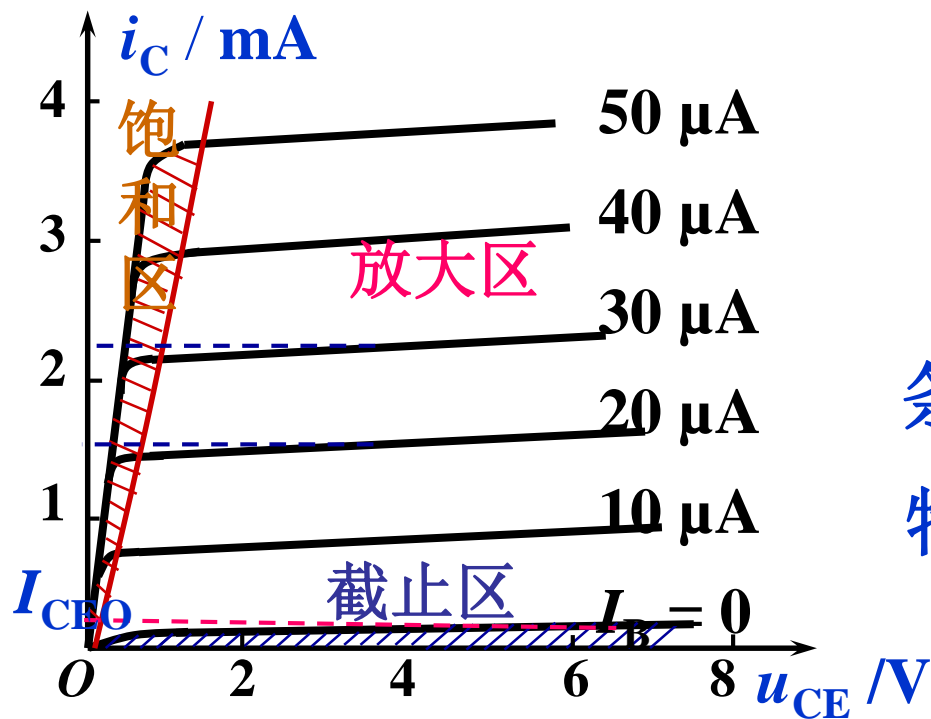


PNP条件:  
发射结正偏 BE  
集电结反偏 BC  
B:N EC: P  
 $V_E > V_B > V_C$



NPN条件:  
发射结正偏 BE  
集电结反偏 BC  
B:P EC: N  
 $V_C > V_B > V_E$





## 3. 饱和区:

$$u_{CE} \leq u_{BE}$$

$$u_{CB} = u_{CE} - u_{BE} \leq 0$$

条件: 两个结正偏

特点:  $I_C \neq \beta I_B$

深度饱和时:

临界饱和时:

$$u_{CE} = u_{BE}$$

$$U_{CE(SAT)} = \begin{cases} 0.3 \text{ V (硅管)} \\ 0.1 \text{ V (锗管)} \end{cases}$$

