

# 模拟电子技术

2019年秋季

# 课程基本情况

蒋乐天 电院电子工程系

<http://nuedc-sh.sjtu.edu.cn/analog/analog.htm>

课件、、小结、作业等信息发布

[Jiangletian@163.com](mailto:Jiangletian@163.com)

QQ群: 721126923



群名称: 模电课程群-2019秋季  
群 号: 721126923

# 课程基本情况

- 专业基础课

- 掌握模拟技术的**基本概念、基本方法**。希望通过这门课的学习使大家具备一定的**电子线路分析和设计**的能力。

- 学习方法

- 有一定的难度：一是理论和实际之间存在差异；而是分析方法跟以往不太一样（工程近似分析等）；
- 理解概念、掌握基本分析方法很重要；
- 重视课外学习和练习

- 成绩构成

- 平时成绩20%+仿真大作业10%+期末考试（半开卷）70%

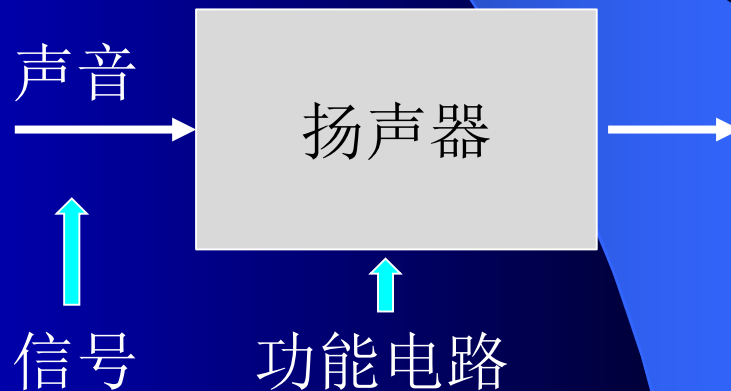
今年的变化：课时 48 → 32

# 课程主要内容

- 学什么？
  - 模拟电子线路的分析和设计

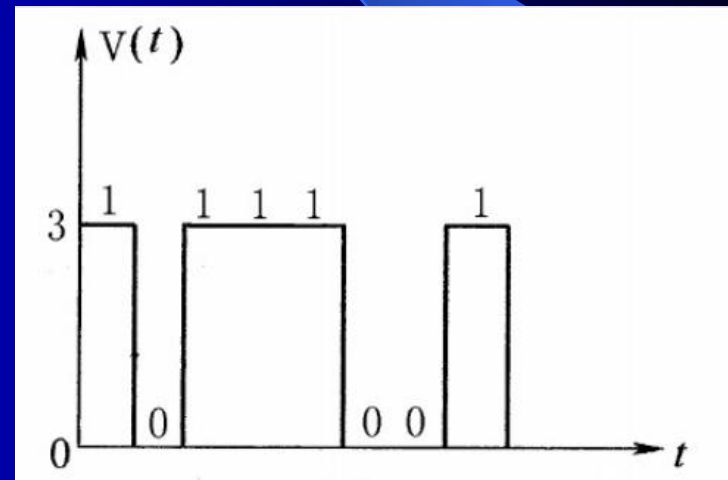
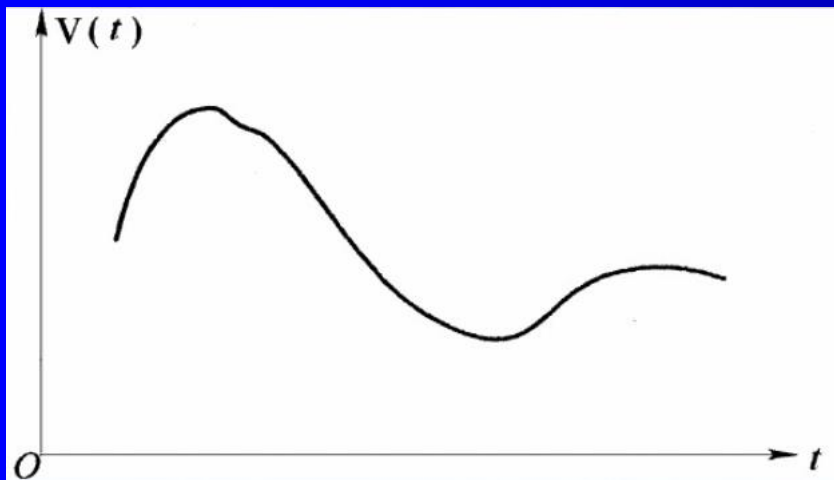


处理**模拟信号**的功能电路



# 课程主要内容

- 信号
  - 模拟信号和数字信号



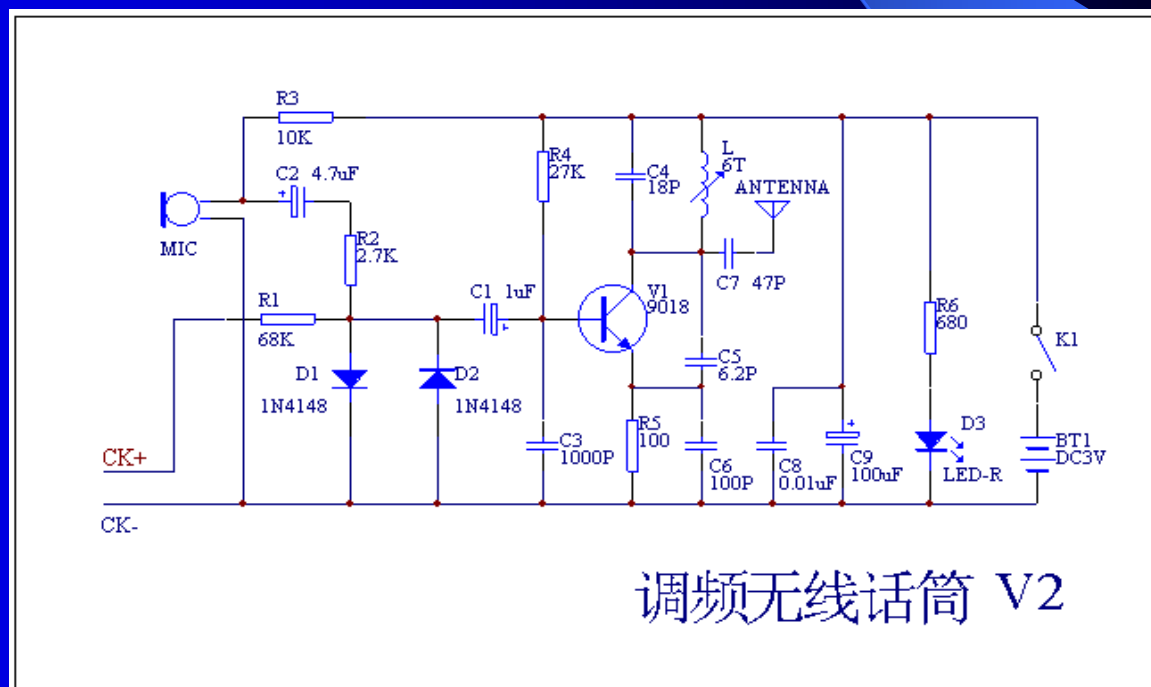
# 课程主要内容

- 功能电路

- 组成：电阻**R**、电容**C**、电感**L**；  
二极管**D**、三极管**BJT**、场效应管**FET**
- 电路：

信号发生  
信号转换

.....



# 主要学习内容

- 半导体器件
- 基本放大电路
- 集成运放电路
- 频率响应
- 负反馈
- 波形的发生及信号转换
- 功放电路
- 直流电源

# 第一章 半导体器件

- 1.1 半导体基础
- 1.2 二极管
- 1.3 双极型晶体管（三极管）
- 1.4 场效应管



# 1.1 半导体基础

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{导体} & \rho < 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm} \\ \text{半导体} & 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm} < \rho < 10^9 \Omega \cdot \text{cm} \\ \text{绝缘体} & \rho > 10^{10} \Omega \cdot \text{cm} \end{array} \right.$$

- 制造半导体器件的主要材料：硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)—微波器件

# 一. 本征半导体

## ➤ 定义

a) 纯净的

b) 无晶格缺陷

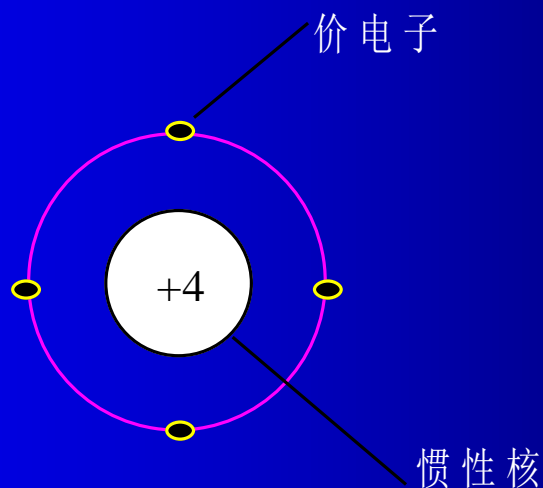


图1-1 本征半导体惯性核模型

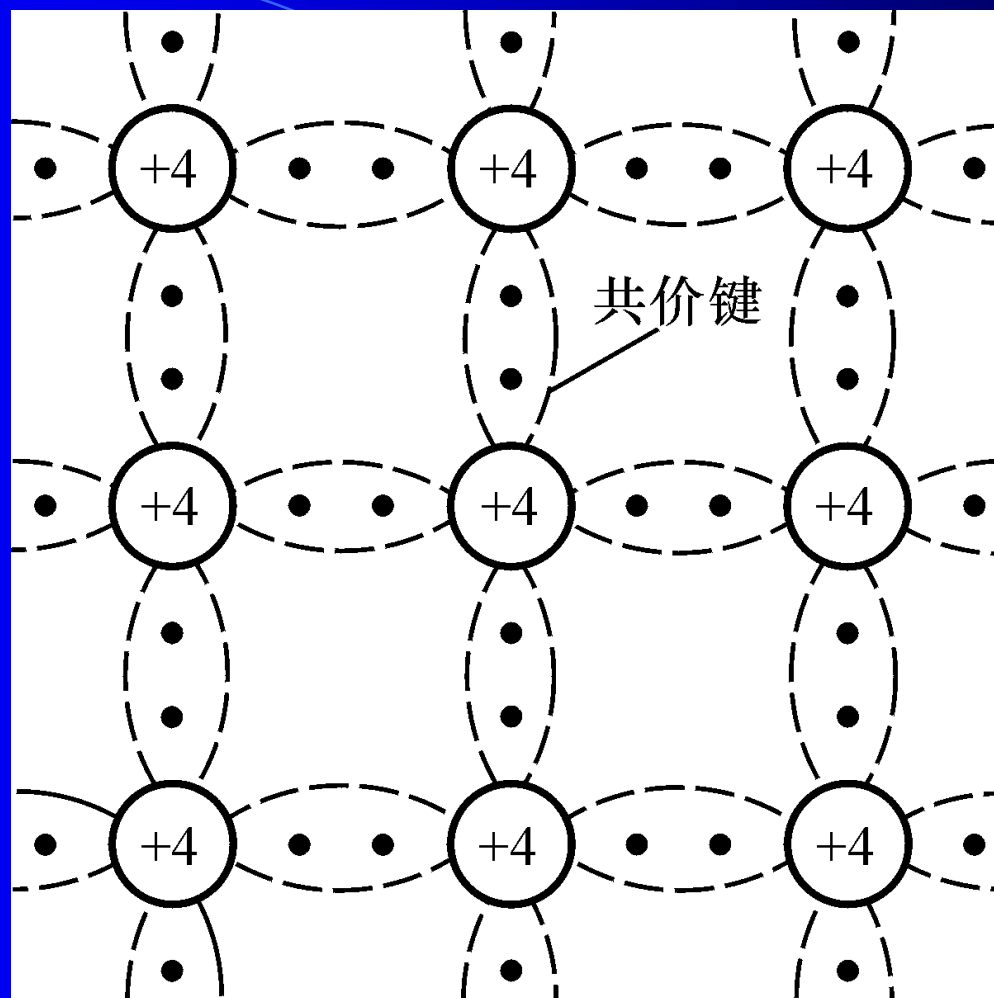


图1-2 本征半导体结构示意图

## ➤ 本征激发和复合

激发：形成自由电子和空穴，成对出现

复合：自由电子—空穴对消失

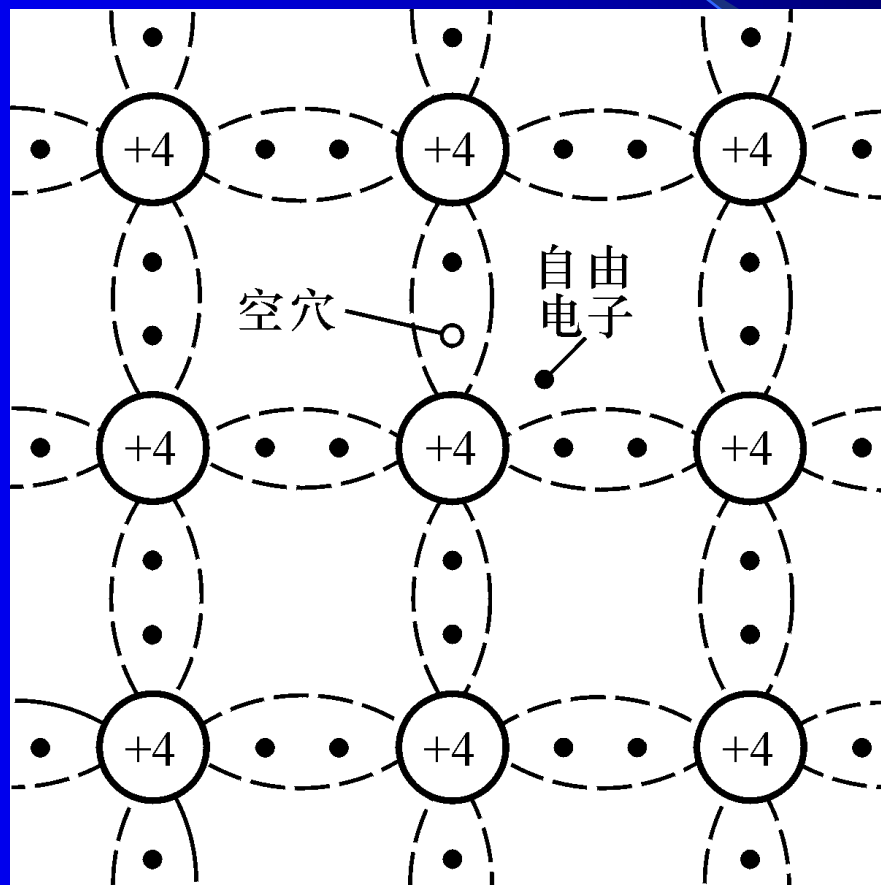


图1-3 本征半导体中的自由电子和空穴

## ➤ 动态平衡下的本征半导体

✓ 两种载流子:

自由电子----n

空穴-----p

✓ 载流子浓度

$$n_i = p_i = AT^{3/2}e^{-E_{go}/(2kT)}$$

系数:

A常数 (硅:  $3.87 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$ , 锗:  $1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$ )

$E_{go}$ : 禁带宽度 (硅: 1.21eV, 锗: 0.785eV)

k: 玻尔兹曼常数 ( $8.63 \times 10^{-5} \text{eV/K}$ )      T: 温度 (K)

室温时 (T=300K), 硅:  $1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ , 锗:  $2.4 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$

