



## 3 二极管及其基本电路

---

- 3.1 半导体的基本知识
- 3.2 PN结的形成及特性
- 3.3 半导体二极管实例
- 3.4 二极管的基本电路及其分析方法
- 3.5 特殊二极管



## 3.1 半导体的基本知识

---

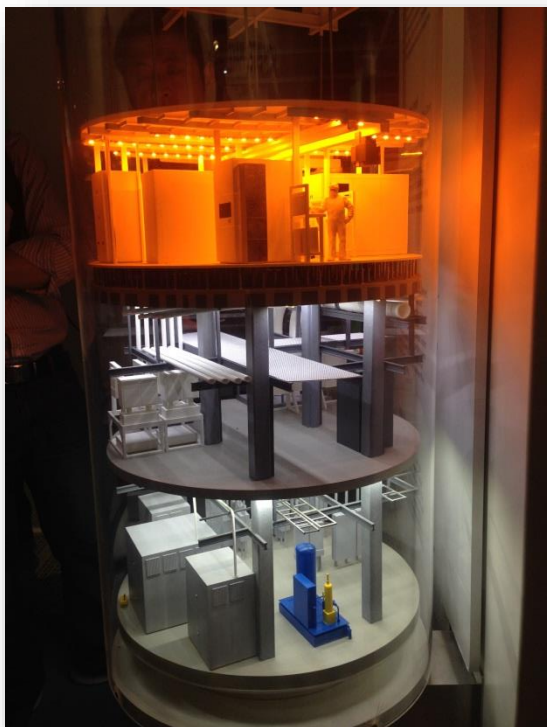
- 3.1.1 半导体材料
- 3.1.2 半导体的共价键结构
- 3.1.3 本征半导体
- 3.1.4 杂质半导体



## 3.1.1 半导体材料

了解

- 根据物体导电能力(电阻率)的不同，来划分导体、绝缘体和半导体。
- 典型的半导体有**硅Si**和**锗Ge**以及**砷化镓GaAs**等。以其为衬底，在上面制作集成电路器件。

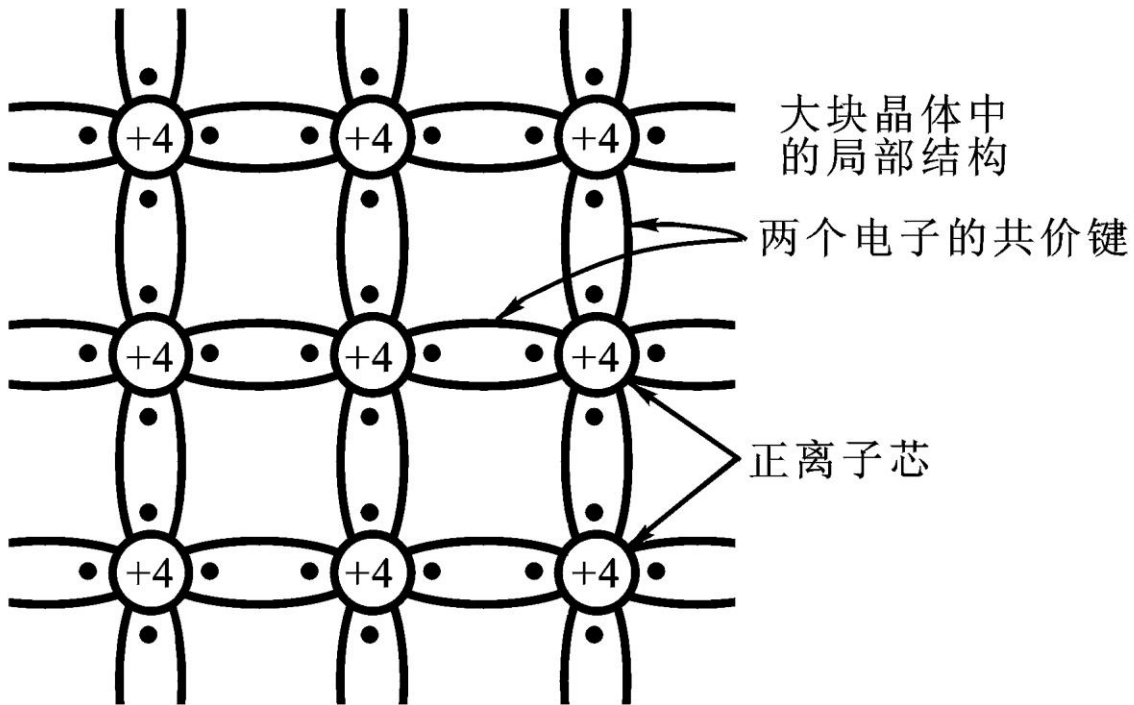
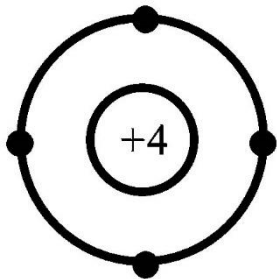




## 3.1.2 半导体的共价键结构

了解

### 硅和锗的原子结构简化模型及晶体结构





### 3.1.3 本征半导体

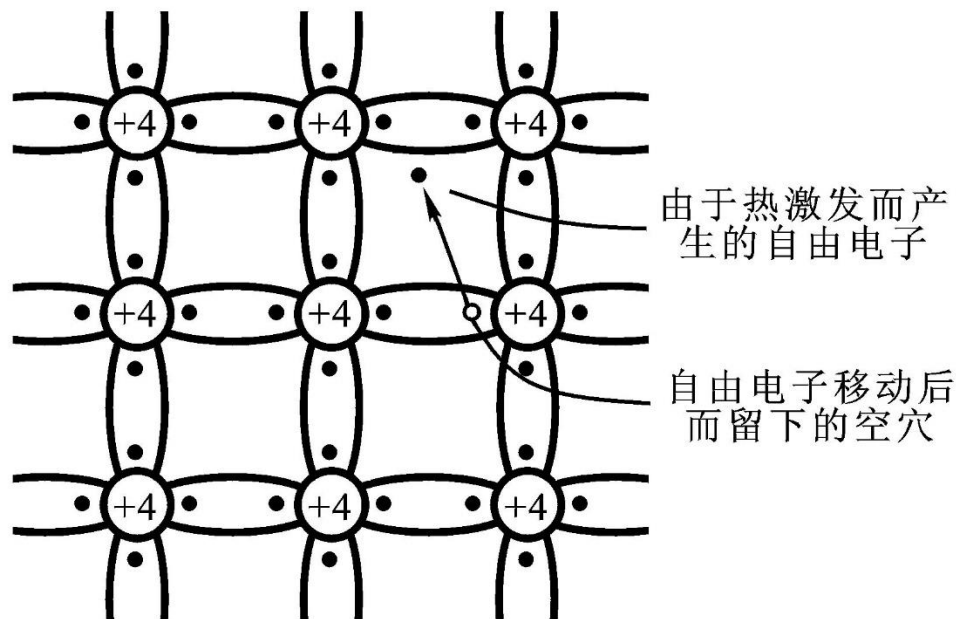
了解

**本征半导体**——化学成分纯净的半导体。它在物理结构上呈单晶体形态。

**空穴**——共价键中的空位。

**电子空穴对**——由热激发而产生的自由电子和空穴对。

**空穴的移动**——空穴的运动是靠相邻共价键中的价电子依次充填空穴来实现的。



由于随机热振动致使共价键被打破而产生空穴 - 电子对



### 3.1.4 杂质半导体

了解

在本征半导体中掺入某些微量元素作为杂质，可使半导体的导电性发生显著变化。掺入的杂质主要是三价或五价元素。掺入杂质的本征半导体称为**杂质半导体**。

**N型半导体**——掺入五价杂质元素（如磷）的半导体。

**P型半导体**——掺入三价杂质元素（如硼）的半导体。

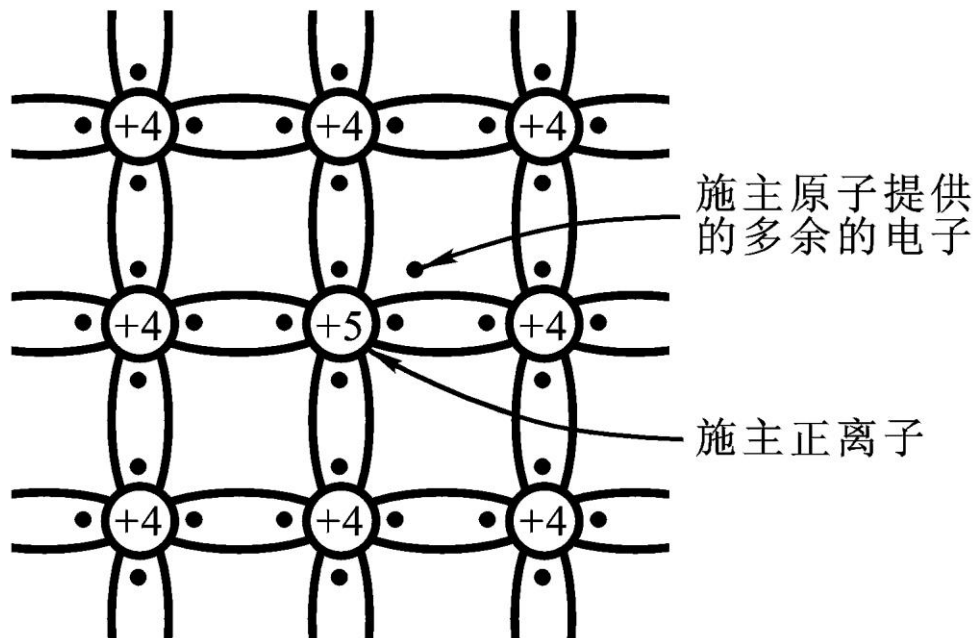


### 3.1.4 杂质半导体

了解

## 1. N型半导体

因五价杂质原子中只有四个价电子能与周围四个半导体原子中的价电子形成共价键，而多余的一个价电子因无共价键束缚而很容易形成自由电子。



在N型半导体中**自由电子是多数载流子**，它主要由杂质原子提供；**空穴是少数载流子**，由热激发形成。

提供自由电子的五价杂质原子因带正电荷而成为**正离子**，因此五价杂质原子也称为**施主杂质**。

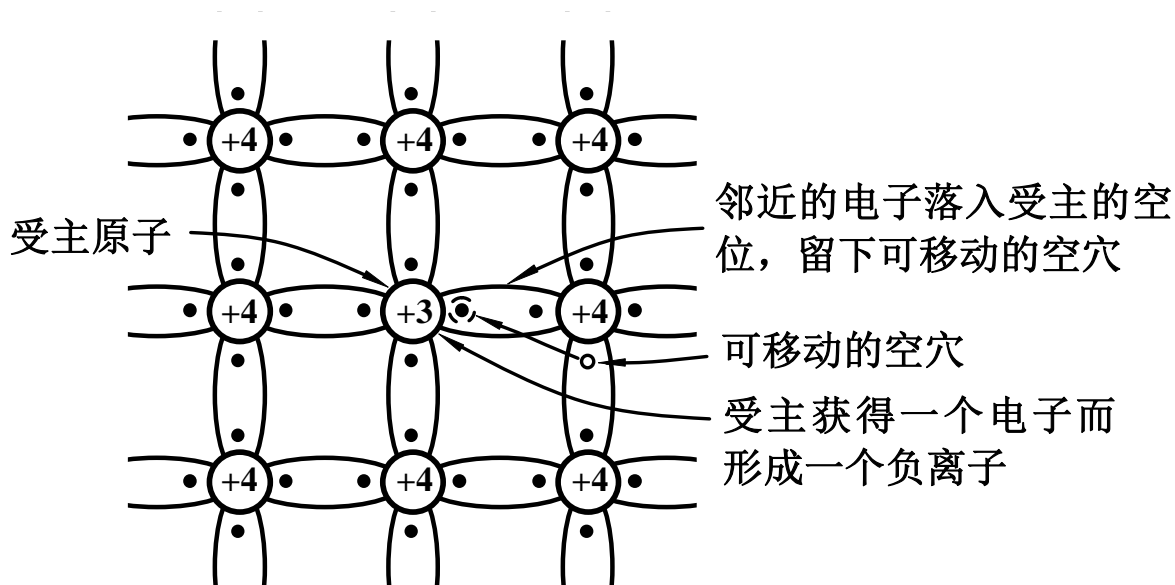


## 3.1.4 杂质半导体

了解

### 2. P型半导体

因三价杂质原子在与硅原子形成共价键时，缺少一个价电子而在共价键中留下一个空穴。



在P型半导体中空穴是多数载流子，它主要由掺杂形成；自由电子是少数载流子，由热激发形成。

空穴很容易俘获电子，使杂质原子成为负离子。三价杂质因而也称为受主杂质。





### 3. 杂质对半导体导电性的影响

掺入杂质对本征半导体的导电性有很大的影响，  
一些典型的数据如下：

①  $T=300\text{ K}$  室温下,本征硅的电子和空穴浓度:

$$n = p = 1.4 \times 10^{10} / \text{cm}^3$$

② 掺杂后 N 型半导体中的自由电子浓度:

$$n = 5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$$

③ 本征硅的原子浓度:  $4.96 \times 10^{22} / \text{cm}^3$

以上三个浓度基本上依次相差  $10^6 / \text{cm}^3$  。



## 3.2 PN结的形成及特性

---

- 3.2.1 载流子的漂移与扩散
- 3.2.2 PN结的形成
- 3.2.3 PN结的单向导电性
- 3.2.4 PN结的反向击穿
- 3.2.5 PN结的电容效应