## 2.3.4 晶体三极管的主要参数

### 一、电流放大系数

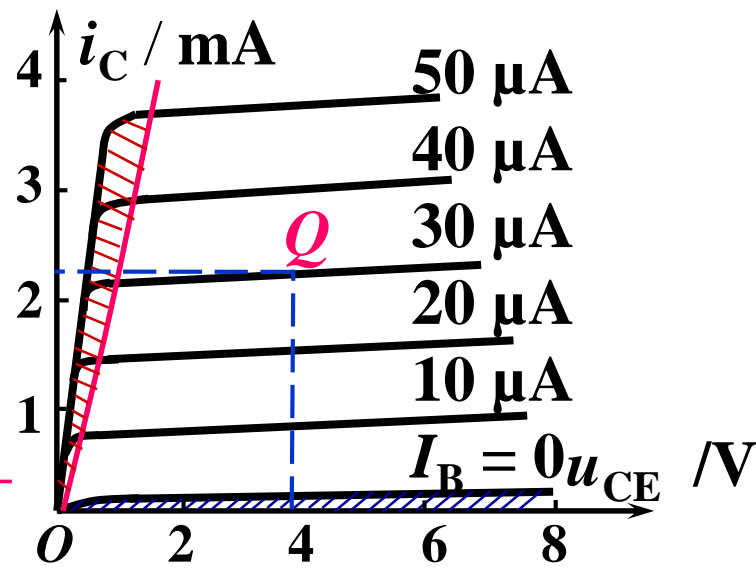
#### 1. 共发射极电流放大系数

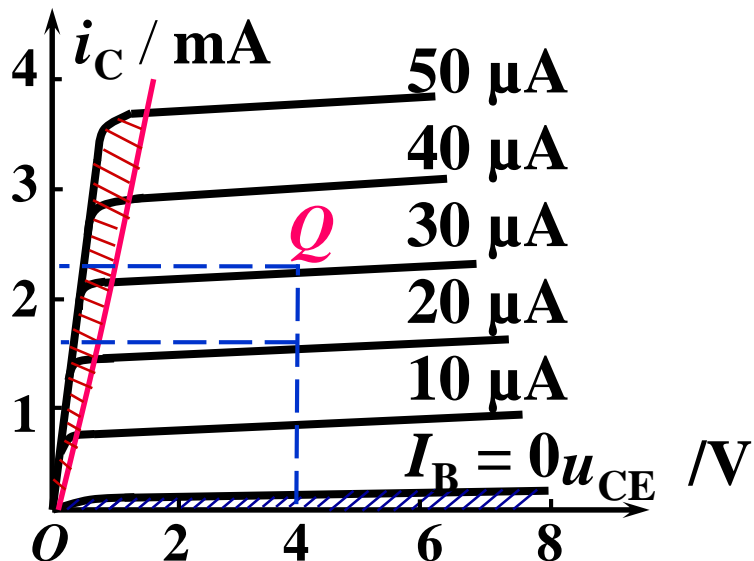
$\bar{\beta}$  — 直流电流放大系数

$$\bar{\beta} = \frac{2.45 \times 10^{-3} \text{ A}}{30 \times 10^{-6} \text{ A}} \approx 82 \approx \frac{I_C}{I_B}$$

$\beta$  — 交流电流放大系数

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} = \frac{(2.45 - 1.65) \times 10^{-3} \text{ A}}{10 \times 10^{-6} \text{ A}} = \frac{0.8}{10} = 80$$





## 2. 共基极电流放大系数

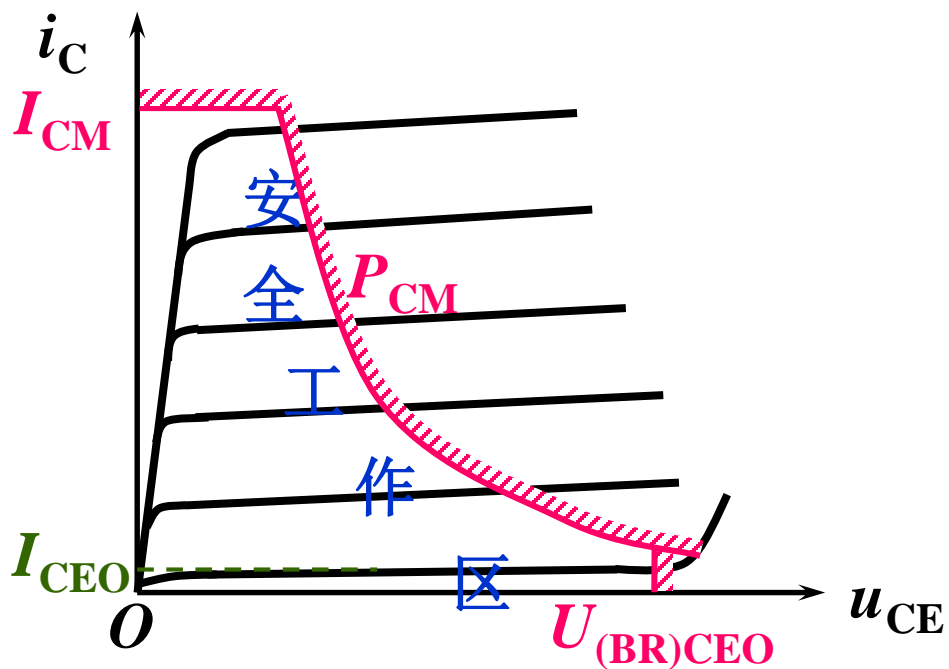
$\alpha < 1$  一般在 0.98 以上。

$$\bar{\alpha} = \frac{80}{80 + 1} = 0.988 = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

