

3 二极管及其基本电路

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 二极管
- 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

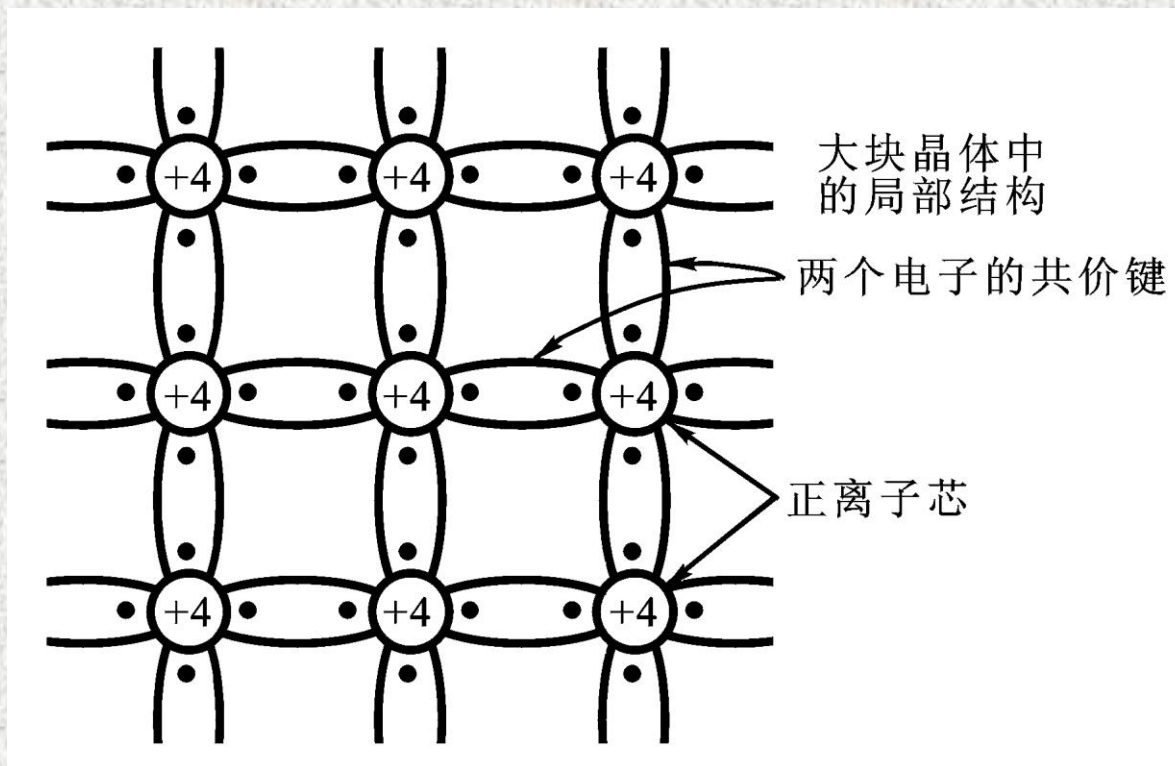
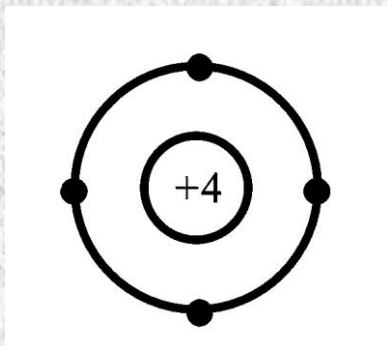
3.1.1 半导体材料

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。

3.1.2 半导体的共价键结构

硅和锗的原子结构简化模型及晶体结构



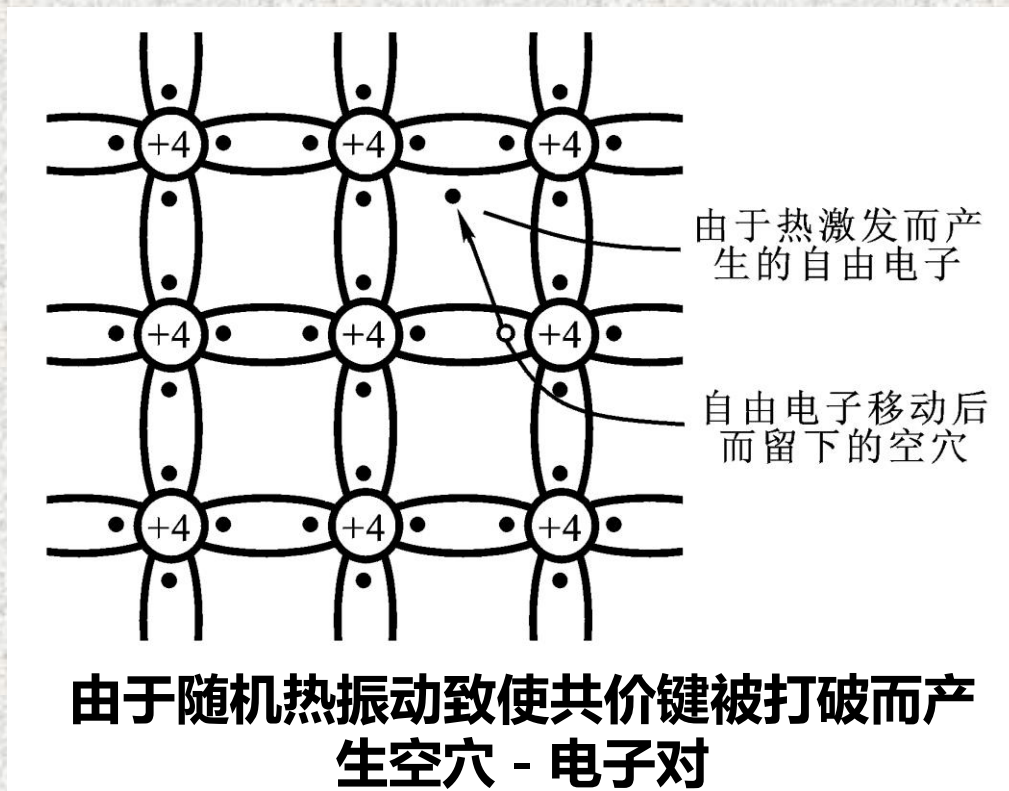
3.1.3 本征半导体

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填充空穴来实现的。



3.1.4 杂质半导体

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**。

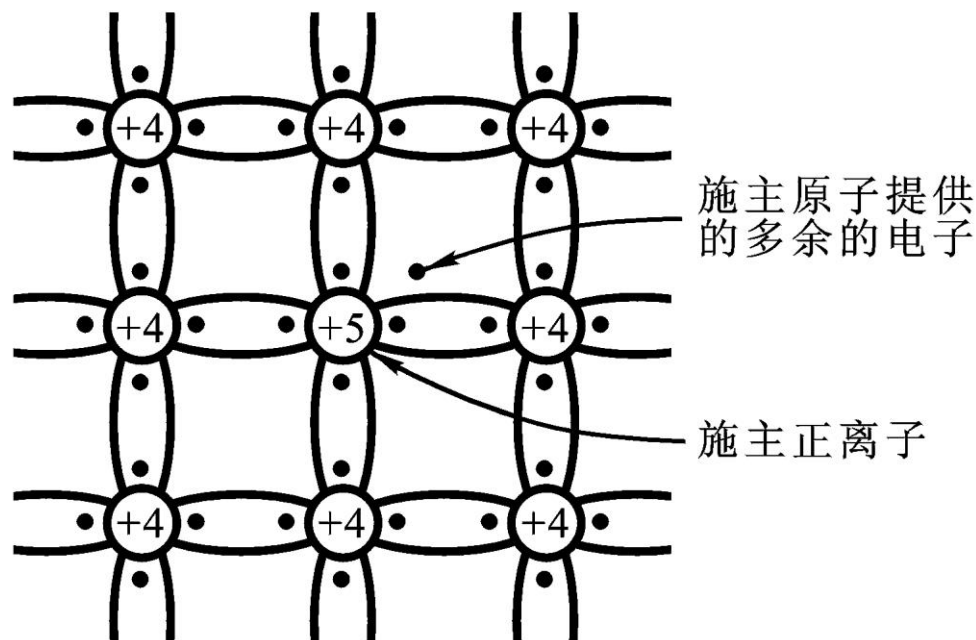
N型半导体——掺入五价杂质元素（如磷）的半导体。

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

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。



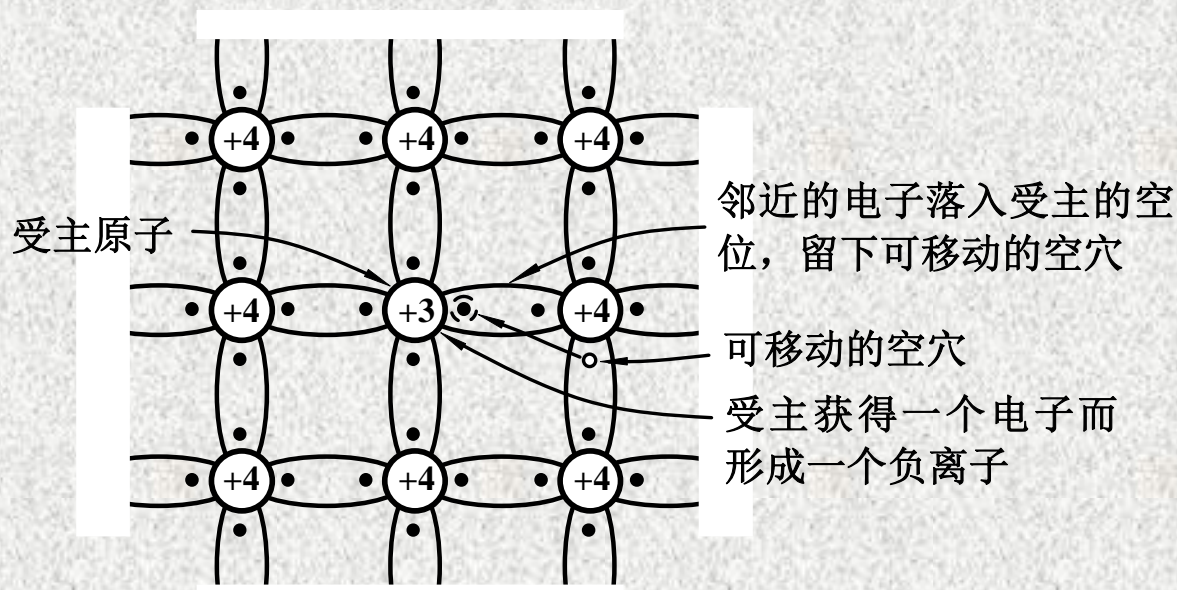
在N型半导体中**自由电子是多数载流子**，它主要由杂质原子提供；**空穴是少数载流子**，由热激发形成。