## 二. 杂质半导体

- 杂质半导体：掺入杂质元素后得到的半导体
- N型半导体
- P型半导体

# N型半导体

## ➤ 定义

掺入五价杂质元素（磷、砷、锑）

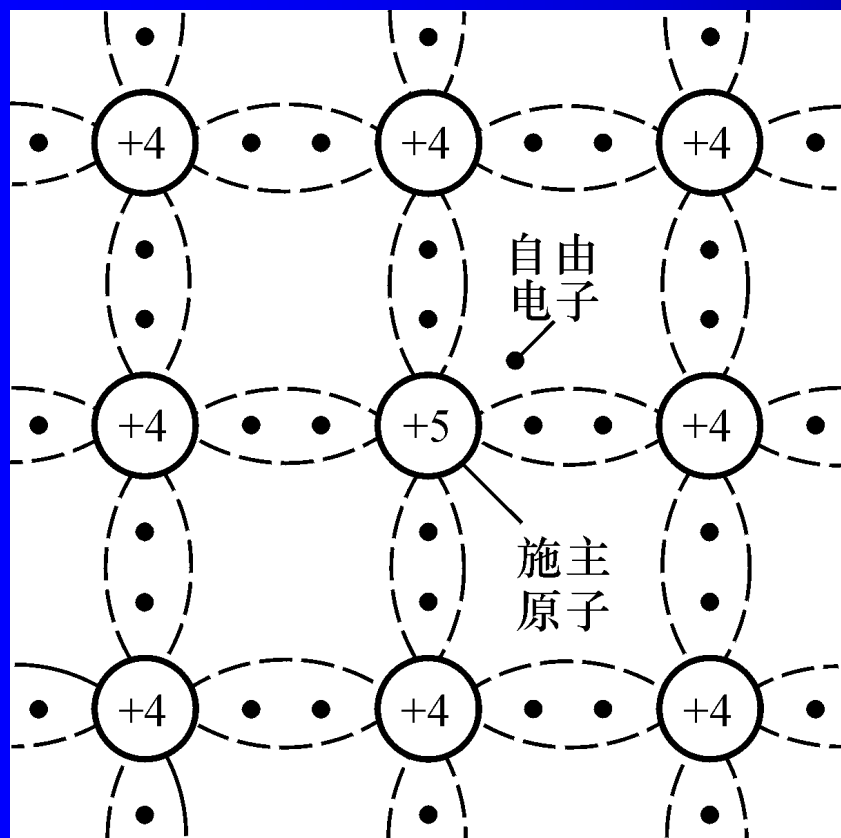
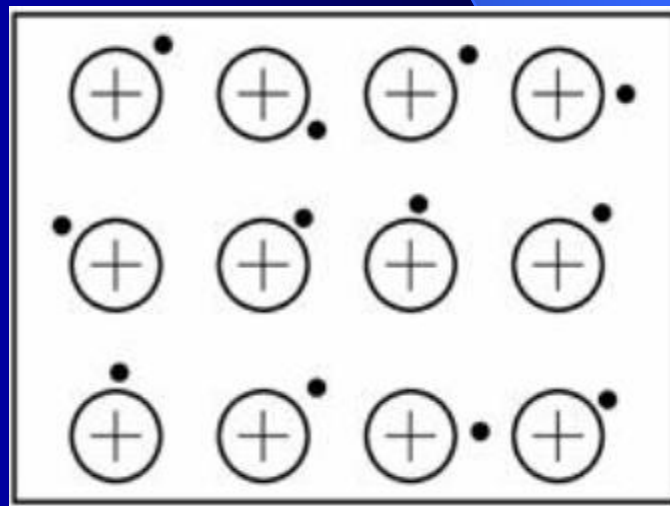


图1-4 N型半导体

自由电子：多子

空穴：少子

杂质原子：施主



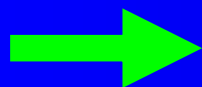
## ➤ 载流子浓度

### ➤ 热平衡条件

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$

### ➤ 电中性条件

$$n_0 = p_0 + N_D$$



$$\begin{cases} n_0 \cong N_D \\ p_0 = \frac{n_i^2}{N_D} \end{cases}$$

$N_D$ : 施主杂质浓度

$n_0$ : 自由电子浓度值

$p_0$ : 空穴浓度

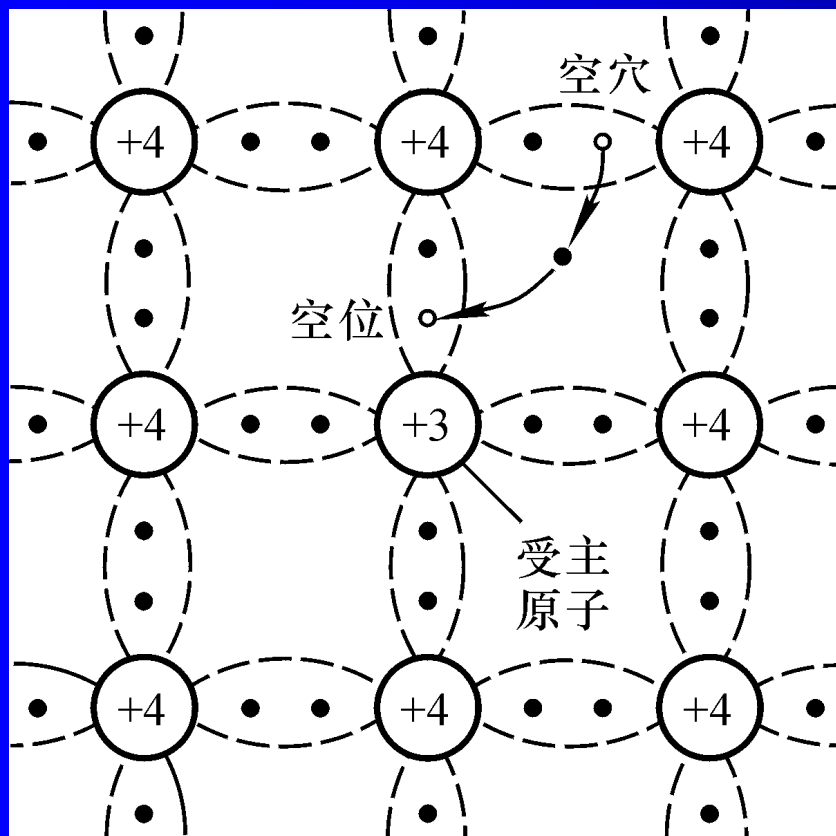
$n_i$ : 本征载流子浓度



# P型半导体

## ➤ 定义

掺入三价杂质元素（铝、硼、镓、铟等）



自由电子：少子

空穴：多子

杂质原子：受主

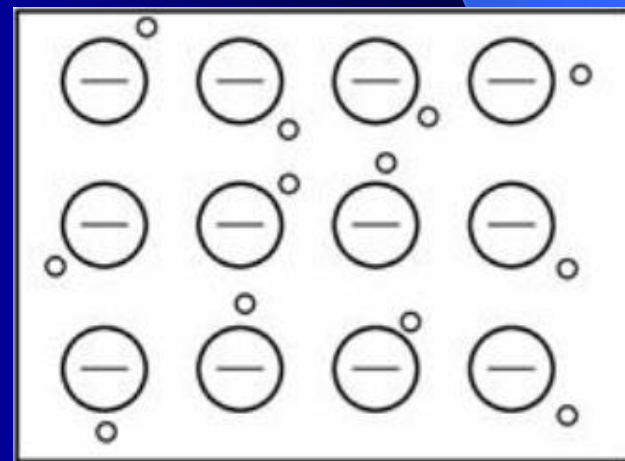


图1-5 P型半导体

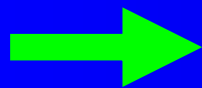
## ➤ 载流子浓度

### ➤ 热平衡条件

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$

### ➤ 电中性条件

$$p_0 = n_0 + N_A$$



$$\begin{cases} p_0 \cong N_A \\ n_0 = \frac{n_i^2}{N_A} \end{cases}$$

$N_A$ : 施主杂质浓度

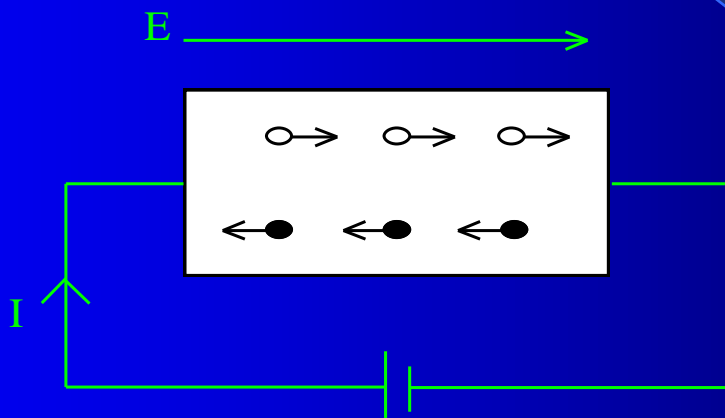
$n_0$ : 自由电子浓度值

$p_0$ : 空穴浓度

$n_i$ : 本征载流子浓度

# 三. 漂移和扩散

## ➤ 漂移电流



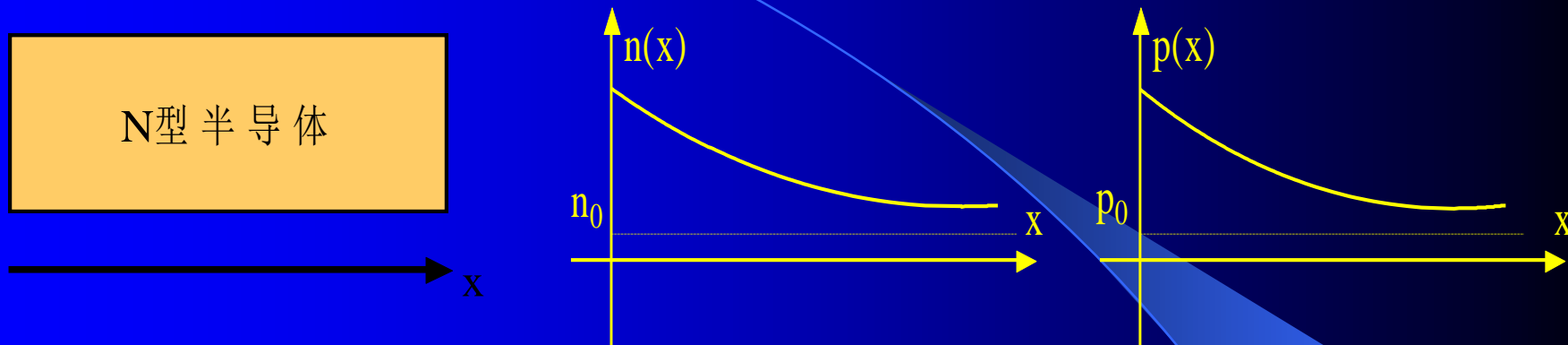
载流子（自由电子、空穴）在电场作用下产生定向运动，形成漂移电流：空穴漂移电流（ $I_{pT}$ ）和电子漂移电流（ $I_{nT}$ ）

总漂移电流密度：

$$J_T = J_{pT} + J_{nT} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$$

系数：  $\mu_p$ ,  $\mu_n$  分别是空穴和自由电子的迁移率。

## ➤ 扩散电流



因浓度差引起载流子（自由电子、空穴）定向运动，产生扩散电流：空穴扩散电流（ $I_{pD}$ ）和电子扩散电流（ $I_{nD}$ ）

总扩散电流密度：

$$J_D = J_{pD} + J_{nD} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} + qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

系数： $D_p, D_n$ 分别是空穴和自由电子的扩散系数

# 半导体

- 半导体结构（自由电子和空穴）
  - 本征半导体
  - P型半导体
  - N型半导体
- 半导体电流（扩散电流和漂移电流）
- 半导体特性（参杂性和温度敏感性）
- 半导体材料（硅、锗、砷化镓）

# 四. PN结

不对称PN结

P型 半导体	耗尽 层	N型 半导体
-----------	---------	-----------

$p^+n$

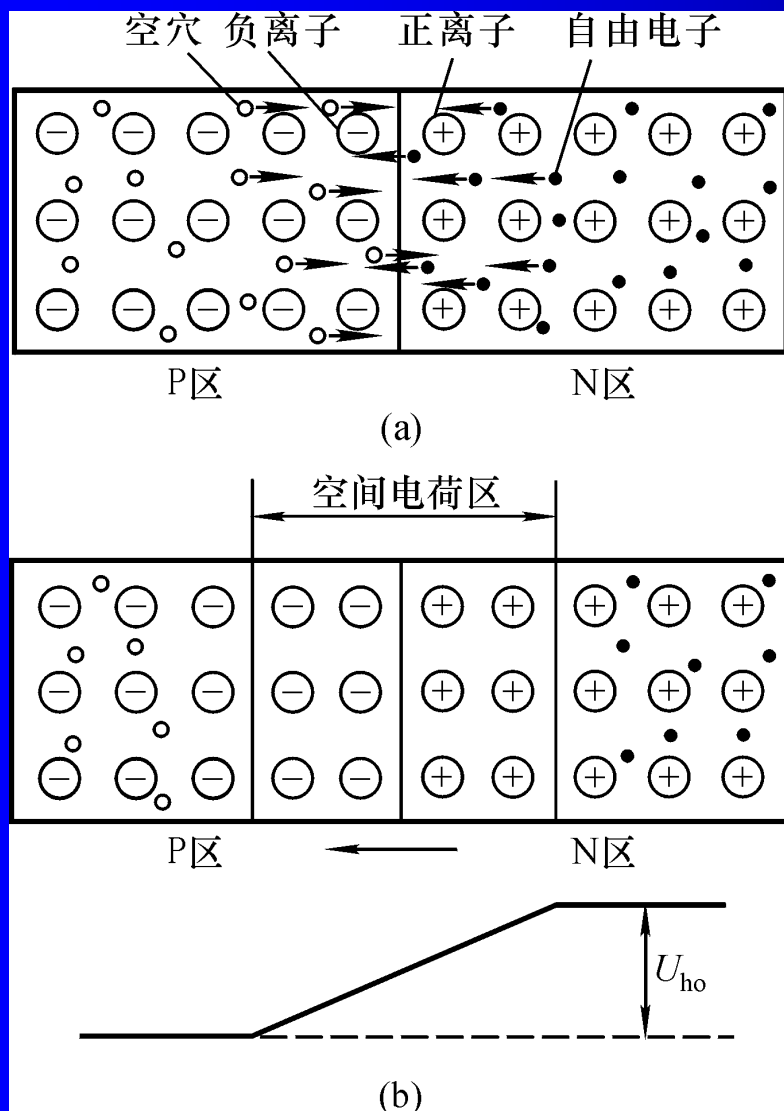
对称PN结

P型 半导体	耗尽 层	N型 半导体
-----------	---------	-----------

$pn$

PN结结构

# PN结形成的物理过程



a) 扩散 多子扩散电流 $I_D$

b) 形成空间电荷区

c) 建立电场 $E$

d) 漂移 少子漂移电流 $I_T$

e) 动态平衡  $I_D = I_T$

$$I = 0$$

f) PN结形成

空间电荷区、耗尽区、势垒区、阻挡层

# 内建电位差 $U_{ho}$

$$U_{ho} = U_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

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

热电压（伏）

室温 $T=300K$ ,  $U_T$ 约为 $26mV$

$U_{ho}$ 与温度相关，室温时，对于硅约为 $0.5\sim 0.7V$

对于锗约为 $0.2\sim 0.3V$



# 空间电荷区宽度 $L_o$

$$L_o = x_n + x_p = \left( \frac{2\varepsilon}{q} U_{ho} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)^{1/2}$$