## 二、极间反向饱和电流

CB 极间反向饱和电流  $I_{CBO}$ ，CE 极间反向饱和电流  $I_{CEO}$ 。

### 三、极限参数



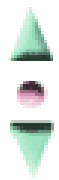
1.  $I_{CM}$  — 集电极最大允许电流，超过时  $\beta$  值明显降低。
2.  $P_{CM}$  — 集电极最大允许功率损耗  $P_C = i_C \times u_{CE}$

3.  $U_{(BR)CEO}$  — 基极开路时 C、E 极间反向击穿电压。

$U_{(BR)CBO}$  — 发射极开路时 C、B 极间反向击穿电压。

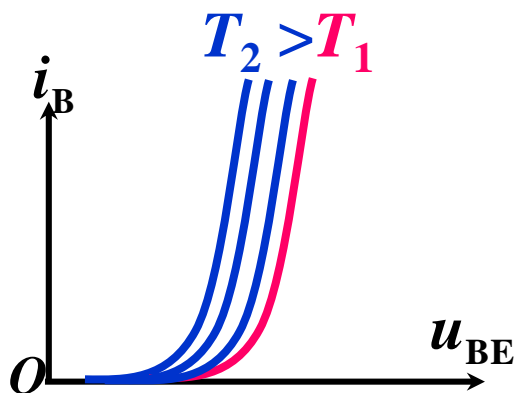
$U_{(BR)EBO}$  — 集电极极开路时 E、B 极间反向击穿电压。

$$U_{(BR)CBO} > U_{(BR)CEO} > U_{(BR)EBO}$$



## 2.3.4 温度对BJT特性曲线的影响

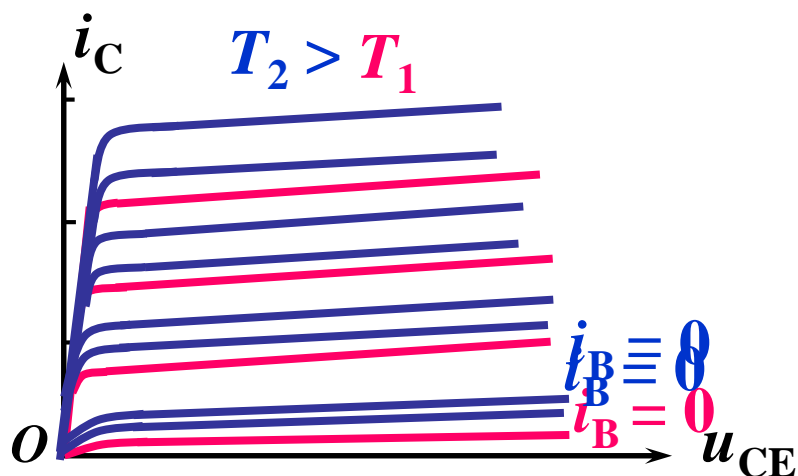
1. 温度升高，输入特性曲线向左移。



温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{BE} \downarrow (2 \sim 2.5) \text{ mV}$ 。

温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{CBO}$  约增大 1 倍。

## 2. 温度升高，输出特性曲线向上移。

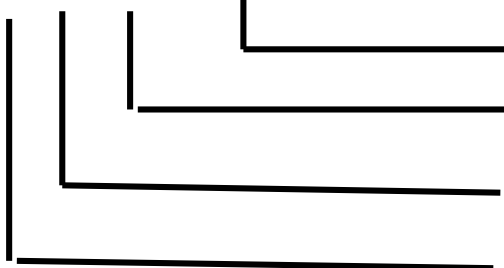


温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ,  $\beta \uparrow (0.5 \sim 1)\%$ 。

