



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、空穴及其导电作用

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。

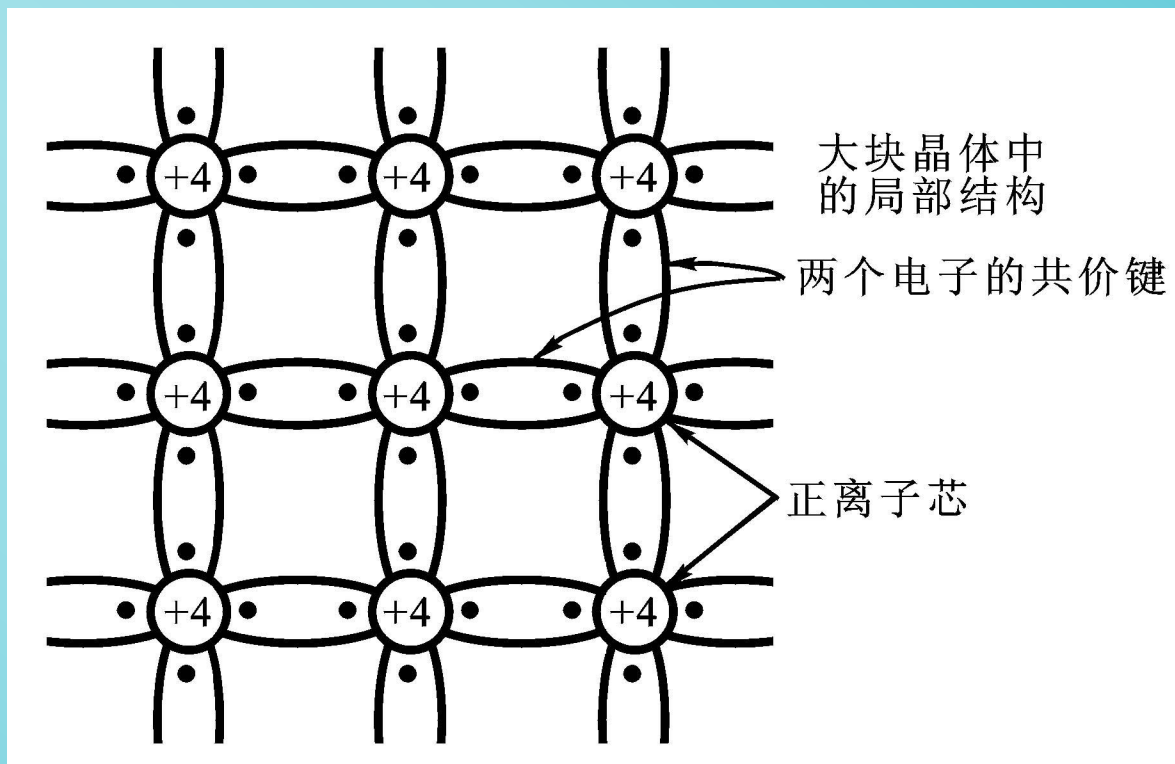
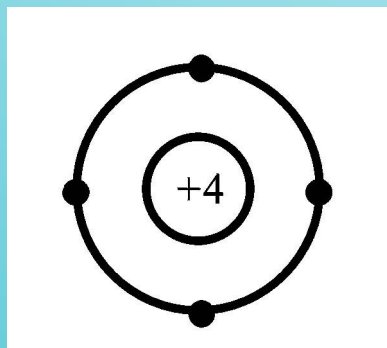
半导体是介于导体和非导体之间的物质。