$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

$\mu\text{m}$ 数量级

三种PN结：突变结、超突变结、缓变结

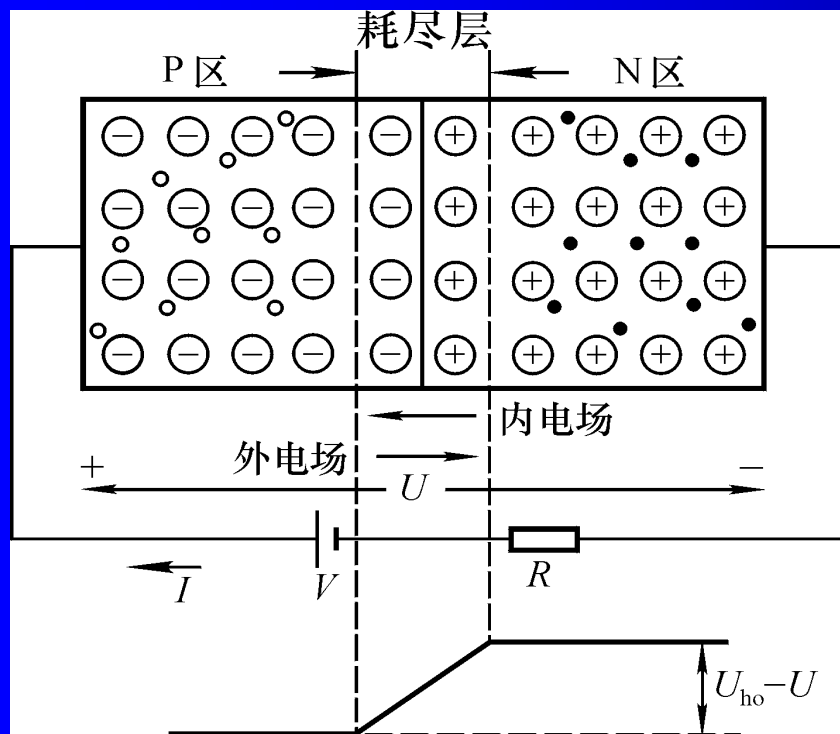
## 五. PN结的特性

- 伏安特性
- 温度特性
- 击穿特性
- 电容特性

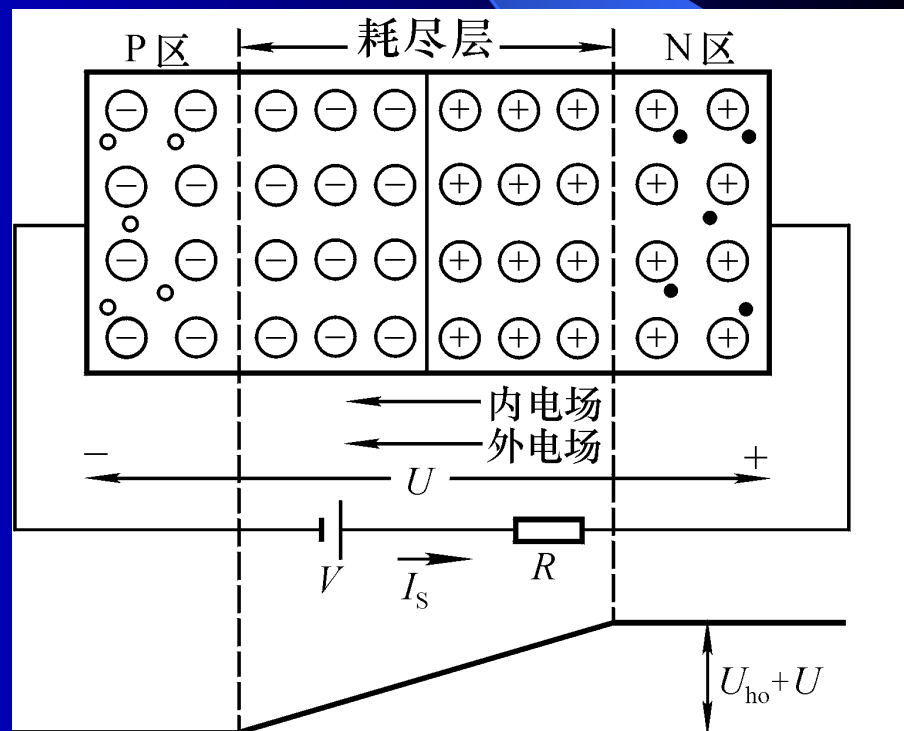
# 伏安特性

## 单向导电性

正向偏置—导通



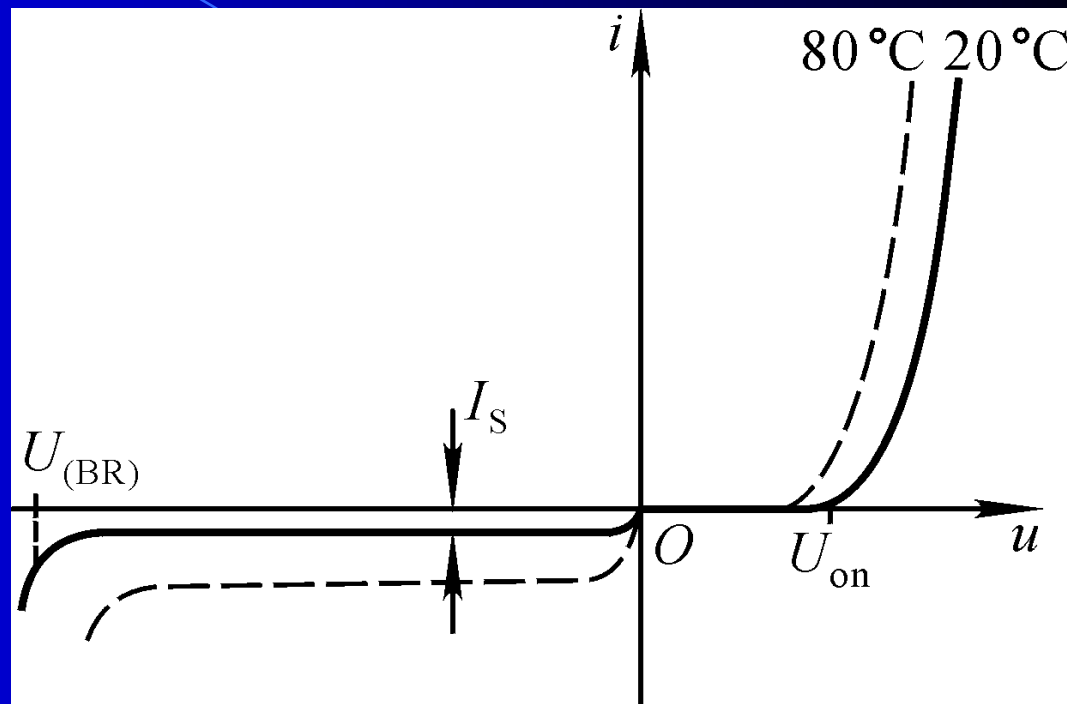
反向偏置—截止



## ➤ PN结电流

$$i = I_S (e^{\frac{qu}{kT}} - 1)$$

$$i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1)$$



$I_S$ : 反向饱和电流、比例电流  
与结面积、少子浓度成正比

PN结的伏安曲线

# 温度特性

- $I_s$  是温度敏感参数，其值随温度升高而增大

$V > 0$           曲线左移

$V < 0$           曲线下移

并有：

$$I_S(t_2) = I_S(t_1) \cdot 2^{\frac{t_2 - t_1}{10}}$$

二极管正常工作，有最高温度限制：

Si:          ( $150^\circ \sim 200^\circ$ )     $I_S = 10^{-9} \sim 10^{-16} \text{A}$

Ge:          ( $75^\circ \sim 100^\circ$ )       $I_S = 10^{-6} \sim 10^{-8} \text{A}$

# 击穿特性

- 反向偏置时，反向电流急剧增加的现象， $U_{(BR)}$

雪崩击穿—发生在掺杂浓度较低的PN结中

机理：由于碰撞而电离产生大电流

电压：较高，随掺杂浓度降低而增大， $>7V$

温度特性： $T \uparrow \longrightarrow U_{(BR)} \uparrow$

齐纳击穿—发生高掺杂浓度PN结中

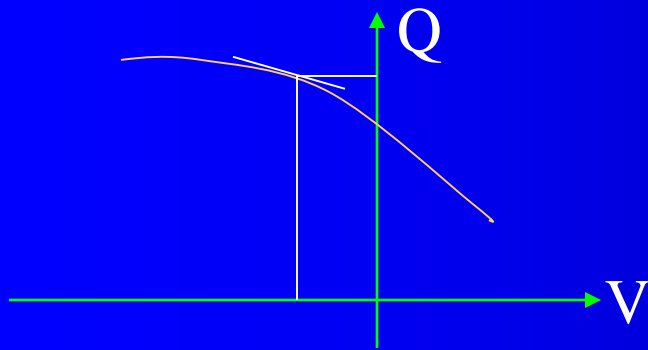
机理：场致激发产生大电流

电压：较低，随掺杂浓度增大而减小， $<5V$

温度特性： $T \uparrow \longrightarrow U_{(BR)} \downarrow$

# 电容特性

- 势垒电容 $C_T$ —阻挡层引起

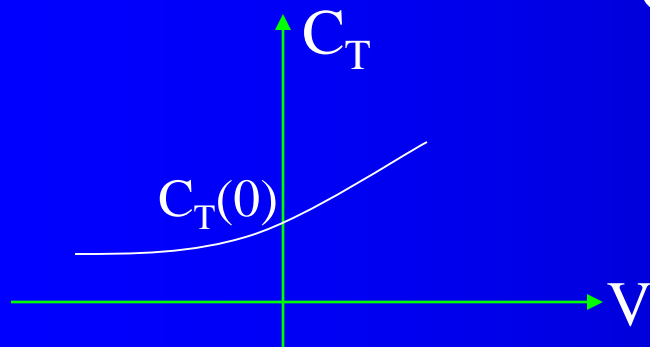


电荷与电压关系

$$C_T = \frac{C_T(0)}{\left(1 - \frac{V}{U_{ho}}\right)^n}$$

$C_T$ : 增量电容—非线性电容

变容特性 $n$ —变容指数, 与工艺有关



电容与电压关系

突变结  $n=1/2$

渐变结  $n=1/3$

超突变结  $n=1/2 \sim 6$

- 扩散电容 $C_D$ —中性区引起

$$C_D = k_D(I + I_S) = \begin{cases} k_D I & V > 0 \\ 0 & V < 0 \end{cases}$$

$k_D$ : 常数, 与PN结两边的掺杂浓度有关

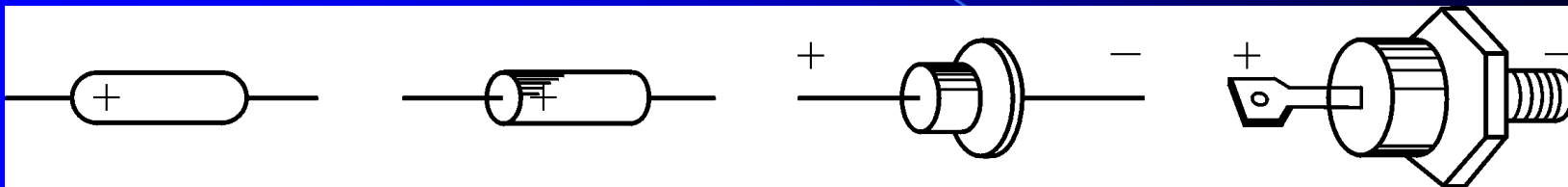
$I$ : 流过PN结的电流

- 结电容 $C_j$

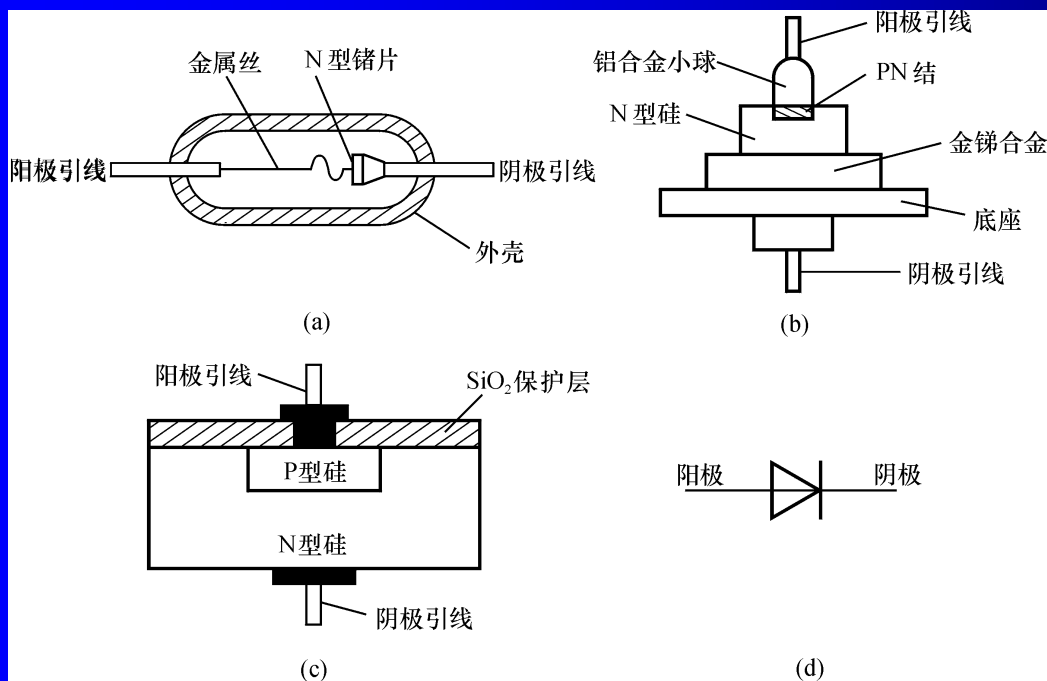
$$C_j = C_T + C_D = \begin{cases} C_D & V > 0 & 10 \sim 10^3 \text{ pF} \\ C_T & V < 0 & 1 \sim 10^1 \text{ pF} \end{cases}$$



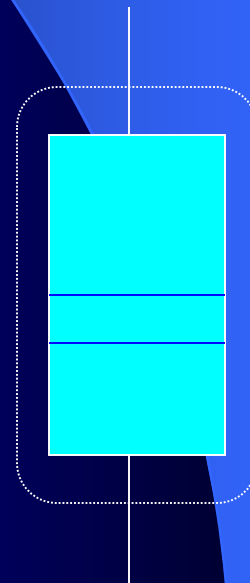
# 1.2 半导体二极管



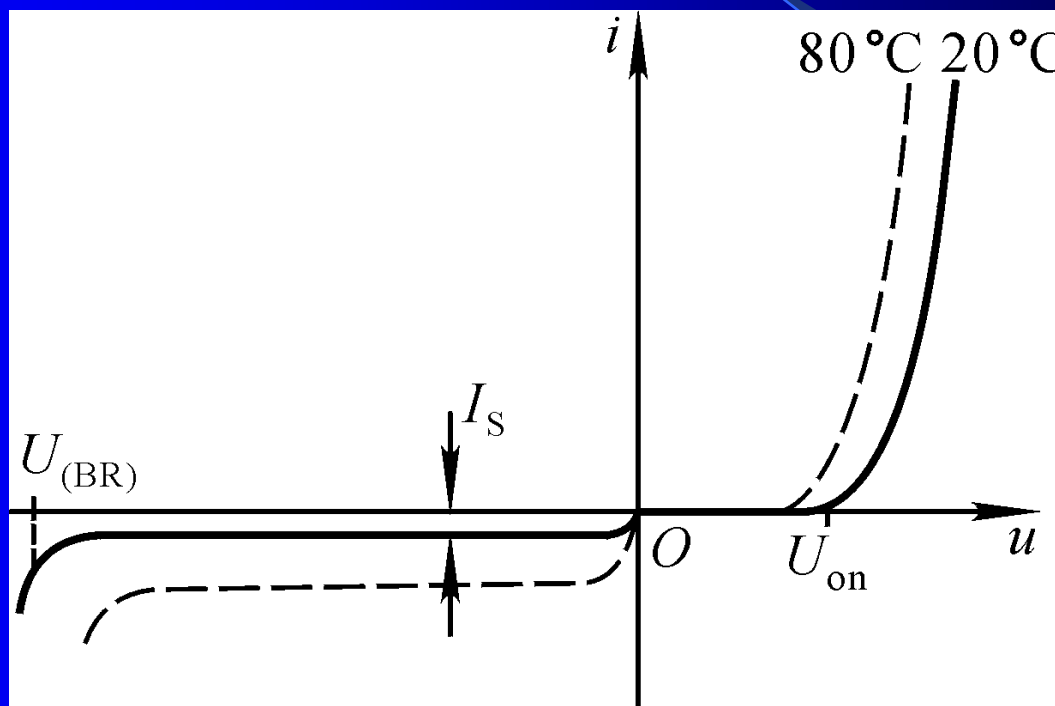
## 二极管外形



## 二极管结构及电路符号



# 一、伏安特性、温度特性



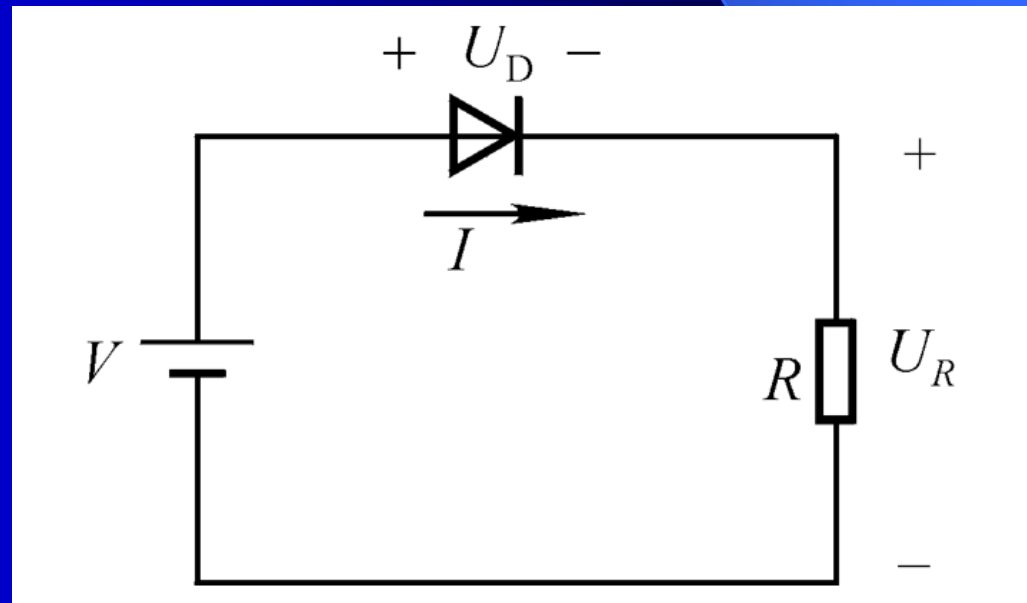
- 开启电压  $U_{\text{on}}$   
温度升高,  $U_{\text{on}}$  减小