## 3.2.1 载流子的漂移与扩散(概念)

了解

**漂移运动:**

**在电场作用引起的载流子的运动**

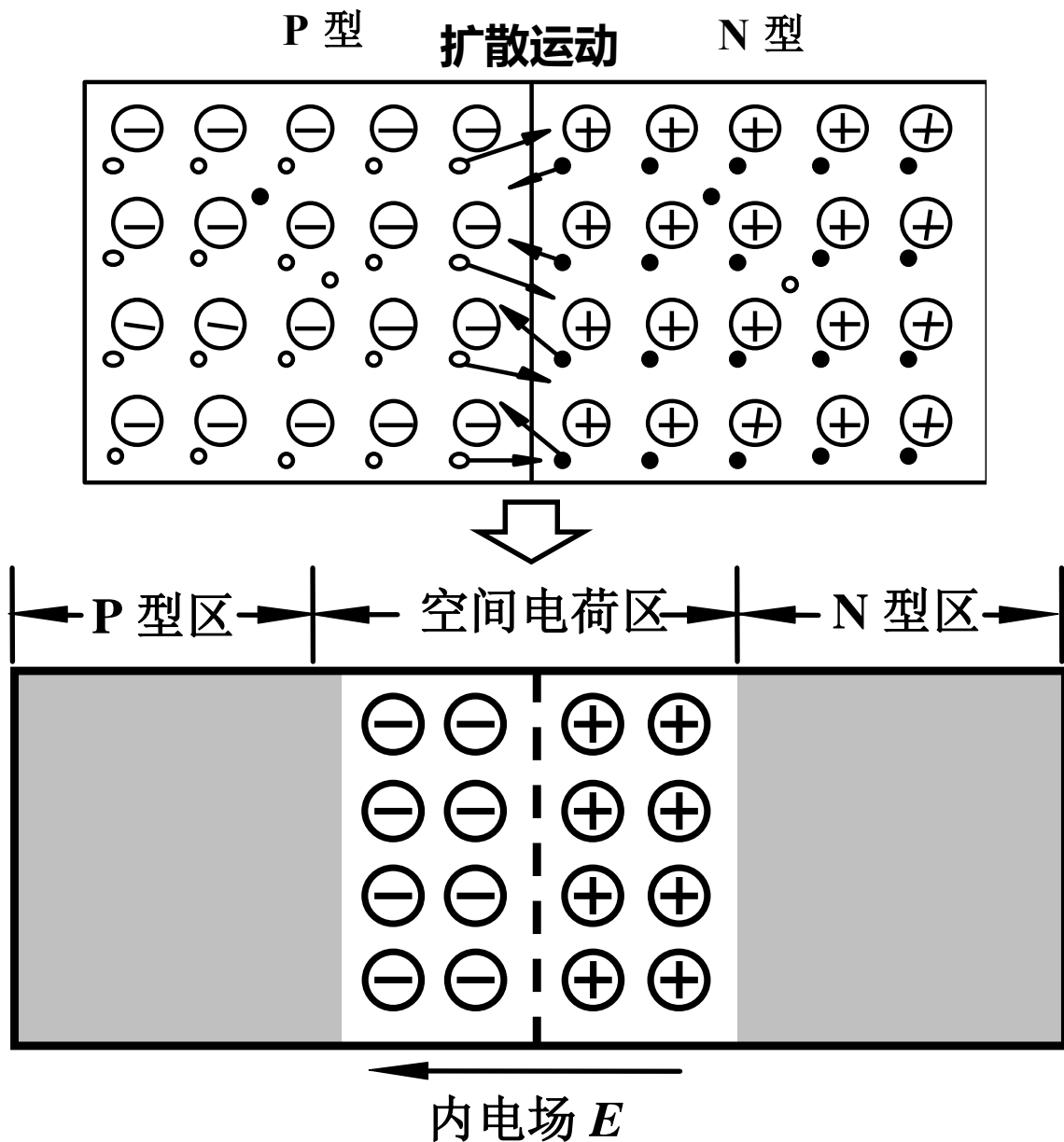
**扩散运动:**

**由载流子浓度差引起的载流子的运动**



## 3.2.2 PN结的形成

了解





## 3.2.2 PN结的形成

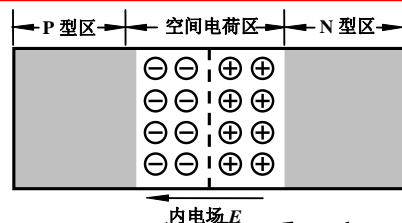
了解

在一块本征半导体两侧通过扩散不同的杂质,分别形成**N**型半导体和**P**型半导体。此时将在**N**型半导体和**P**型半导体的结合面上形成如下物理过程:

因浓度差



多子的扩散运动 → 由杂质离子形成空间电荷区



空间电荷区形成内电场



内电场促使少子漂移



内电场阻止多子扩散

最后,多子的**扩散**和少子的**漂移**达到**动态平衡**。

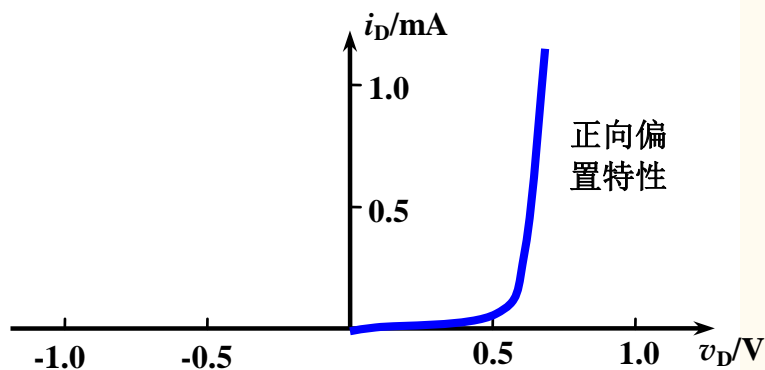


### 3.2.3 PN结的单向导电性

当外加电压使PN结中**P**区的电位高于**N**区的电位，称为加**正向电压**，简称**正偏**；反之称为加**反向电压**，简称**反偏**。

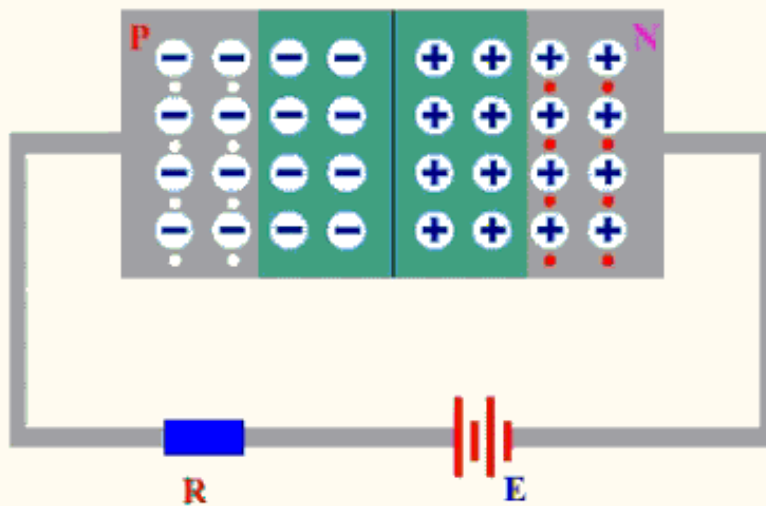
#### (1) PN结加正向电压时

- 低电阻
- 大的正向扩散电流



PN结的*i-v*特性

PN结加正向电压时的导电情况



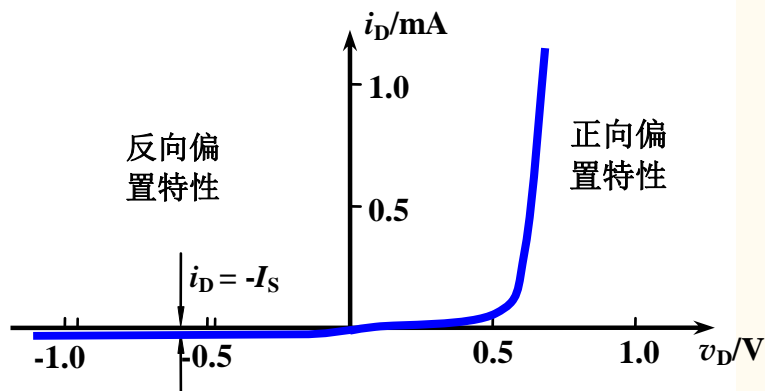


### 3.2.3 PN结的单向导电性

当外加电压使PN结中**P**区的电位高于**N**区的电位，称为加**正向电压**，简称**正偏**；反之称为加**反向电压**，简称**反偏**。

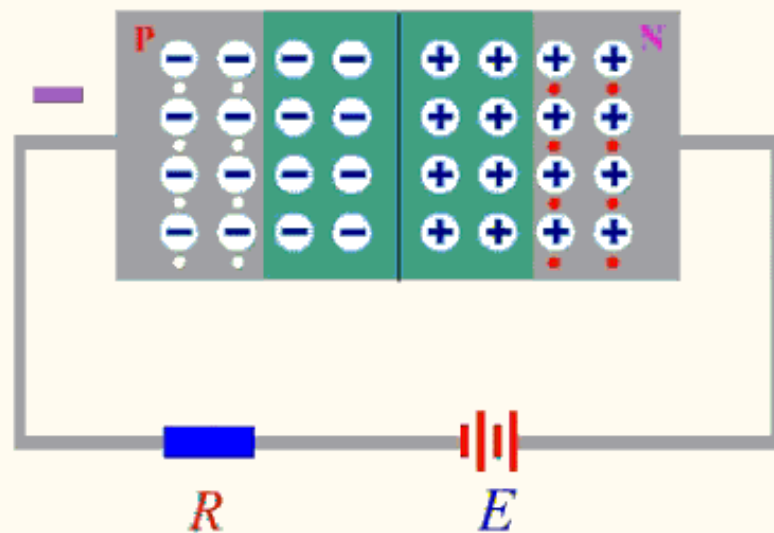
#### (2) PN结加反向电压时

- 高电阻
- 很小的反向漂移电流



PN结的  $i$ - $v$  特性

PN结加反向电压时的导电情况



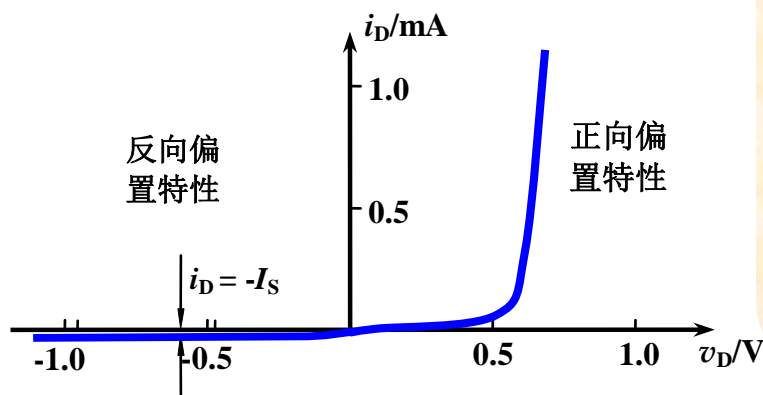


### 3.2.3 PN结的单向导电性

当外加电压使PN结中**P**区的电位高于**N**区的电位，称为加**正向电压**，简称**正偏**；反之称为加**反向电压**，简称**反偏**。

#### (2) PN结加反向电压时

- 高电阻
- 很小的反向漂移电流



PN结的*i-v*特性

在一定的温度条件下，由本征激发决定的少子浓度是一定的，故少子形成的漂移电流是恒定的，基本上与所加反向电压的大小无关，这个电流也称为**反向饱和电流**。





### 3.2.3 PN结的单向导电性

---

**PN结加正向电压时，呈现低电阻，  
具有较大的正向扩散电流；**

**PN结加反向电压时，呈现高电阻，  
具有很小的反向漂移电流。**

**由此可以得出结论：PN结具有单向  
导电性。**



### 3.2.3 PN结的单向导电性

#### (3) PN结 $i$ - $V$ 特性表达式

$$i_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1) \approx I_S e^{v_D/V_T}$$

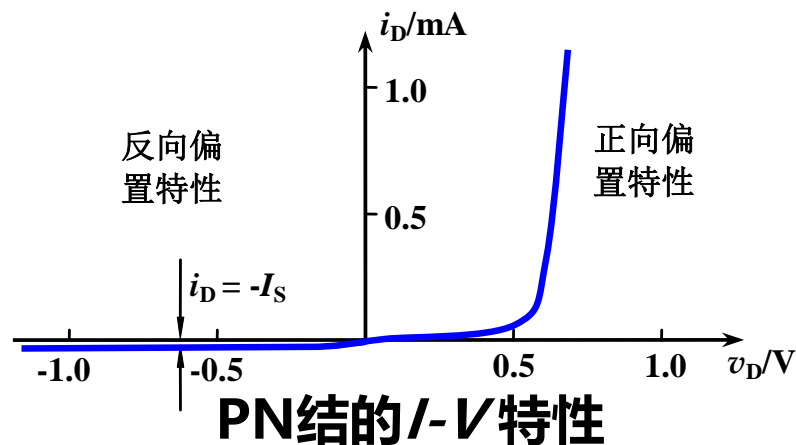
其中

$I_S$ ——反向饱和电流

$V_T$ ——温度的电压当量 (热电压, thermal voltage)