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

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**。

3.1.4 杂质半导体

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

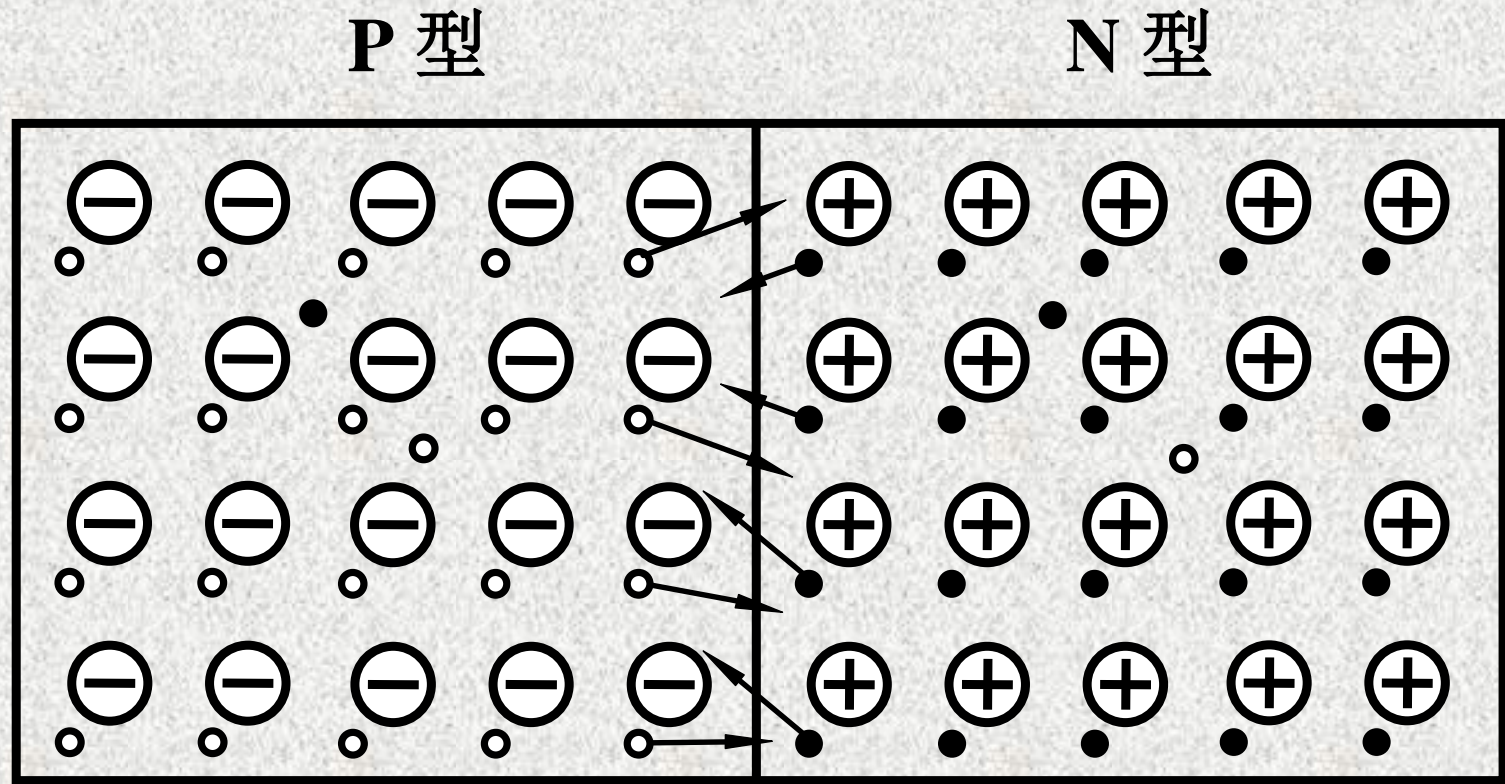
漂移运动：

在电场作用引起的载流子的运动

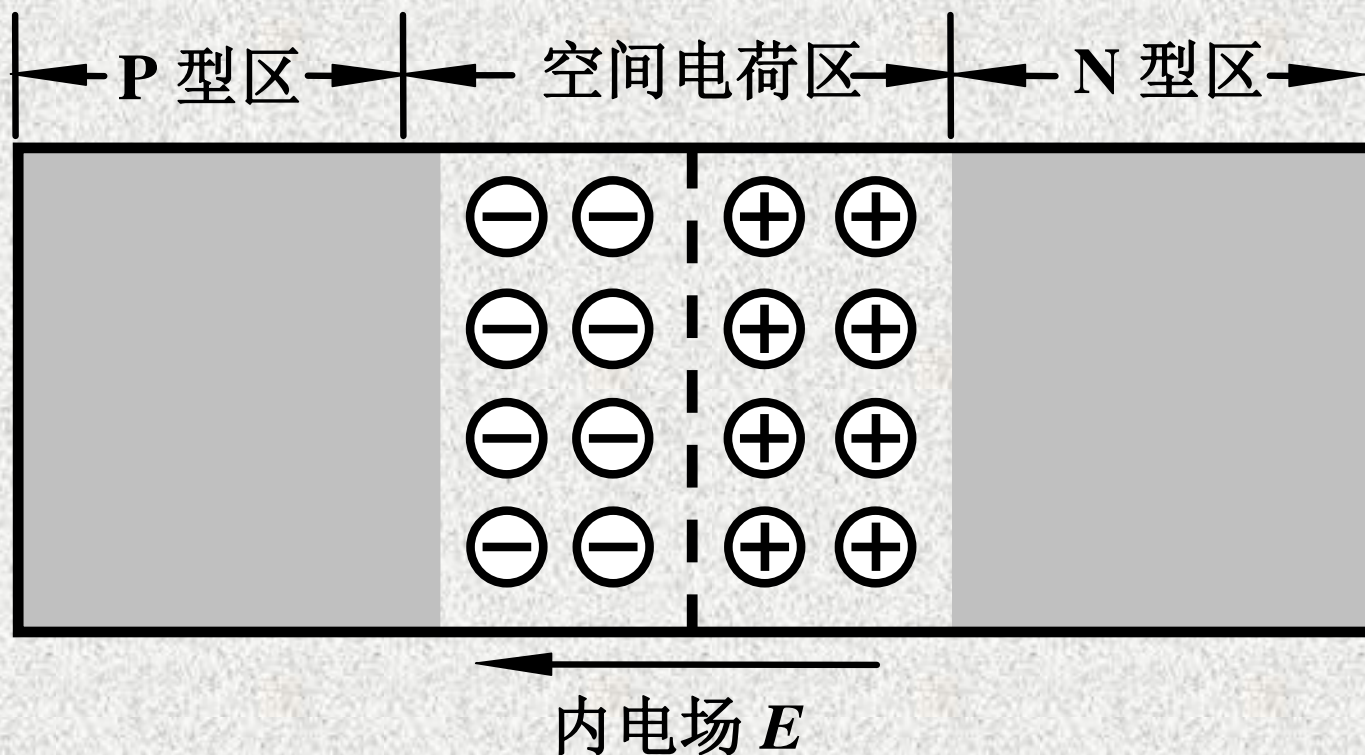
扩散运动：

由载流子浓度差引起的载流子的运动

3.2.2 PN结的形成



3.2.2 PN结的形成



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

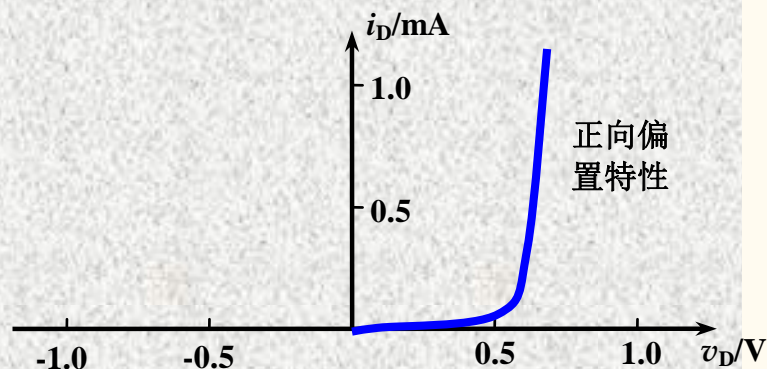
最后,多子的**扩散**和少子的**漂移**达到**动态平衡**。

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**。

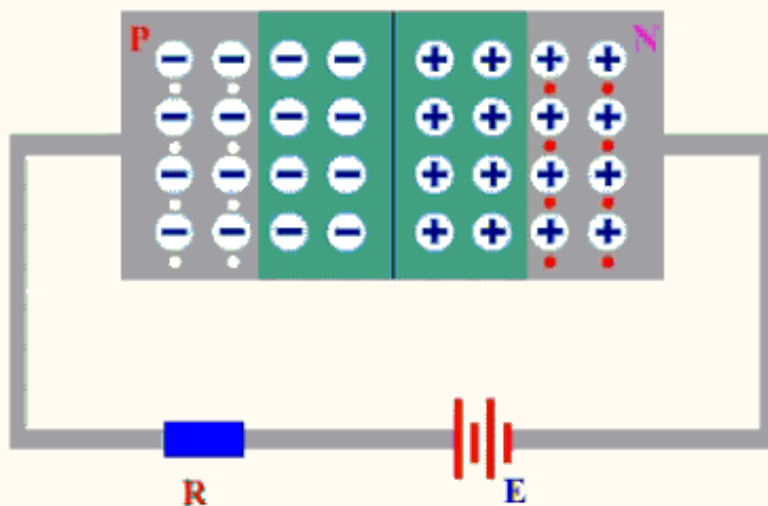
(1) PN结加正向电压时

- 低电阻
- 大的正向扩散电流

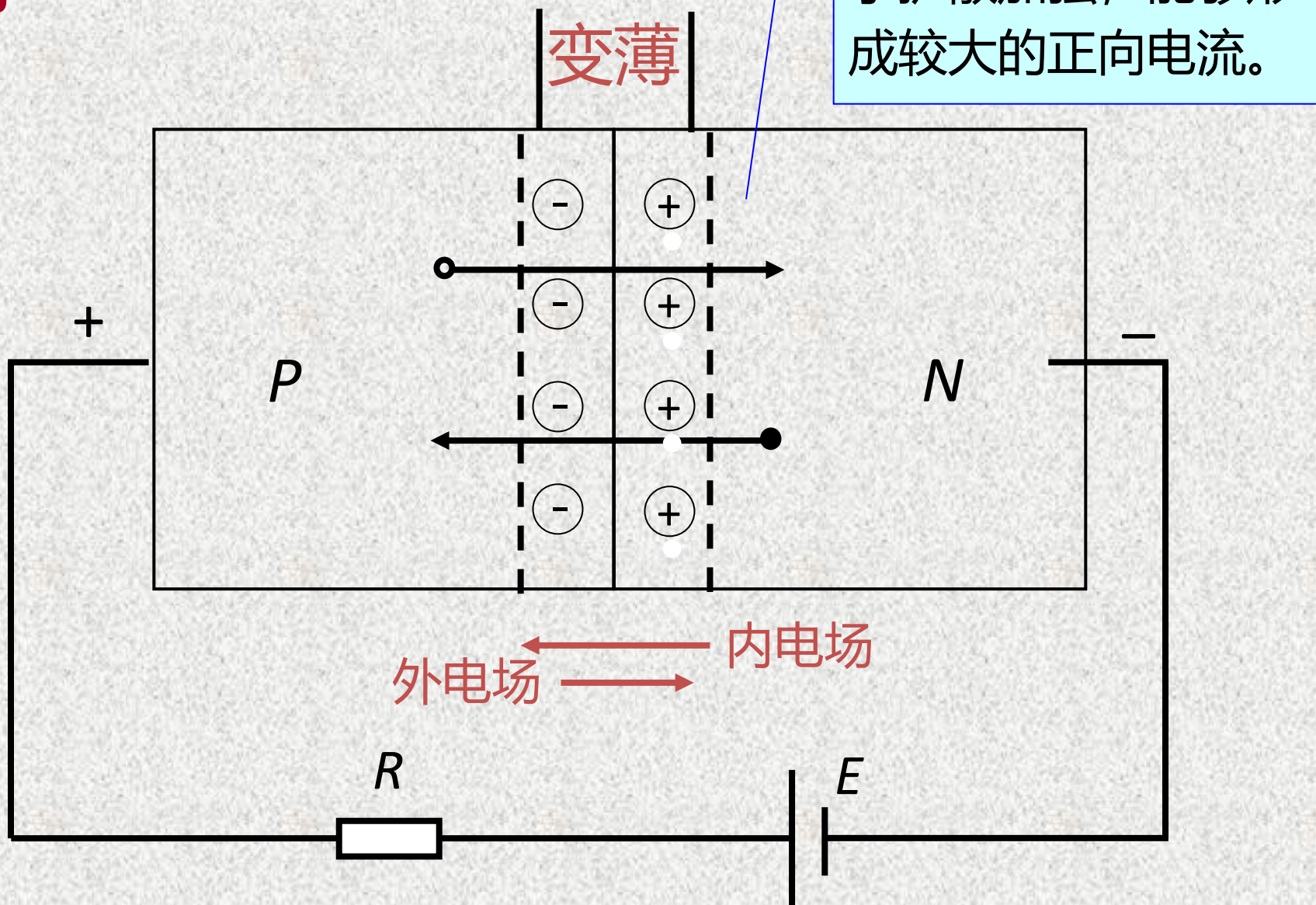


PN结的*i-v*特性

PN结加正向电压时的导电情况



(1) PN结加正向电压时

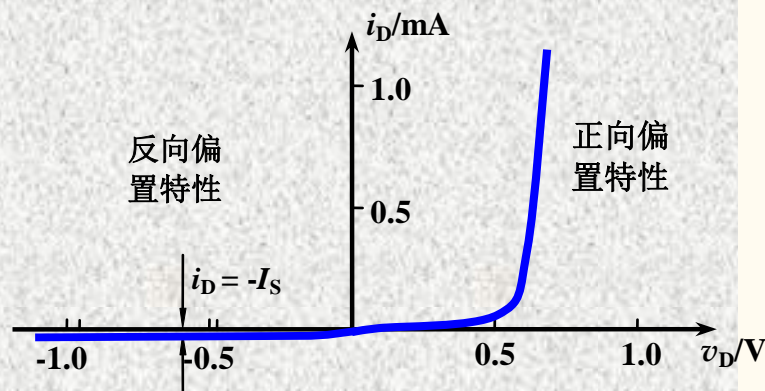


3.2.3 PN结的单向导电性