## 二、二极管参数

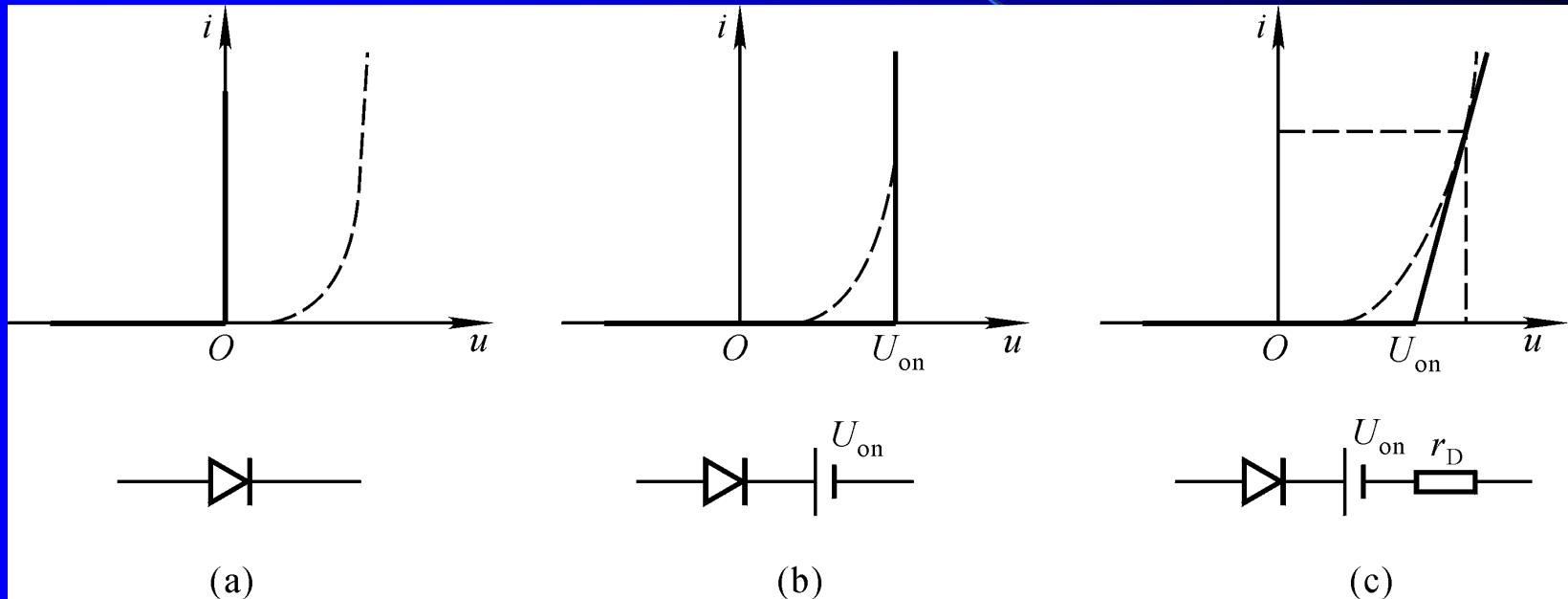
- 最大整流电流 $I_F$
- 最高反向工作电压 $U_R$
- 反向电流 $I_R$
- 最高工作频率 $f_M$

# 三、二极管模型

- 数学模型—电流方程
- 曲线模型—伏安特性曲线
- 分段线性模型
- 小信号电路模型



# 分段线性模型



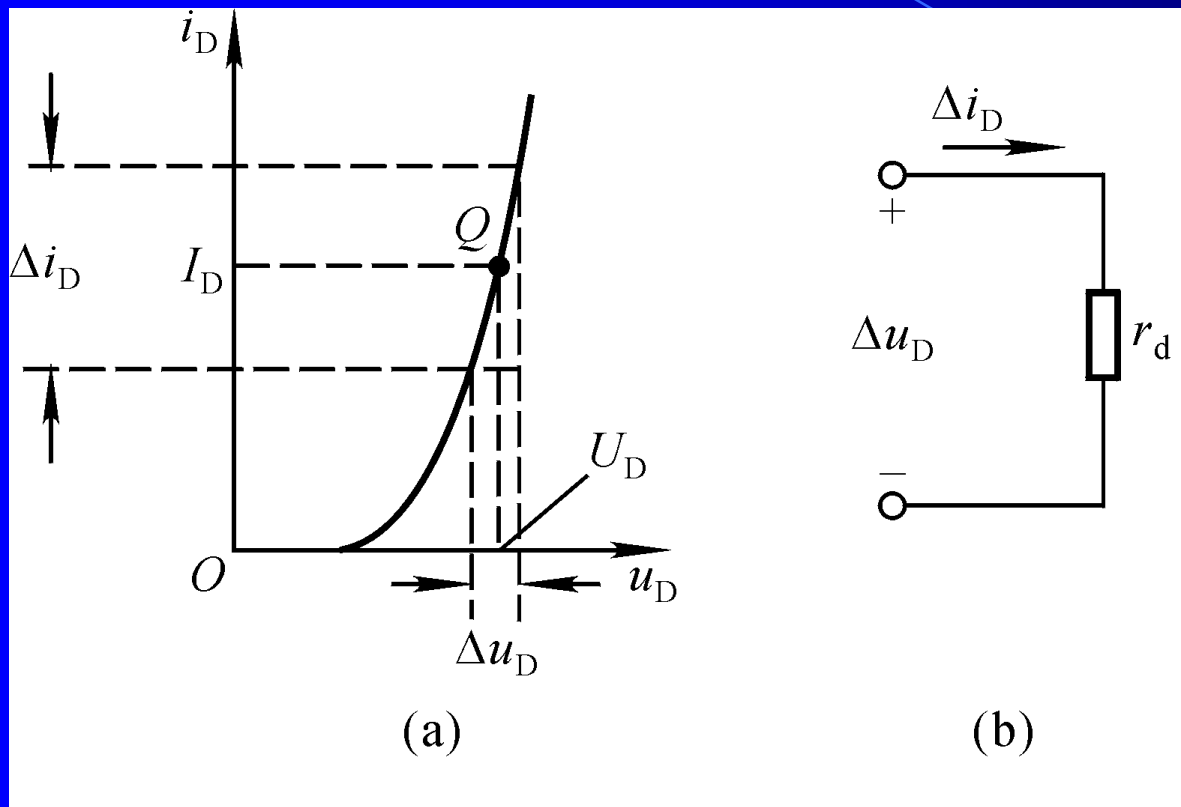
a) 理想二极管模型

b) 常数压降模型

c) 电池加电阻模型

$r_D$ : 导通电阻,  $U_{on}$ 一般取0.7V

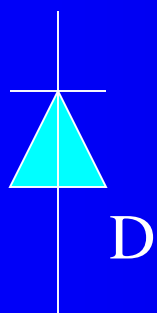
# 小信号电路模型



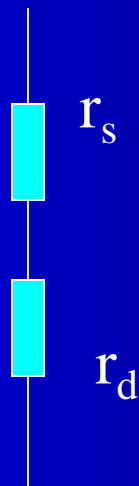
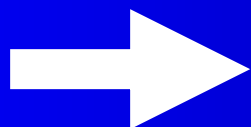
$r_d$ : 增量电阻

$$r_d \approx \frac{U_T}{I_D}$$

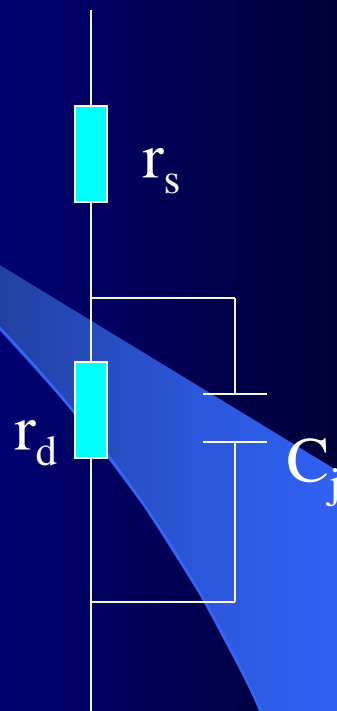
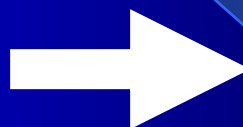
$$\frac{1}{r_d} = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_D} \right|_Q = \left. \frac{\partial}{\partial u} [I_s (e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1)] \right|_{u_D=U_D} = \frac{I_Q + I_s}{U_T} \approx \frac{I_D}{U_T}$$



二极管



低频模型



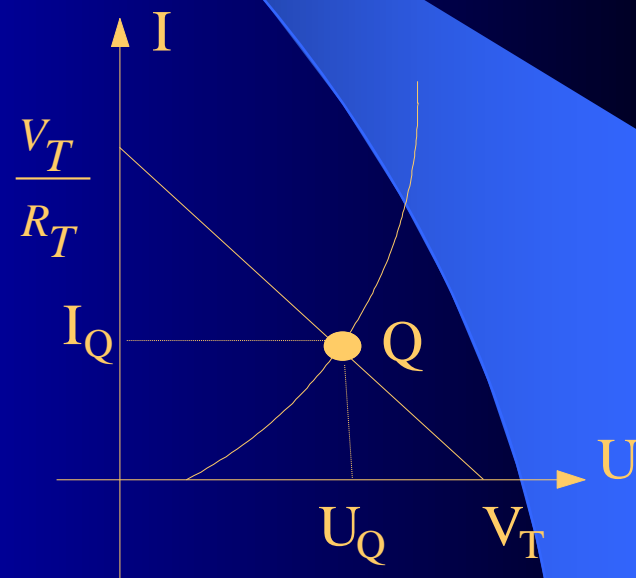
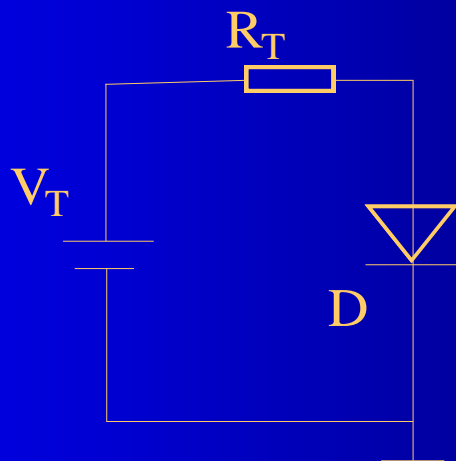
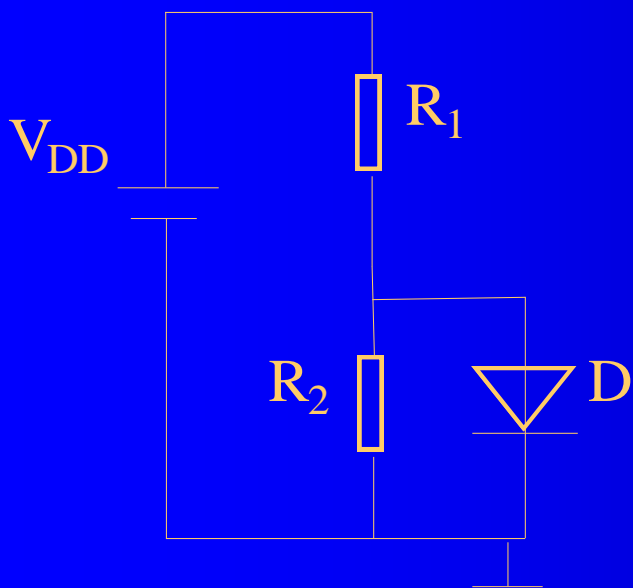
高频模型

小信号模型

# 二极管电路分析例题

## ➤ 图解分析法

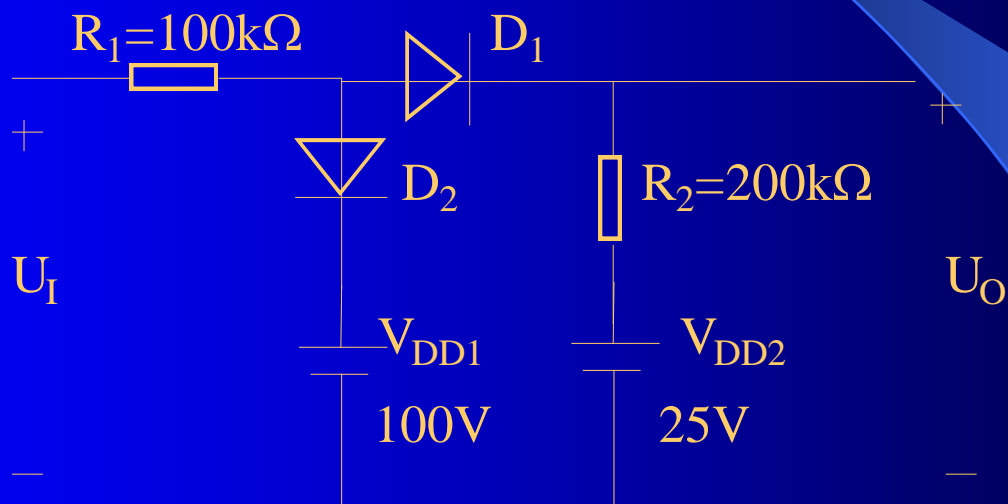
例1：求图所示电路流过二极管的电流及其两端电压。



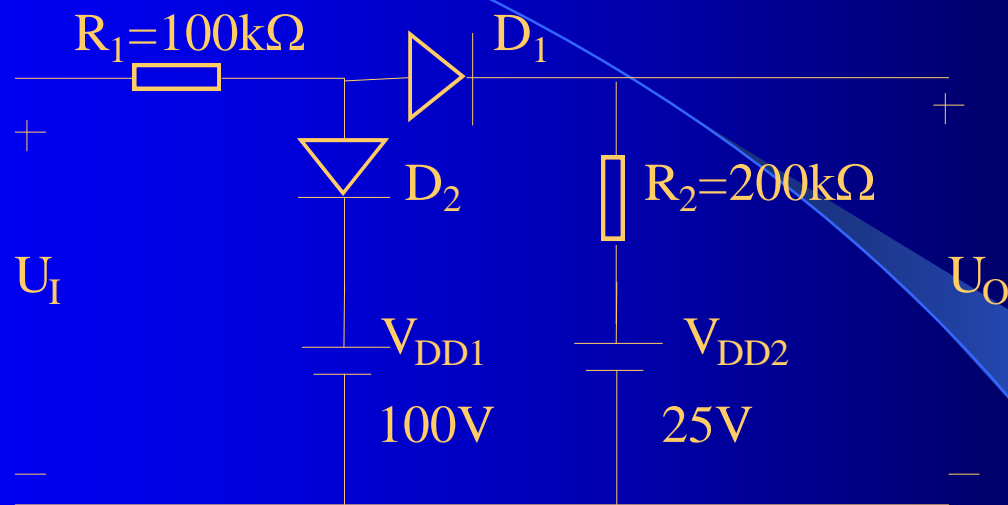


## ➤等效电路法

例2：如图电路，已知两个二极管为理想二极管，试画出 $U_O$ 随 $U_I$ 变化的传输特性。



等效电路:



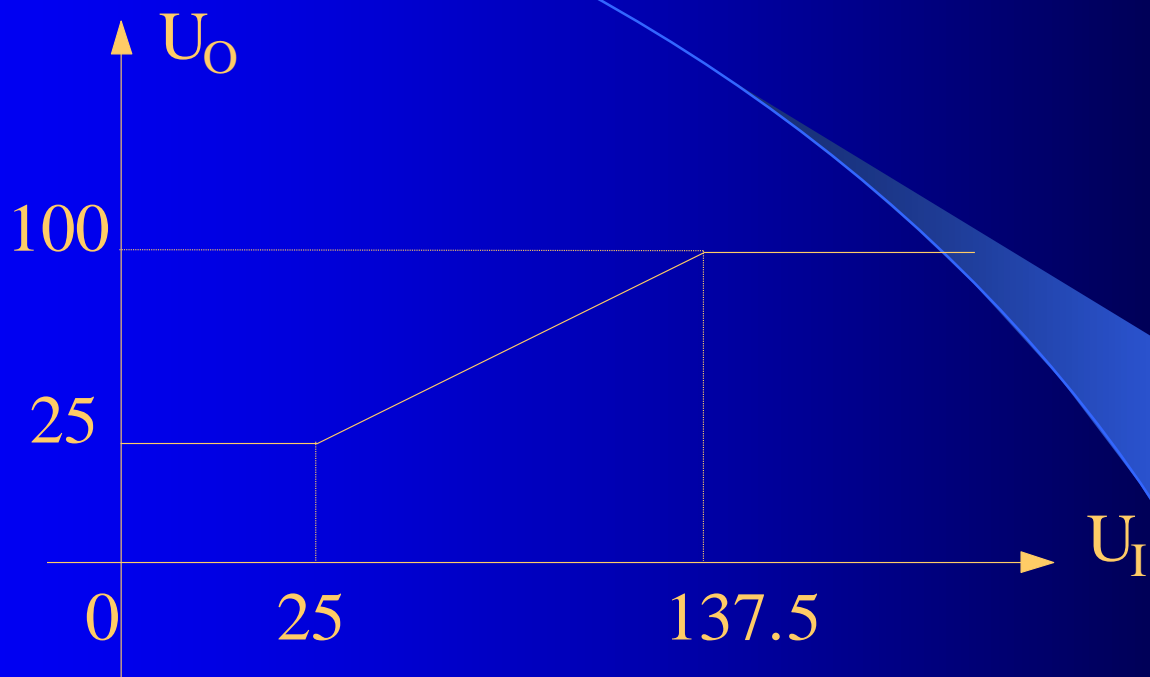
分析: 当 $U_I < 25\text{V}$ 时, 两二极管截止,  $U_O = V_{DD2} = 25\text{V}$ 。