且在常温下 ( $T=300\text{K}$ ), ( $k$ 为玻尔兹曼常数,  $q$ 是电子电荷量):

$$V_T = \frac{kT}{q} = 0.026\text{V} = 26\text{mV}$$



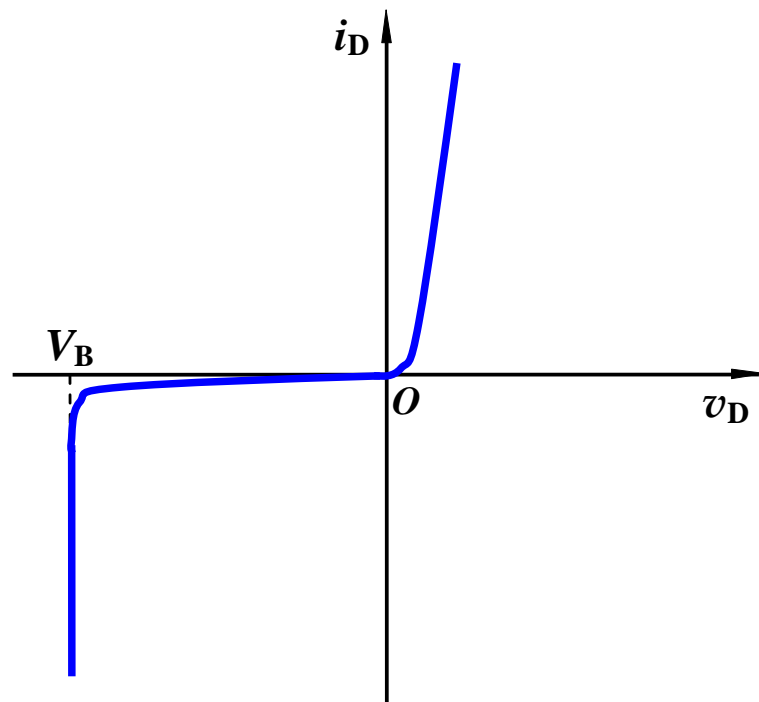


## 3.2.4 PN结的反向击穿

当PN结的反向电压增加到一定数值时，反向电流突然快速增加，此现象称为PN结的**反向击穿**。

热击穿——不可逆

雪崩击穿 }  
齐纳击穿 } 电击穿——可逆





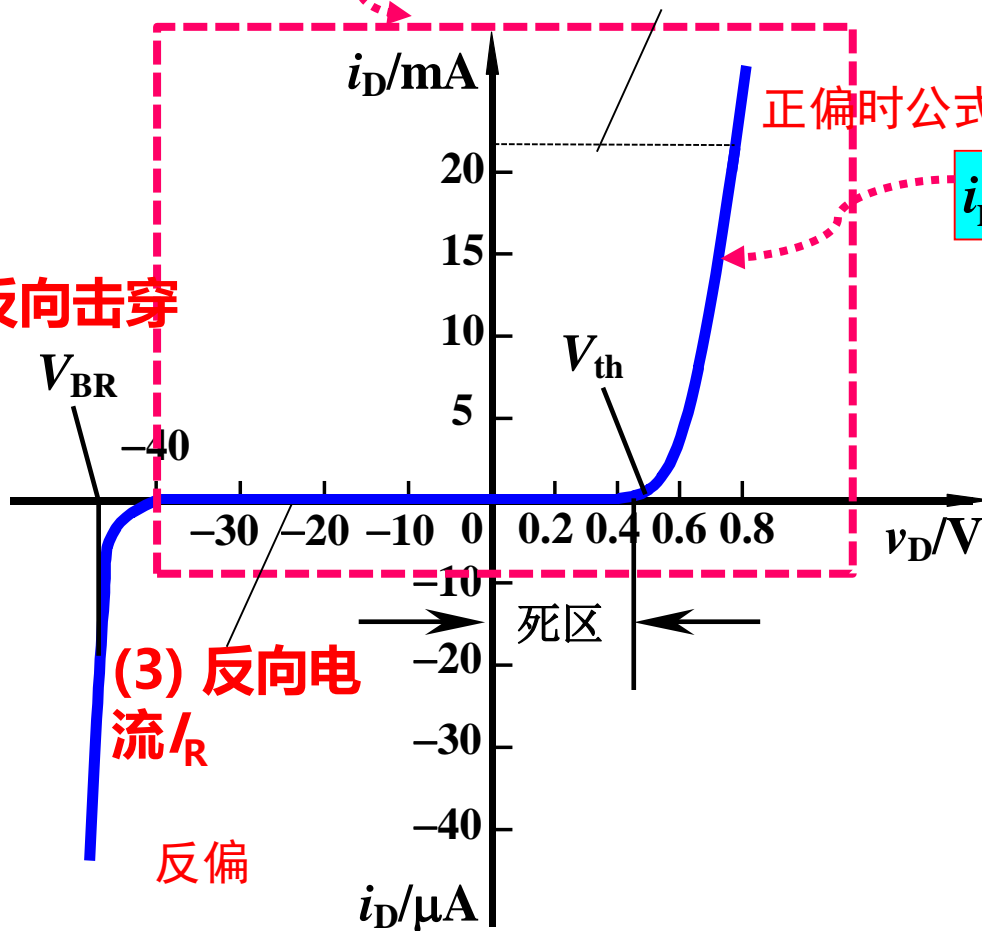
# 二极管（大信号）特性总结

\*掌握\*

$$i_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1)$$

(1) 最大整流电流  $I_F$

(2) 反向击穿电压



(3) 反向电流  $I_R$

反偏

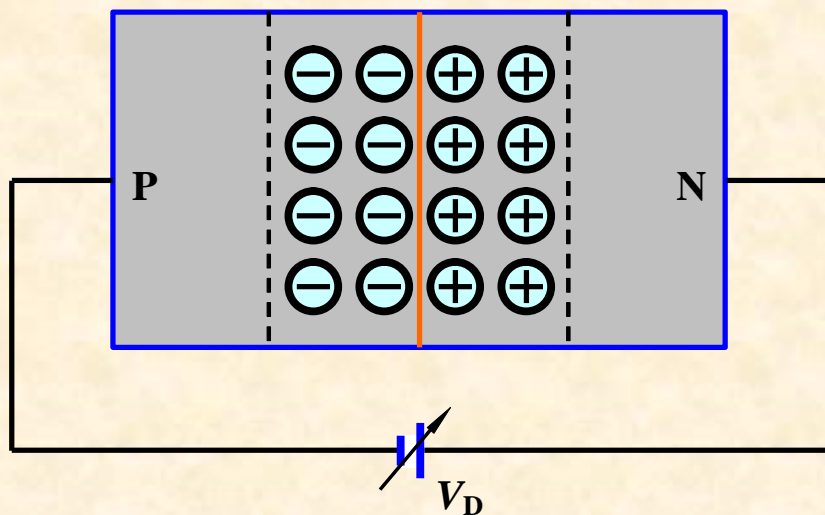
PN结的  $I$ - $V$  特性



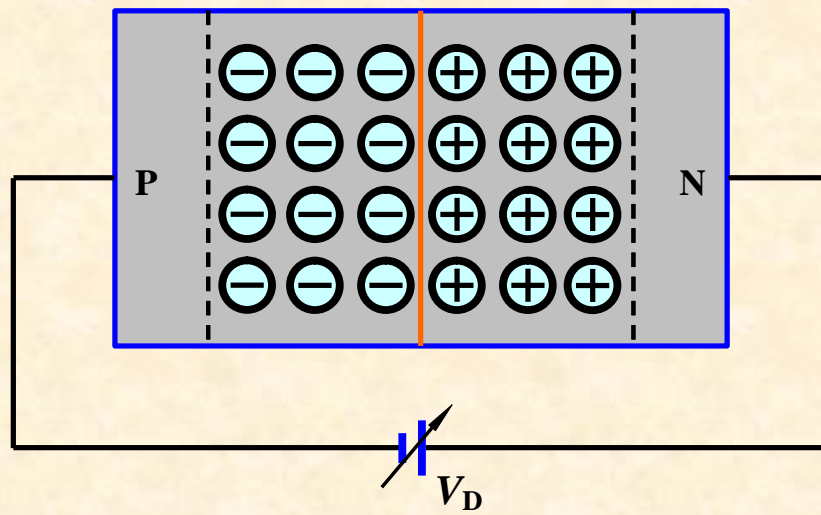
## 3.2.5 PN结的电容效应

了解

### (1) 势垒电容 $C_B$



(a) 电压减小时



(b) 电压增加时

外加电压变化  $\longrightarrow$  离子层厚薄变化  $\longrightarrow$  等效于电容充放电



## 3.2.5 PN结的电容效应

了解

### (2) 扩散电容 $C_D$

外加电压变化

- 扩散到对方区域在靠近PN结附近累积的载流子浓度发生变化
- 等效于电容充放电

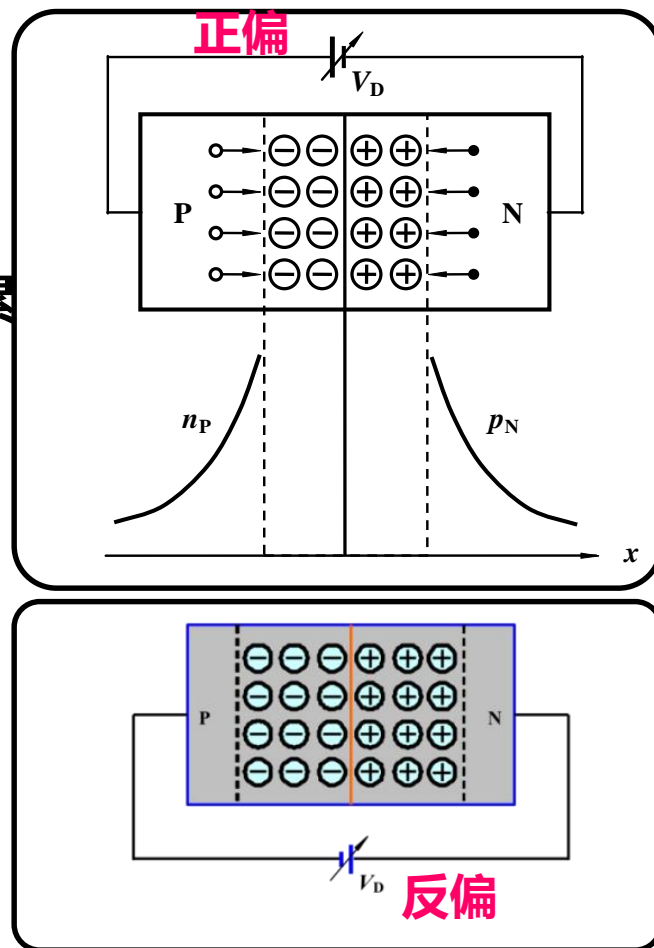
正偏，扩散电容  $C_D = \tau_t I_D / V_T$

□ 其中  $V_T$  是二极管阈值电压

### (3) 势垒电容 $C_B$

反偏，势垒电容  $C_B = C_{B0} \left(1 - \frac{V_D}{V_0}\right)^{-m}$

- 其中  $V_D$  接法是让二极管处于反偏状态，可实现压控电容，广泛用于VCO、匹配调谐器、可调滤波器等电路！
- 正偏时二极管主要体现扩散电容，反偏时主要体现势垒电容。