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**。

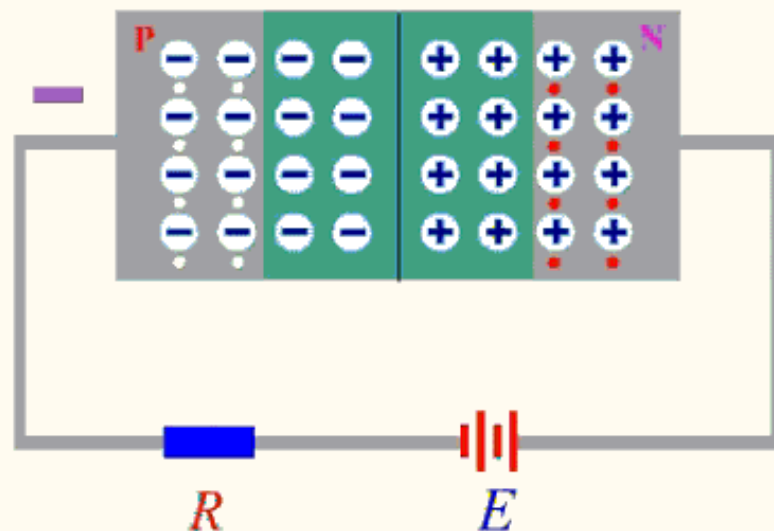
(2) PN结加反向电压时

- 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

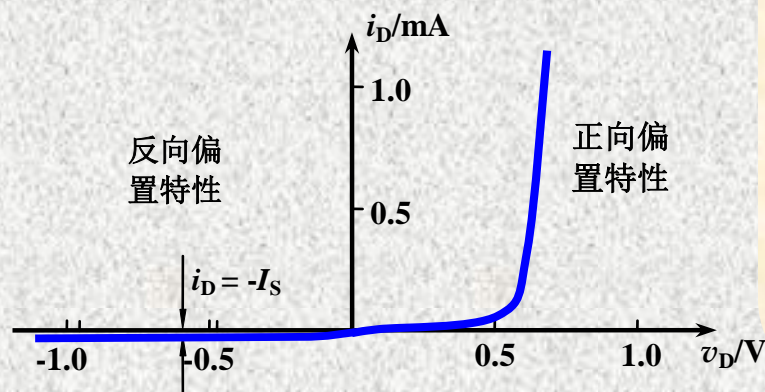


3.2.3 PN结的单向导电性

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



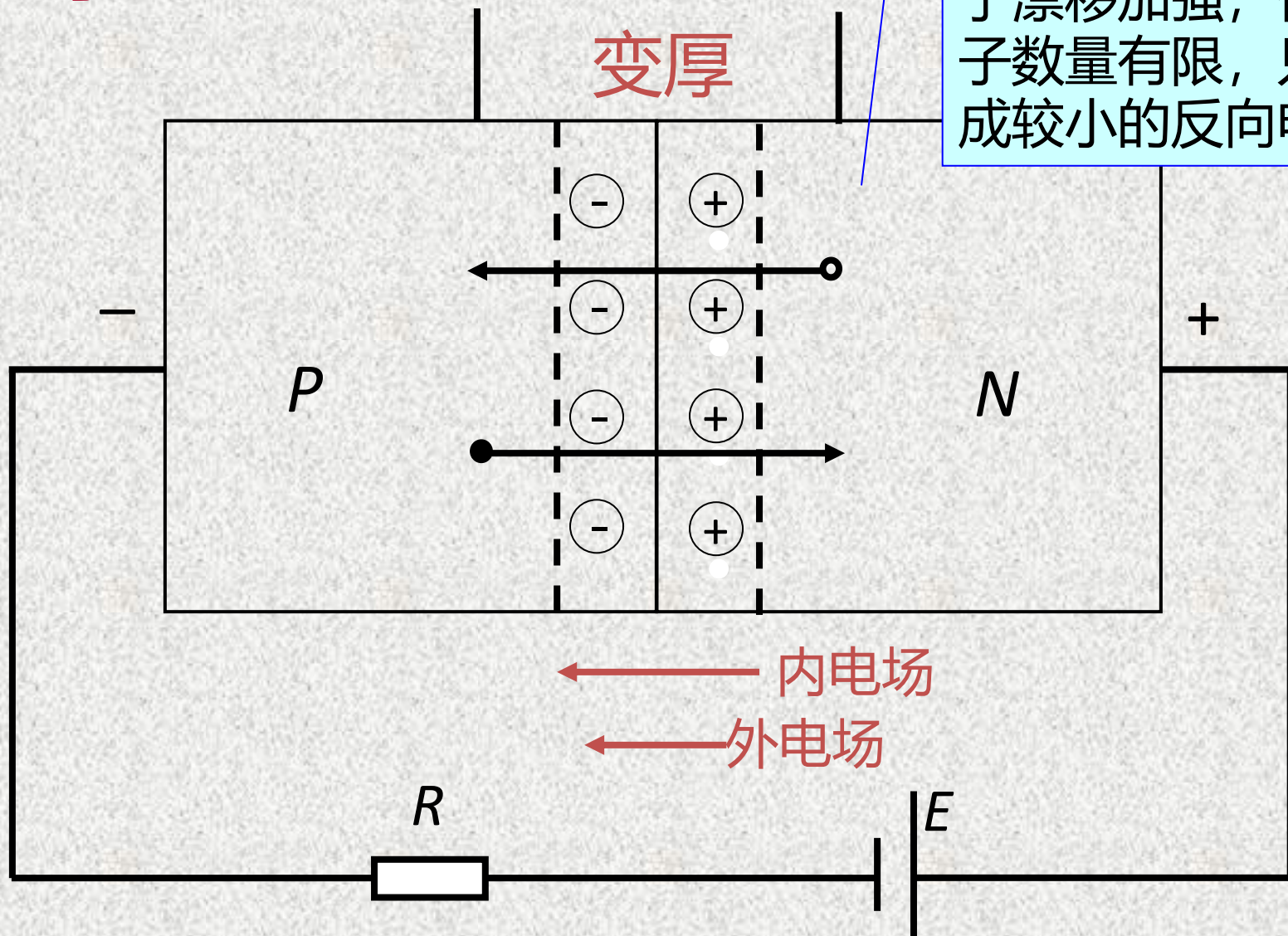
PN结的 i - v 特性

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**。

(2) PN结加反向电压时

变厚

内电场被加强，多子扩散受到抑制，少子漂移加强，但因少子数量有限，只能形成较小的反向电流。



总结：

- 1、加正向电压时，PN结处于导通状态，呈低电阻，正向电流较大。
- 2、加反向电压时，PN结处于截止状态，呈高电阻，反向电流很小。

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

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

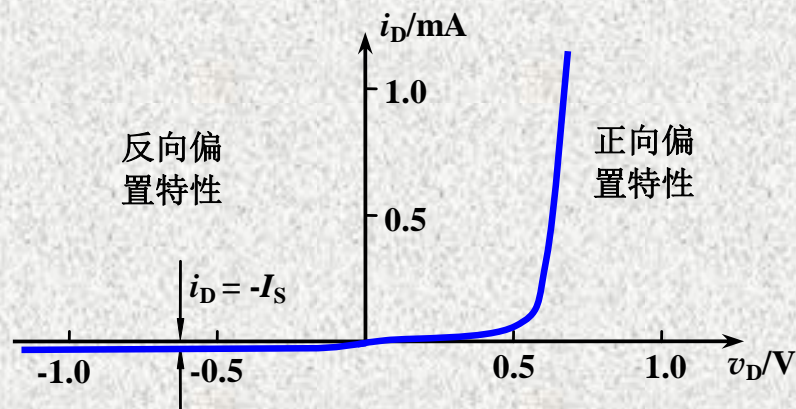
其中

I_S ——反向饱和电流

V_T ——温度的电压当量

且在常温下 ($T=300\text{K}$)