输出特性曲线间距增大。

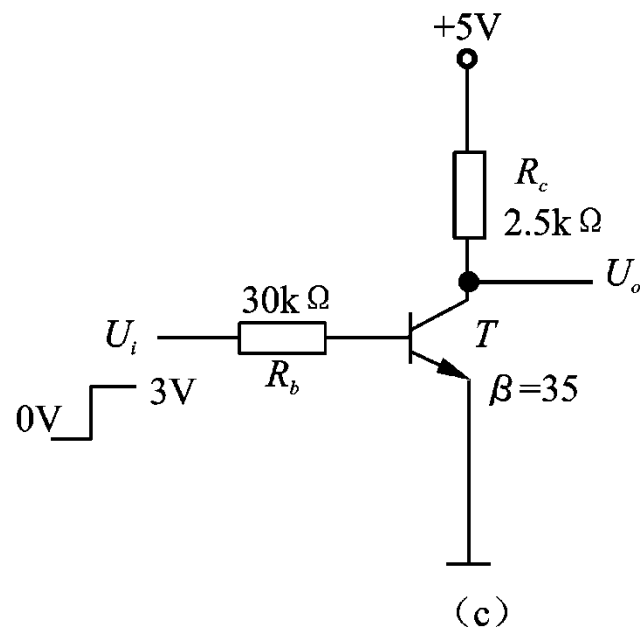
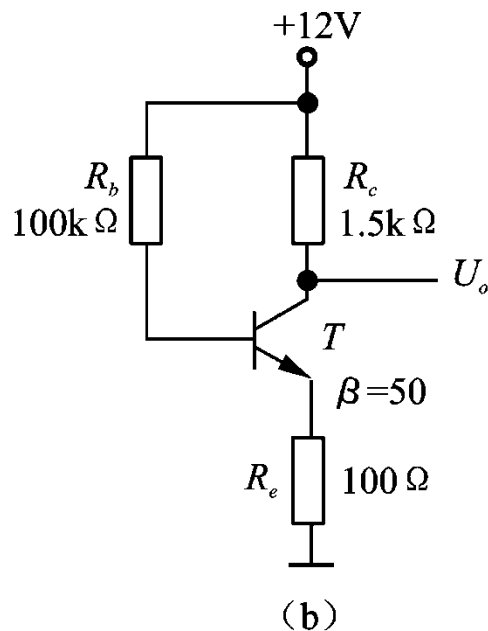
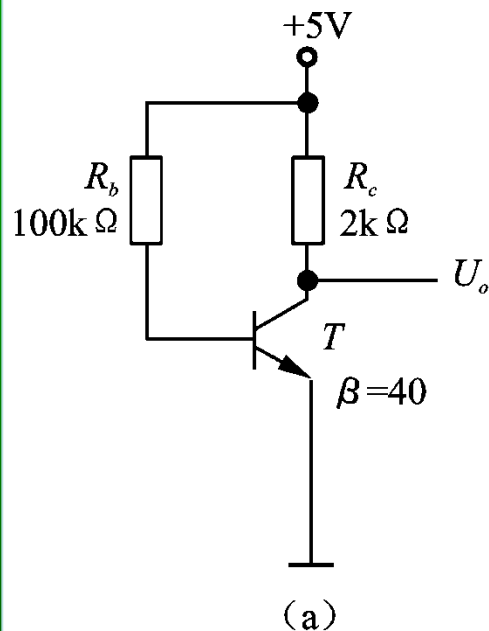
- 半导体三极管的型号（补充）

国家标准对半导体三极管的命名如下：

- **3 D G 110 B** ——用字母表示同一型号中的不同规格
- 用数字表示同种器件型号的序号
- 用字母表示器件的种类
- 用字母表示材料
- 三极管
- 第二位：A表示锗PNP管、B表示锗NPN管、C表示硅PNP管、D表示硅NPN管
- 第三位：X表示低频小功率管、D表示低频大功率管、G表示高频小功率管、A表示高频小功率管、K表示开关管。