受周围状态(或条件)改变性质。

1. 温度
2. 光或电场
3. 掺杂

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



典型的半导体有硅Si和锗Ge以及砷化镓GaAs等。

川北医学院生物医学工程

2.1.3 本征半导体

本征激发：本征半导体中产生自由电子和空穴

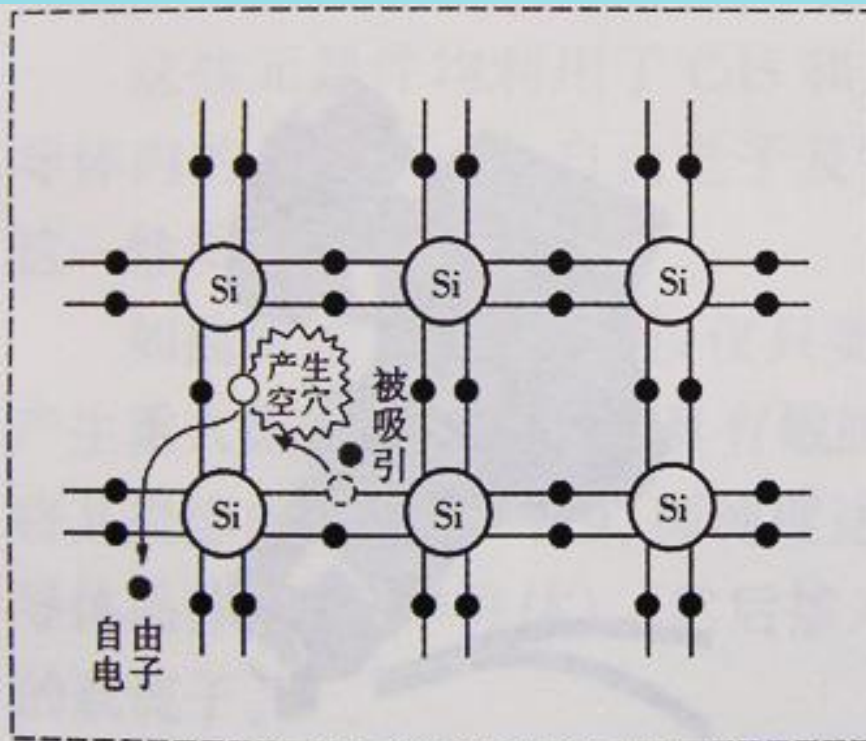


图 1.27 载流子发生引起的空穴移动



图 1.28 空穴发生的连锁反应

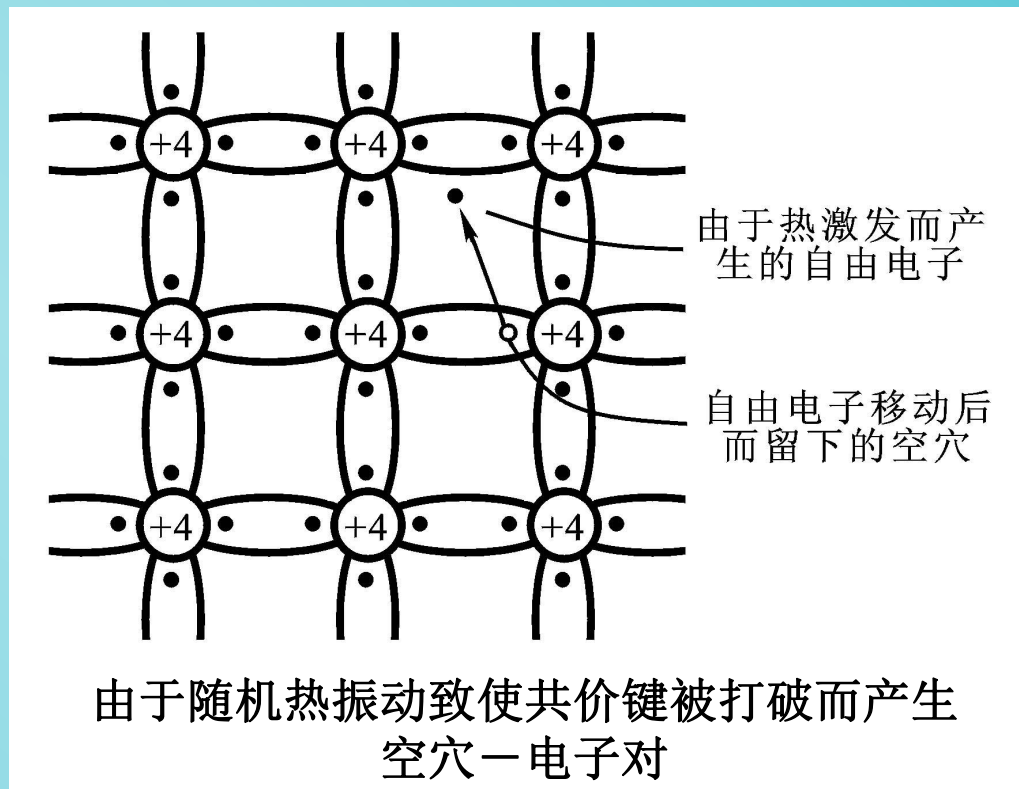
3.1.3 本征半导体、空穴及其导电作用

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**。

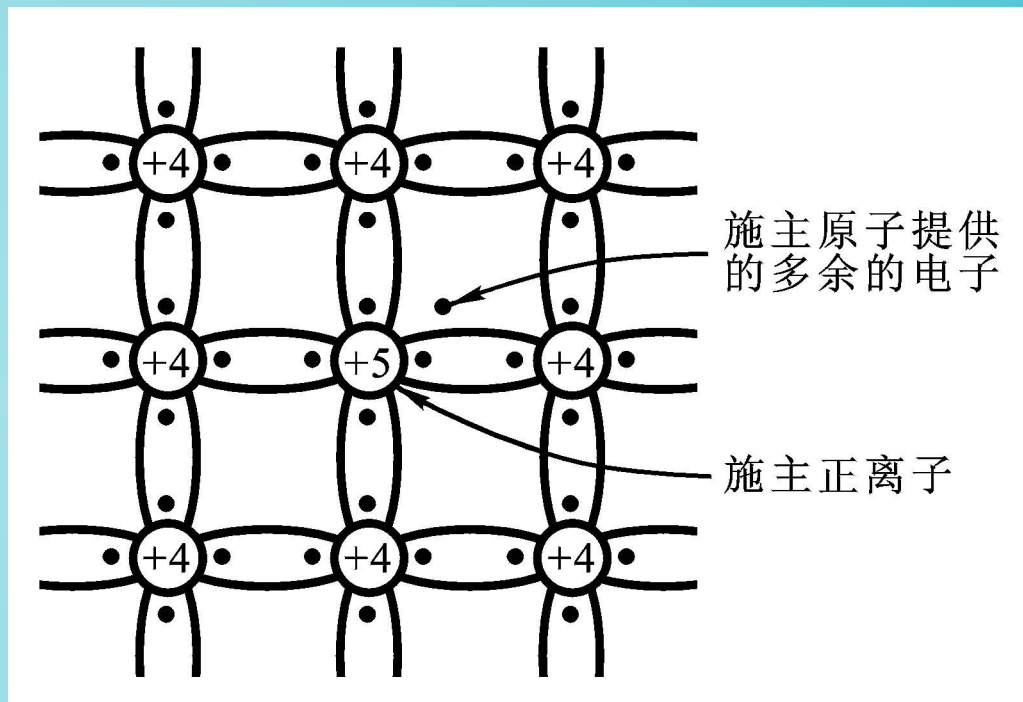
N型半导体——掺入五价杂质元素（如磷）的半导体。

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。



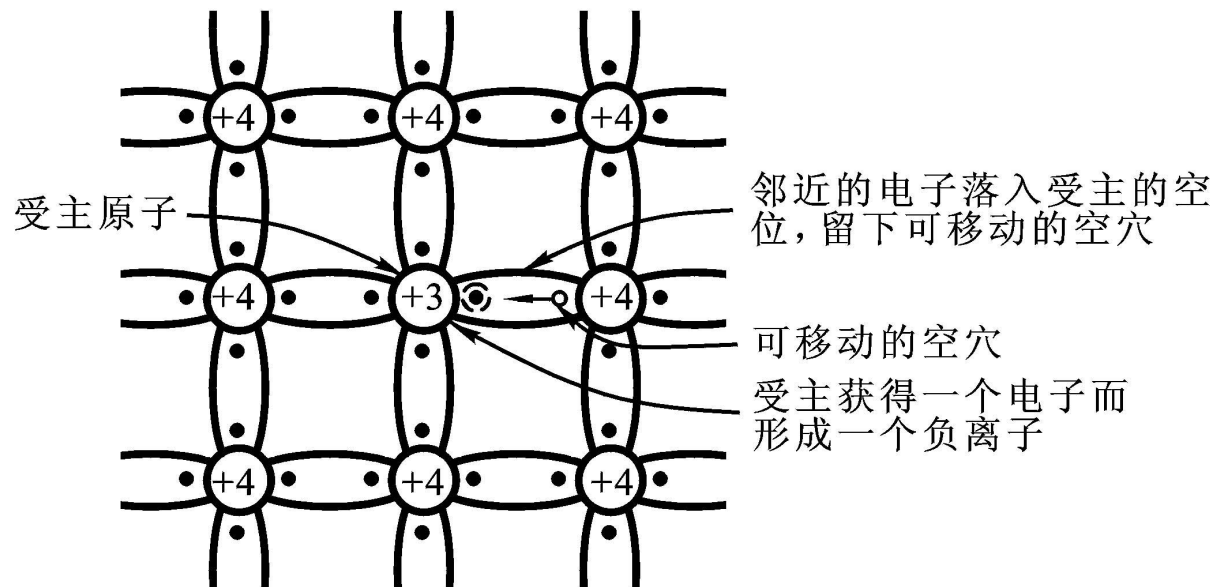
在N型半导体中自由电子是多数载流子，它主要由杂质原子提供；空穴是少数载流子，由热激发形成。