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



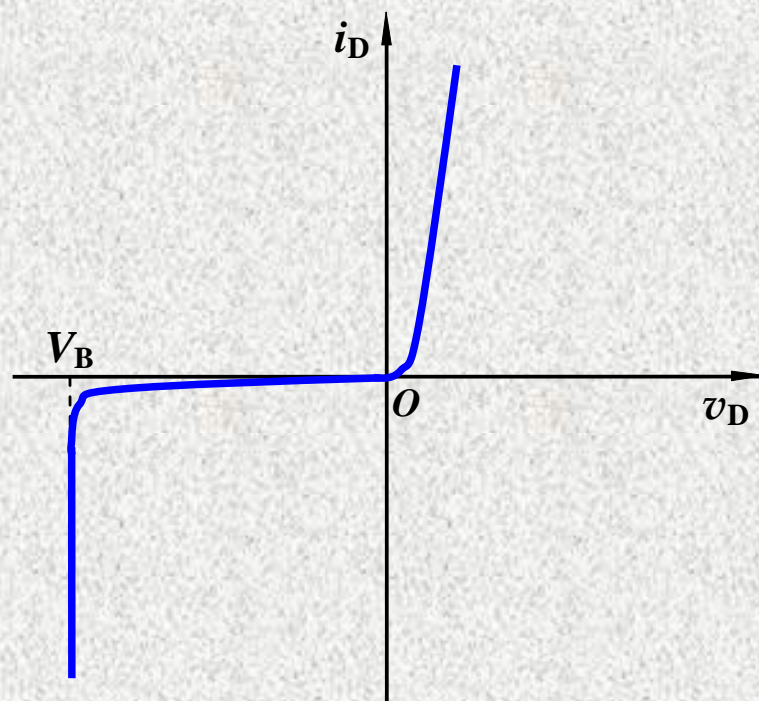
PN结的I-V特性

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**。

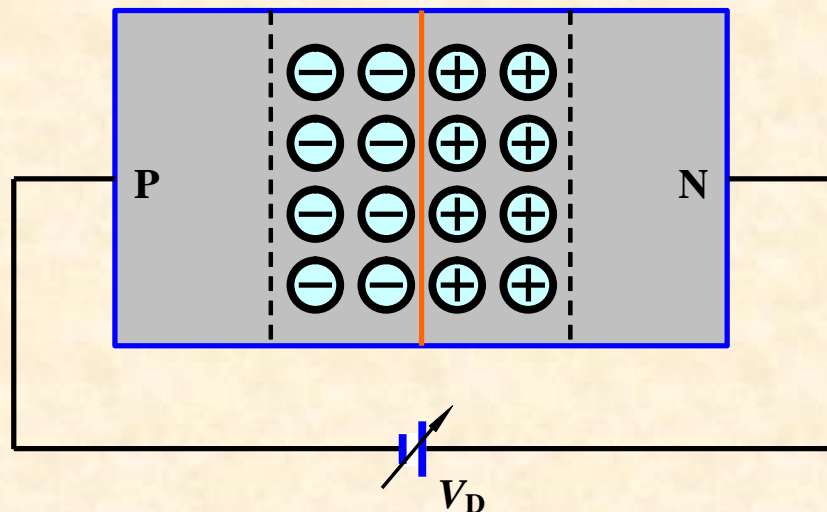
热击穿——不可逆

雪崩击穿 }
齐纳击穿 } 电击穿——可逆

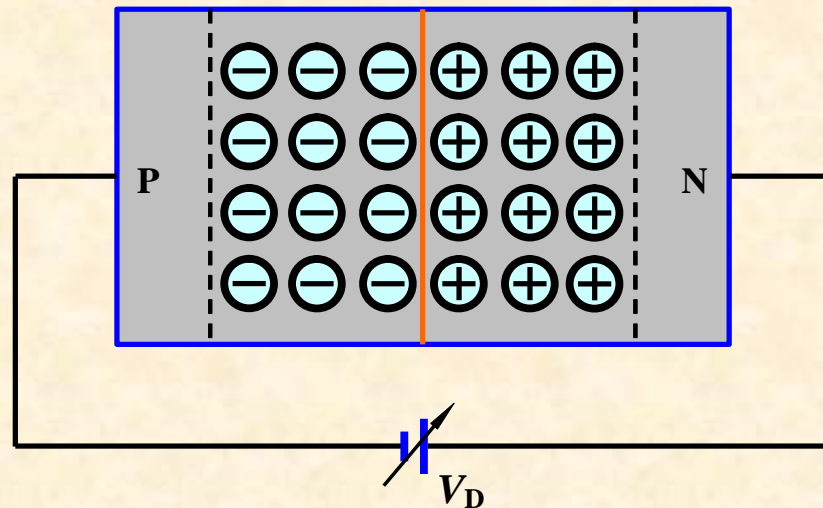


3.2.5 PN结的电容效应

(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

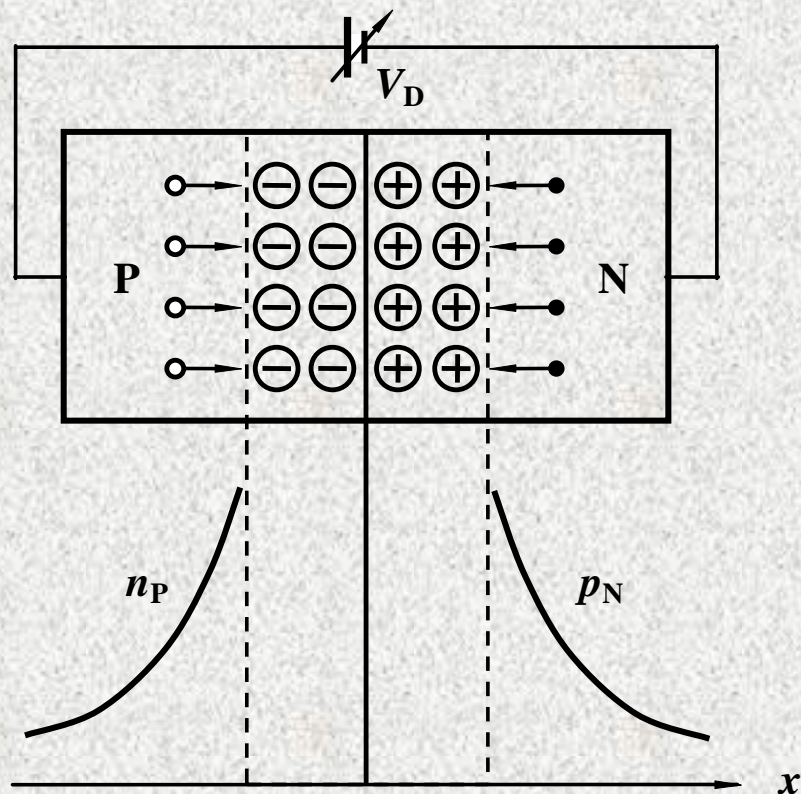
3.2.5 PN结的电容效应

(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



扩散电容示意图

3.3 半导体二极管

3.3.1 二极管的结构

3.3.2 二极管的 I - V 特性

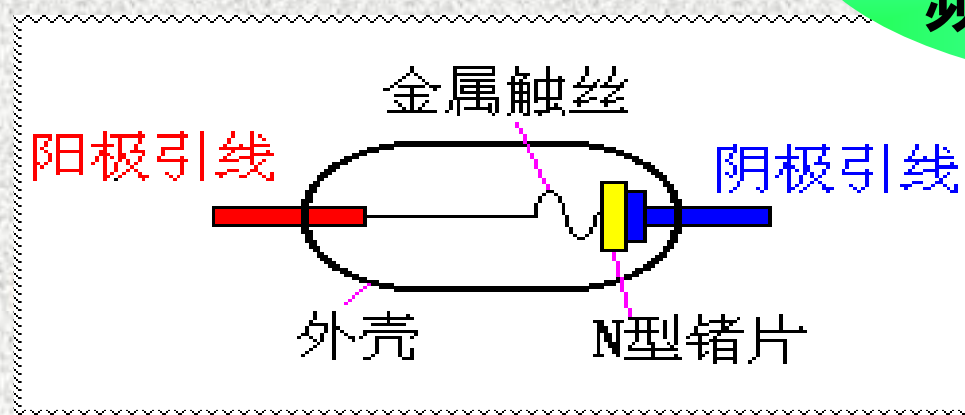
3.3.3 二极管的参数

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。

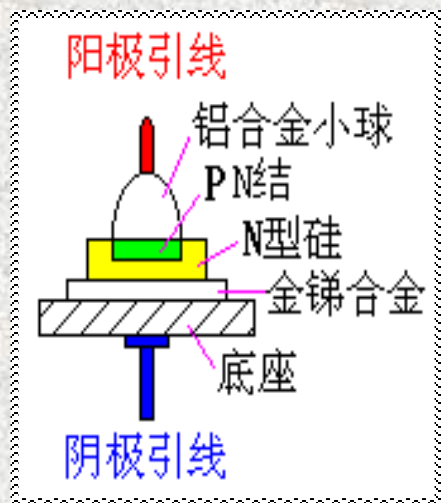


二极管的结构示意图

(a)点接触型

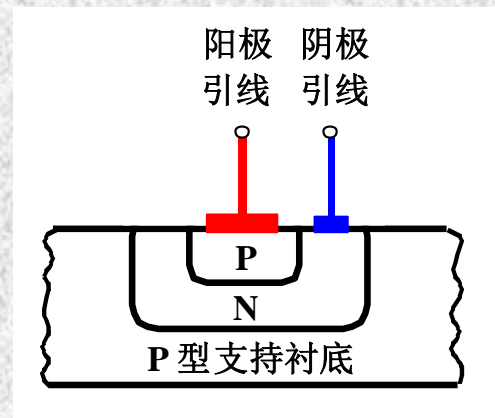
3.3.1 二极管的结构

(2) 面接触型二极管



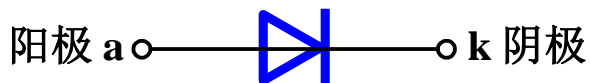
(b)面接触型

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

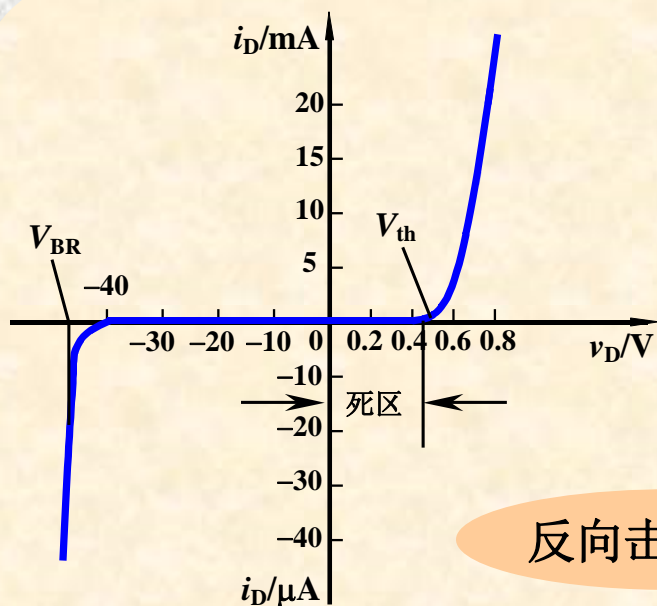
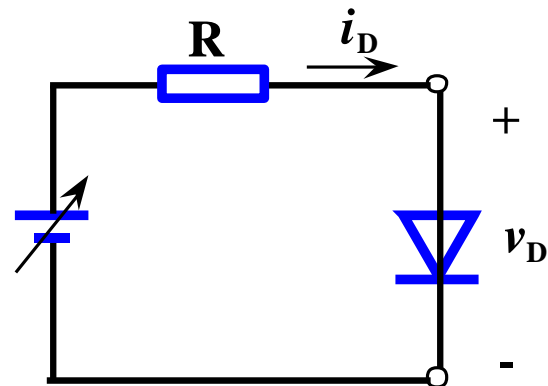
(3) 二极管的代表符号



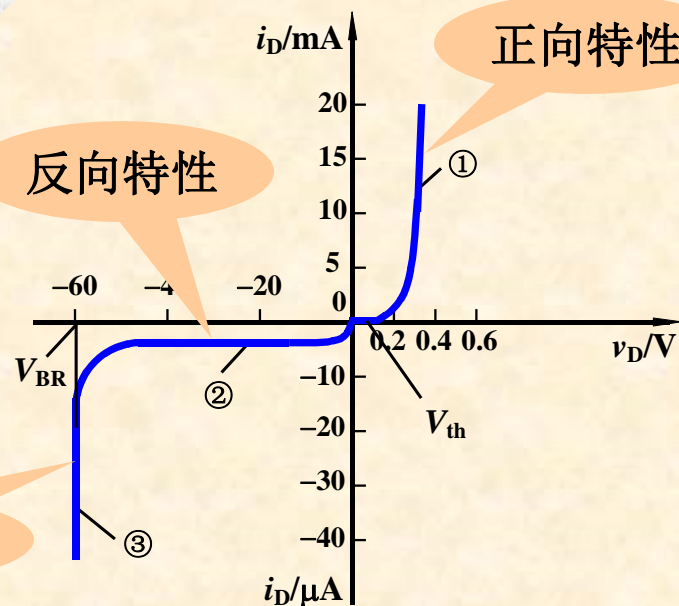
3.3.2 二极管的*i-v*特性

二极管的伏安特性曲线可用下式表示

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



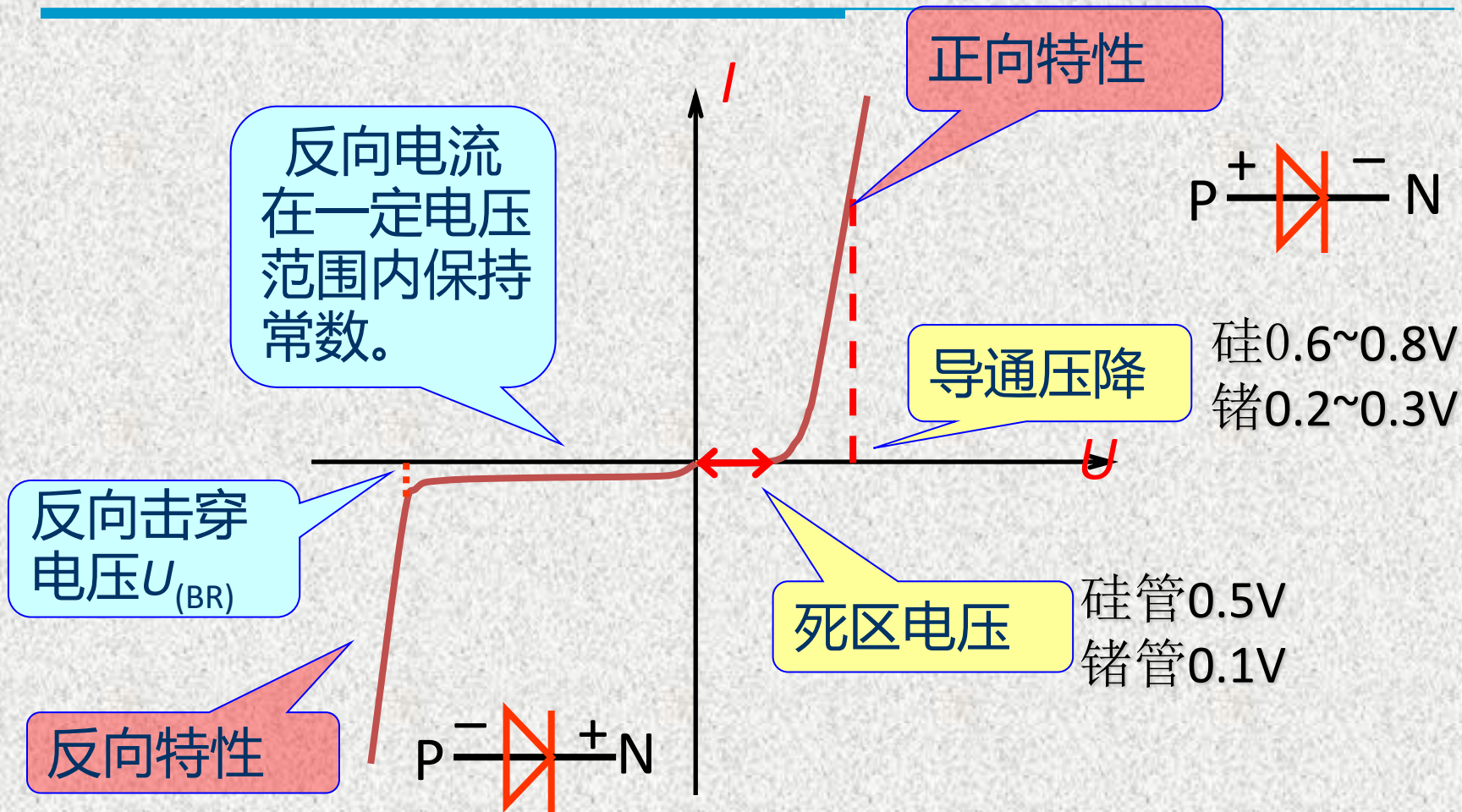
硅二极管2CP10的*i-v*特性



锗二极管2AP15的*i-v*特性

3.3.2 二极管的I-V特性

非线性



外加电压大于反向击穿电压时，二极管被击穿，失去单向导电性。

外加电压大于死区电压，二极管才能导通。

3.3.3 二极管的主要参数

1. 最大整流电流 I_F

二极管长时间使用时，允许流过二极管的最大正向平均电流。

2. 反向工作峰值电压 U_{RWM}

保证二极管不被击穿而给出的反向峰值电压，一般是反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 的一半或三分之二。点接触型D管为数十伏，面接触型D管可达数百伏。通常二极管击穿时，其反向电流剧增，单向导电性被破坏，甚至过热而烧坏。

3.3.3 二极管的主要参数

3. 反向峰值电流 I_{RM}

指二极管加反向峰值工作电压时的反向电流。反向电流越大，说明二极管的单向导电性越差。

反向电流受温度影响，温度越高反向电流越大。

硅管的反向电流较小（<几微安），锗管的反向电流要比硅管大几十到几百倍。

以上均是二极管的直流参数，二极管的应用主要是利用它的单向导电性，它可应用于整流、检波、限幅、保护等等。

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：

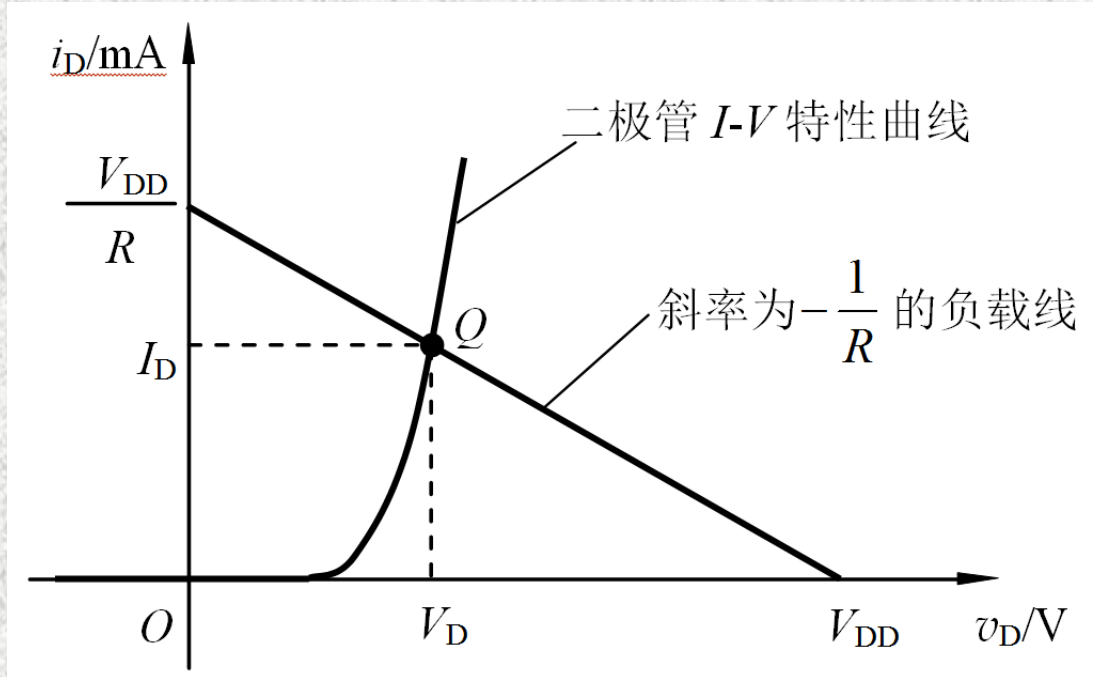
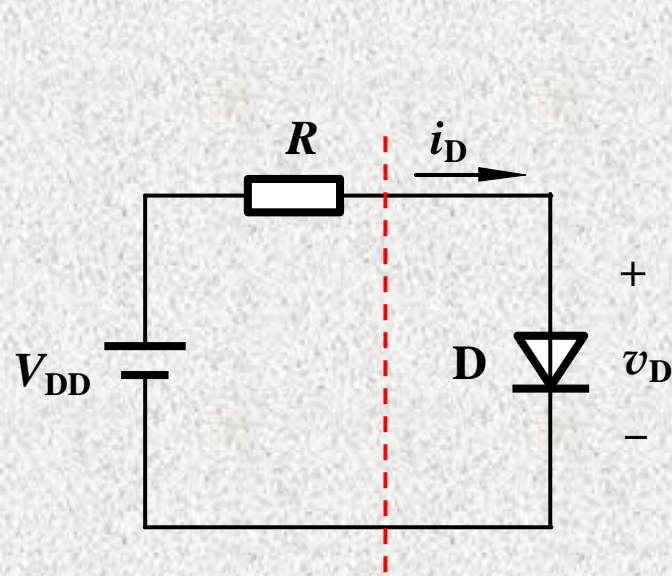
大写字母大写下标：静态值（直流），如 I_B