## 3.3 半导体二极管实例

---

- 3.3.1 二极管的结构
- 3.3.2 二极管的I-V特性举例
- 3.3.3 二极管的主要应用参数



### 3.3.1 二极管的结构





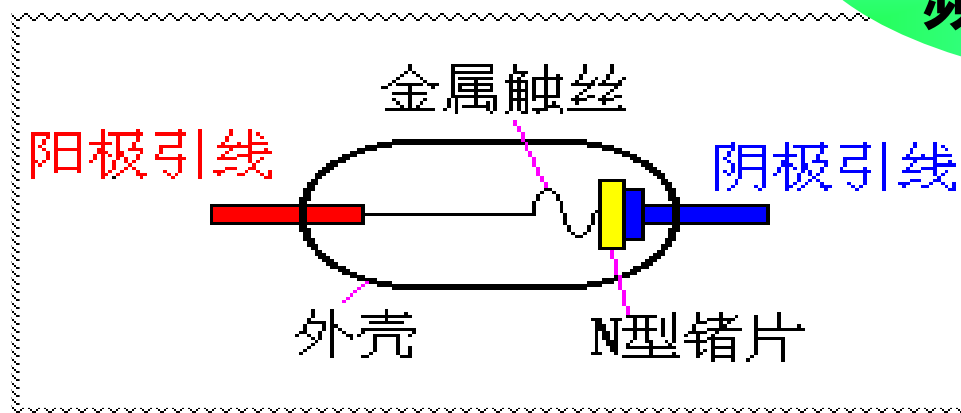


### 3.3.1 二极管的结构

在PN结上加上引线和封装，就成为一个二极管。  
二极管按结构分有**点接触型**、**面接触型**两大类。

#### (1) 点接触型二极管

PN结面积小，结电容小，用于检波和变频等高频电路。



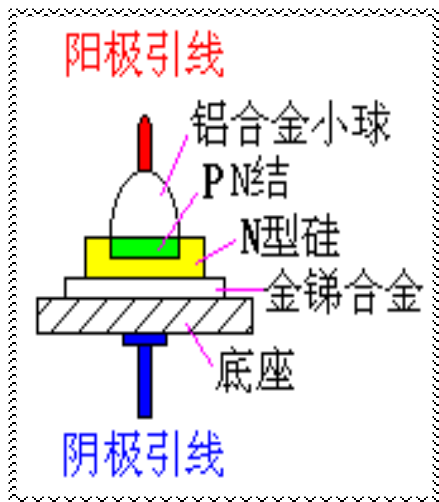
二极管的结构示意图

(a)点接触型



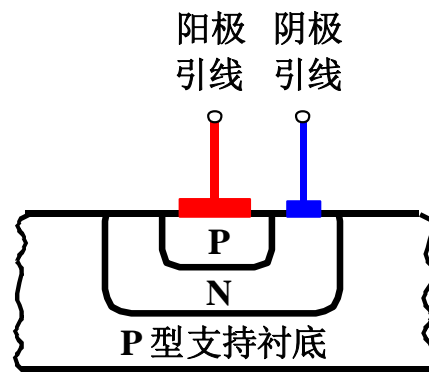
## 3.3.1 二极管的结构

### (2) 面接触型二极管



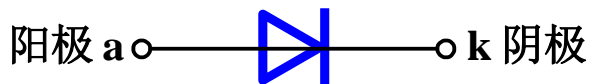
(b)面接触型

PN结面积大，用于  
工频大电流整流电路。



(c)集成电路中的平面型

### (3) 二极管的代表符号

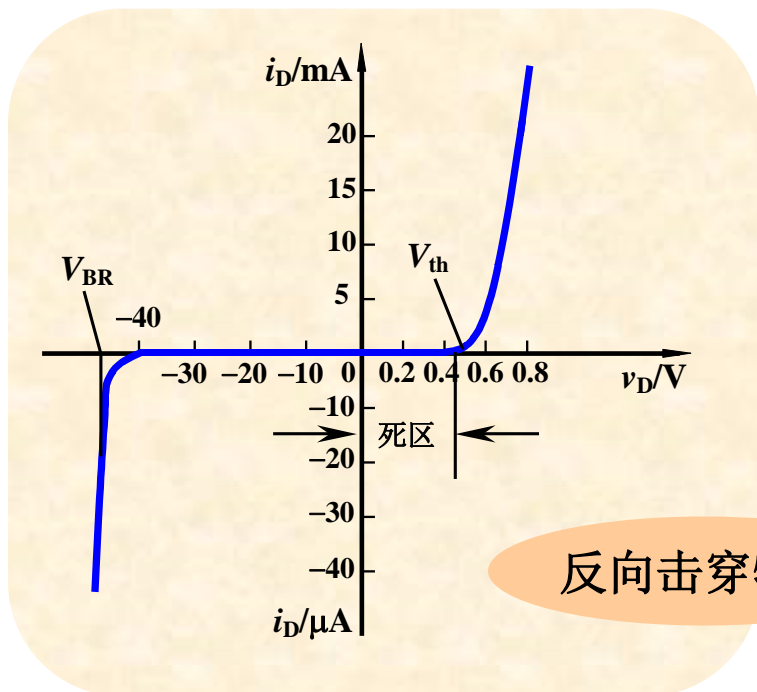
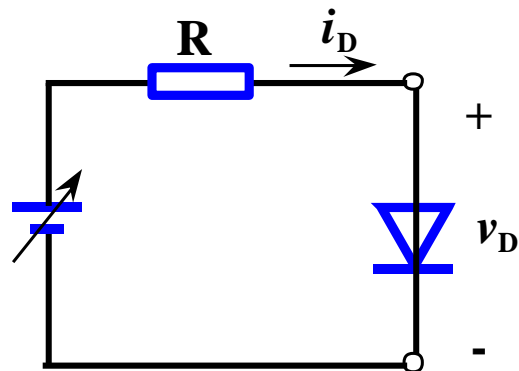




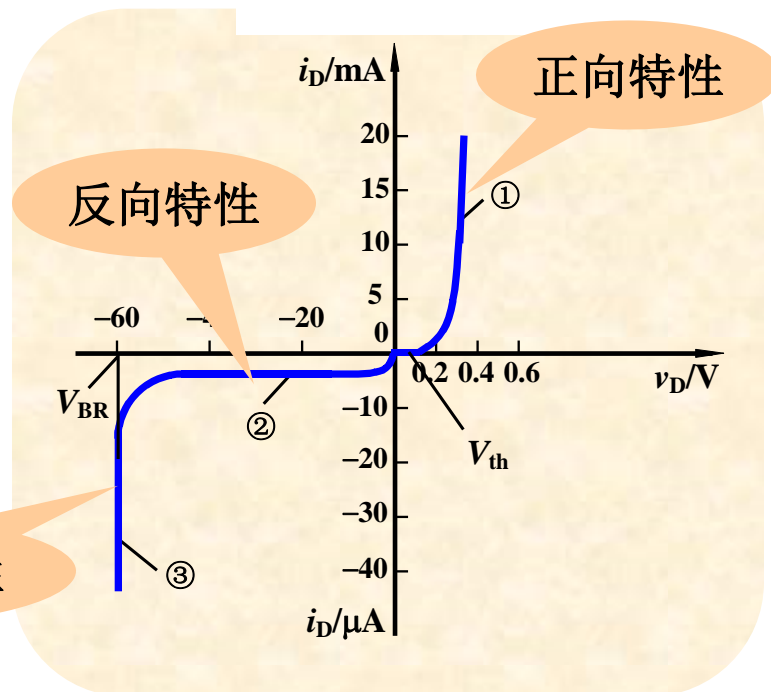
## 3.3.2 二极管的I-V特性

二极管的伏安特性曲线可用下式表示

$$i_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1) \approx I_S e^{v_D/V_T}$$



硅二极管2CP10的I-V特性



锗二极管2AP15的I-V特性



### 3.3.3 二极管的主要应用参数

了解

(1) 最大整流电流  $I_F$

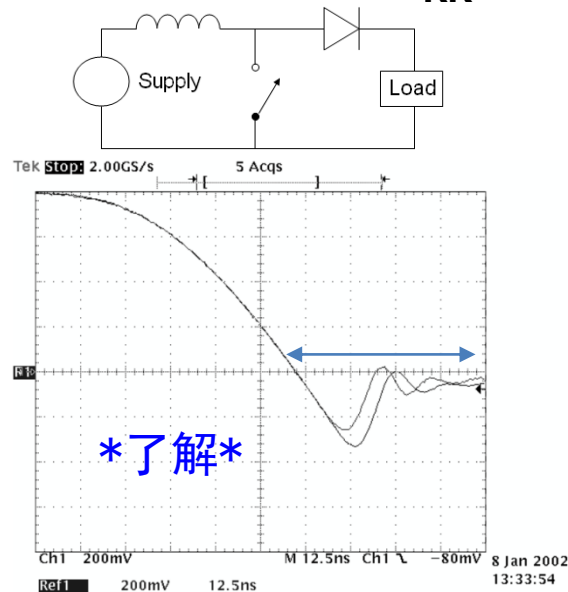
(2) 反向击穿电压  $V_{BR}$

(3) 反向电流  $I_R$

(4) 极间电容  $C_d$  ( $C_B$ 、 $C_D$ )

(5) 反向恢复时间  $T_{RR}$

反向恢复时间  $T_{RR}$





## 3.4 二极管的基本电路及其分析方法

---

3.4.1 简单二极管电路的图解分析方法

3.4.2 二极管电路的简化模型分析方法



### 3.4.1 简单二极管电路的图解分析方法

二极管是一种非线性器件，因而其电路一般要采用非线性电路的分析方法，相对来说比较复杂，而图解分析法则较简单，但前提条件是已知二极管的  $V-I$  特性曲线。

符号中大小写的含义：

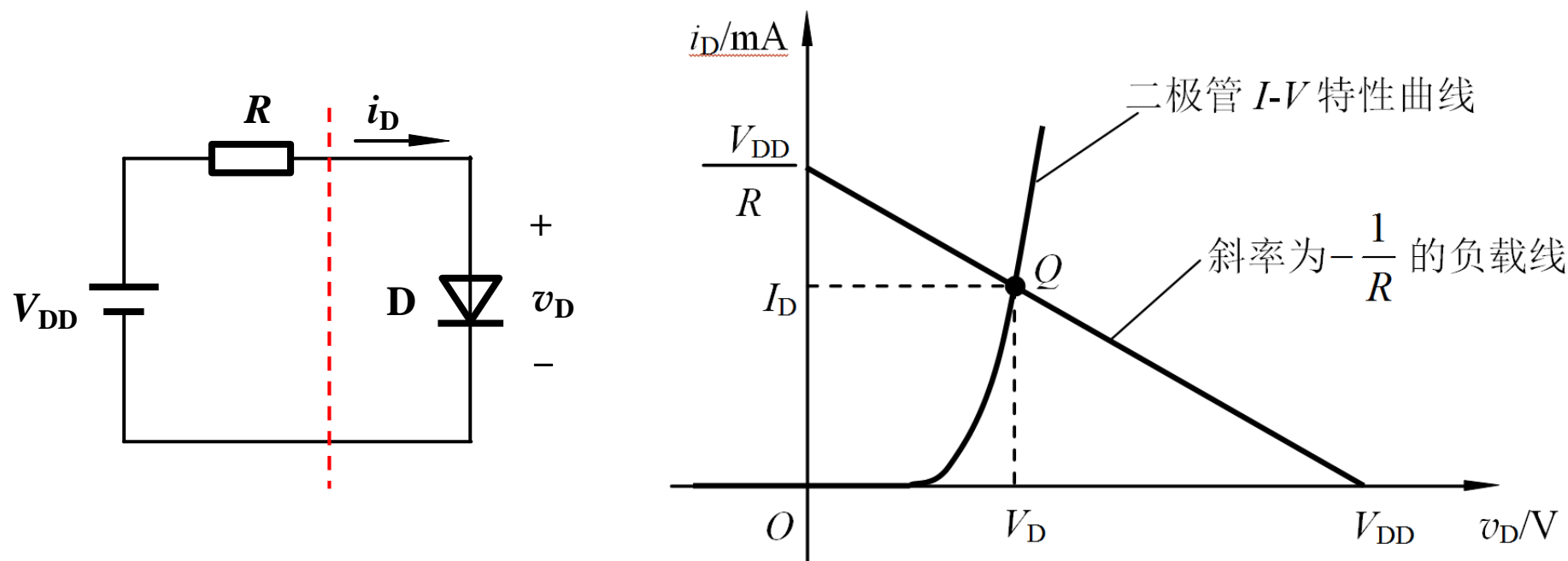
大写字母大写下标：静态值（直流），如， $I_B$

小写字母大写下标：总量（直流+交流），如， $i_B$

小写字母小写下标：瞬时值（交流），如， $i_b$

（参见“本书常用符号表”）

**例3.4.1** 电路如图所示，已知二极管的 $V$ - $I$ 特性曲线、电源 $V_{DD}$ 和电阻 $R$ ，求二极管两端电压 $v_D$ 和流过二极管的电流 $i_D$ 。



**解：**由电路的KVL方程，可得 
$$i_D = \frac{V_{DD} - v_D}{R}$$

即  $i_D = -\frac{1}{R}v_D + \frac{1}{R}V_{DD}$  是一条斜率为 $-1/R$ 的直线，称为**负载线**

$Q$ 的坐标值  $(V_D, I_D)$  即为所求。 $Q$ 点称为电路的**工作点**

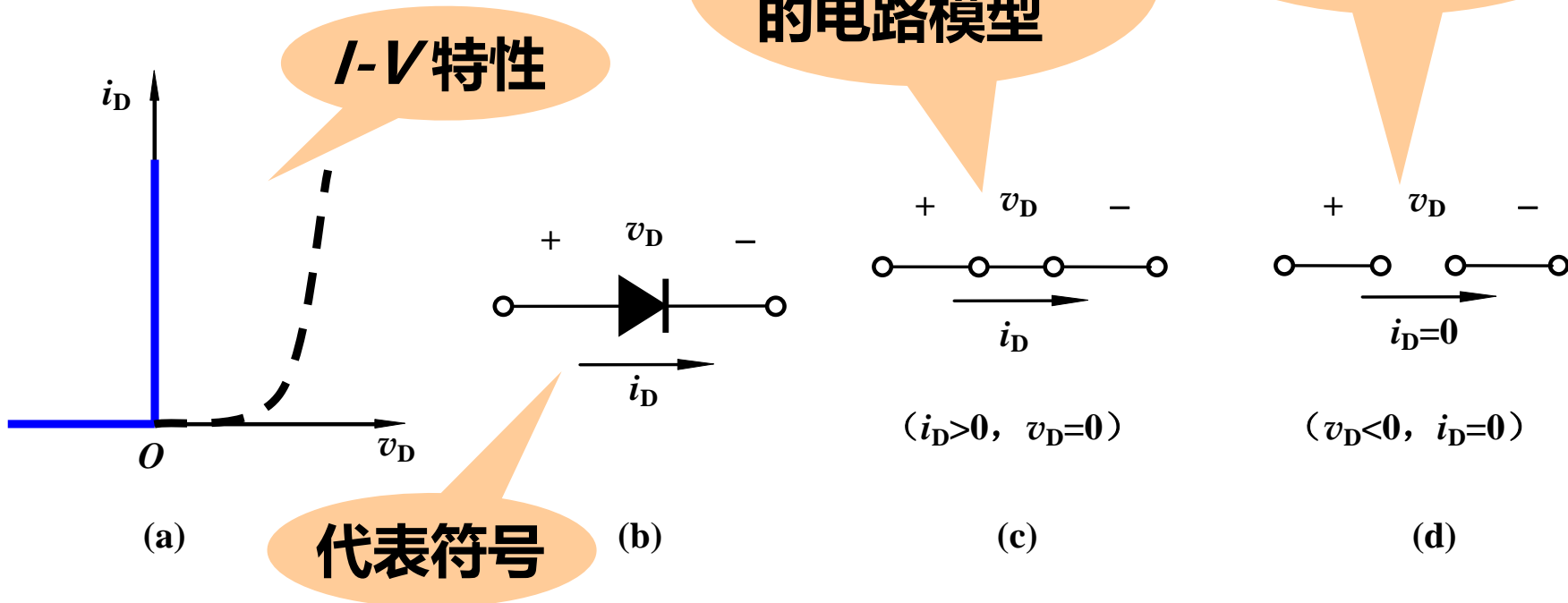


## 3.4.2 二极管电路的模型分析方法

### 1. 二极管 $i$ - $v$ 特性的大信号简化建模

将指数模型  $i_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1)$  分段线性化，得到二极管特性的等效模型。