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约 $10^6/\text{cm}^3$ 。



本节中的有关概念

- 本征半导体、杂质半导体
- 施主杂质、受主杂质
- N型半导体、P型半导体
- 自由电子、空穴
- 多数载流子、少数载流子



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

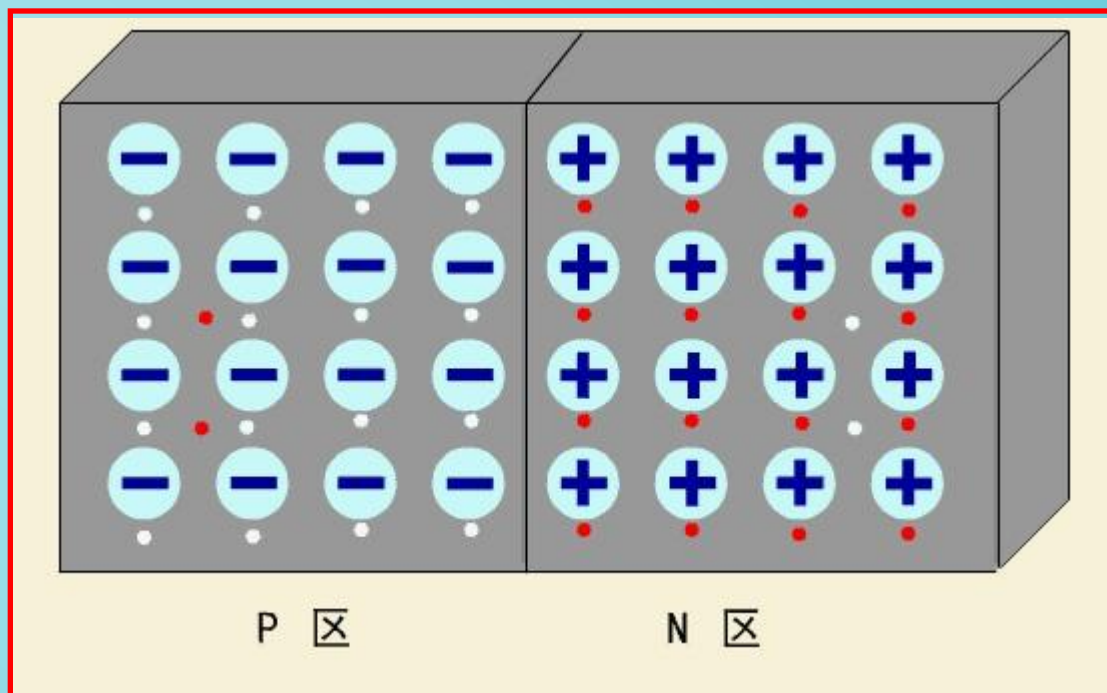
3.2.4 PN结的反向击穿

3.2.5 PN结的电容效应



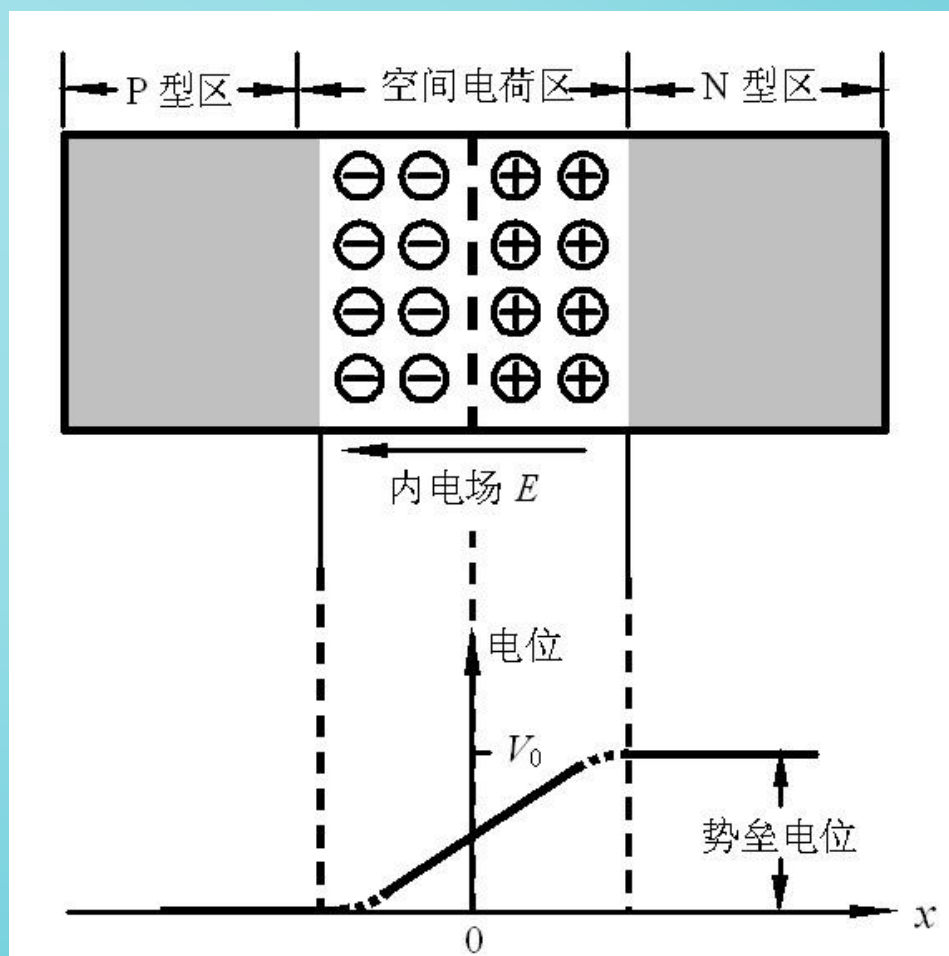
2.2.1 PN结的形成

- 扩散运动
- 漂移运动
- 自由电子与空穴复合



由载流子浓度差引起的载流子的运动称为**扩散运动**。
由电场作用引起的载流子的运动称为**漂移运动**。

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。