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**

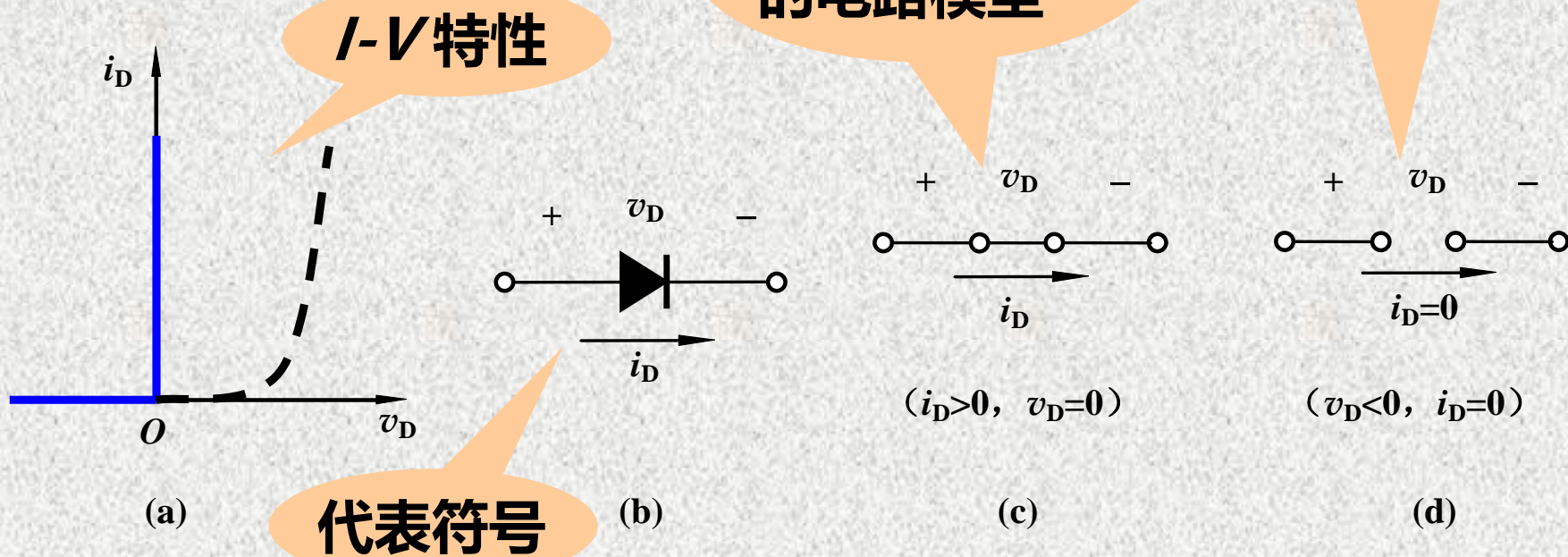
Q 的坐标值 (V_D, I_D) 即为所求。 Q 点称为电路的**工作点**

3.4.2 二极管电路的简化模型分析方法

1. 二极管 i - v 特性的建模

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。

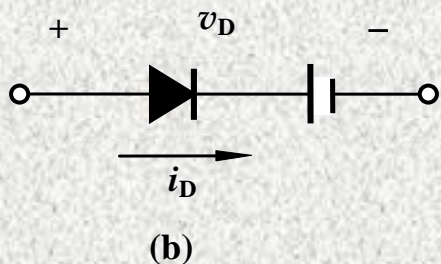
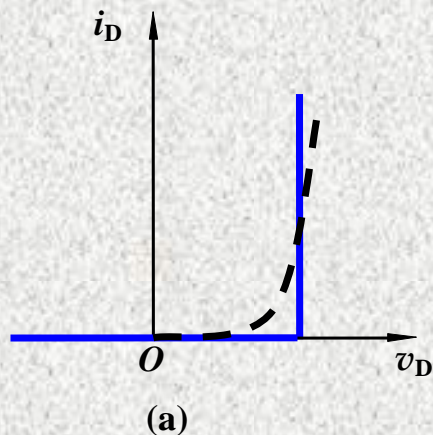
(1) 理想模型



3.4.2 二极管电路的简化模型分析方法

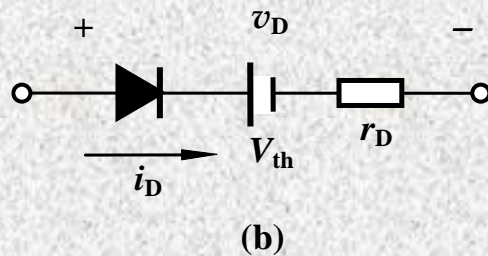
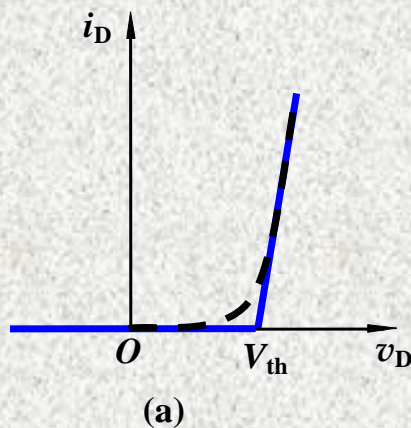
1. 二极管 I - V 特性的建模

(2) 恒压降模型



(a) I - V 特性 (b) 电路模型

(3) 折线模型

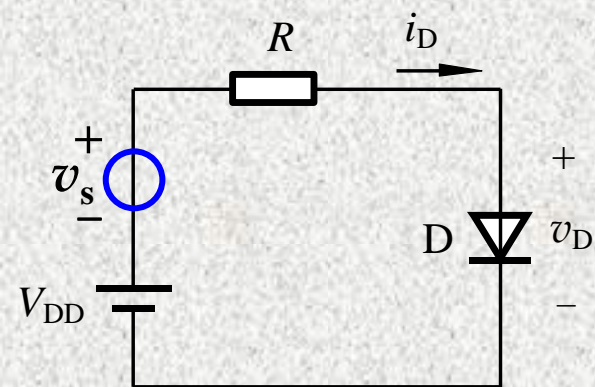


(a) I - V 特性 (b) 电路模型

3.4.2 二极管电路的简化模型分析方法

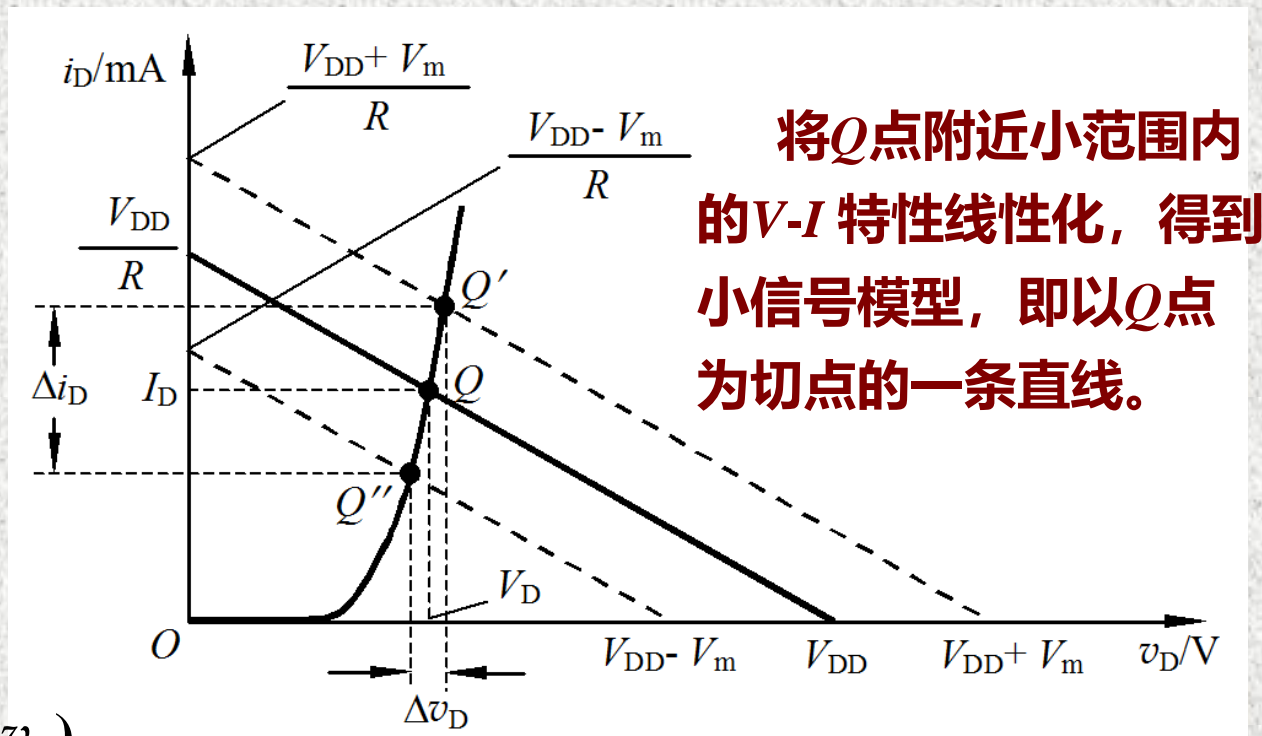
1. 二极管 i - v 特性的建模

(4) 小信号模型



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

$v_s = V_m \sin \omega t$ 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。



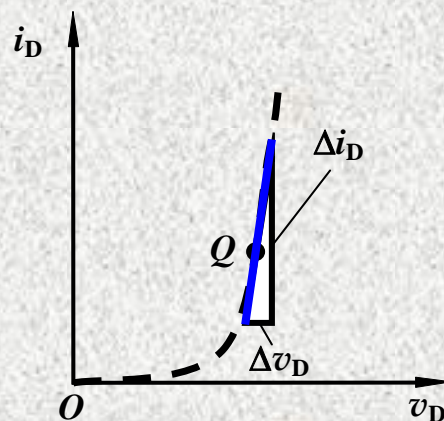
3.4.2 二极管电路的简化模型分析方法

1. 二极管 i - v 特性的建模

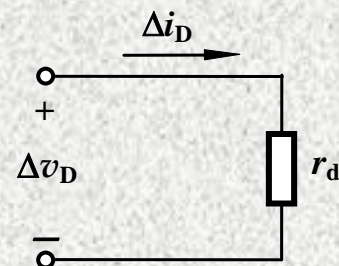
(4) 小信号模型

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)

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

得 Q 点处的微变电导

$$g_d = \left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_Q = \frac{I_S}{V_T} e^{v_D/V_T} \Big|_Q \approx \left. \frac{i_D}{V_T} \right|_Q = \frac{I_D}{V_T} \quad \text{则} \quad r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{V_T}{I_D}$$

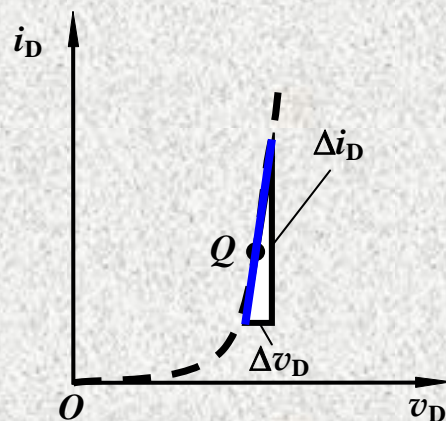
常温下 ($T=300\text{K}$)

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

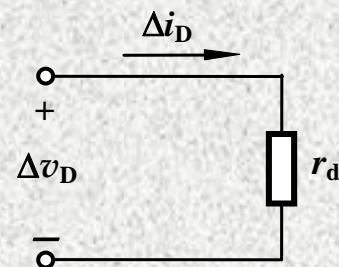
3.4.2 二极管电路的简化模型分析方法

1. 二极管 I - V 特性的建模

(4) 小信号模型



(a)



(b)

(a) I - V 特性 (b) 电路模型

特别注意：

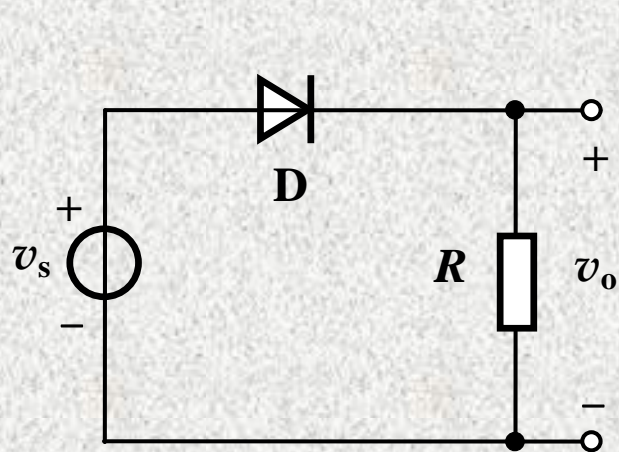
- 小信号模型中的微变电阻 r_d 与静态工作点 Q 有关。
- 该模型用于二极管处于正向偏置条件下，且 $v_D \gg V_T$ 。

3.4.2 二极管电路的简化模型分析方法

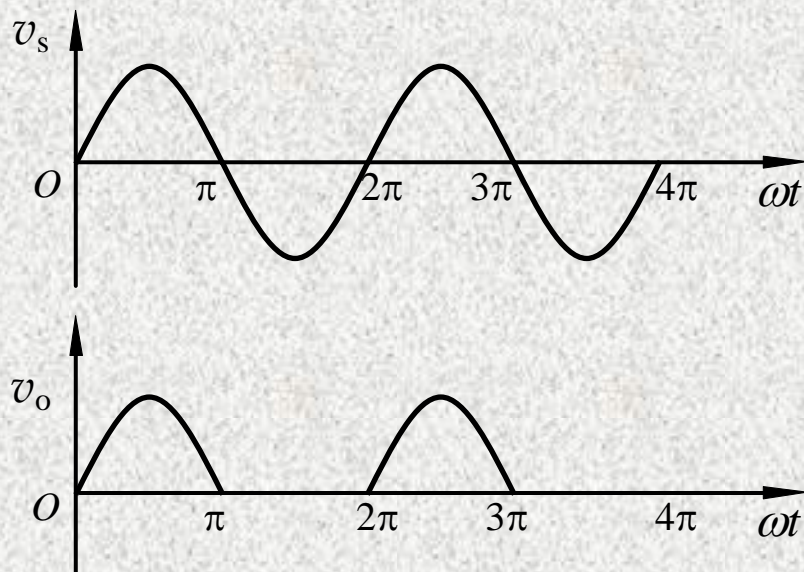
2. 模型分析法应用举例

(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. 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

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

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

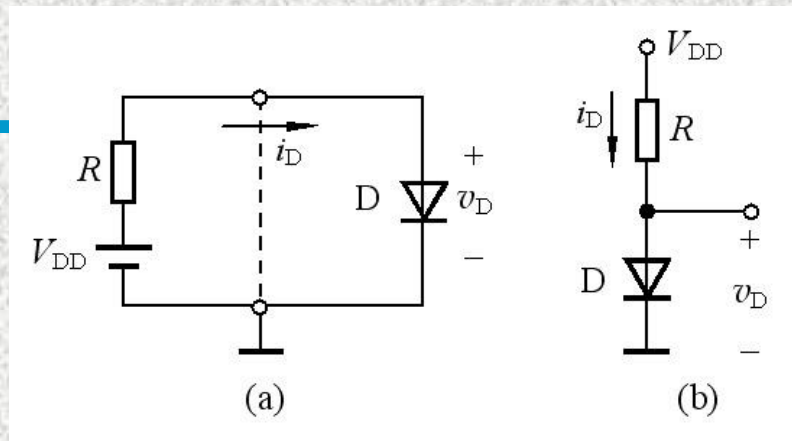
折线模型

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

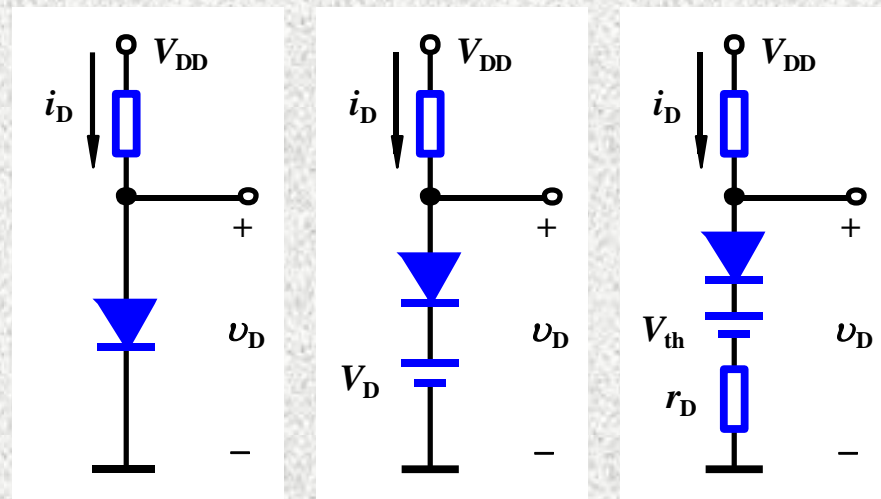
$$\text{设 } r_D = 0.2\text{k}\Omega$$

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

当 $V_{DD}=1\text{V}$ 时, (自学)