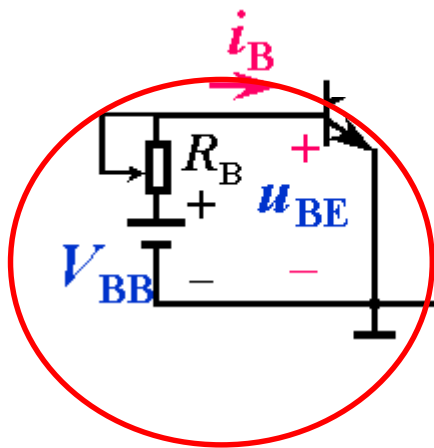
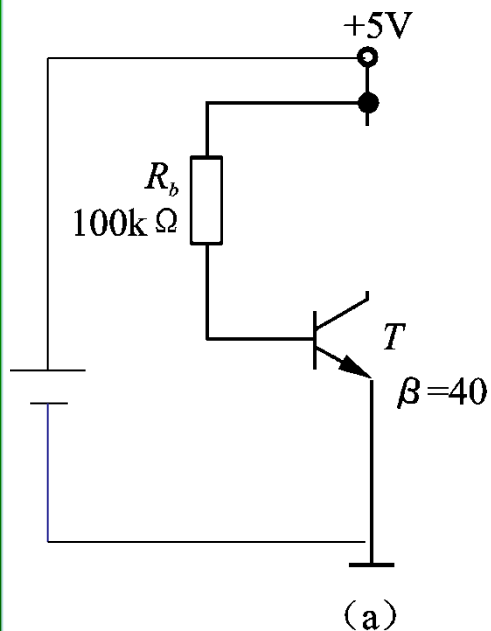


例：判断下图各三极管的工作状态。



**V<sub>BB</sub>、V<sub>CC</sub>、R<sub>B</sub>、R<sub>C</sub>都会影响三极管的工作状态**

例：判断下图各三极管的工作状态。



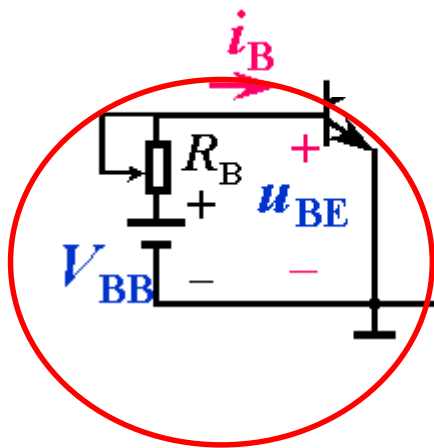
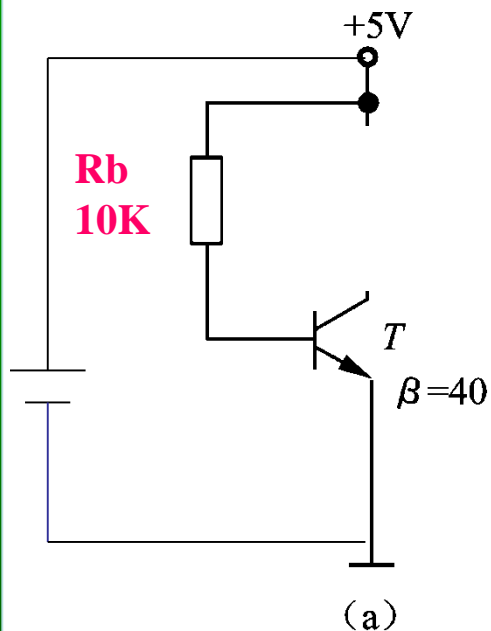
$$V_B = U_{BE} + U_E = U_{BE} = 0.7V$$