对于P型半导体和N型半导体结合面，离子薄层形成的空间电荷区称为PN结。

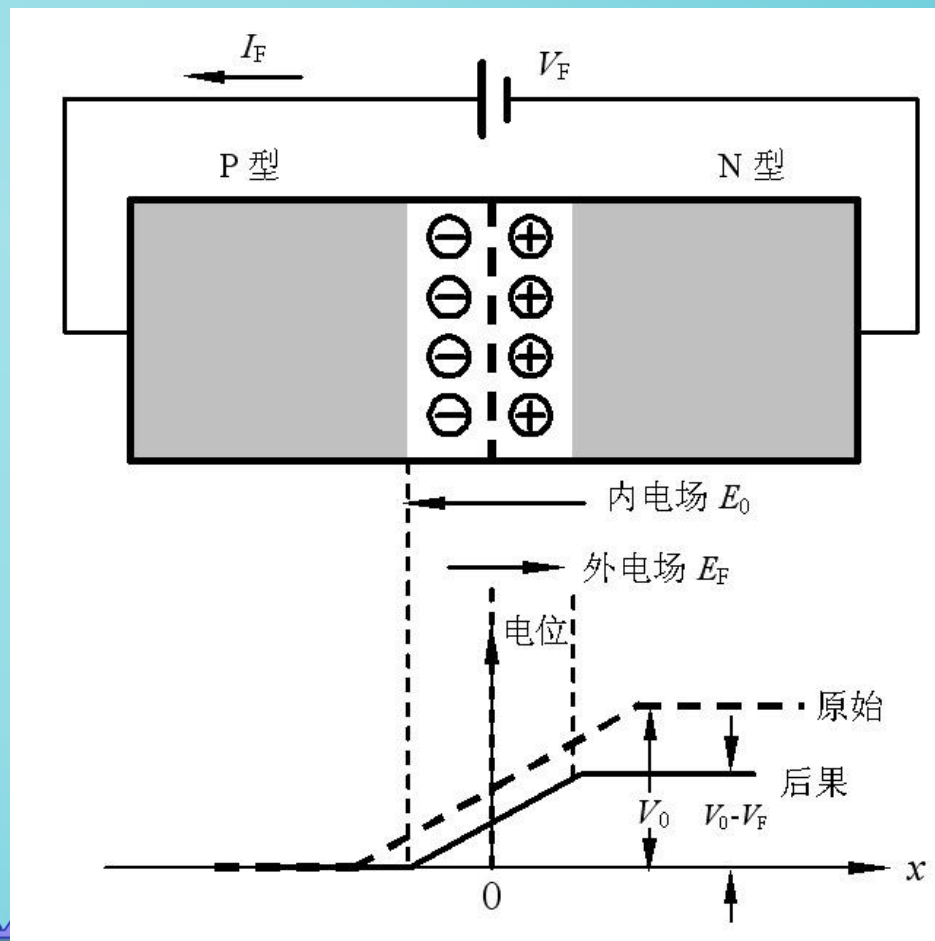
在空间电荷区，由于缺少多子，所以也称耗尽层。

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



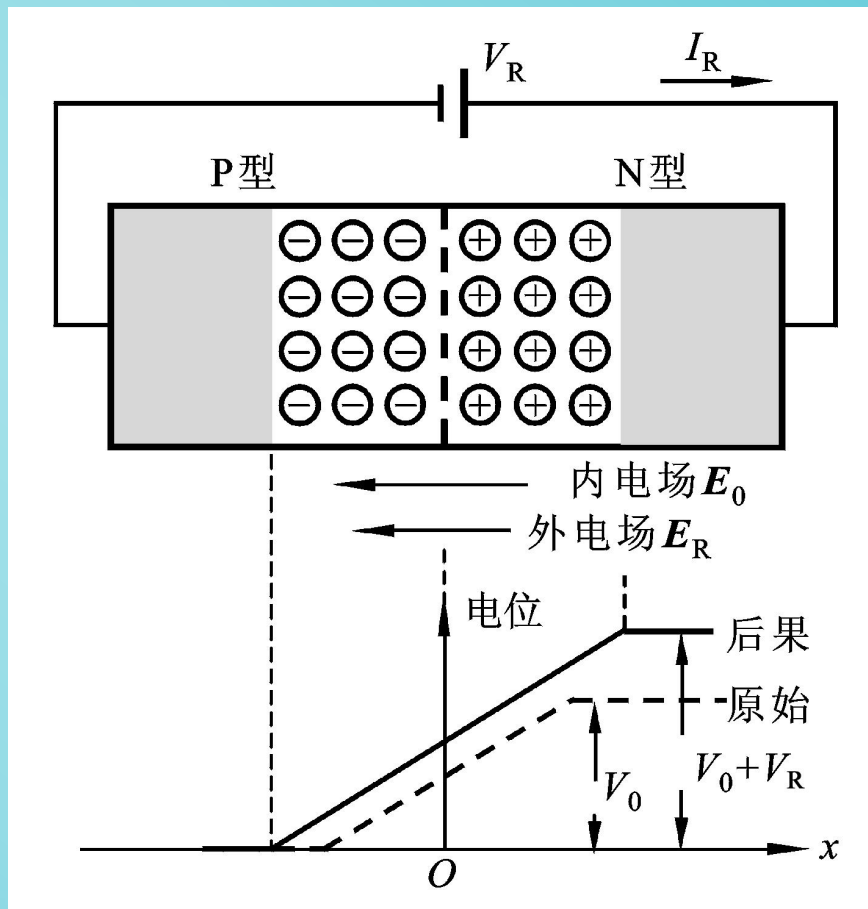
3.2.3 PN结的单向导电性

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

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**。





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 V - I 特性表达式

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

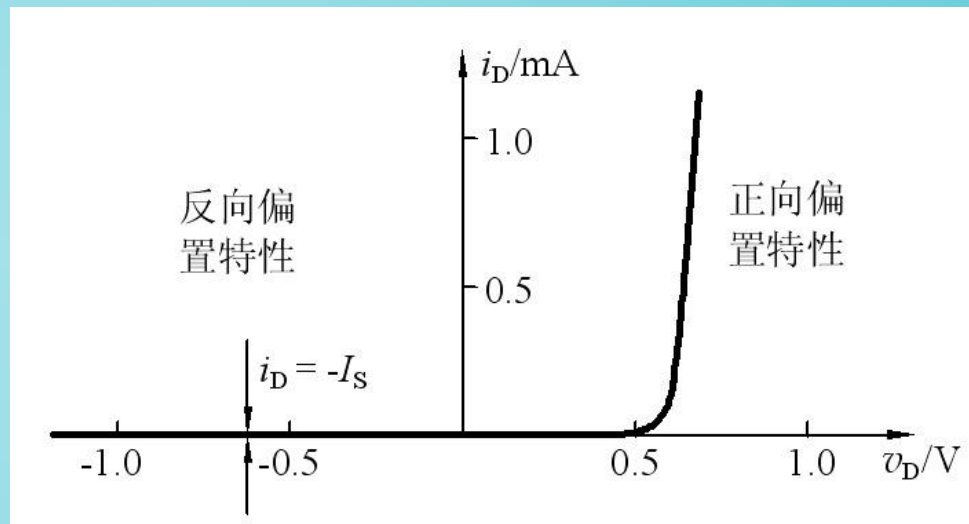