#### (1) 理想模型



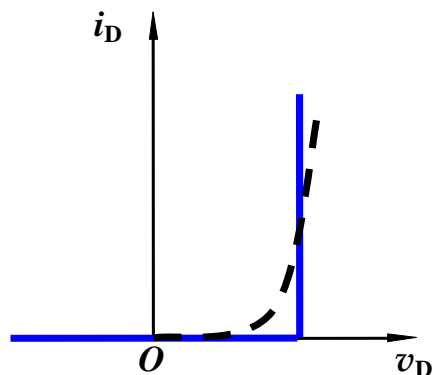




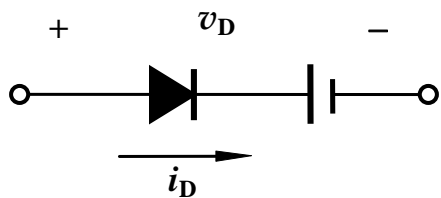
## 3.4.2 二极管电路的模型分析方法

### 1. 二极管 $I$ - $V$ 特性的大信号简化建模

#### (2) 恒压降模型



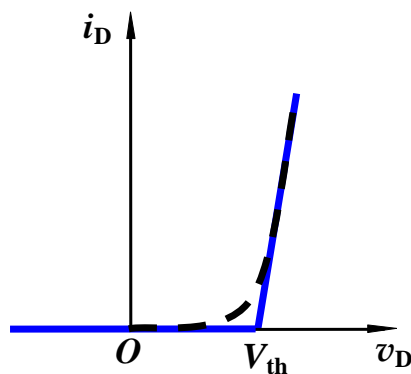
(a)



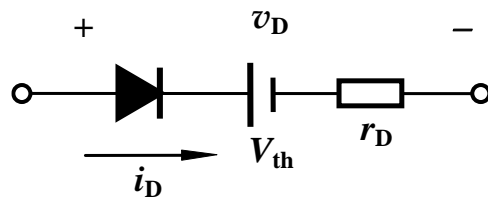
(b)

(a)  $I$ - $V$  特性 (b) 电路模型

#### (3) 折线模型



(a)



(b)

(a)  $I$ - $V$  特性 (b) 电路模型

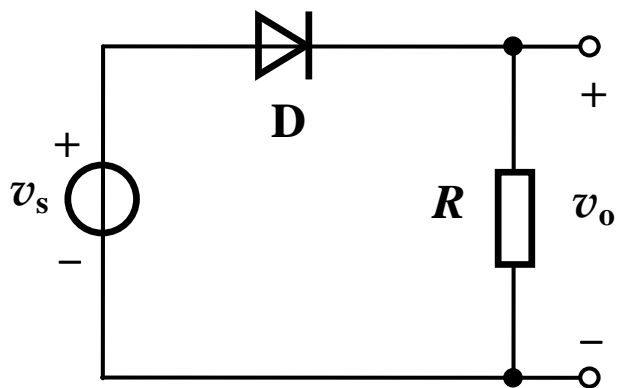


## 3.4.2 二极管电路的模型分析方法

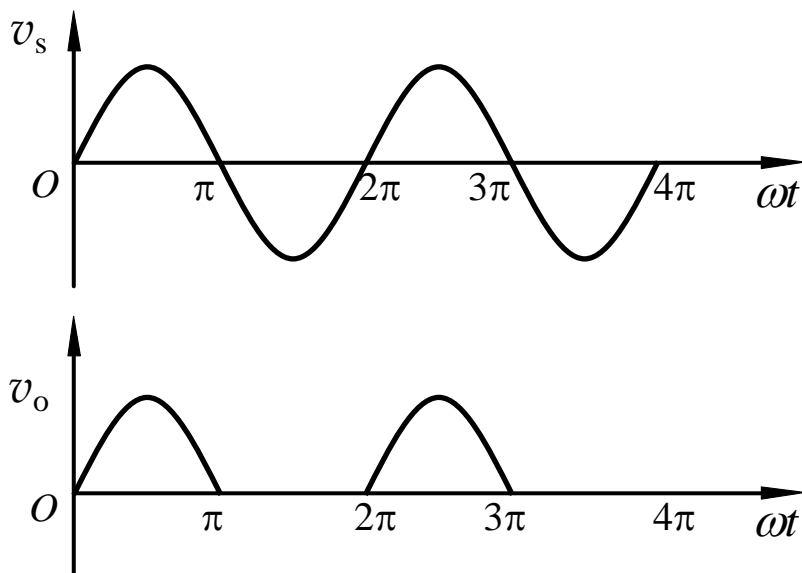
### 2. 大信号模型分析法应用举例

#### (1) 整流电路（理想模型）

当 $v_s$ 为正半周时，二极管导通，且导通压降为0V， $v_o = v_s$



(a)





## 2. 大信号模型分析法应用举例

### (2) 静态工作情况分析

当  $V_{DD}=10\text{V}$  时, ( $R=10\text{k}\Omega$ )

**理想模型**

$$V_D = 0\text{V} \quad I_D = V_{DD} / R = 1\text{mA}$$

**恒压模型**

$$V_D = 0.7\text{V} \quad (\text{硅二极管典型值})$$

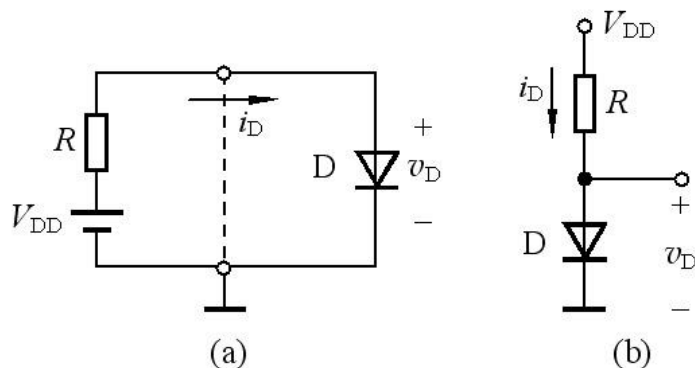
$$I_D = (V_{DD} - V_D) / R = 0.93\text{mA}$$

**折线模型**

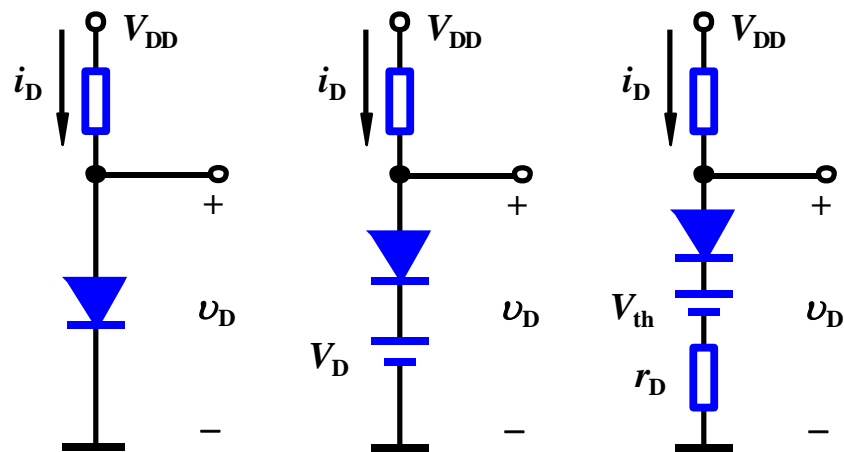
$$V_{th} = 0.5\text{V} \quad (\text{硅二极管典型值})$$

$$\text{设 } r_D = 0.2\text{k}\Omega$$

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{th}}{R + r_D} = 0.931\text{mA} \quad V_D = V_{th} + I_D r_D = 0.69\text{V}$$



(a) 简单二极管电路 (b) 习惯画法



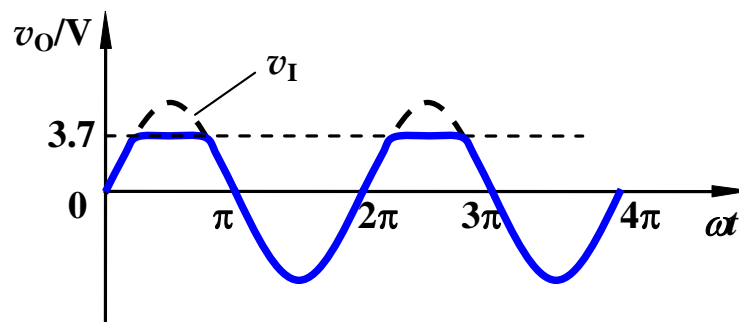
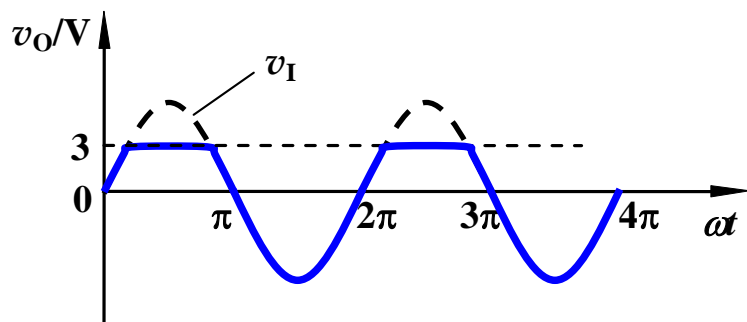
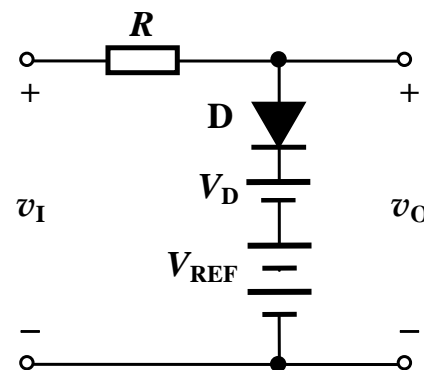
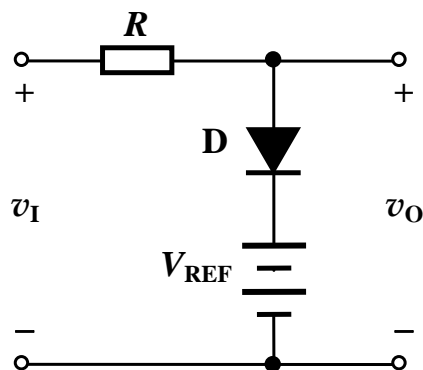
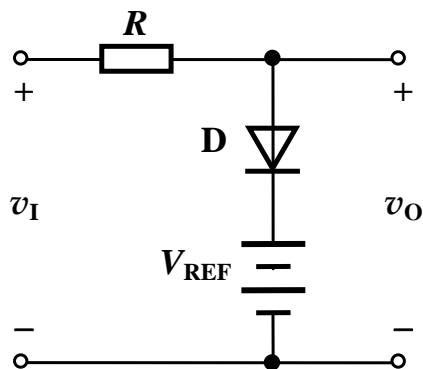
当  $V_{DD}=1\text{V}$  时, (自学)



## 2. 大信号模型分析法应用举例

### (3) 限幅与钳位电路

电路如图， $R = 1\text{k}\Omega$ ， $V_{\text{REF}} = 3\text{V}$ ，二极管为硅二极管。分别用理想模型和恒压降模型求解，当 $v_I = 6\sin\omega t \text{ V}$ 时，绘出相应的输出电压 $v_O$ 的波形。

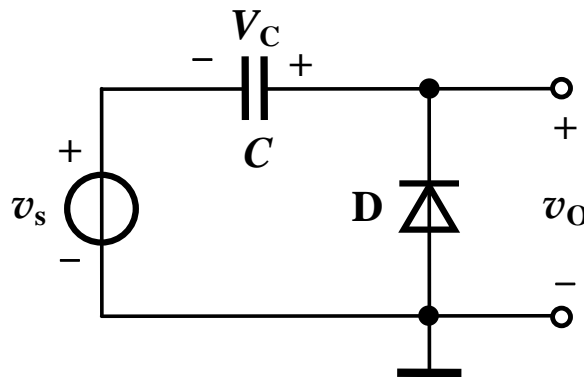




## 2. 大信号模型分析法应用举例

### (3) 限幅与钳位电路

电路如图，二极管为硅二极管， $V_D=0.7V$ ， $v_s = V_m \sin \omega t$  V，且  $V_m \gg V_D$ ，绘出相应的输出电压  $v_O$  的波形。