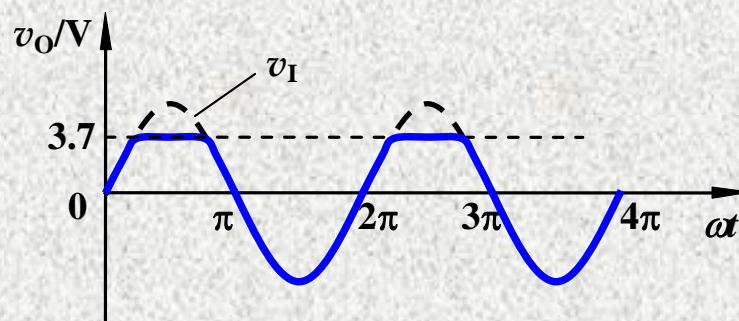
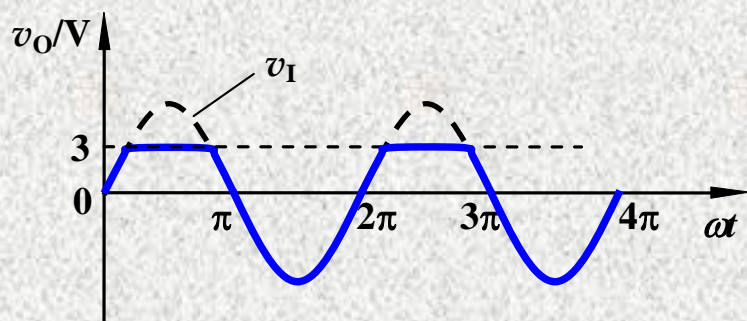
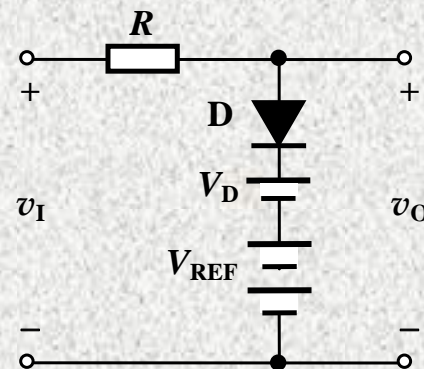
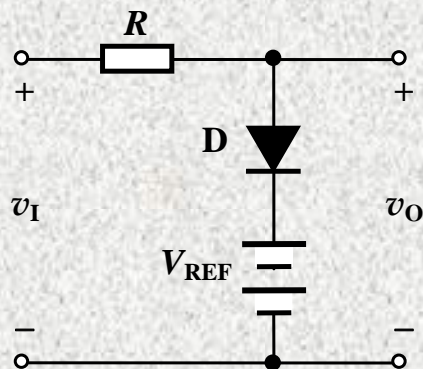
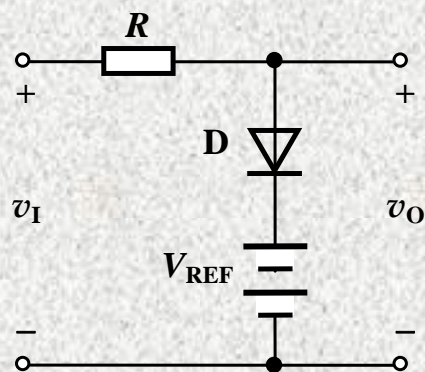
(a) 简单二极管电路 (b) 习惯画法



2. 模型分析法应用举例

(3) 限幅与钳位电路

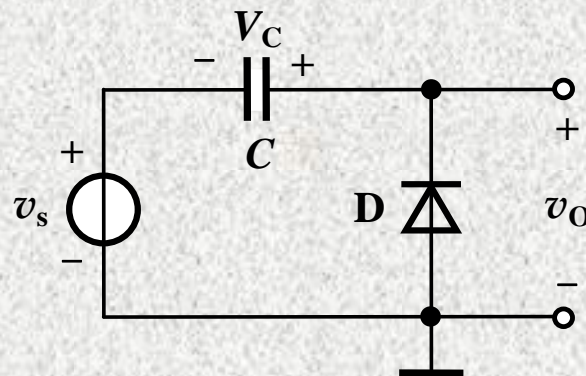
电路如图， $R = 1\text{k}\Omega$ ， $V_{\text{REF}} = 3\text{V}$ ，二极管为硅二极管。分别用理想模型和恒压降模型求解，当 $v_I = 6\sin\omega t$ V时，绘出相应的输出电压 v_O 的波形。



2. 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。



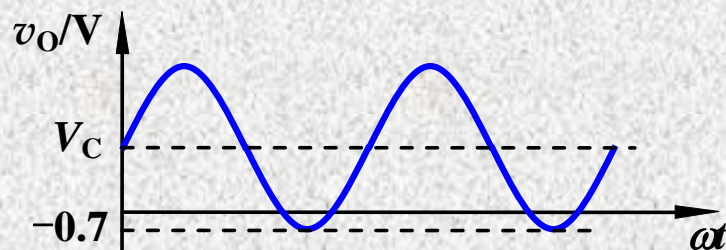
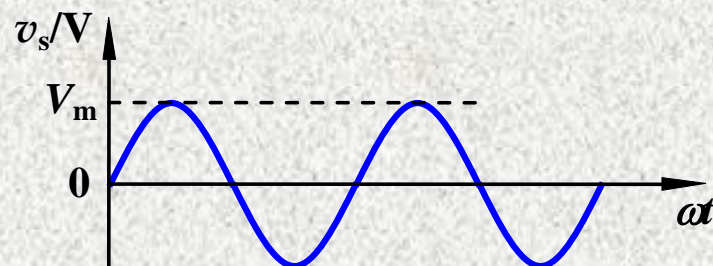
v_s 的负半周，D 导通，C 充电，但无放电回路，最后（稳态）

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

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？

二极管电路分析

- 分析方法:

1. 断开二极管

2. a) 分析其两端电位高低,

- b) 或其两端所加电压 U_D 的正负。

3. a) $V_{\text{阳}} > V_{\text{阴}} \rightarrow$ 导通

- $V_{\text{阳}} < V_{\text{阴}} \rightarrow$ 截止

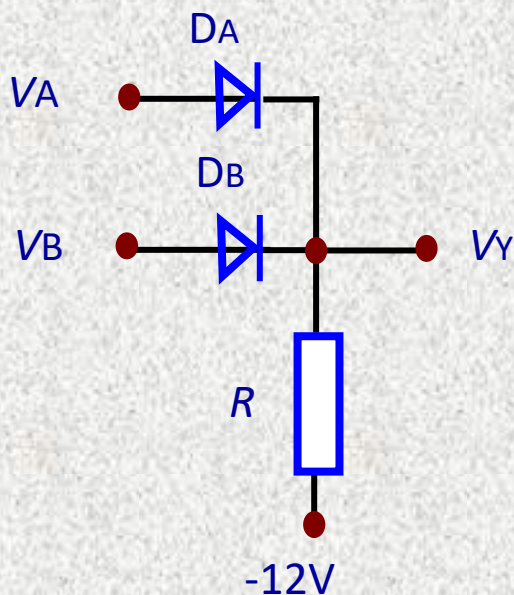
- b) $U_D > 0 \rightarrow$ 导通

- $U_D < 0 \rightarrow$ 截止

2. 模型分析法应用举例

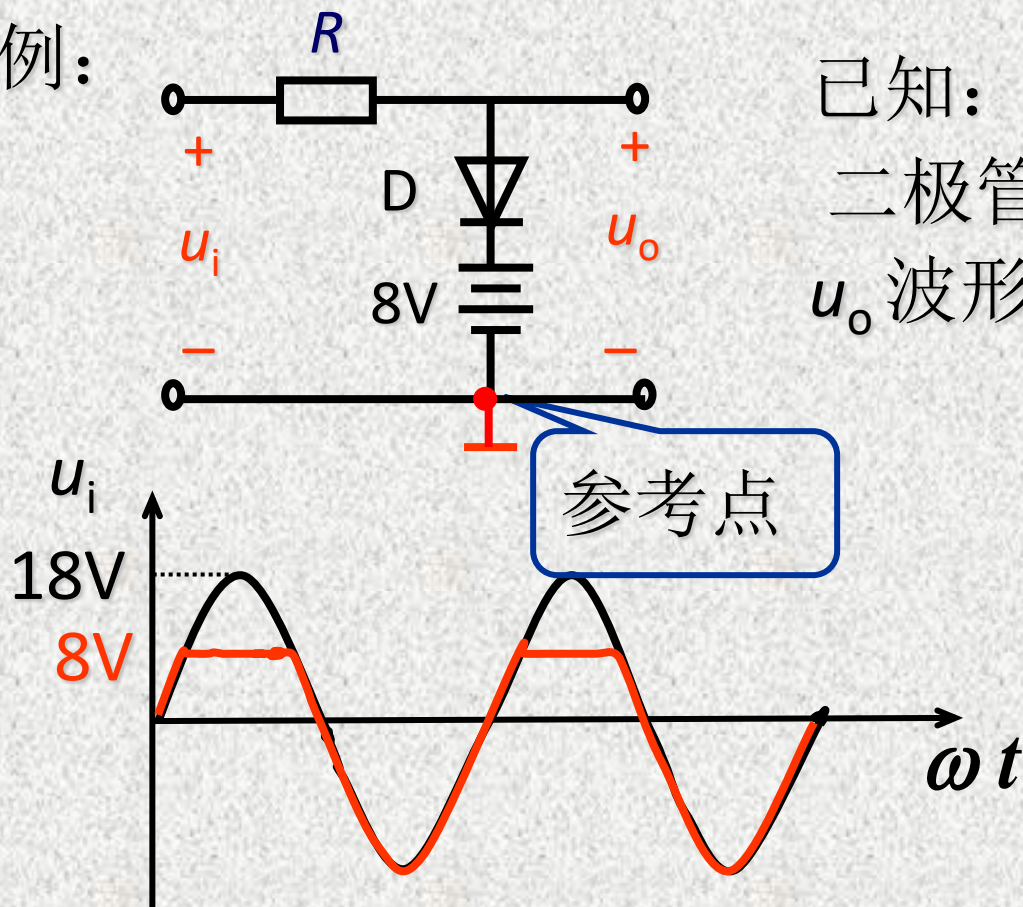
例：已知：管子为锗管， $V_A = 3V$ ， $V_B = 0V$ 。导通压降为 $0.3V$ ，试求： $V_Y = ?$

解：方法：先判二极管谁优先导通，
导通后二极管起嵌位作用
两端压降为定值。



因： $V_A > V_B$
故： D_A 优先导通 $\Rightarrow D_B$ 截止
若： D_A 导通压降为 $0.3V$
则： $V_Y = 2.7V$

例：



已知： $u_i = 18\sin\omega t \text{ V}$
二极管是理想的，试画出 u_o 波形。

二极管的用途：
整流、检波、
限幅、钳位、开
关、元件保护、
温度补偿等。

二极管阴极电位为 8V

$u_i > 8V$ ，二极管导通，可看作短路 $u_o = 8V$

$u_i < 8V$ ，二极管截止，可看作开路 $u_o = u_i$

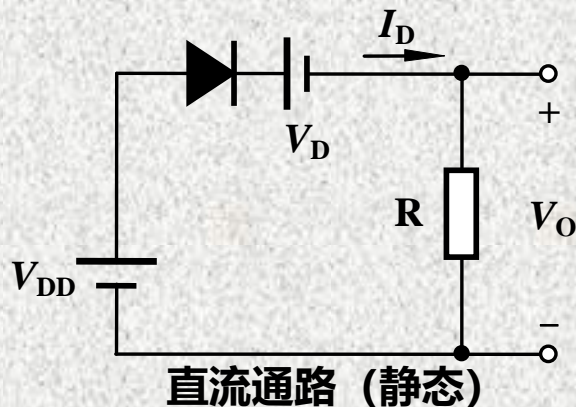
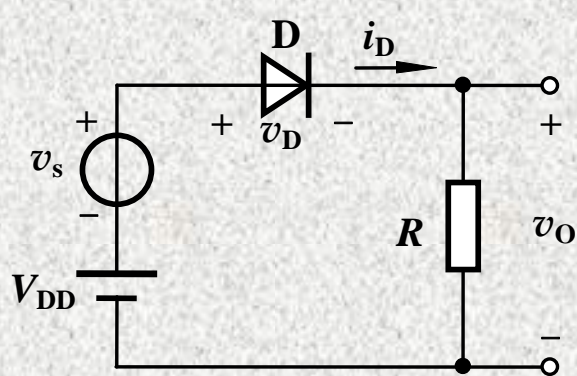
2. 模型分析法应用举例

直流通路、交流通路、静态、动态等概念，在放大电路的分析中非常重要。

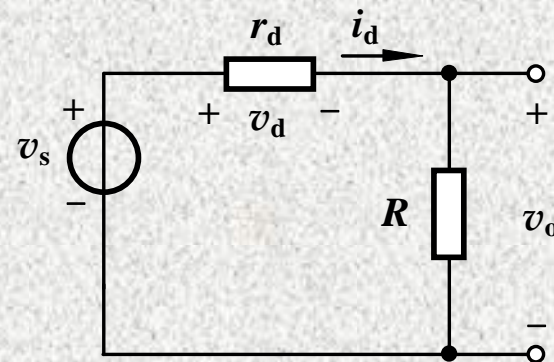
(6) 小信号工作情况分析

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。



直流通路 (静态)