其中

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结的伏安特性

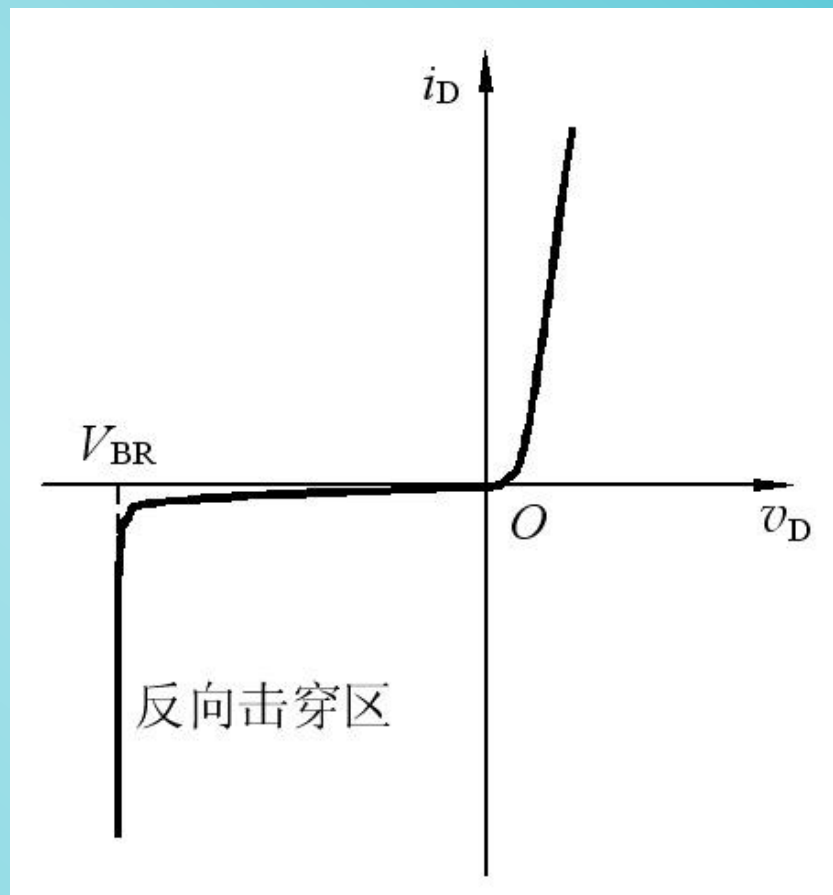
3.2.4 PN结的反向击穿

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

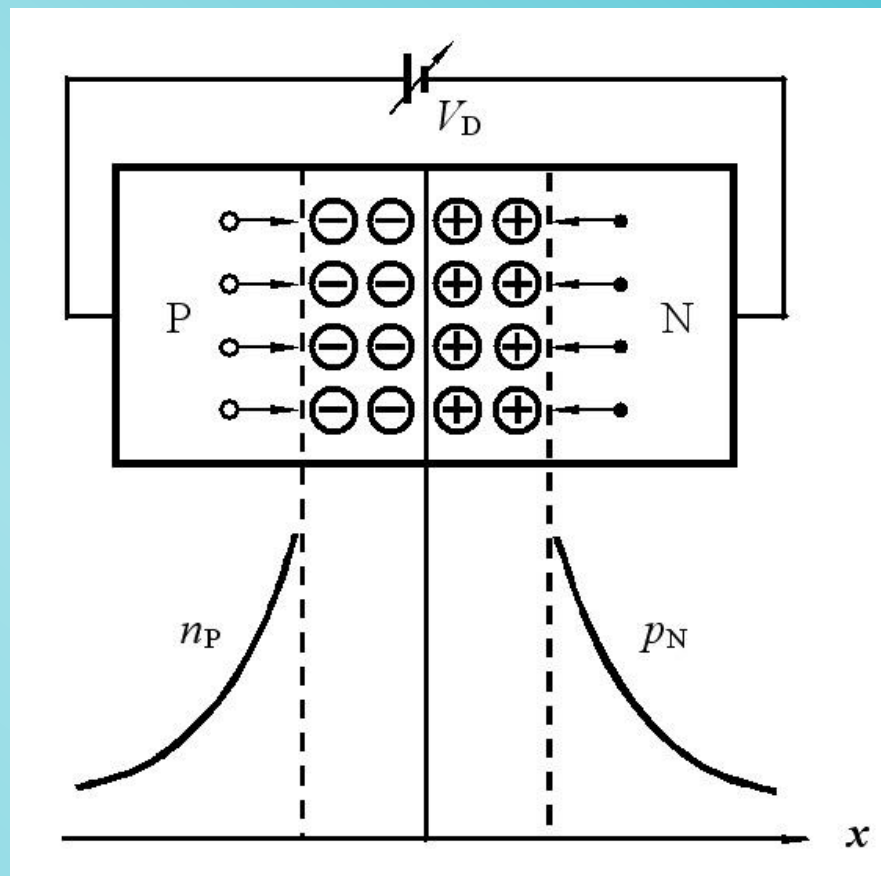


3.2.5 PN结的电容效应

(1) 扩散电容 C_D

当PN结处于正向偏置时，扩散运动使多数载流子穿过PN结，在对方区域PN结附近有高于正常情况时的电荷累积。存储电荷量的大小，取决于PN结上所加正向电压值的大小。离结越远，由于空穴与电子的复合，浓度将随之减小。

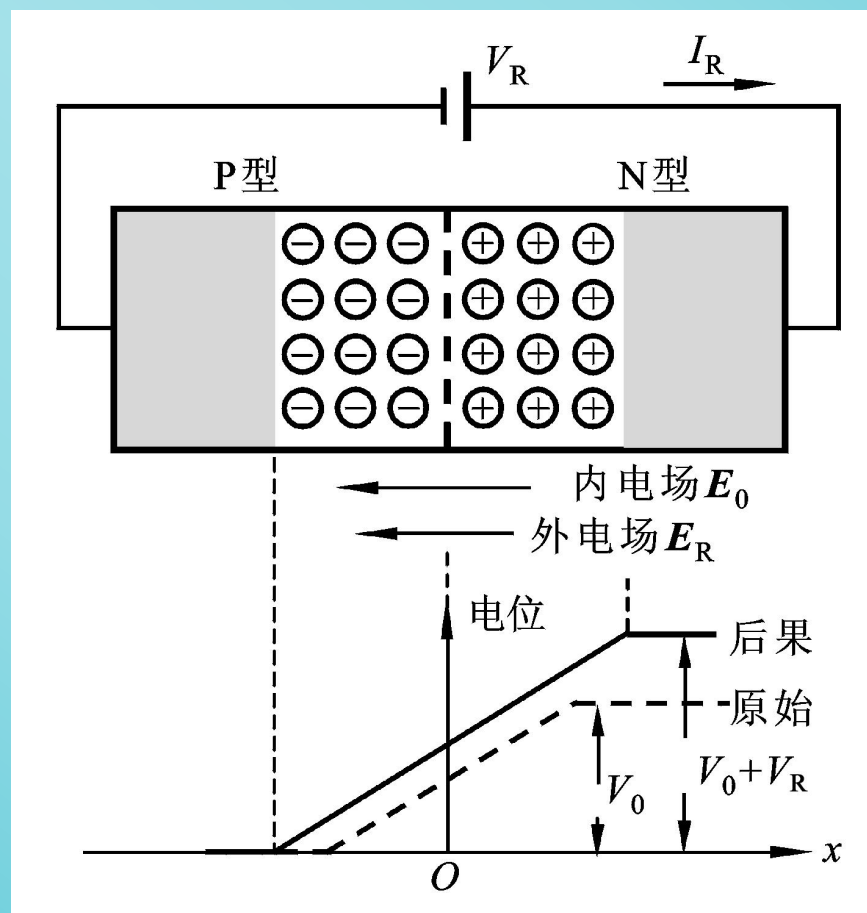
若外加正向电压有一增量 ΔV ，则相应的空穴（电子）扩散运动在结的附近产生一电荷增量 ΔQ ，二者之比 $\Delta Q/\Delta V$ 为扩散电容 C_D 。