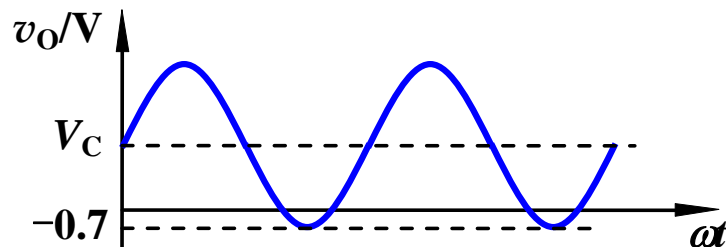
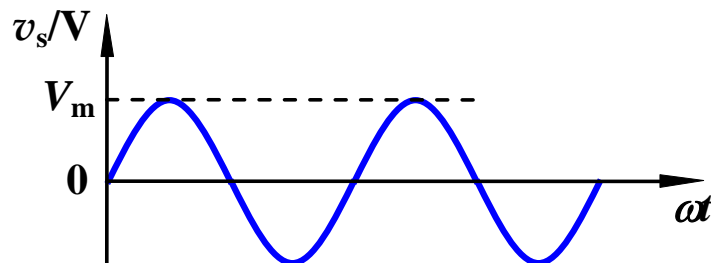
$v_s$  的负半周，D 导通，C 充电，但无放电回路，最后（稳态）

$$V_C = V_m - V_D = V_m - 0.7V \quad (V_m \text{ 是振幅值})$$

此后输出电压为

$$v_O = v_s + V_C = v_s + V_m - 0.7V$$

将输入波形的底部钳位在了  $-0.7V$  的直流电平上。



若颠倒二极管的方向， $v_O$  的波形将怎样变化？



## 2. 大信号模型分析法应用举例

### (4) 开关电路

电路如图所示，求AO的电压值

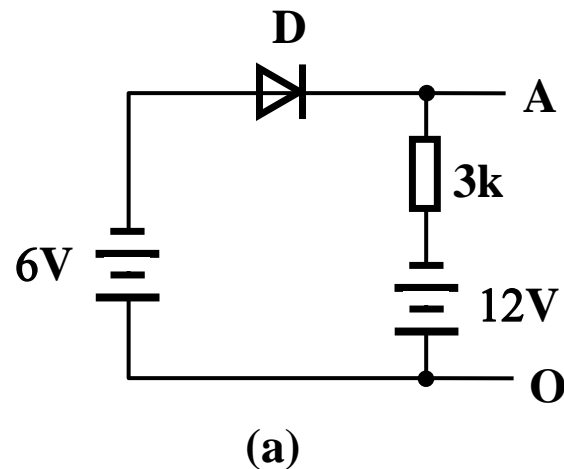
解：先断开D，以O为基准电位，  
即O点为0V。

则接D阳极的电位为-6V，接阴极  
的电位为-12V。

阳极电位高于阴极电位，D接入时正向导通。

导通后，D的压降等于零，即A点的电位就是D阳极的电位。

所以，AO的电压值为-6V。

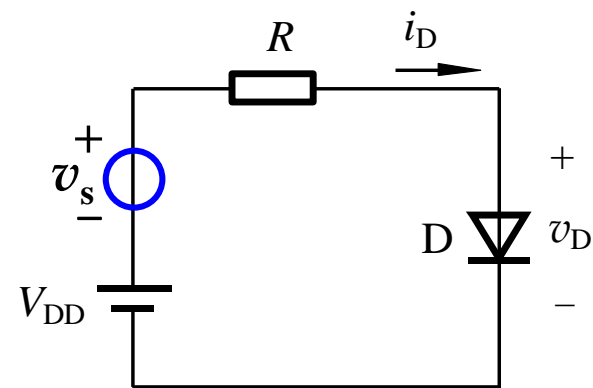




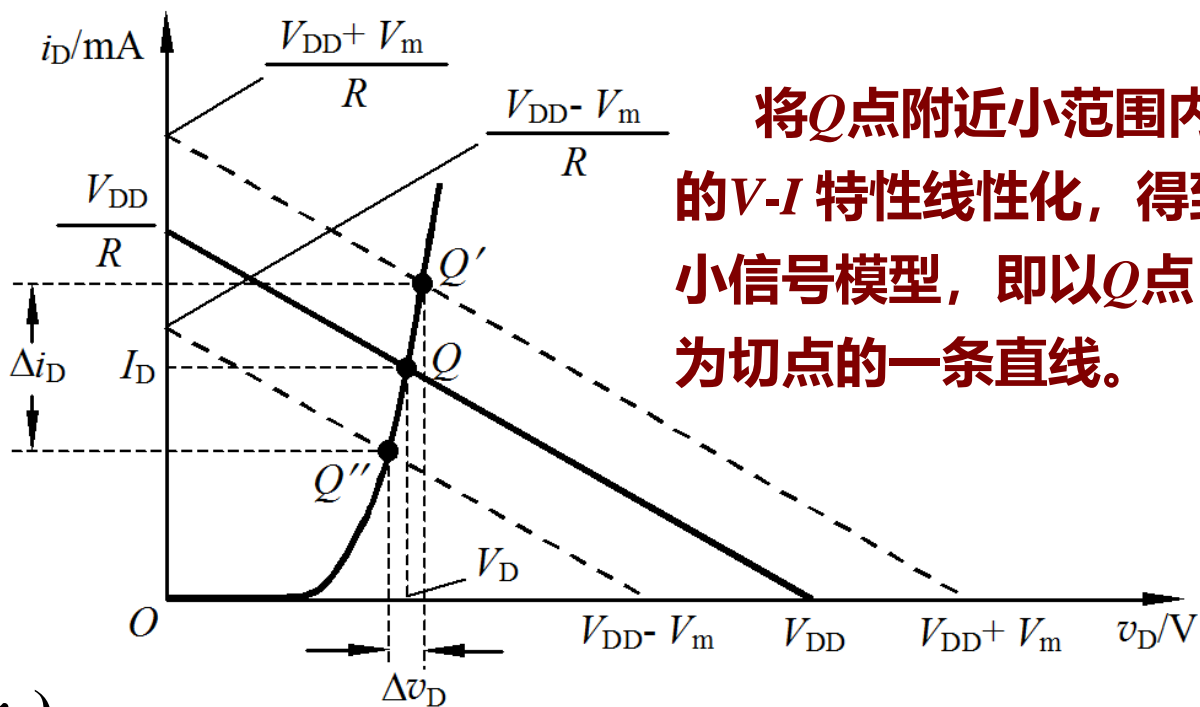
## 3.4.2 二极管电路的模型分析方法

### 3. 二极管 $i$ - $v$ 特性的小信号建模

#### (1) 小信号模型



$$i_D = -\frac{1}{R}v_D + \frac{1}{R}(V_{DD} + v_s)$$



将 $Q$ 点附近小范围内的 $v$ - $i$ 特性线性化, 得到小信号模型, 即以 $Q$ 点为切点的一条直线。

$v_s = V_m \sin \omega t$  时 ( $V_m \ll V_{DD}$ )  $Q$ 点称为**静态工作点**, 反映直流时的工作状态。



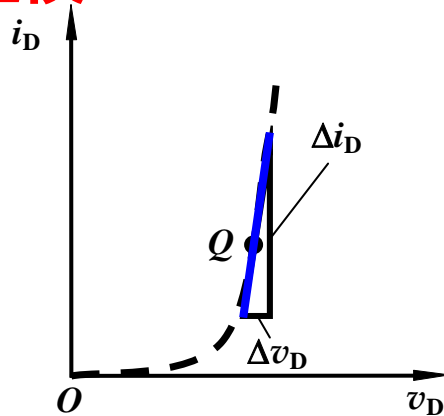
## 3.4.2 二极管电路的简化模型分析方法

### 3. 二极管 $i$ - $v$ 特性的小信号建模

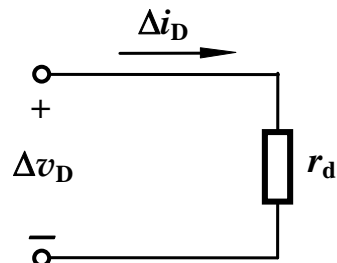
#### (1) 小信号模型

过 $Q$ 点的切线可以等效成  
一个微变电阻

$$\text{即 } r_d = \frac{\Delta v_D}{\Delta i_D}$$



(a)



(b)

根据  $i_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1) \approx I_S e^{v_D/V_T}$

得 $Q$ 点处的微变电导

$$g_d = \left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_Q = \frac{I_S}{V_T} e^{v_D/V_T} \Big|_Q \approx \left. \frac{i_D}{V_T} \right|_Q = \frac{I_D}{V_T}$$

$$\text{则 } r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{V_T}{I_D}$$

常温下 ( $T=300\text{K}$ )

$$r_d = \frac{V_T}{I_D} = \frac{26(\text{mV})}{I_D(\text{mA})}$$

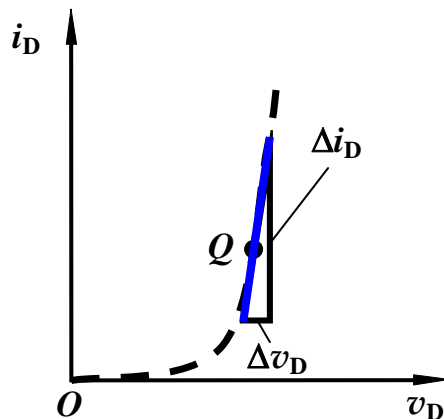




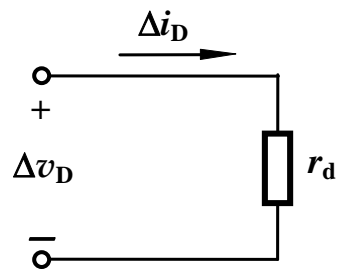
## 3.4.2 二极管电路的简化模型分析方法

### 3. 二极管 $I$ - $V$ 特性的小信号建模

#### (1) 小信号模型



(a)



(b)

(a)  $I$ - $V$  特性    (b) 电路模型

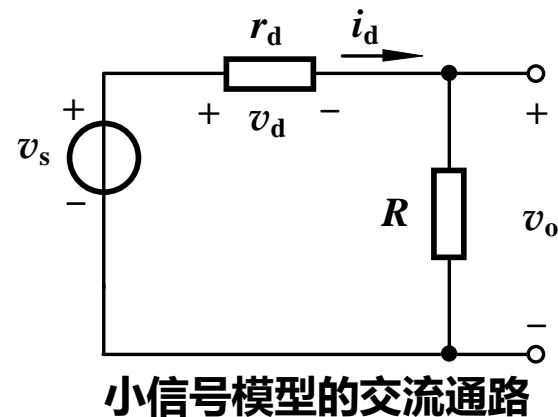
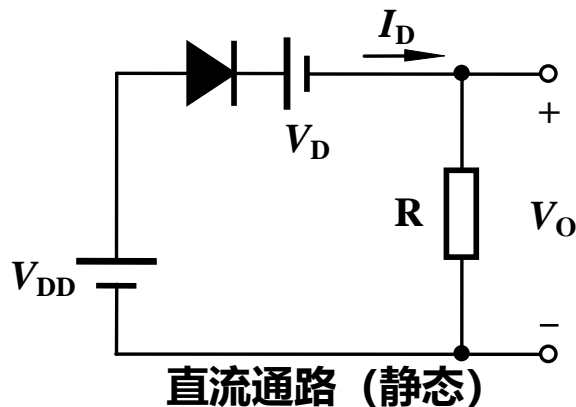
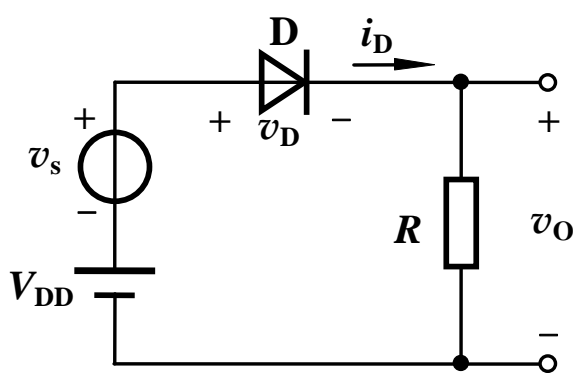
**特别注意：**

- 小信号模型中的微变电阻  $r_d$  与静态工作点  $Q$  有关。
- 该模型用于二极管处于正向偏置条件下，且  $v_D \gg V_T$ 。



## (2) 小信号工作情况例子

A. 图示电路中,  $V_{DD} = 5V$ ,  $R = 5k\Omega$ , 恒压降模型的  $V_D = 0.7V$ ,  $v_s = 0.1\sin\omega t$  V。 (1) 求输出电压  $v_o$  的交流量和总量; (2) 绘出  $v_o$  的波形。