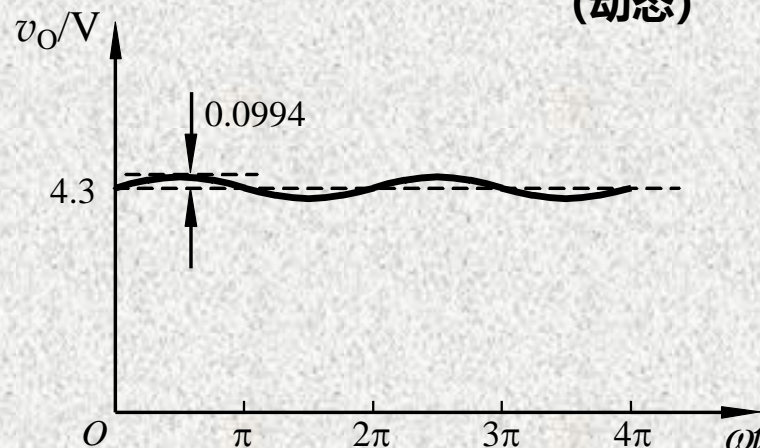
小信号模型的交流通路 (动态)

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:

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



3.5 特殊二极管

3.5.1 齐纳二极管

3.5.2 变容二极管

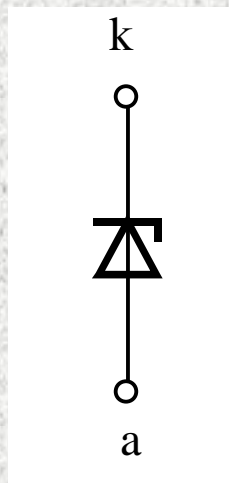
3.5.3 肖特基二极管

3.5.4 光电器件

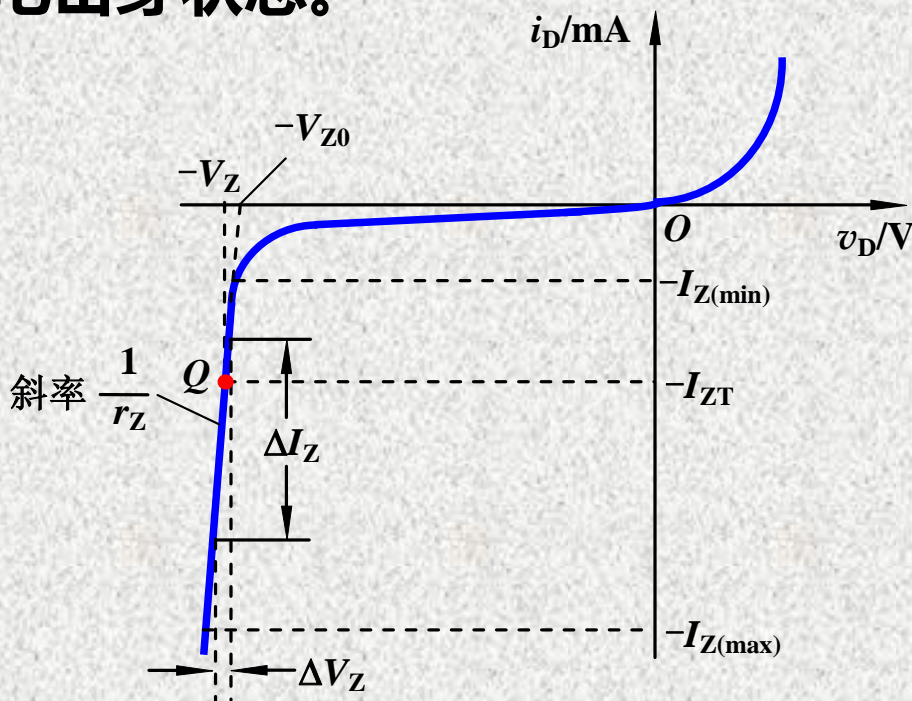
3.5.1 齐纳二极管

1. 符号及稳压特性

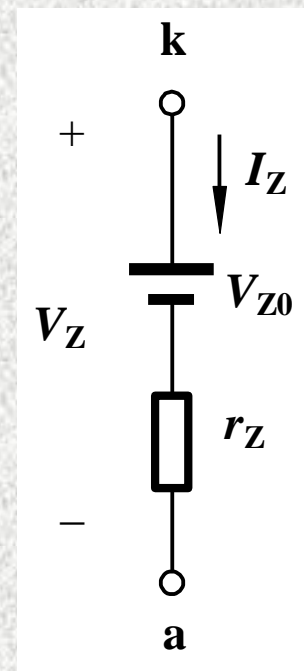
利用二极管反向击穿特性实现稳压。稳压二极管稳压时工作在反向电击穿状态。



(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

符号

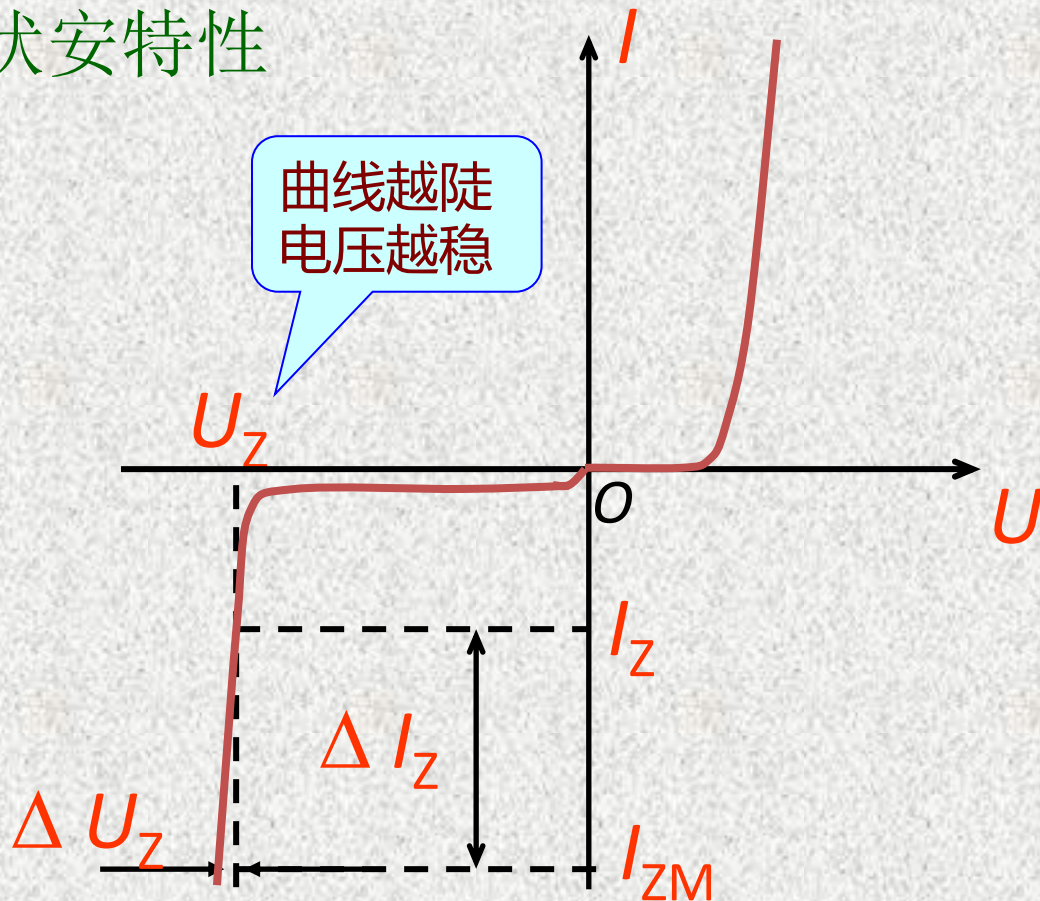


伏安特性

稳压管正常工作时，需加反向电压，工作于反向击穿区。

稳压原理：

稳压管反向击穿以后，电流变化很大，但其两端电压变化很小。



使用时要加限流电阻

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。

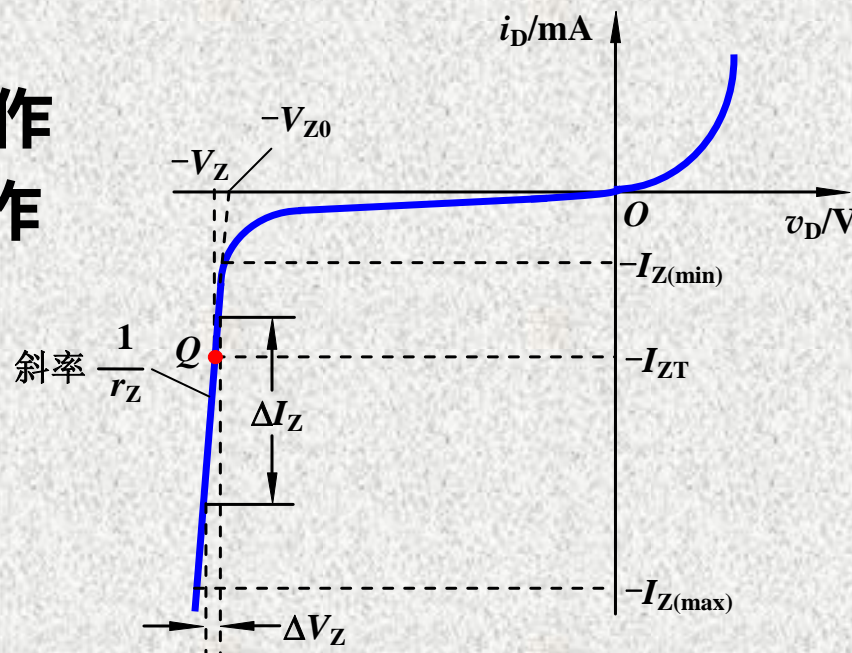
(2) 动态电阻 r_Z

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

(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—— α_{V_Z}

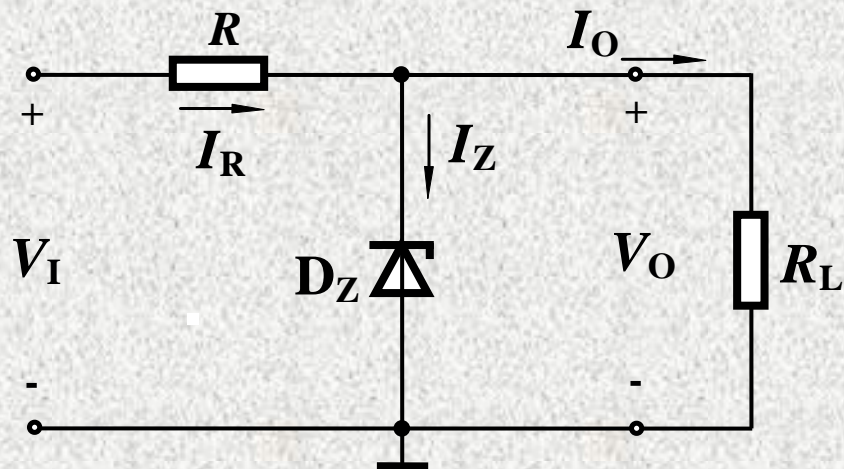
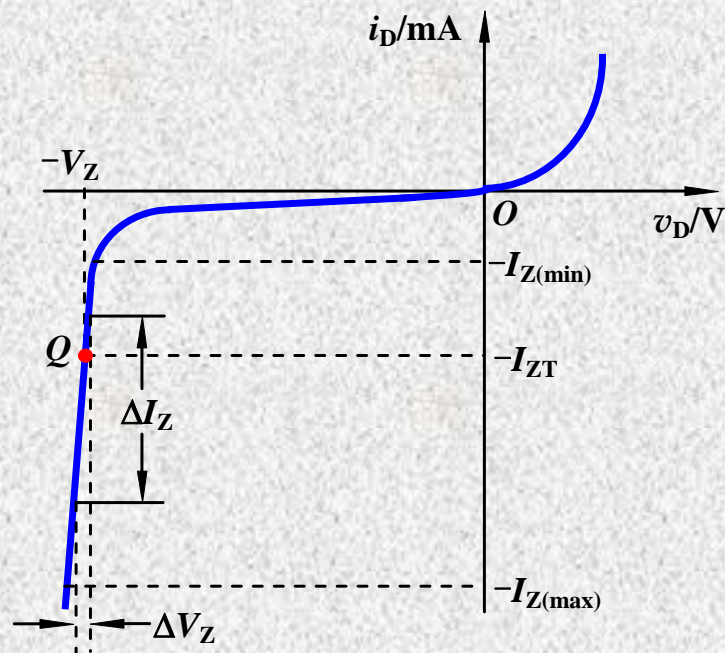