当 $U_I > 25\text{V}$ 时,  $D_1$ 导通,  $D_2$ 截止,

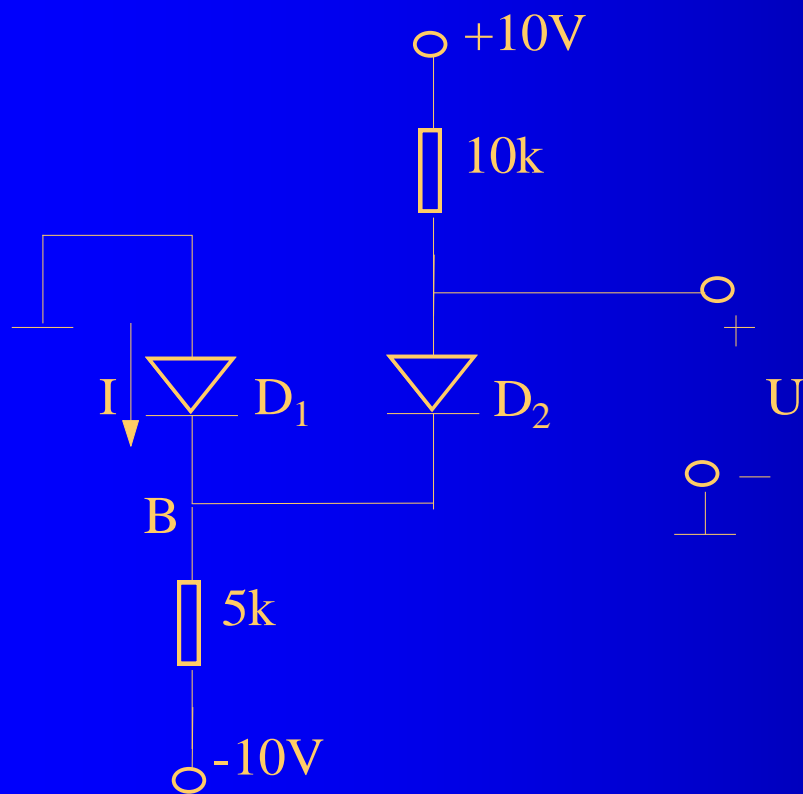
$$I_1 = \frac{U_I - V_{DD2}}{R_1 + R_2} = \frac{U_I - 25}{300 \times 10^3} \quad U_O = V_{DD2} + I_1 R_2 = \frac{25 + 2U_I}{3}$$

当 $U_O = 100\text{V}$ , 即 $U_I = 137.5\text{V}$ 时,  $D_2$ 开始导通

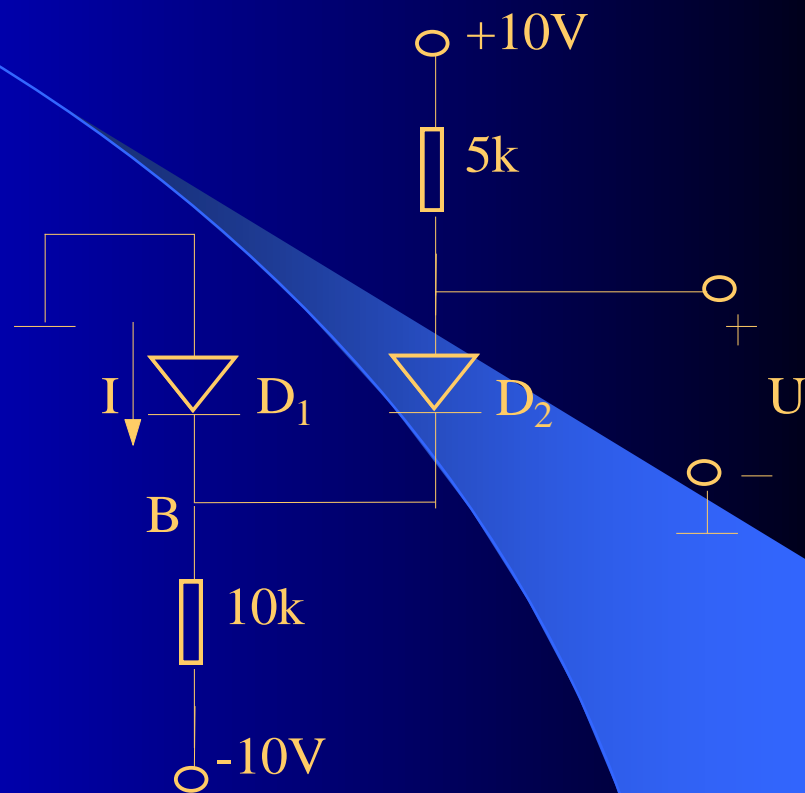
$$U_O = 100$$



例3：有如下两个电路：



(a)



(b)

假设 $D_1$ ,  $D_2$ 为理想二极管, 求 $U$ ,  $I$ 的值

解:

(a) 假设 $D_1, D_2$ 导通, 则

$$U_B = 0 \longrightarrow U = 0$$

$$\Rightarrow I_{D2} = 1\text{mA}$$

$$\text{B点节点方程} \Rightarrow I = 1\text{mA}$$

(b) 假设 $D_1, D_2$ 导通, 则

$$U_B = 0 \longrightarrow U = 0$$

$$\Rightarrow I_{D2} = 1\text{mA}$$

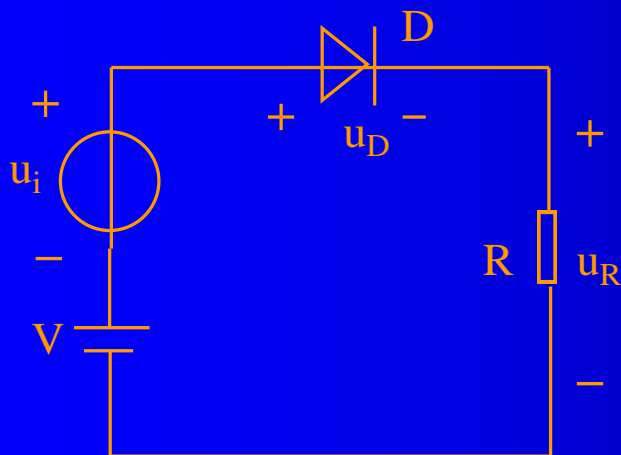
$$\text{B点节点方程} \Rightarrow I = -1\text{mA} \quad \text{假设不成立}$$

重新假设 $D_1$ 截止,  $D_2$ 导通

$$\Rightarrow I = 0 \quad U = 3.3\text{V}$$

# 小信号分析

## 例4:



### 1、直流分析

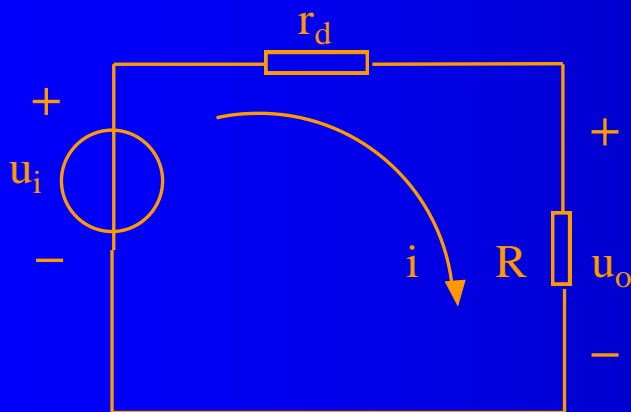
$$I_Q = \frac{V - U_{D(on)}}{R}$$

$$U_R = V - U_{D(on)}$$

### 2、小信号参数

$$r_d = \frac{U_T}{I_Q}$$

### 3、小信号分析



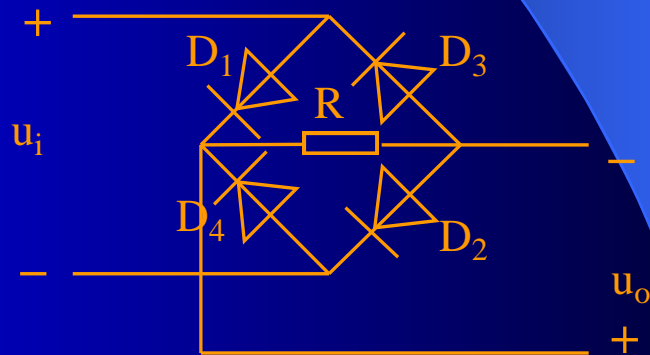
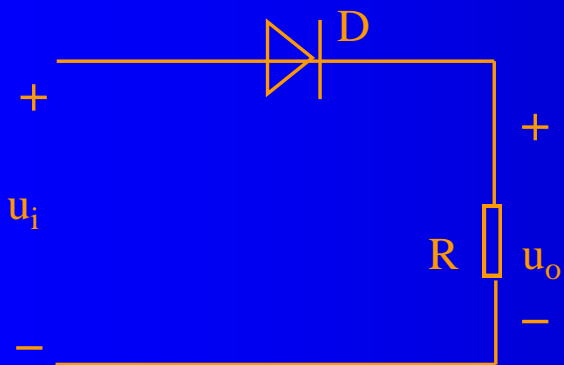
$$i = \frac{u_i}{R + r_d}$$

$$u_o = \frac{u_i}{R + r_d} \cdot R$$

$$u_R = U_R + u_o$$

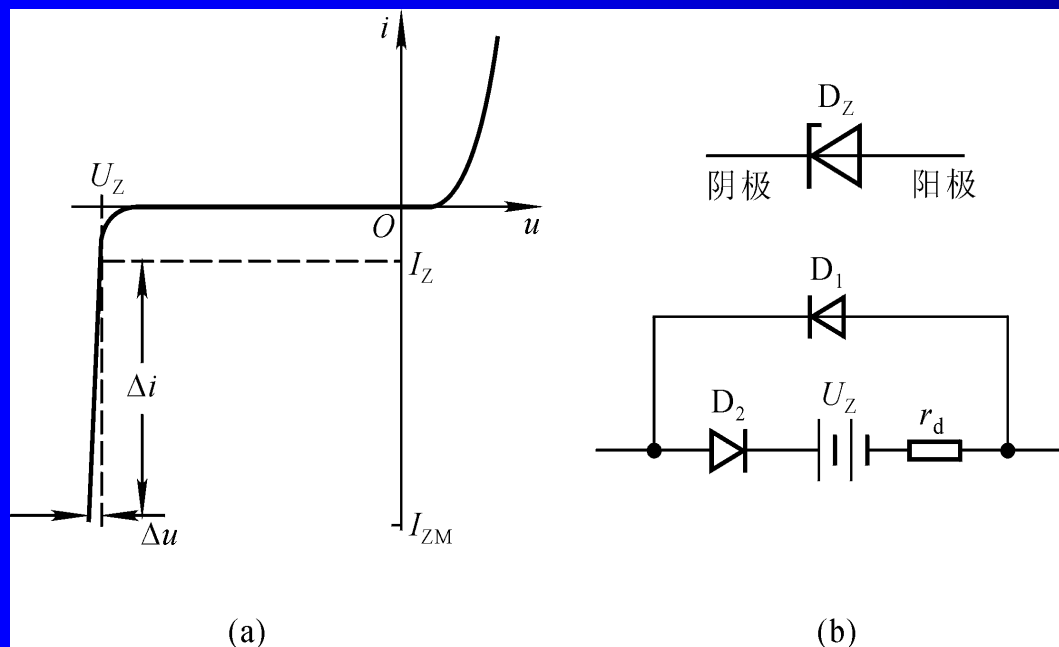
## 四、二极管应用

### ➤ 整流电路



# ➤ 稳压电路

## 稳压二极管



参数:

稳定电压 $U_Z$

稳定电流 $I_Z(I_{Zmin})$

最大稳定电流 $I_{Zmax}$

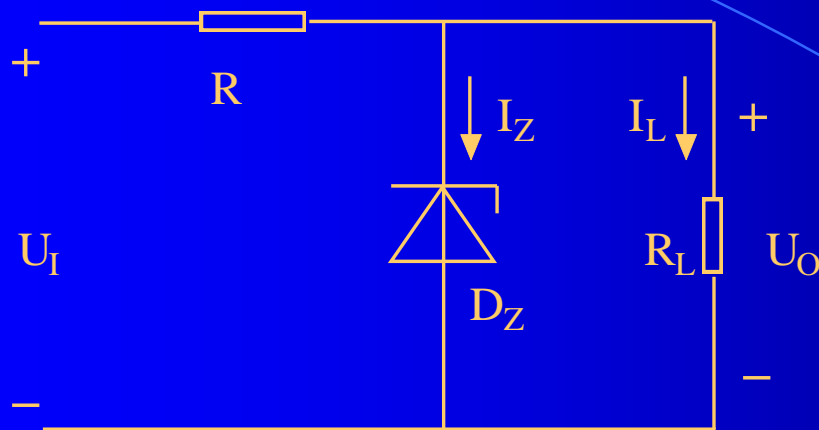
额定功耗 $P_{ZM}$

动态电阻 $r_z$

温度系数 $\alpha$



## 稳压电路



**R:** 限流电阻, 保证 $I_Z$ 落在 $I_{Zmin}$ 和 $I_{Zmax}$ 范围内

### 求限流电阻的方法

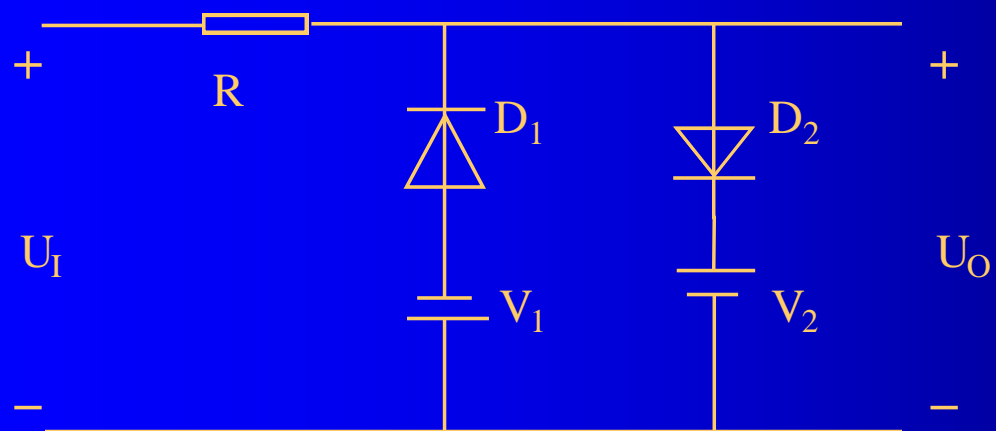
当 $U_I$ 取最大 $U_{Imax}$ ,  $R_L$ 取最大 $R_{Lmax}$ 时,  $I_Z$ 不应超过 $I_{Zmax}$ , 得到 $R_{min}$

当 $U_I$ 取最小 $U_{Imin}$ ,  $R_L$ 取最小 $R_{Lmin}$ 时,  $I_Z$ 不应低于 $I_{Zmin}$ , 得到 $R_{max}$

即:

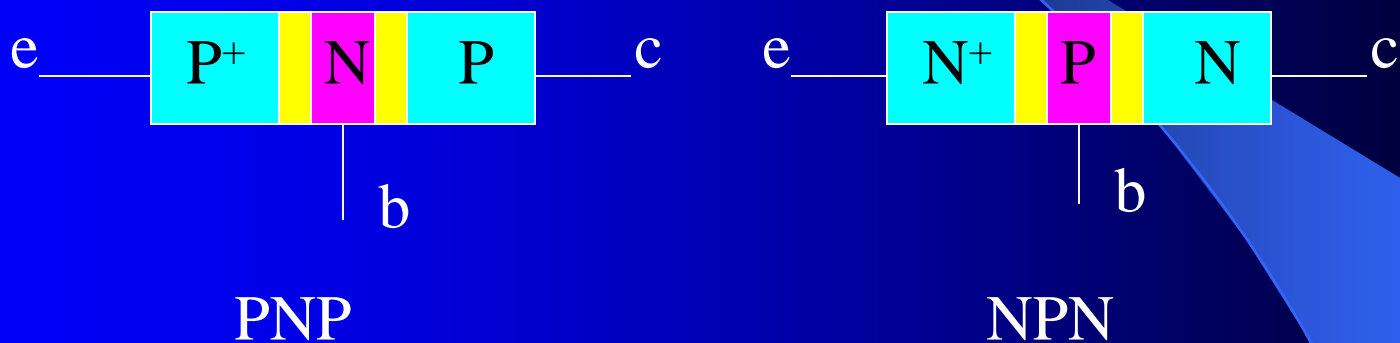
$$\begin{cases} \frac{U_{Imax} - U_Z}{R_{min}} = I_{Zmax} + \frac{U_Z}{R_{Lmax}} \\ \frac{U_{Imin} - U_Z}{R_{max}} = I_{Zmin} + \frac{U_Z}{R_{Lmin}} \end{cases}$$