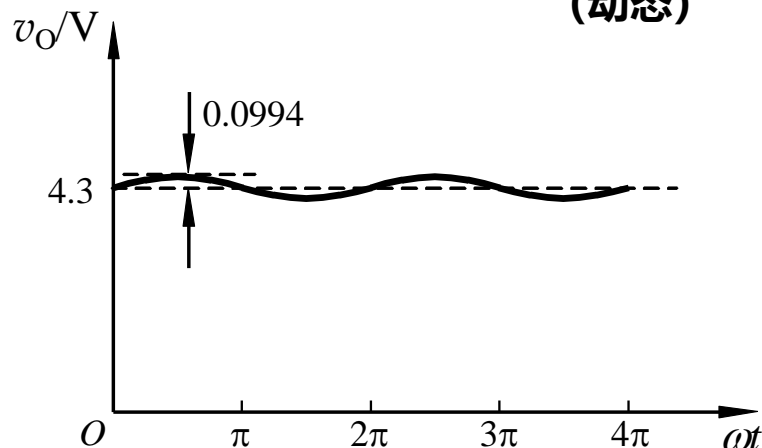


解: 
$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} \quad r_d = \frac{V_T}{I_D}$$

$$v_o = \frac{R}{R + r_d} \cdot v_s$$

解得:

$$v_o = V_O + v_o = 4.3 + 0.0994\sin\omega t \quad (\text{V})$$



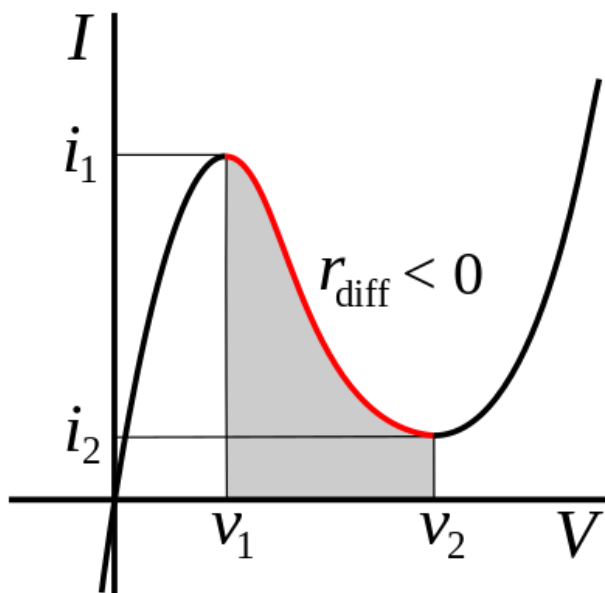


## (2) 小信号工作情况例子

了解

### B. Tunnel diode / Esaki diode (江崎二极管)

- It was invented in August 1957 by Leo Esaki when he was with Tokyo Tsushin Kogyo, now known as Sony. In 1973 he received the Nobel Prize in Physics, jointly with Brian Josephson, for discovering the electron tunneling effect used in these diodes.
- They have negative differential resistance in part of their operating range, and therefore are also used as oscillators, amplifiers, and in switching circuits using hysteresis.





## 3.5 特殊二极管

---

- 3.5.1 齐纳二极管
- 3.5.2 变容二极管
- 3.5.3 肖特基二极管
- 3.5.4 光电器件



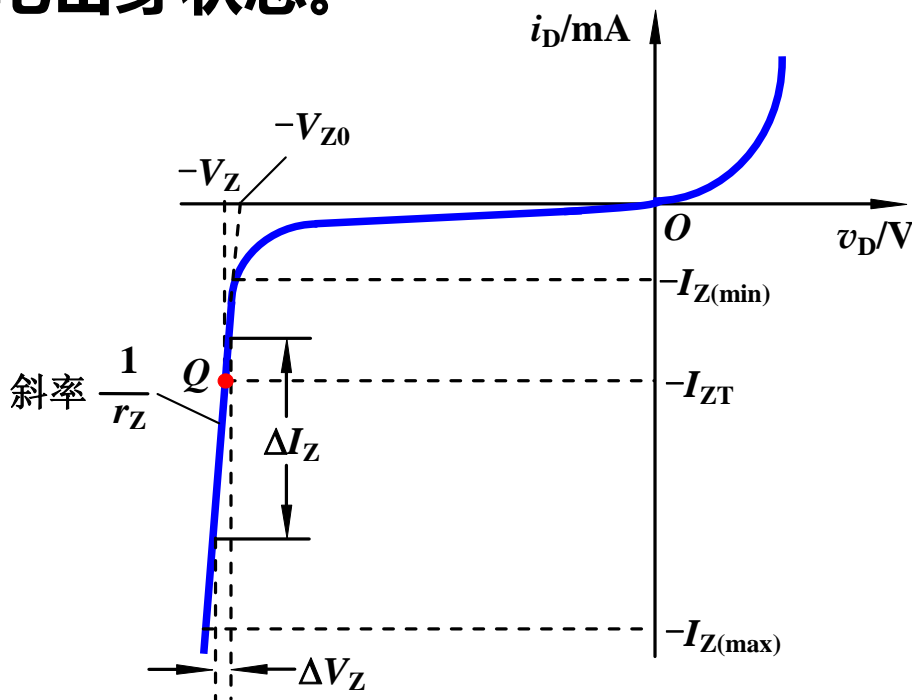
## 3.5.1 齐纳二极管

### 1. 符号及稳压特性

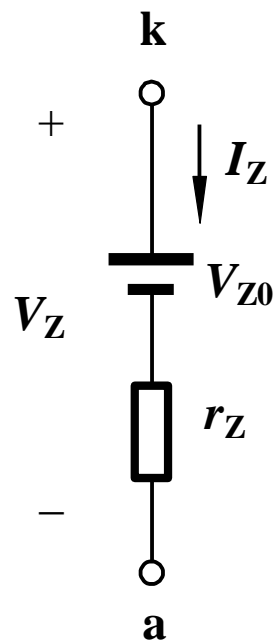
利用二极管反向击穿特性实现稳压。稳压二极管稳压时工作在反向电击穿状态。



(a) 符号



(b) 伏安特性



(c) 反向击穿时的模型



## 3.5.1 齐纳二极管

### 2. 齐纳二极管主要参数

#### (1) 稳定电压 $V_Z$

在规定的稳压管反向工作电流  $I_Z$  下，所对应的反向工作电压。

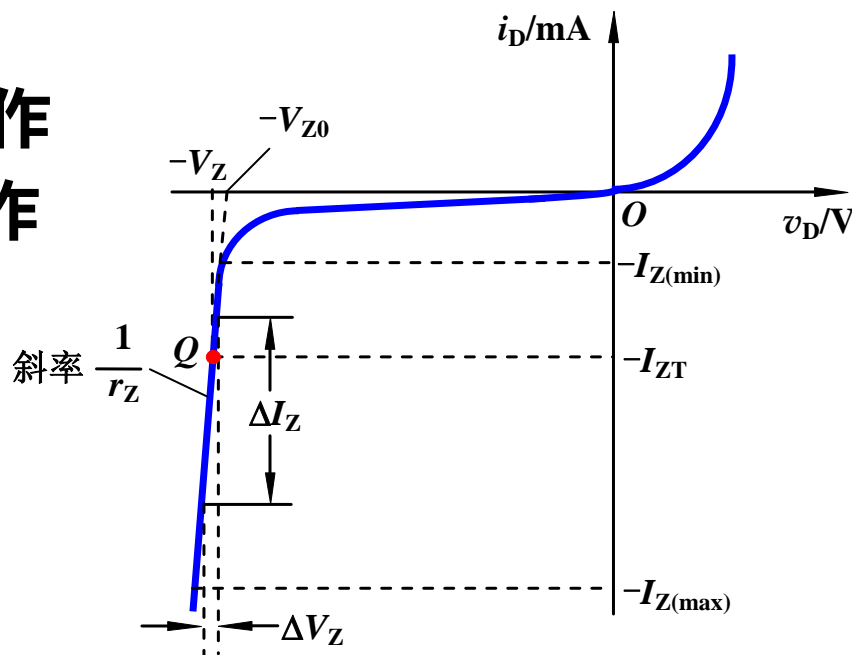
#### (2) 动态电阻 $r_Z$

$$r_Z = \Delta V_Z / \Delta I_Z$$

#### (3) 最大耗散功率 $P_{ZM}$

#### (4) 最大稳定工作电流 $I_{Z(max)}$ 和最小稳定工作电流 $I_{Z(min)}$

#### (5) 稳定电压温度系数—— $\alpha_{V_Z}$



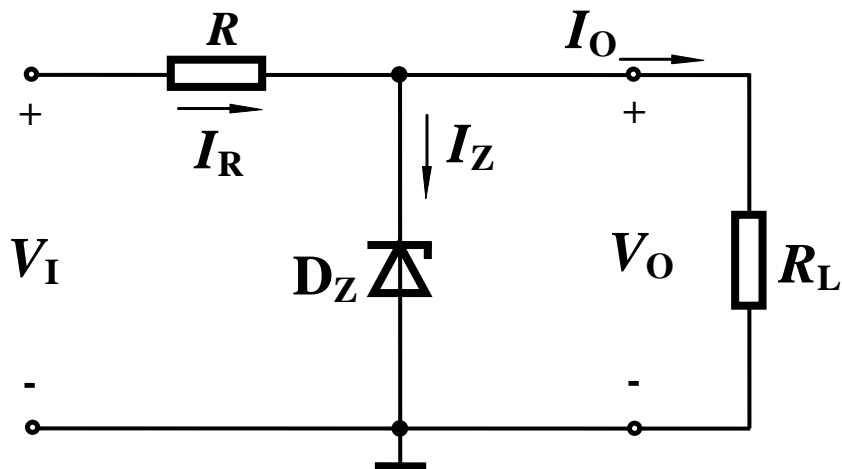
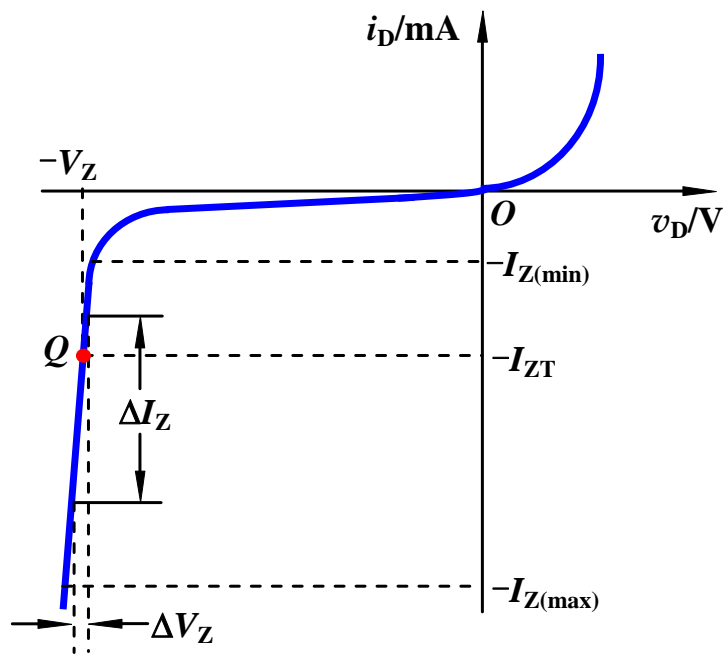


## 3.5.1 齐纳二极管

### 3. 稳压电路

正常稳压时  $V_O = V_Z$

# 稳压条件是什么？



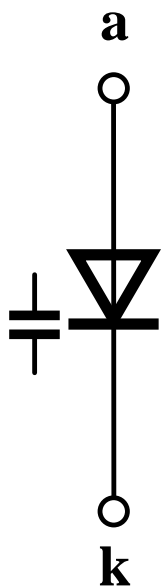
$$I_{Z(\min)} \leq I_Z \leq I_{Z(\max)}$$

# 不加 $R$ 可以吗？

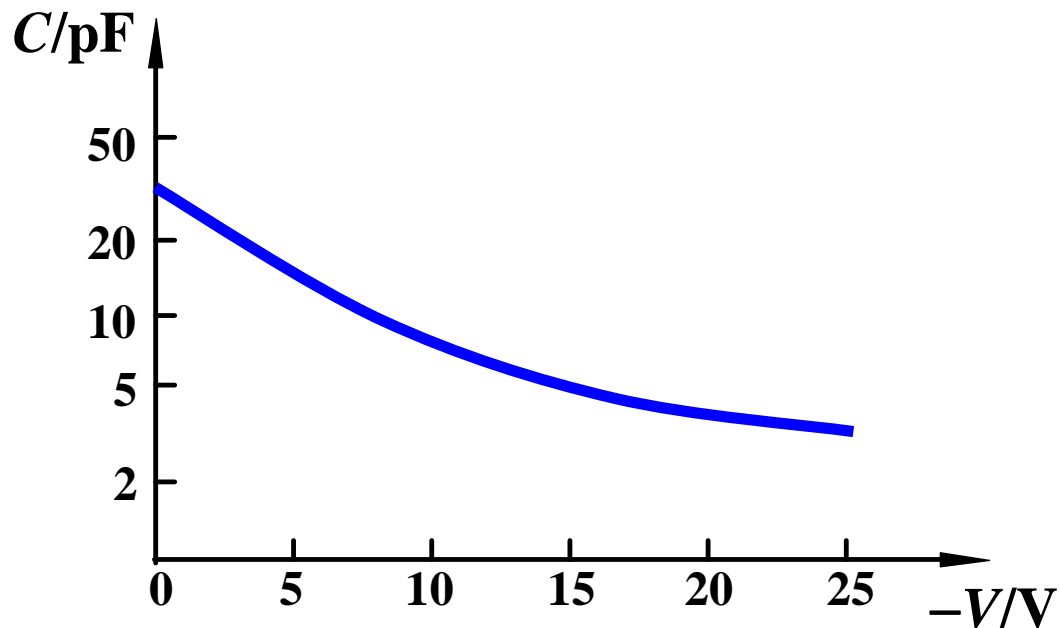


## 3.5.2 变容二极管

了解



(a)



(b)

(a) 符号 (b) 结电容与电压的关系 (纵坐标为对数刻度)