3.5.1 齐纳二极管

3. 稳压电路

正常稳压时 $V_O = V_Z$

稳压条件是什么？



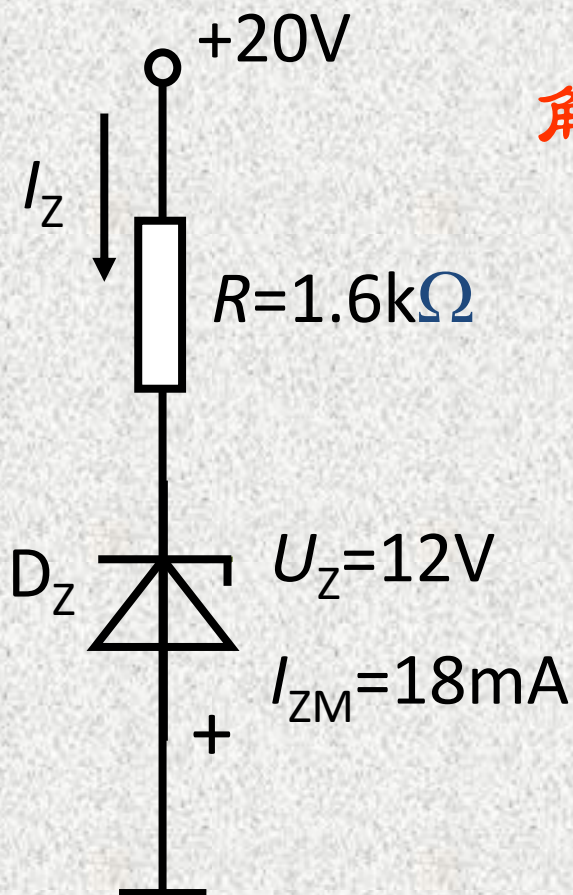
$$I_{Z(min)} \leq I_Z \leq I_{Z(max)}$$

不加 R 可以吗？

3.5.1 齐纳二极管

例：已知： $U_Z = 12V$ ， $I_{ZM} = 18mA$ ， $R = 1.6k\Omega$ 。

试求： $I_Z = ?$ 限流电阻 R 的阻值是否合适？



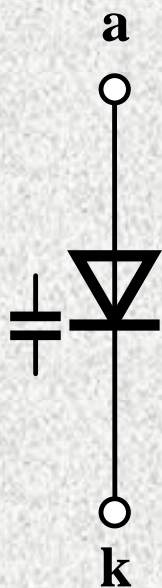
解：

$$\begin{aligned} I_Z &= (20 - U_Z) / R \\ &= (20 - 12) / 1.6 \times 10^3 \\ &= 5mA \end{aligned}$$

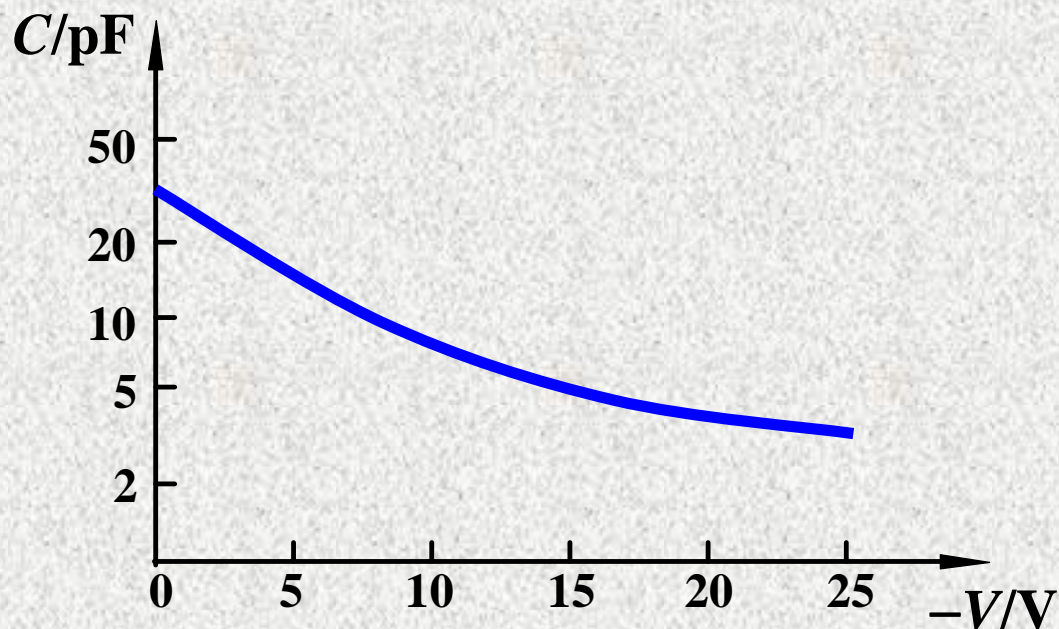
因： $I_Z < I_{ZM}$

故： 限流电阻 R 的阻值合适

3.5.2 变容二极管



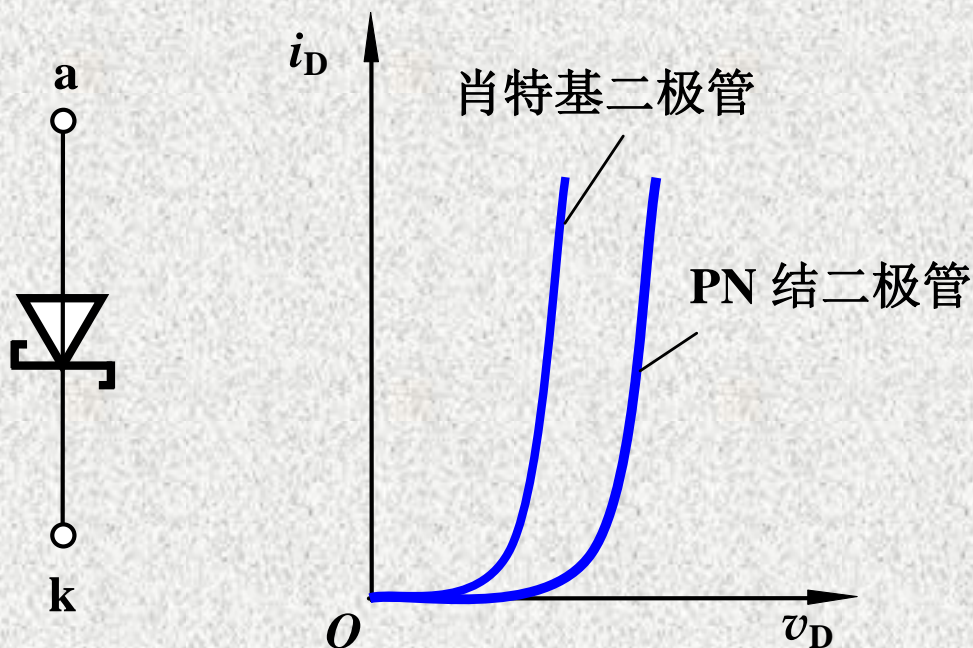
(a)



(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



(a)

(b)

(a) 符号

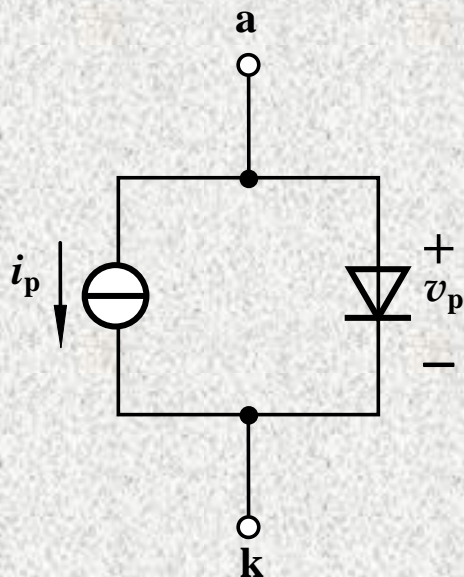
(b) 正向 V - I 特性

3.5.4 光电器件

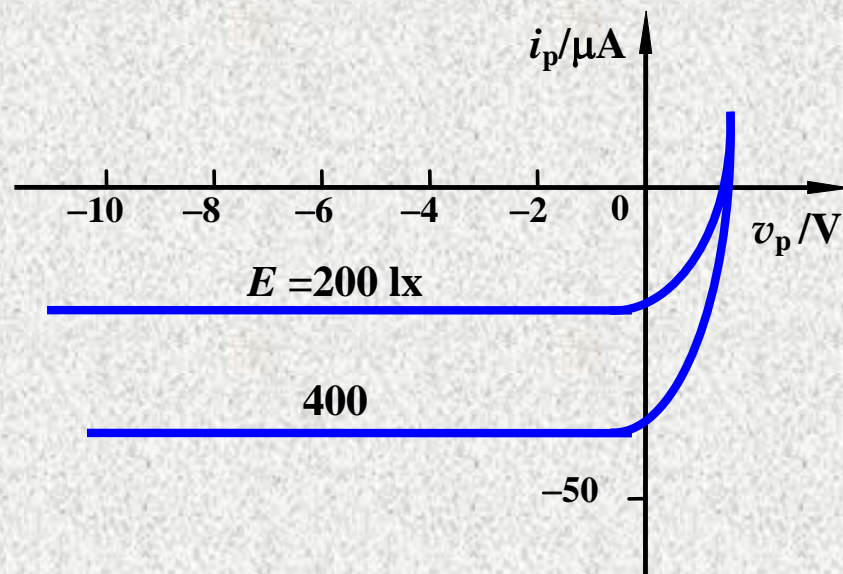
1. 光电二极管



(a)



(b)



(c)

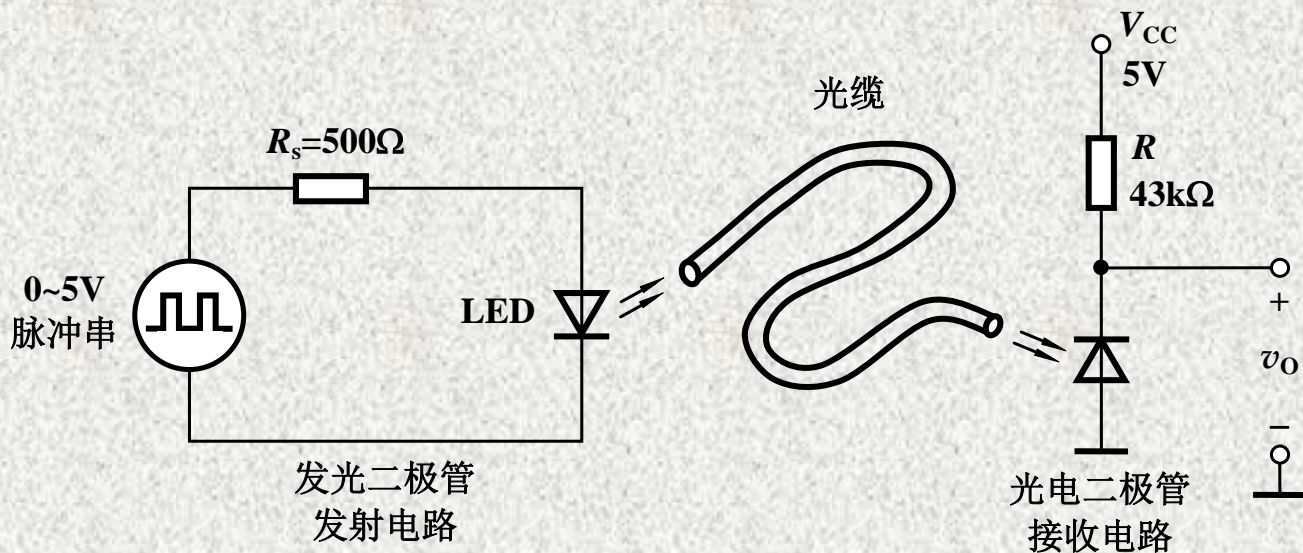
(a) 符号 (b) 电路模型 (c) 特性曲线

3.5.4 光电器件

2. 发光二极管



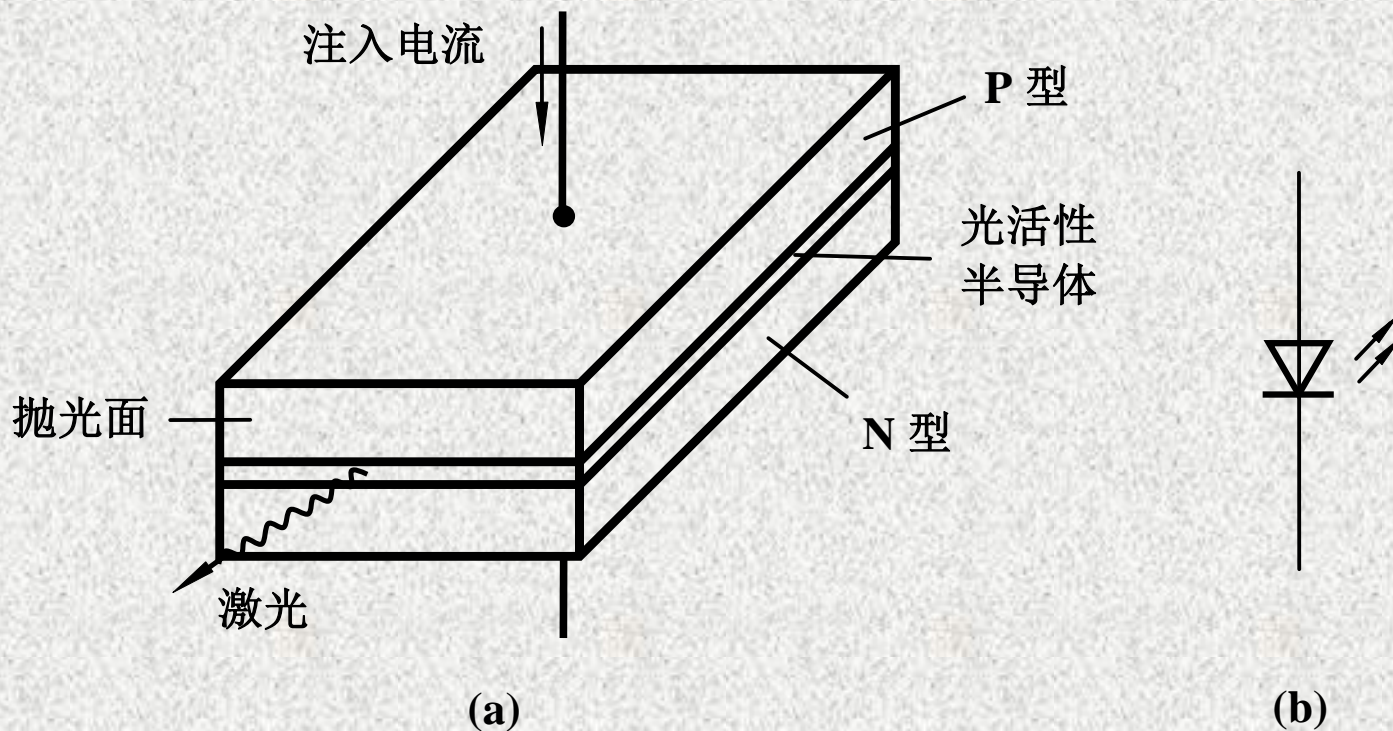
符号



光电传输系统

3.5.4 光电器件

3. 激光二极管



(a) 物理结构 (b) 符号

3.5.4 光电器件

4. 太阳能电池