$$I_B = (V_{BB} - V_B) / R_b = (5 - 0.7) / 100K = 43\mu A$$

假定放大区

$$I_C = \beta I_B = 40 * 43 = 1.72mA$$

例：判断下图各三极管的工作状态。



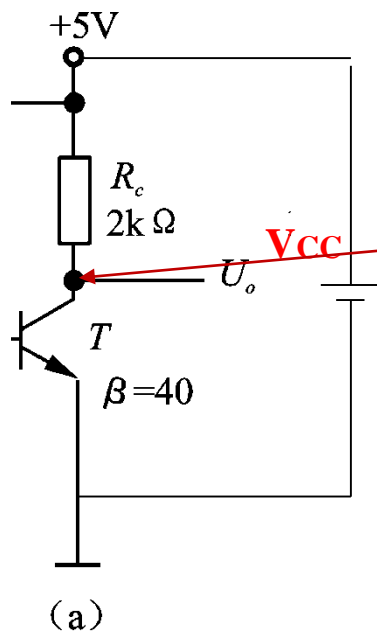
$$V_B = U_{BE} + U_E = U_{BE} = 0.7V$$

$$I_B = (V_{BB} - V_B) / R_b = (5 - 0.7) / 10K = 430\mu A$$

假定放大区

$$I_C = \beta I_B = 40 * 430 = 17.2mA$$

例：判断下图各三极管的工作状态。



假定放大区

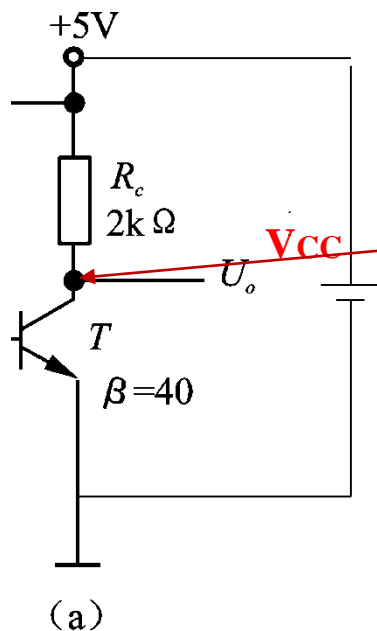
$$I_C = \beta I_B = 40 * 430 = 17.2\text{mA}$$

$$V_C = V_{CC} - I_C * R_C = 5 - 17.2 * 2 = -30\text{V}$$

$$V_B = 0.7\text{V}$$

$$V_E = 0\text{V}$$

例：判断下图各三极管的工作状态。



假定放大区

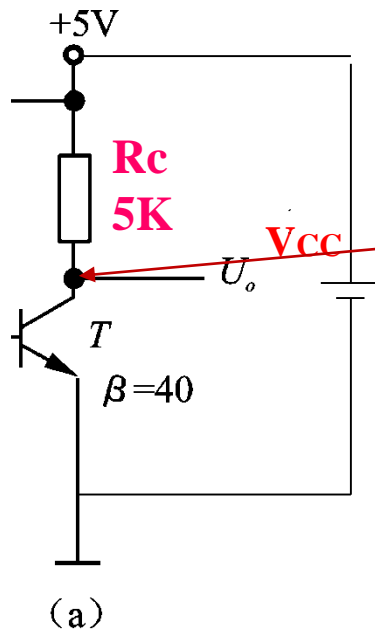
$$I_C = \beta I_B = 40 \times 43 = 1.72 \text{mA}$$

$$V_C = V_{CC} - I_C \times R_C = 5 - 1.72 \times 2 = 1.6 \text{V}$$

$$V_B = 0.7 \text{V}$$

$$V_E = 0 \text{V}$$

例：判断下图各三极管的工作状态。



假定放大区

$$I_C = \beta I_B = 40 \times 43 = 1.72 \text{mA}$$

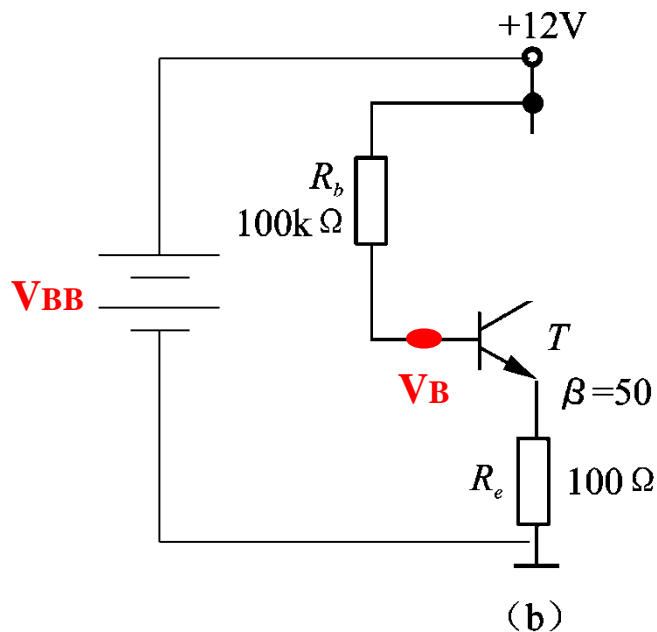
$$V_C = V_{CC} - I_C \times R_C = 5 - 1.72 \times 5 = -3.5 \text{V}$$