## ➤ 限幅电路



# 1.3 双极型晶体管

晶体三极管结构



晶体三极管电路符号

三个区：N、P、N 或 P、N、P

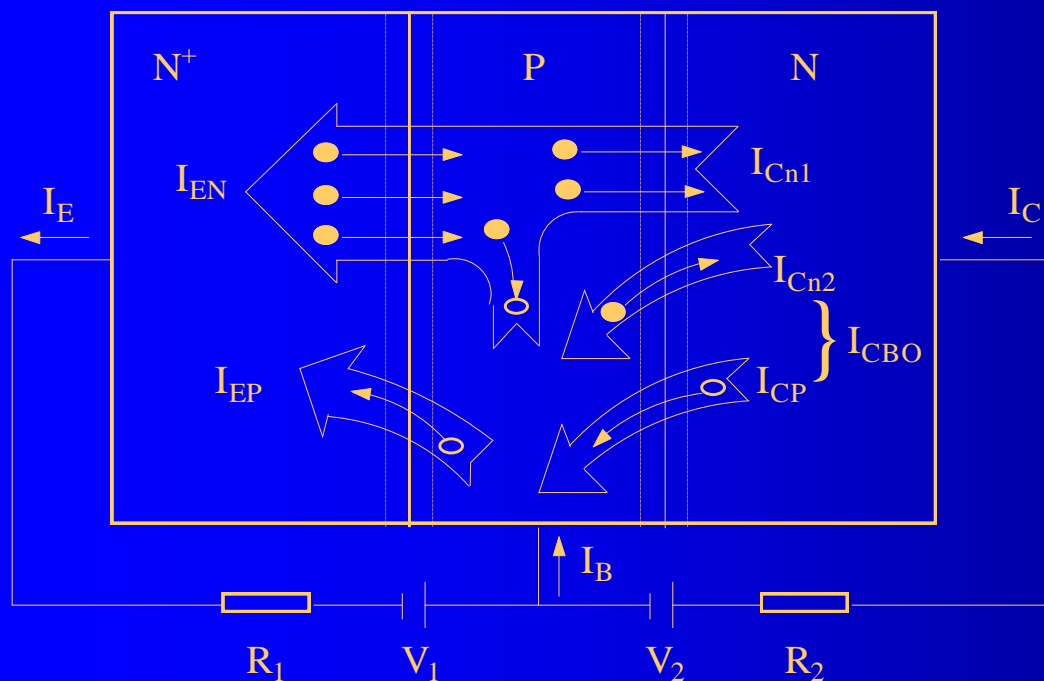
三个极：发射极(e)、基极(b)、集电极(c)

两个结：发射结(eb结)、集电结(cb结)

## 晶体三极管工作模式

工作模式	偏置	特性
放大模式	发射结正偏、集电结反偏	正向受控特性
饱和模式	发射结正偏、集电结正偏	开关特性
截止模式	发射结反偏、集电结反偏	开关特性
反向放大模式	发射结反偏、集电结正偏	

# 一、放大模式下三极管工作原理



内部载流子传输过程

$$I_E = I_{EN} + I_{EP}$$

E、B区多子扩散电流

$$\begin{aligned} I_C &= I_{Cn1} + I_{Cn2} + I_{CP} \\ &= I_{Cn1} + I_{CBO} \end{aligned}$$

$I_{CBO}$ : CB结反向饱和电流, 与T有关, 少子漂移电流。

$I_{Cn1}$ : 少子漂移电流

$$I_B = I_{EP} + (I_{EN} - I_{Cn1}) - I_{Cn2} - I_{CP} = I_E - I_C$$

## 共基直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$

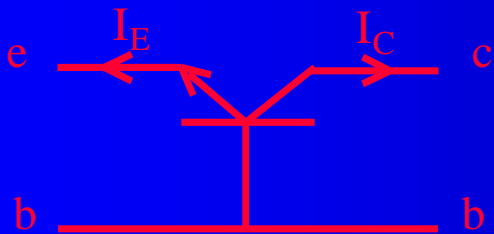
$$\bar{\alpha} = \frac{I_{Cn1}}{I_E} = \frac{I_{EN}}{I_E} \cdot \frac{I_{Cn1}}{I_{EN}} = \eta_E \cdot \eta_B$$

$\eta_E$ : 发射效率;  $\eta_B$ : 基区传输效率

提高 $\bar{\alpha}$ 的工艺措施: 1) E区重掺杂; 2) 基区宽度要小;  
3) 集电结面积要大

三种连接方式下的直流电流传输方程:

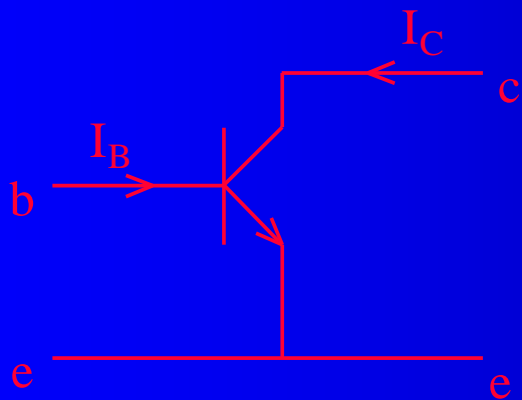
### 1. 共基



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

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

## 2. 共发射极



$$\begin{aligned} I_C &= \bar{\alpha} I_E + I_{CBO} \\ &= \bar{\alpha} (I_C + I_B) + I_{CBO} \\ &= \bar{\alpha} I_C + \bar{\alpha} I_B + I_{CBO} \end{aligned}$$

$$I_C = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} I_B + \frac{1}{1 - \bar{\alpha}} I_{CBO}$$

$$\text{令 } \bar{\beta} = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad I_{CEO} = \frac{1}{1 - \bar{\alpha}} I_{CBO}$$

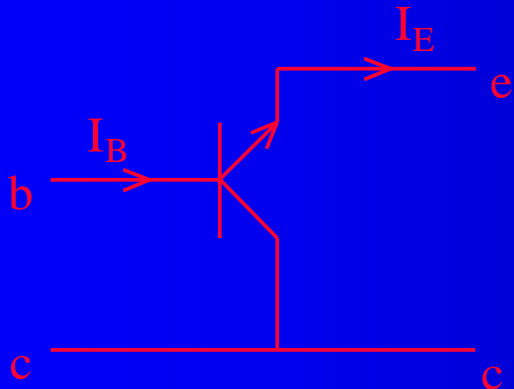
$$I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$$

$$I_C \approx \bar{\beta} I_B$$

$\bar{\beta}$  共发射极直流电流放大系数

$I_{CEO}$ : 基极开路时, 在集电极电源作用下集电极和发射极之间的电流, 称穿透电流。

### 3. 共集电极



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

$$I_E - I_B = \overline{\beta} I_B + I_{CEO}$$

$$I_E = (1 + \overline{\beta}) I_B + I_{CEO}$$

$$I_E \approx (1 + \overline{\beta}) I_B$$



## 交流电流放大系数

$$\alpha = \frac{i_c}{i_e}$$

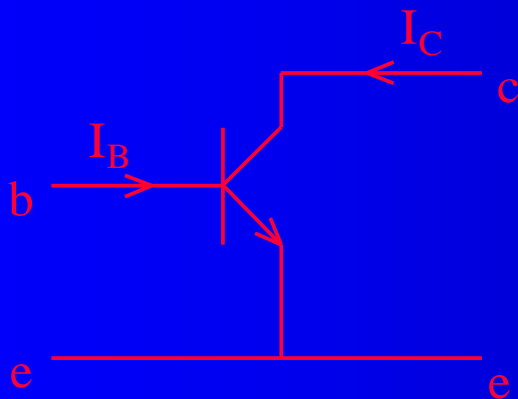
$$\beta = \frac{i_c}{i_b}$$

$$\beta \approx \bar{\beta}$$

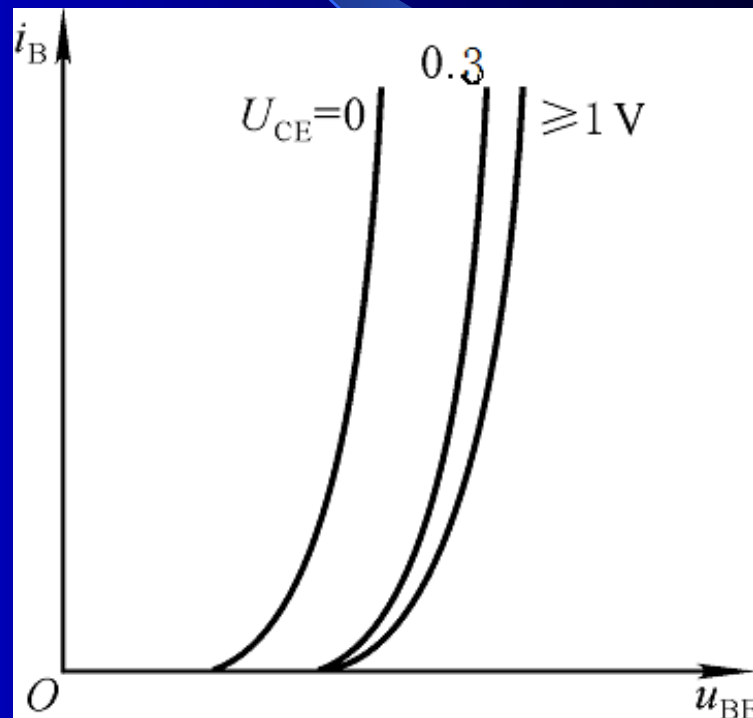
$$\alpha \approx \bar{\alpha}$$

## 二、三极管特性曲线

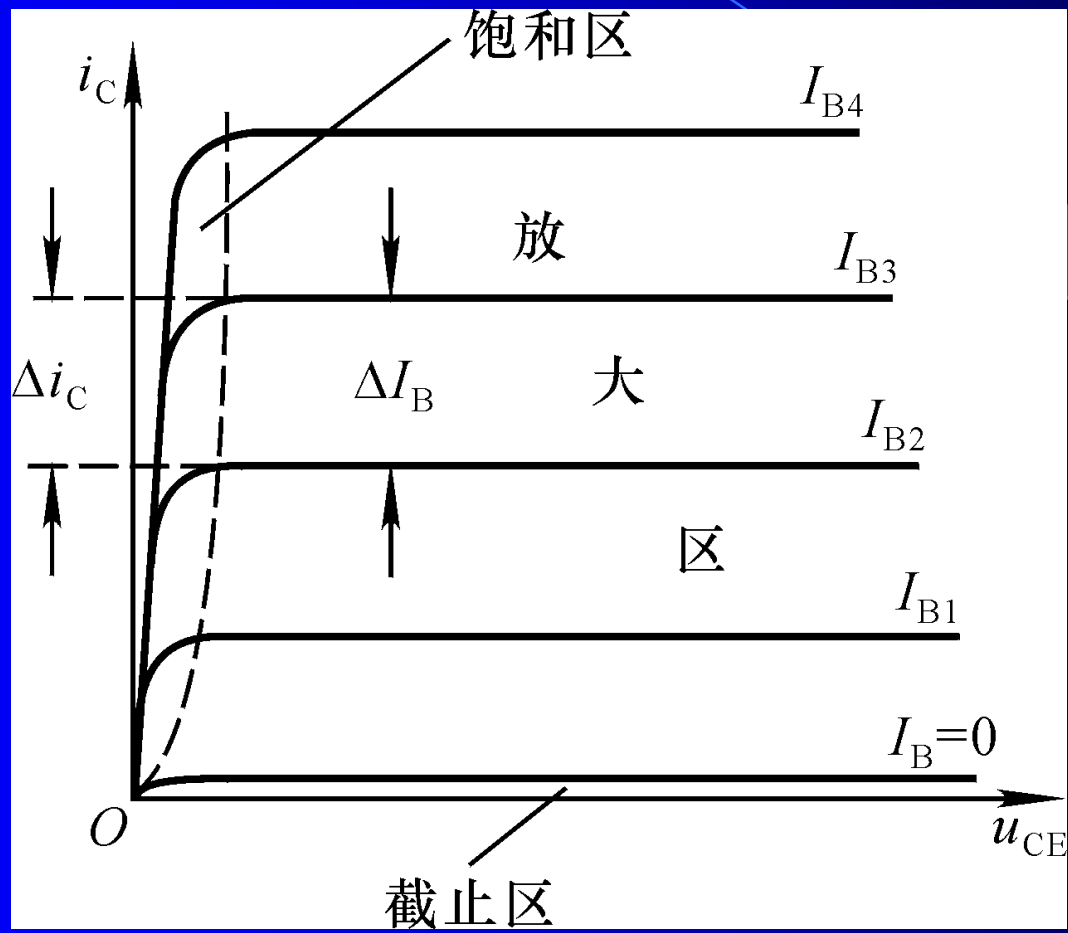
### ➤ 输入特性曲线族



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



## ➤ 输出特性曲线族



# 三、三极管参数

- 1、直流参数

$$\bar{\beta} \quad \bar{\alpha} \quad I_{CBO}、I_{CEO}$$

- 2、交流参数

$$\beta \quad \alpha \quad f_T$$

- 3、极限参数

$$I_{CM}、P_{CM}、U_{(BR)CEO}$$

## 四、三极管温度特性

- $\beta$ ,  $I_{CBO}$ (或 $I_S$ )和 $U_{BE(on)}$ 都是温度敏感参数, 一般有:
  - ✓ 每升高 $1^\circ \text{C}$ ,  $\beta$ 增大 $0.5\sim 1\%$
  - ✓ 每升高 $1^\circ \text{C}$ ,  $U_{BE(on)}$ 减小 $2\sim 2.5\text{mV}$
  - ✓ 每升高 $10^\circ \text{C}$ ,  $I_{CBO}$ 增大一倍。

# 1.4 场效应管

- 场效应管（FET, Field Effect Transistor）

- 分类

制作工艺

结型场效应管（JFET）

增强型MOS场效应管（EMOS）

耗尽型MOS场效应管（DMOS）

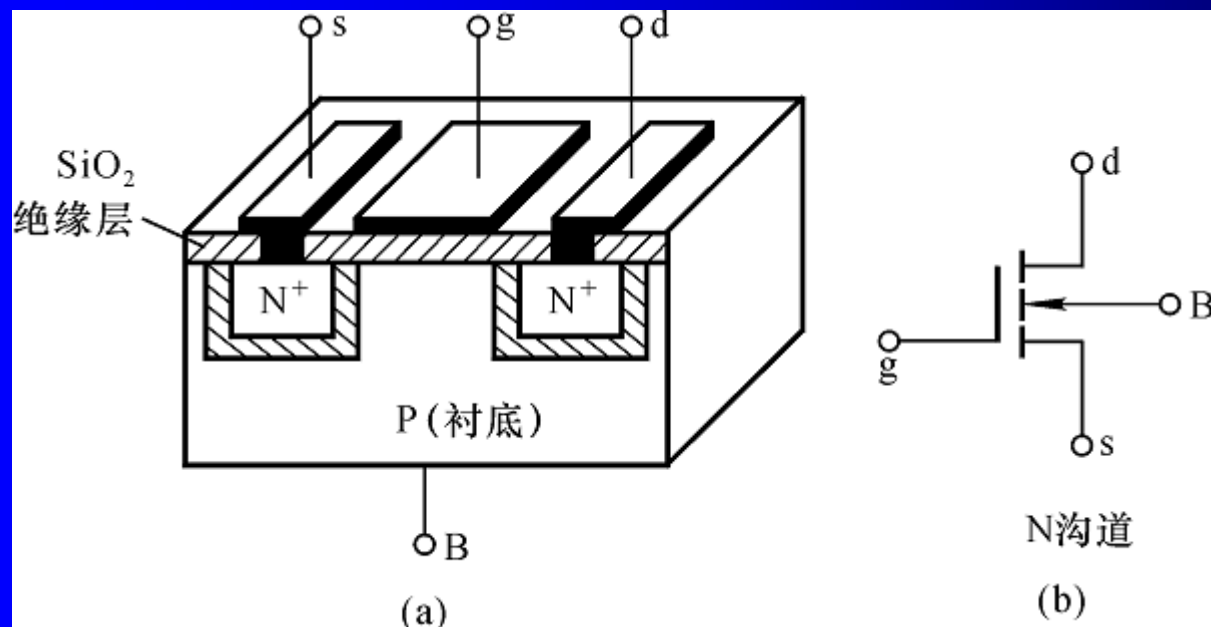
导电沟道

P沟道场效应管

N沟道场效应管

# 一、EMOS场效应管

## ● N沟道EMOS结构图及电路符号



L: 沟道长度,

$1\sim 10\mu\text{m}$

W: 沟道宽度,

$2\sim 500\mu\text{m}$

$\text{SiO}_2$ 厚度:

$0.02\sim 0.1\mu\text{m}$

s: 源极; g: 栅极; d: 漏极; B: 衬底极;  $\text{N}^+$ : 源区、漏区

# 工作原理

## ● 1、MOS管工作状态

MOS管正常工作时，两个PN结始终处于反偏状态，一般有 $u_{BS}=0$ 或 $u_{BS}<0$ （B接最低电位），因此有 $u_{DS}>0$ （漏源间接正偏电压）

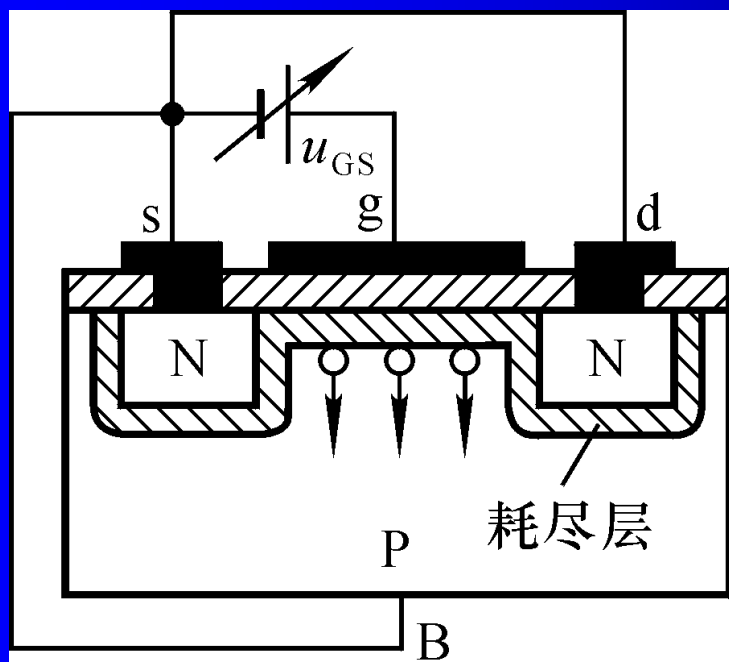
在栅极电压 $u_{GS}$ 的作用下，在d、s之间形成导电通道，然后在 $u_{DS}$ 的控制下形成d、s之间的漏极电流（ $i_D$ ）

由于形成的导电通道是N型半导体，因此称为N沟道。

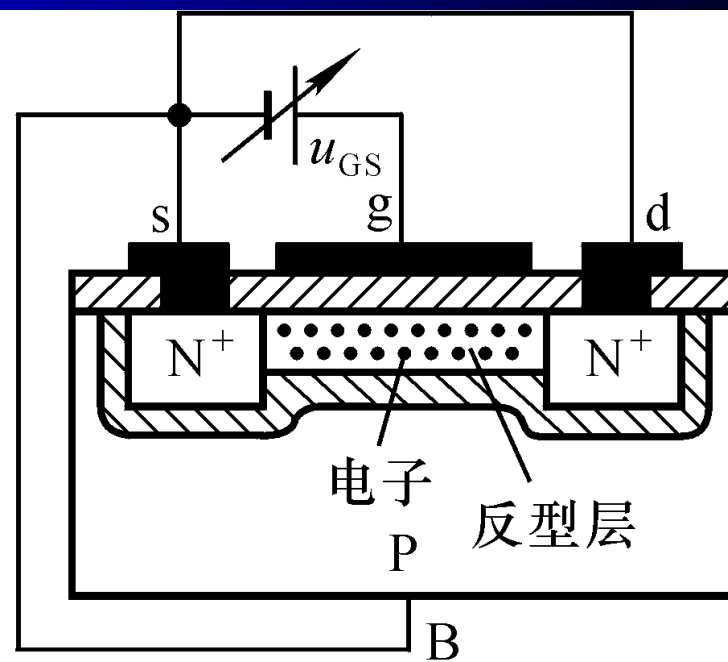


## ● 2、沟道形成及 $u_{GS}$ 对 $i_D$ 的控制

- 1) 都不加电压时 ( $u_{GS}=0, u_{DS}=0$ )，两个PN结处于动态平衡，会形成空间电荷区，所以DS之间互相隔离，不能导通。
- 2) g、s之间加正偏电压 ( $u_{GS}>0$ )，衬底栅极相当于一个平板电容器。——> g板上积聚正电荷 ——> 形成电场  $E$  (从 $SiO_2$ 层指向衬底) ——> 吸引电子，排斥空穴 ——> 形成负离子区+自由电子 (??)
- 3)  $u_{GS} \uparrow$  ——>  $E \uparrow$  ——> 吸引更多电子、排斥更多空穴 ——> 自由电子浓度大于空穴浓度 ——> P型衬底变成N型 ——> 产生反型层 (沟道产生)。
- 4) 将反型层刚好形成时的 $u_{GS}$ 称为开启电压 ( $U_{GS(th)}$ )，是MOS管的工艺参数，取决于 $SiO_2$ 的厚度，衬底的掺杂浓度等。
- 5) MOS管是沟道导电的器件，当 $u_{GS} < U_{GS(th)}$ 时，未形成沟道，ds之间无电流。 $u_{GS} > U_{GS(th)}$ 时，形成沟道。



(a)



(b)

### ● 3、 $u_{DS}$ 对 $i_D$ 的控制 ( $u_{GS}$ 一定)

$u_{GS} > U_{GS(th)}$ , 形成沟道

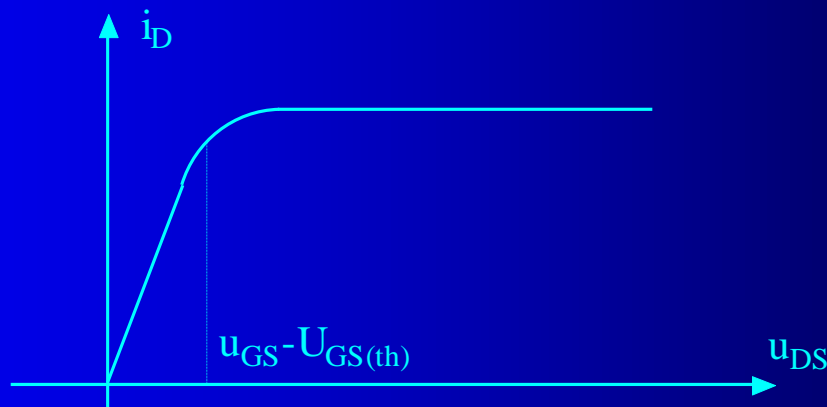
d、s之间加正偏电压 ( $u_{DS} > 0$ ), 自由电子形成漂移电流 $i_D$ , 方向从d  $\longrightarrow$  s

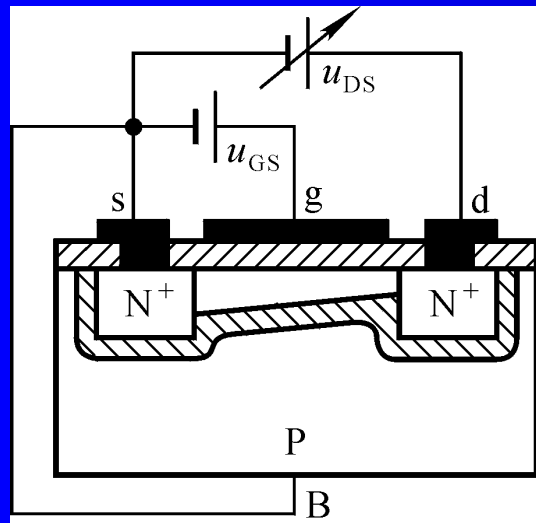
1) 当 $u_{DS}$ 很小时,  $i_D$ 很小, 沟道深度均匀,  $i_D$ 与 $u_{DS}$ 几乎成线性增大关系

2)  $u_{DS} \uparrow \longrightarrow i_D \uparrow \longrightarrow$  形成锥形沟道

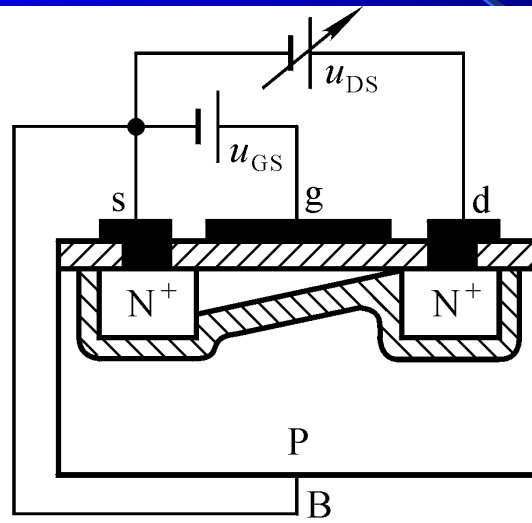
此时, 沟道电阻增大, 导致 $i_D$ 增大趋势变缓。

3)  $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} = U_{GS(th)}$ , 即 $u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(th)}$ 时, 漏极端反型层消失 (预夹断),  $i_D$ 不随 $u_{DS}$ 变化, 进入饱和区。继续增大 $u_{DS}$ ,  $i_D$ 基本恒定。

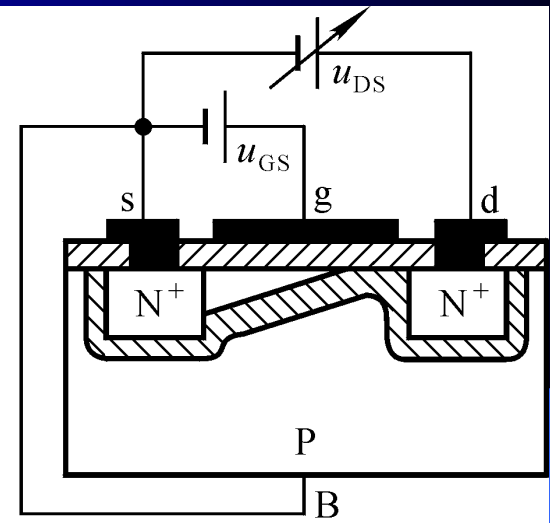




(a)

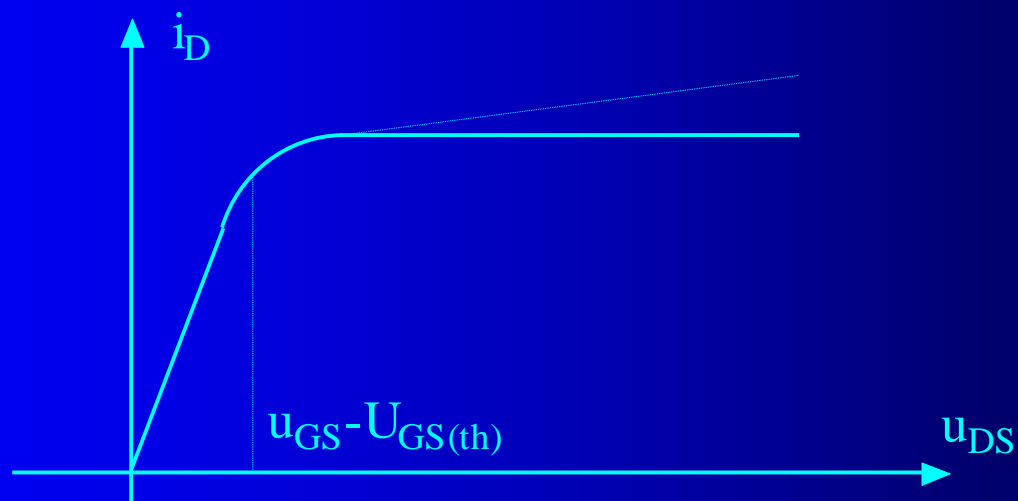


(b)



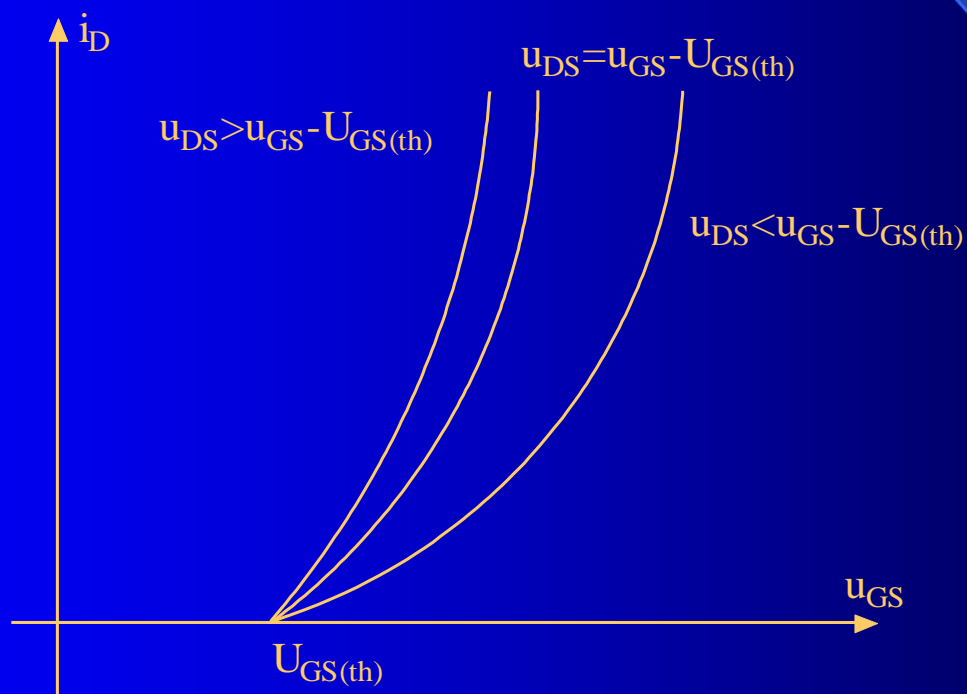
(c)