扩散电容示意图

3.2.5 PN结的电容效应

(2) 势垒电容 C_B





3.3 二极管

3.3.1 二极管的结构

3.3.2 二极管的伏安特性

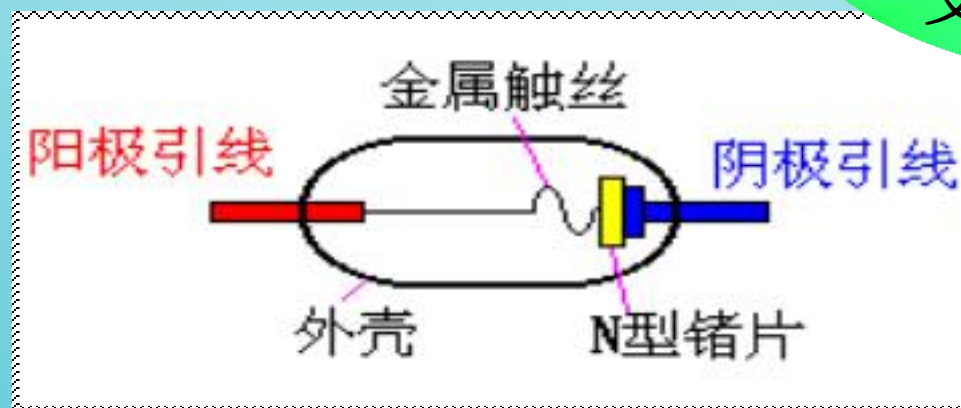
3.3.3 二极管的主要参数

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。

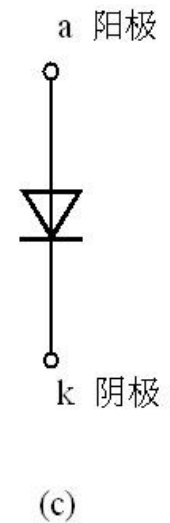
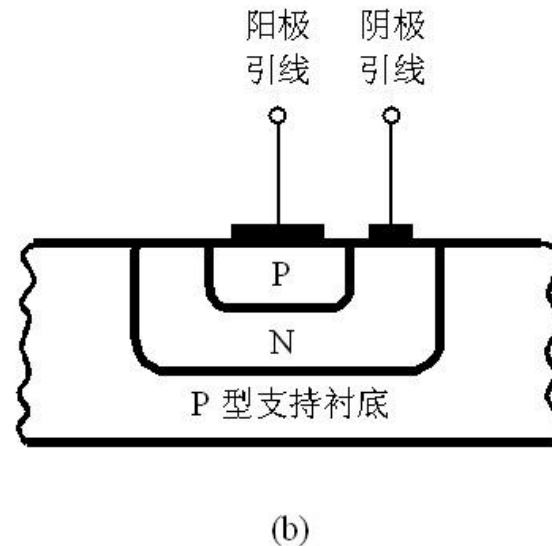
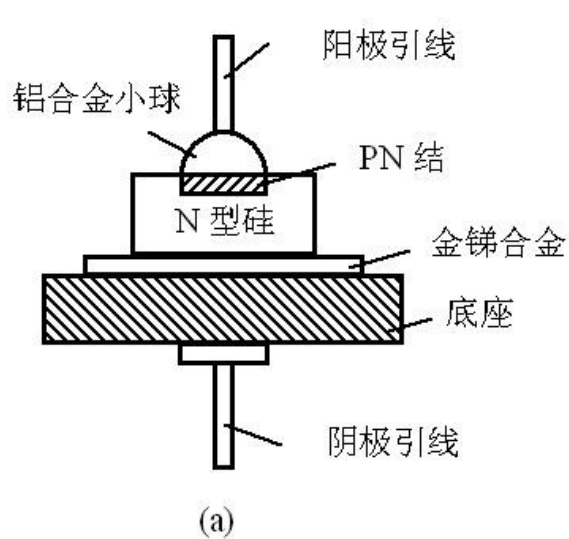