$$V_B = 0.7 \text{V}$$

$$V_E = 0 \text{V}$$

饱和区

例：判断下图各三极管的工作状态。



$$I_B = ?$$

$$V_B = ?$$

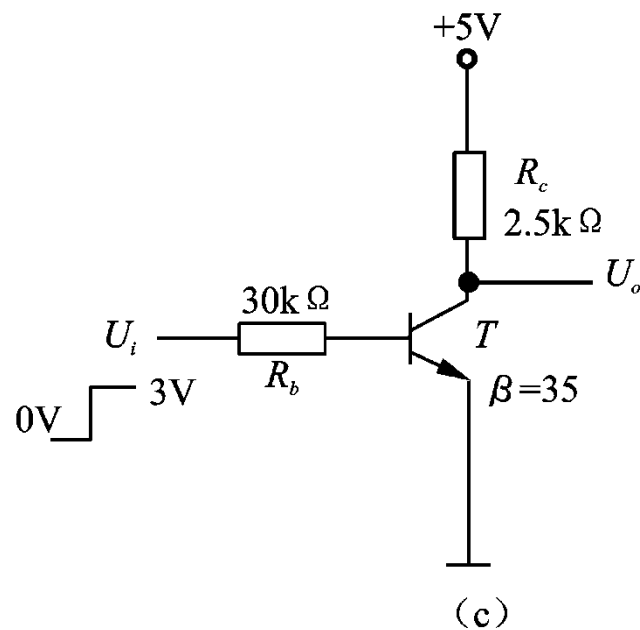
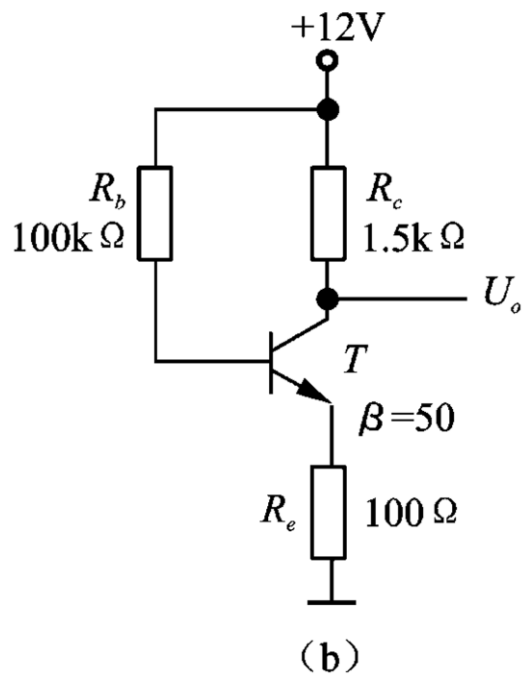
假定放大区