## ● 4、沟道长度调制效应

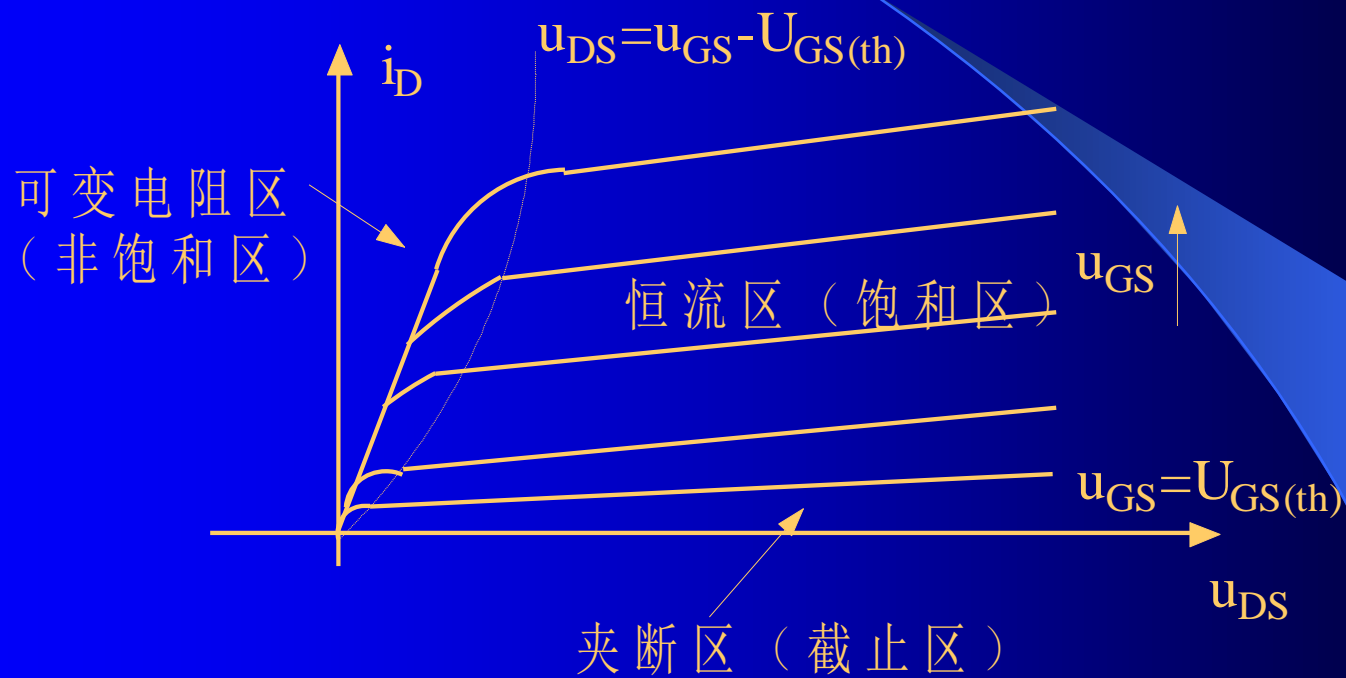


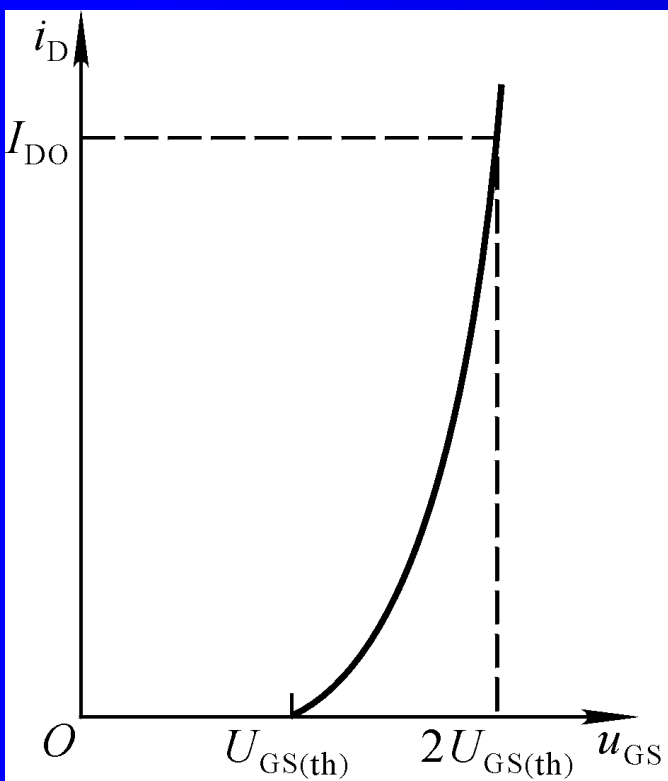
# N沟道EMOS特性曲线

## ➤ 转移特性曲线

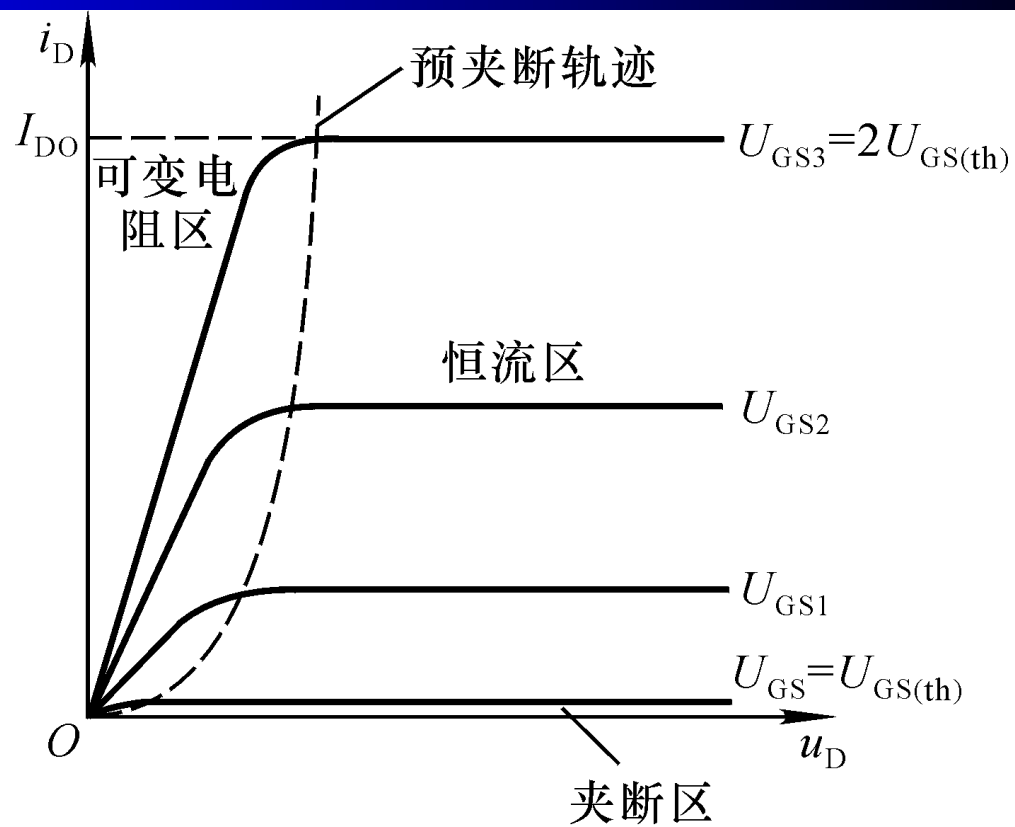


## ➤ 输出特性曲线





(a)



(b)



## 电流方程:

i) 非饱和区  $u_{GS} > U_{GS(th)}$ ,  $0 < u_{DS} < u_{GS} - U_{GS(th)}$

$$i_D = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} [2(u_{GS} - U_{GS(th)})u_{DS} - u_{DS}^2]$$

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon}{\tau_{ox}} \quad \varepsilon: \text{SiO}_2 \text{层介电常数}; \tau_{ox}: \text{厚度}$$

ii) 饱和区  $u_{GS} > U_{GS(th)}$ ,  $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(th)}$

$$i_D = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} (u_{GS} - U_{GS(th)})^2 \cdot (1 + \lambda u_{DS})$$

$\lambda$ 由沟道长度调制效应引入, 如果不考虑则为0

$$\mathbf{i_D = I_{DO}(u_{gs}/U_{GS(th)} - 1)^2}$$

iii) 截止区  $u_{GS} < U_{GS(th)}$

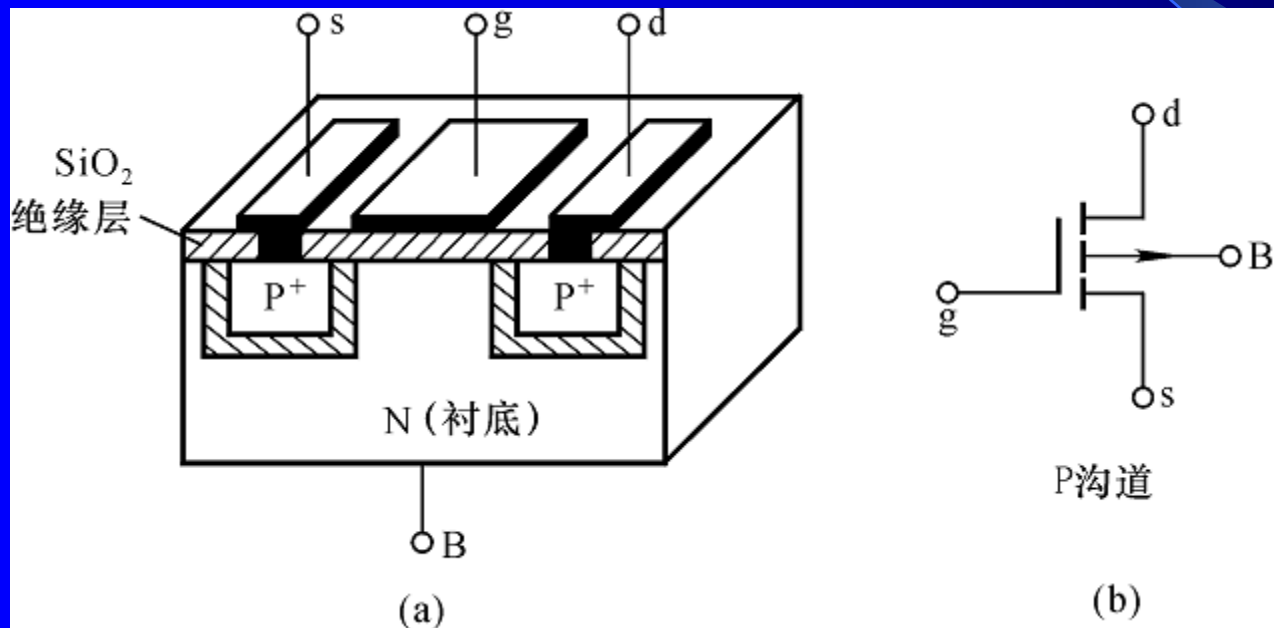
$$i_D = 0$$

# 背栅效应、温度特性

- 当衬底与源极不连接时，即衬底与源极之间存在一个负偏压 $u_{BS}$ 时，将引入背栅效应（衬底效应）
- $u_{BS}$ 对 $i_D$ 的影响可以反映在开启电压上， $u_{BS}$ 反偏越大，开启电压就越大。从转移曲线来看，相当于曲线右移。输出曲线下移。
- 温度特性
  - 温度升高，自由电子迁移率降低使电流减小
  - 温度升高，衬底中自由电子浓度增大使开启电压减小，从而使电流增大。
  - 从整个结果来看，前者影响大于后者影响，所以MOS管电流随温度升高而减小，具有负温度特性。

# P沟道EMOS管

## ● 结构图及电路符号

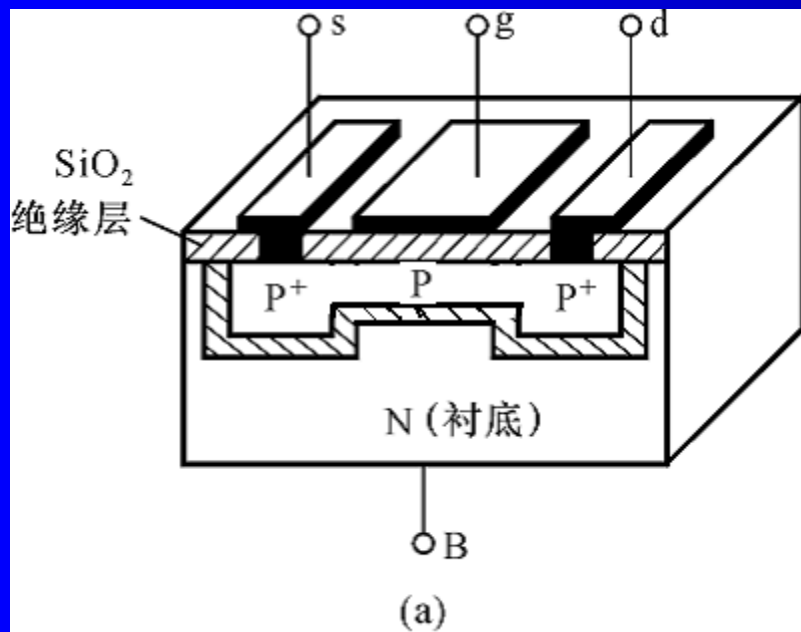


PN结反偏，  
B接最高电位

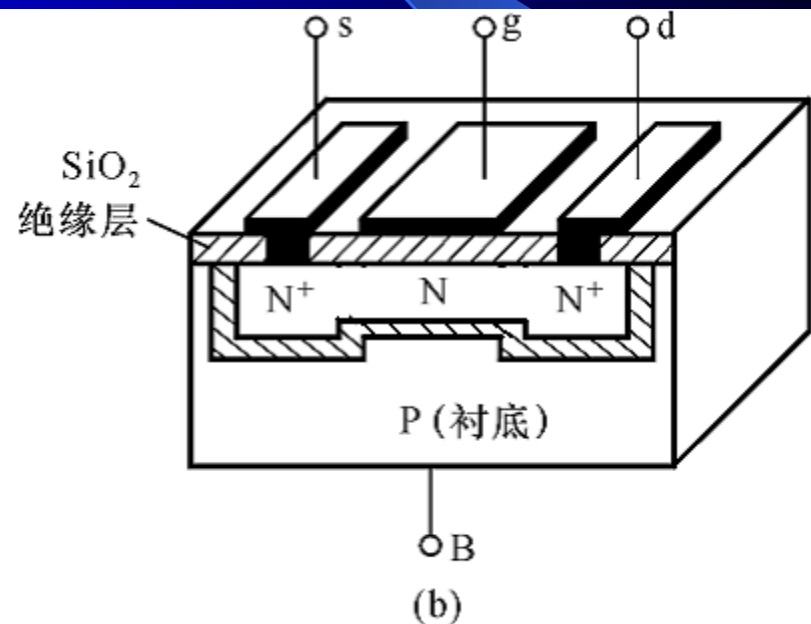
$$u_{GS} < U_{GS(th)} < 0 \quad u_{DS} < 0 \quad i_D \text{ 电流方向: } s \longrightarrow d$$

## 二、DMOS场效应管

### ● 结构

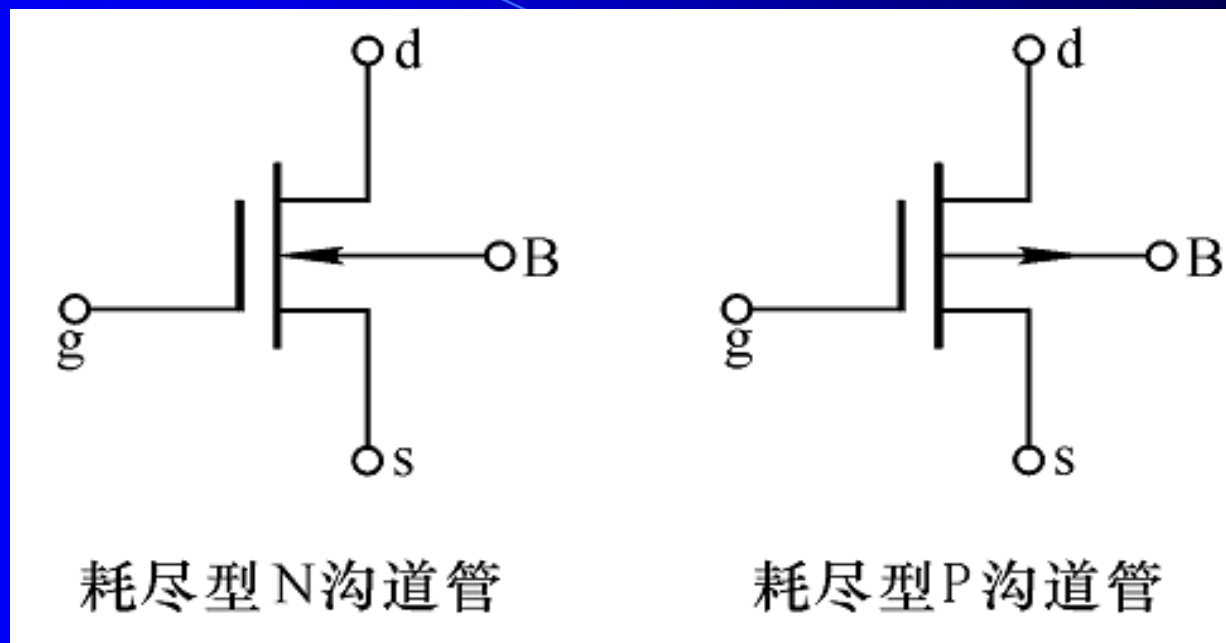


P沟道



N沟道

## 电路符号



N沟道:  $U_{DS} > 0$ ;  $U_{GS(off)} < 0$ ;  $u_{GS} > U_{GS(off)}$  时,  $i_D > 0$   $D \rightarrow S$

P沟道:  $U_{DS} < 0$ ;  $U_{GS(off)} > 0$ ;  $u_{GS} < U_{GS(off)}$  时,  $i_D > 0$   $S \rightarrow D$

# 场效应管类型的判别

- 1、由 $u_{DS}$ 识别沟道类型

$u_{DS} > 0$       N沟道

$u_{DS} < 0$       P沟道

- 2、由 $u_{GS}$ 识别增强型、耗尽型或结型

$u_{GS} > 0$  或者  $u_{GS} < 0$  (不含  $u_{GS} = 0$ )      EMOS

$u_{GS} > 0$  或者  $u_{GS} < 0$  (含  $u_{GS} = 0$ )      JFET

$u_{GS} > 0$ 、 $u_{GS} < 0$ 、 $u_{GS} = 0$       DMOS

# 三、场效应管参数

## ● 1、直流参数

- 开启电压 $U_{GS(th)}$ ；夹断电压 $U_{GS(off)}$ ； $I_{DSS}$ ；栅极电流

## ● 2、交流参数

- 跨导 $g_m$ ；背栅（衬底）跨导 $g_{mB}$ ；极间电容 $C_{gs}$ 、 $C_{gd}$ 、 $C_{ds}$ ；交流输出电阻 $r_{ds}$

## ● 3、极限参数

- 最大漏极电流 $I_{DM}$ ；击穿电压；最大耗散功率 $P_{DM}$

## 四、三极管与场效应管的比较

- 1、FET单极型器件（只有一种载流子参与导电），多子漂移电流，受温度影响小，负温度特性
- BJT双极型器件（两种载流子都参与导电），多子扩散电流，少子漂移电流，正温度特性
- 2、BJT的输入电阻小（ $K\Omega$ ），FET输入电阻大（ $10^8 \sim 10^{12}\Omega$ ）。BJT电流控制器件，FET电压控制器件。
- 3、FET的d、s对称，可互换，偏置较灵活；BJT发射极和集电极不能互换。
- 4、MOS管工艺简单，集成度高，在大规模集成电路中应用较多；BJT多应用于小规模集成电路中。