二极管的结构示意图

(a) 点接触型

(2) 面接触型二极管

PN结面积大，用于
大电流整流电路。

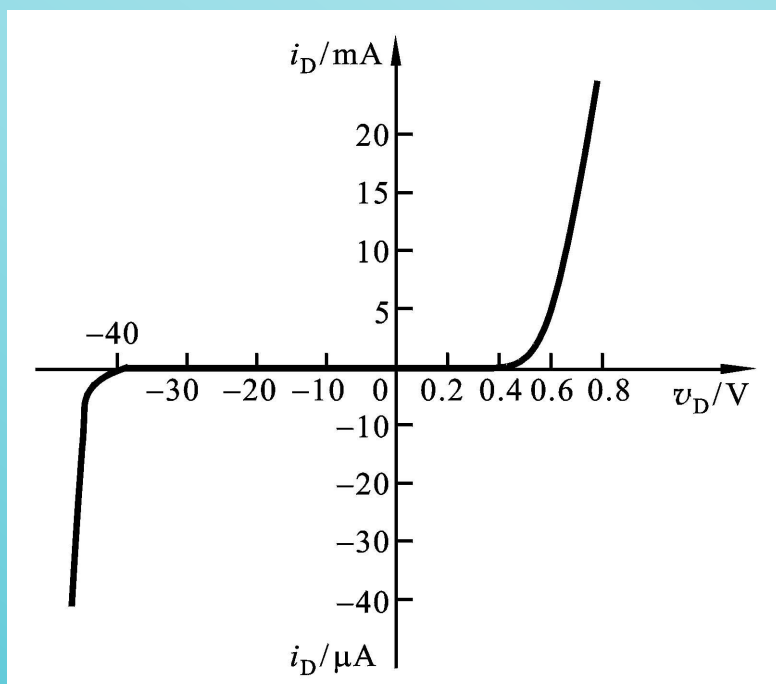


(a) 面接触型 (b) 集成电路中的平面型 (c) 代表符号

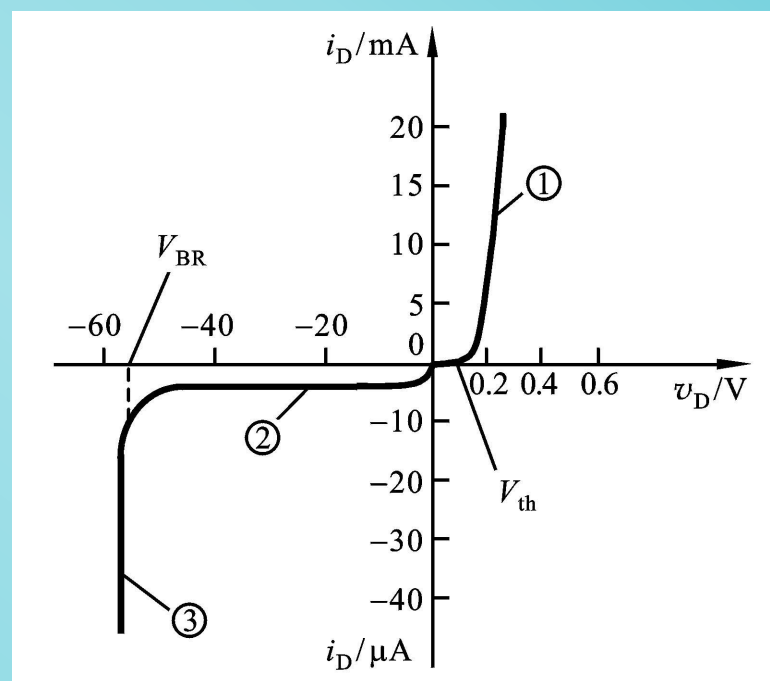
3.3.2 二极管的*V-I* 特性

二极管的*V-I* 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*V-I* 特性



锗二极管2AP15的*V-I* 特性

3.3.3 二极管的主要参数

- (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}



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

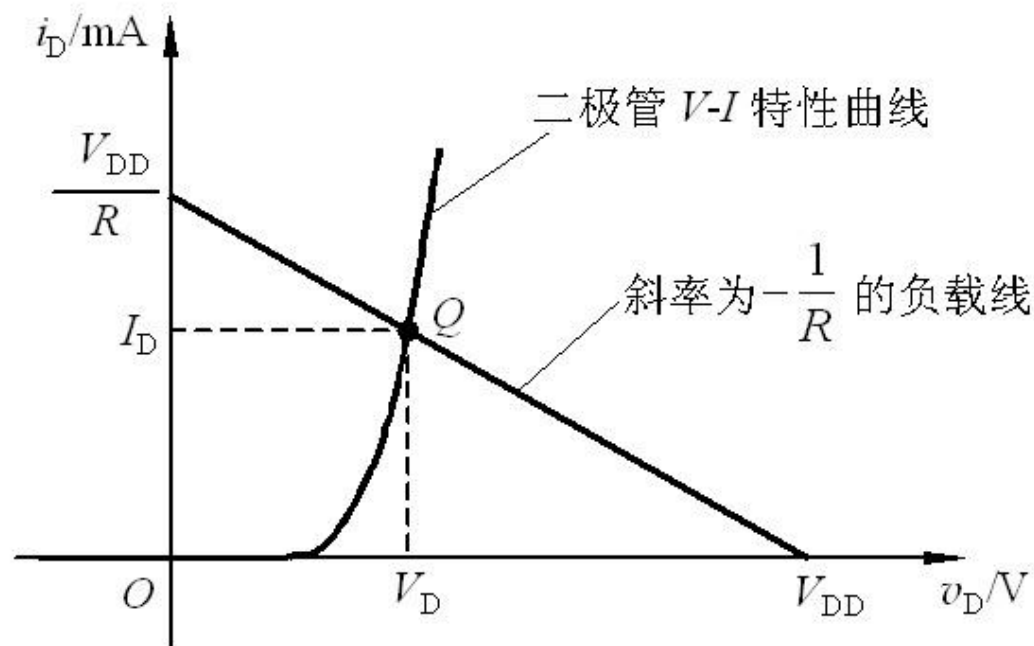
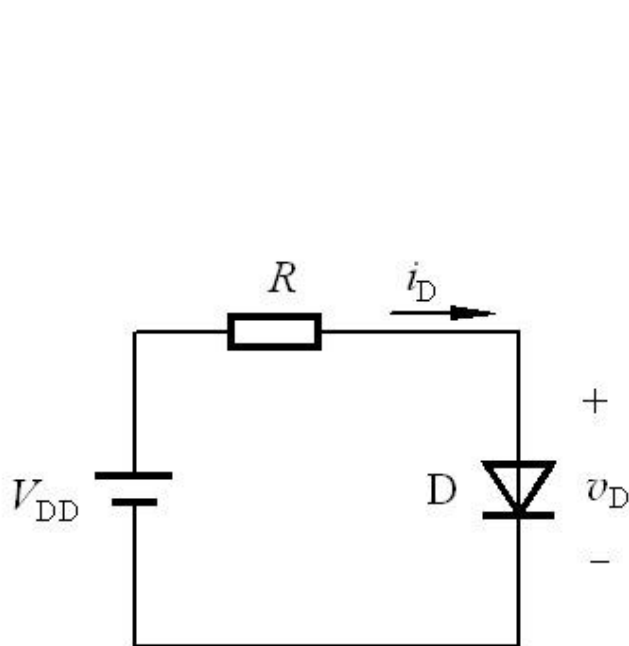
3.4.2 二极管电路的简化模型分析方法



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。

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**

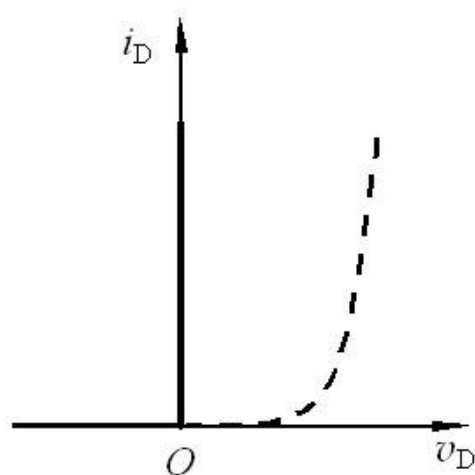
Q 的坐标值 (V_D, I_D) 即为所求。 Q 点称为电路的**工作点**

3.4.2 二极管电路的简化模型分析方法

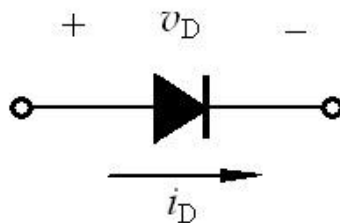
1. 二极管 V - I 特性的建模

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。

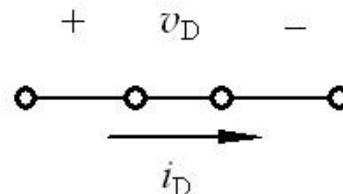
(1) 理想模型



(a)