$$I_C = \beta I_B = 50 * ? = \text{mA}$$

【匿名】露娜 8:59:58

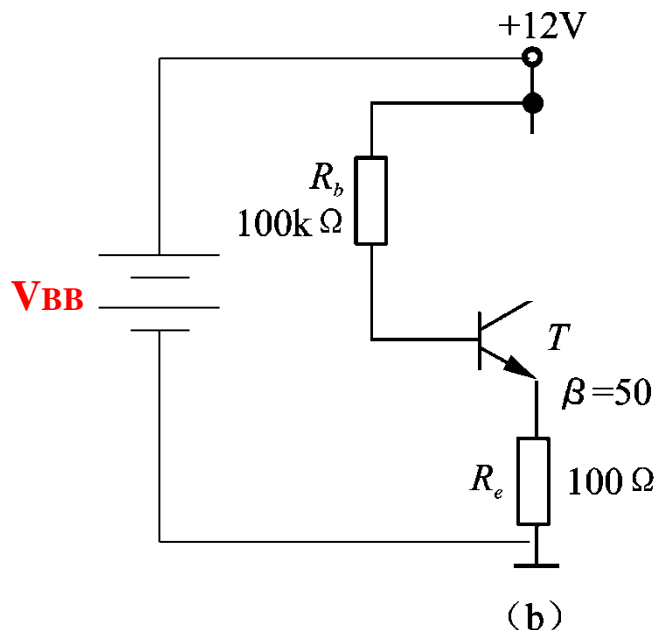
$$V_{bb} - 0.7 = I_b * R_b + (I_b + I_c) * R_e$$

习题：判断下图各三极管的工作状态。





例：判断下图各三极管的工作状态。



【匿名】露娜 8:59:58

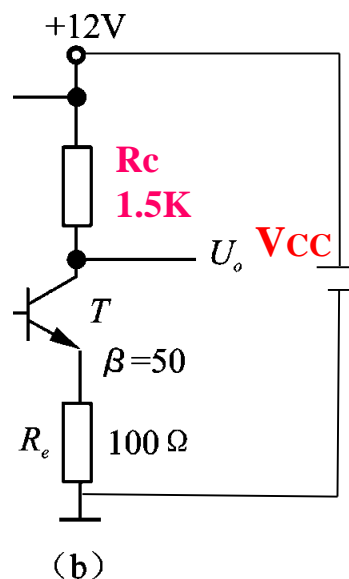
$$V_{bb} - 0.7 = I_B * R_B + (I_B + I_C) * R_E$$

$$V_{BB} - 0.7 = I_B * R_B + (1 + \beta) I_B * R_E$$

$$100k I_B + 51 * I_B * 100 = 11.3$$

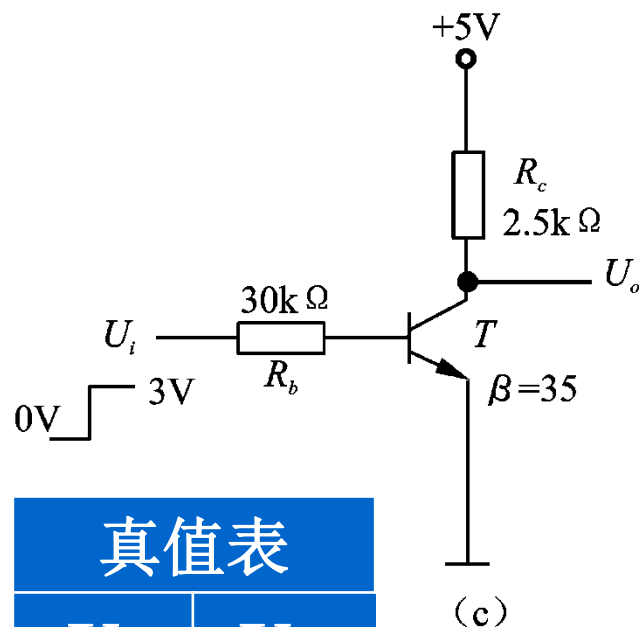
$$I_B = 0.108mA$$

$$I_C = 5.376mA$$



$$\begin{aligned} V_C &= V_{CC} - I_C * R_C \\ &= 12 - 5.376 * 1.5 \\ &= 3.94V \end{aligned}$$

例：判断下图各三极管的工作状态。



真值表	
$U_I$	$U_O$
1	0
0	1

$$U_I = 3V$$

$$I_B = (3 - 0.7) / 30k = 0.077mA$$

$$U_O = V_{CC} - \beta * I_B * R_C = 5 - 35 * 0.077 * 2.5k = -1.738V$$

饱和区

$$U_I = 0V$$

$$I_B = I_C = 0A$$

$$U_O = 5V$$

截止区