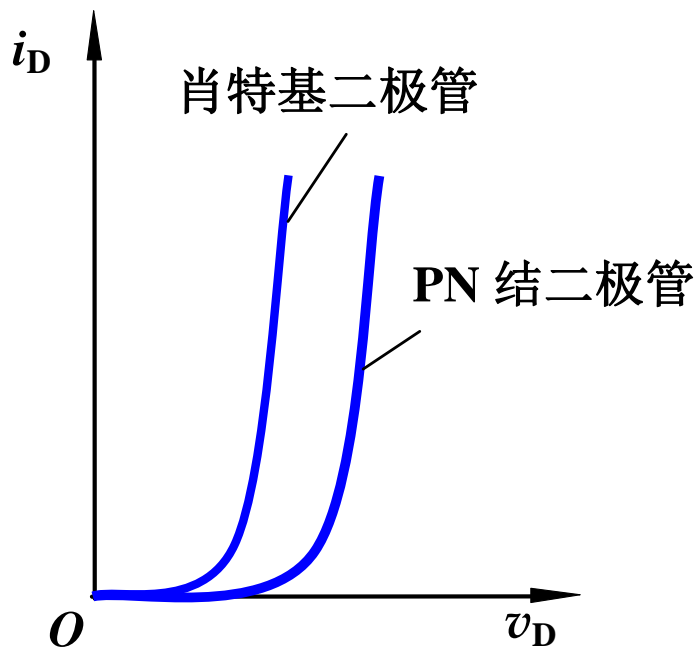
### 3.5.3 肖特基二极管

了解



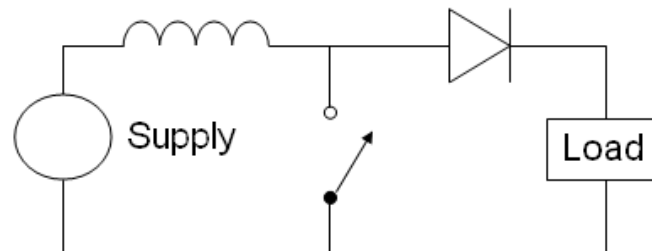
(a)

(a) 符号



(b)

(b) 正向V-I特性

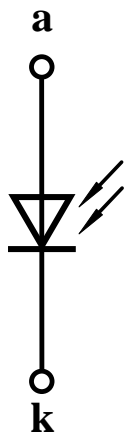




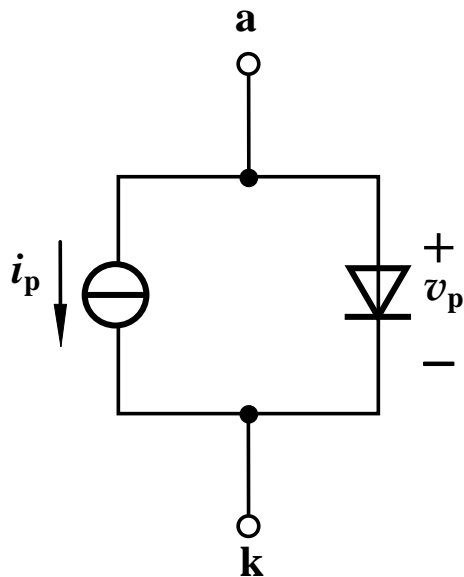
## 3.5.4 光电器件

了解

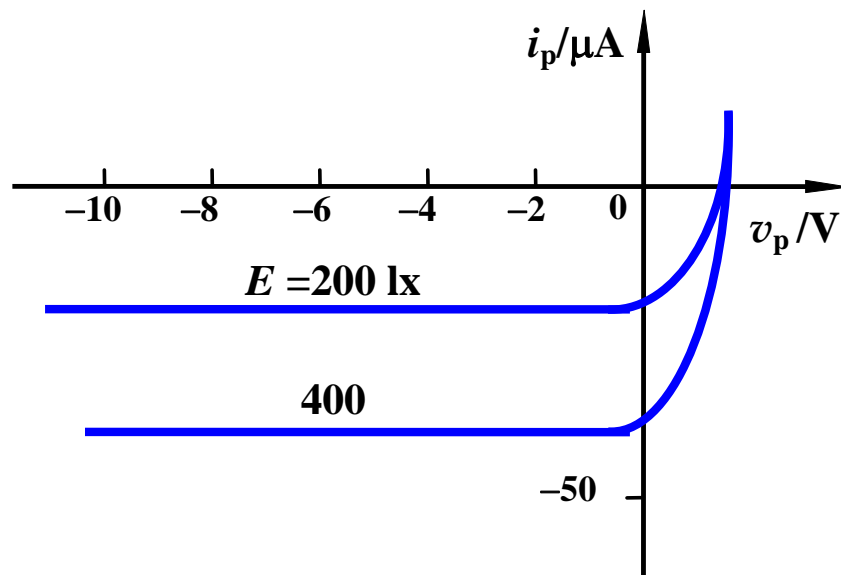
### 1. 光电二极管



(a)



(b)



(c)

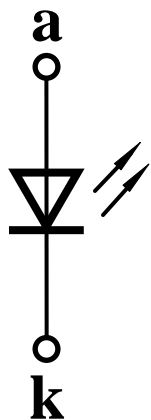
(a) 符号      (b) 电路模型      (c) 特性曲线



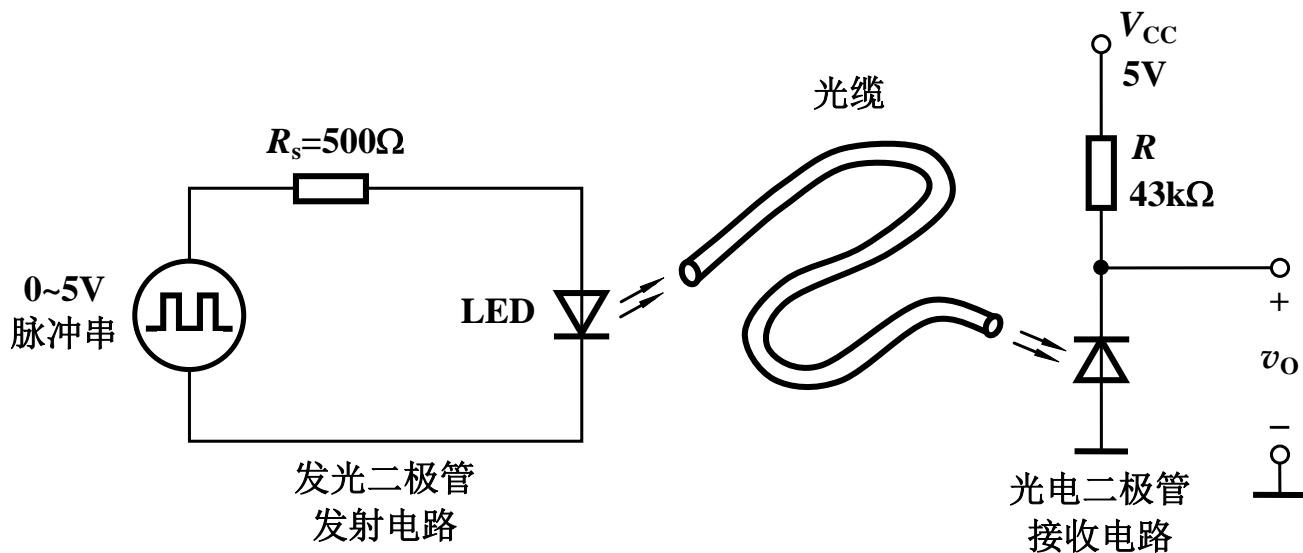
## 3.5.4 光电器件

了解

### 2. 发光二极管



符号



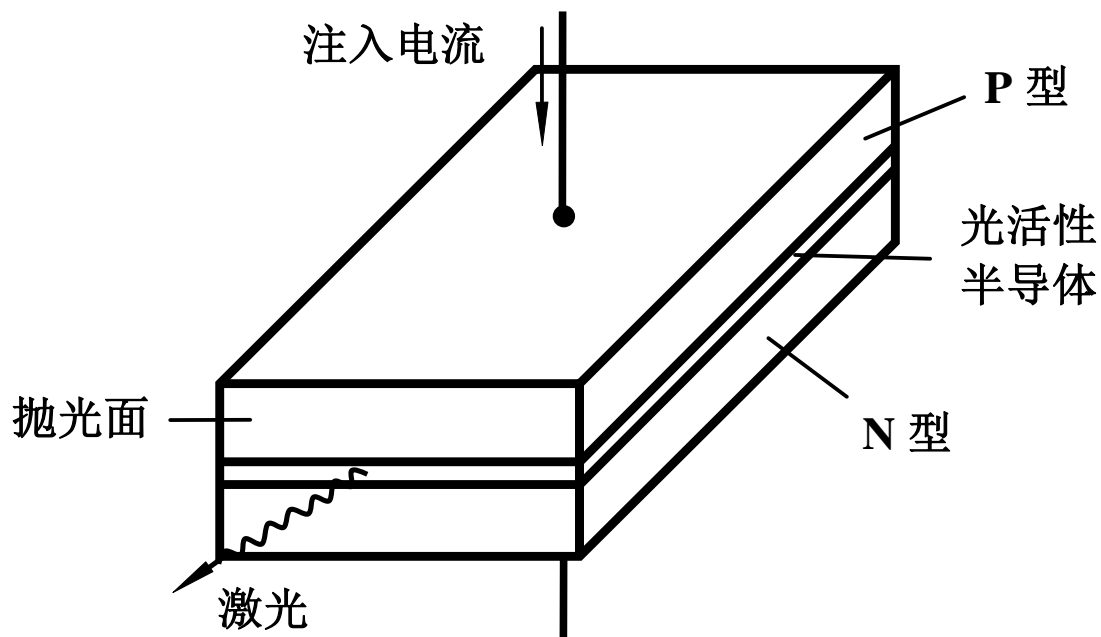
光电传输系统



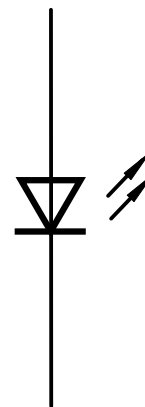
## 3.5.4 光电器件

了解

### 3. 激光二极管



(a)



(b)

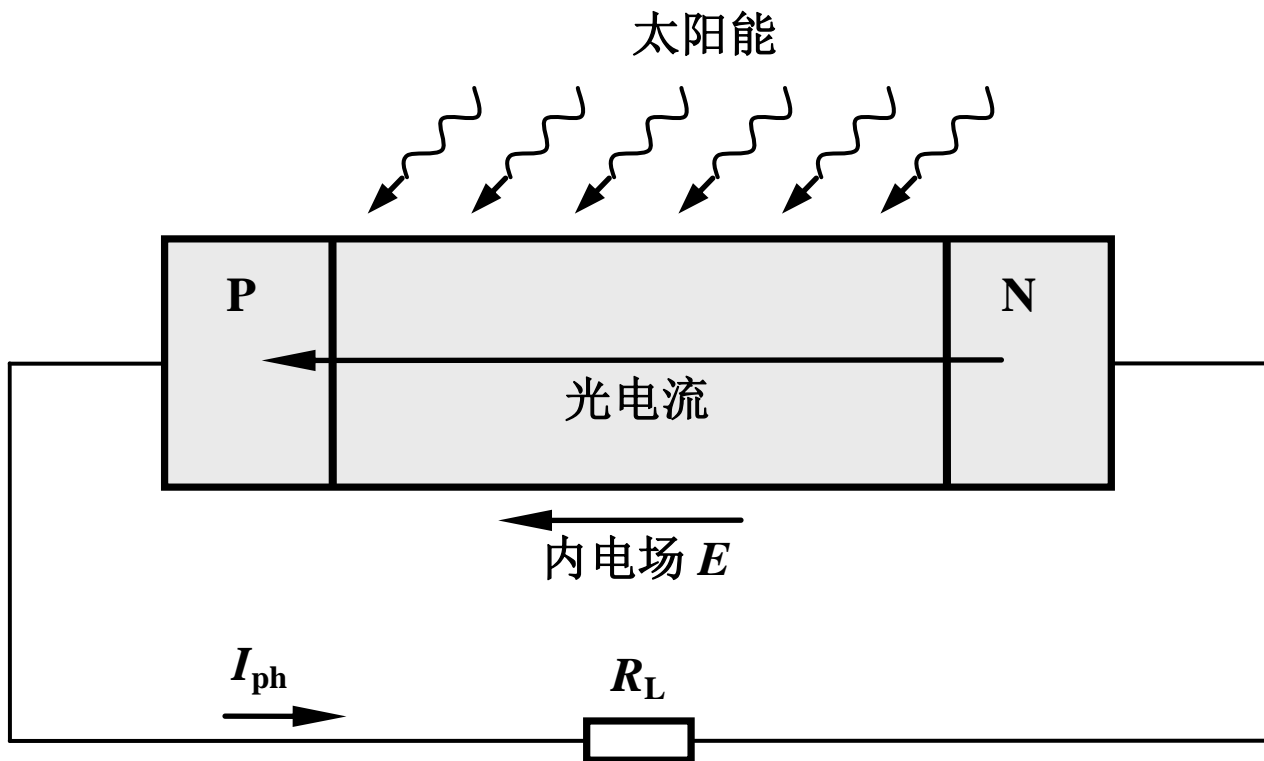
(a) 物理结构      (b) 符号



## 3.5.4 光电器件

了解

### 4. 太阳能电池



end



# 总结

---

- 了解半导体材料特性以及pn结工作原理。
- 掌握二极管的大信号  $i-v$  传递特性曲线、公式，以及其三种简化的模型及分析实例，以及典型应用；
- 掌握二极管的小信号模型及其小信号参数的计算公式，会画直流等效电路和交流小信号等效电路。掌握直流分析结果和小信号分析结果的叠加原理，以及分析实例。