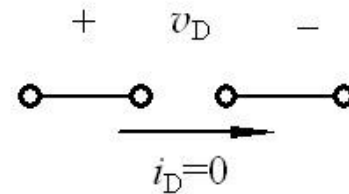


(b)



$$(i_D > 0, v_D = 0)$$

(c)



$$(v_D < 0, i_D = 0)$$

(d)

(a) V - I 特性

(b) 代表符号

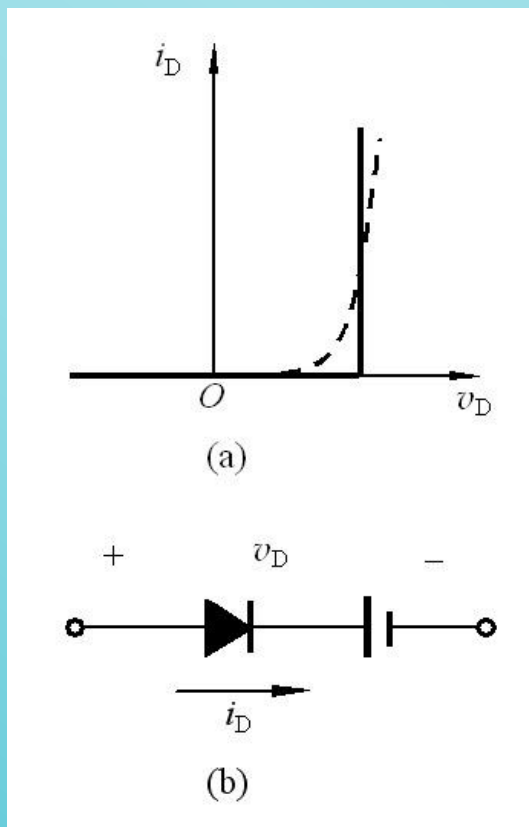
(c) 正向偏置时的电路模型

(d) 反向偏置时的电路模型

3.4.2 二极管电路的简化模型分析方法

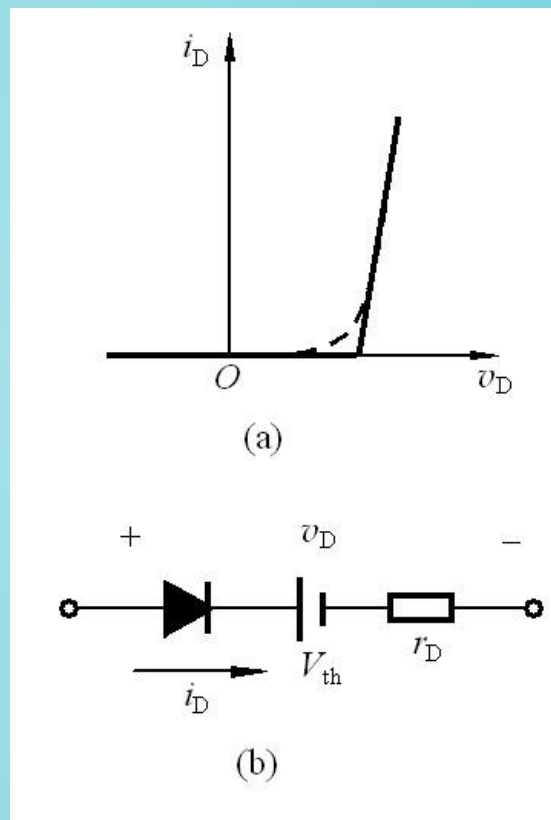
1. 二极管 $V-I$ 特性的建模

(2) 恒压降模型



(a) $V-I$ 特性 (b) 电路模型

(3) 折线模型



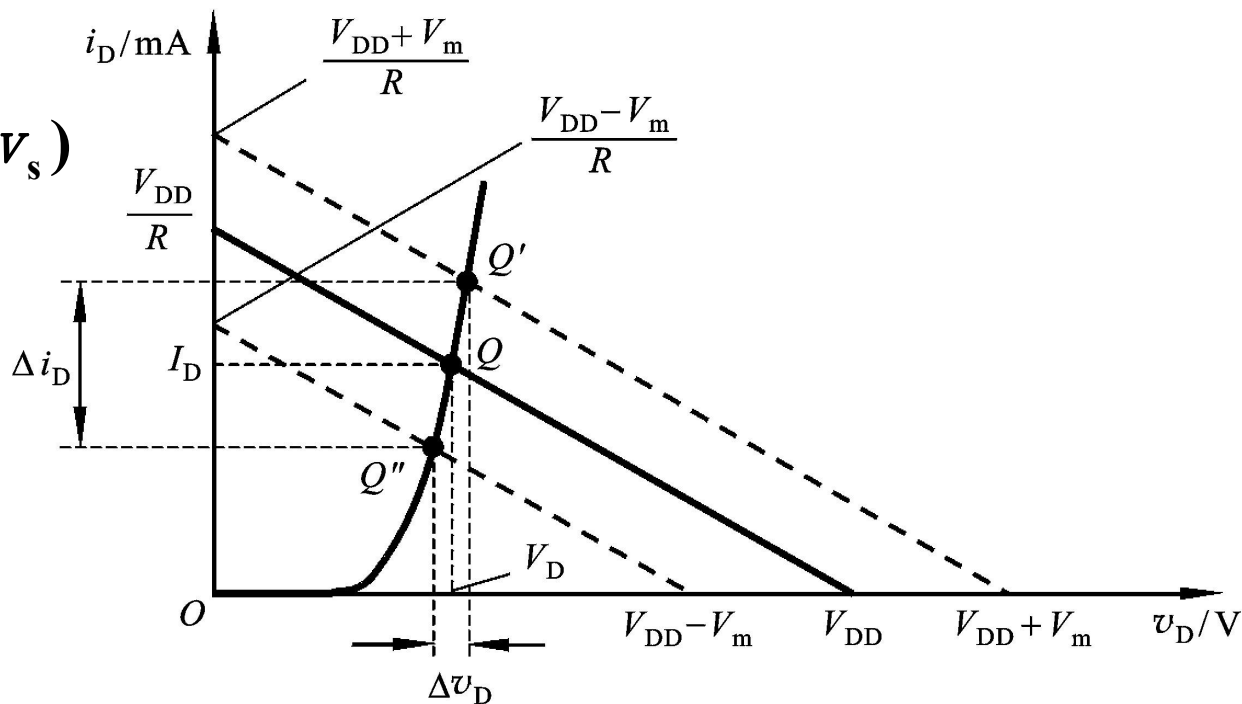
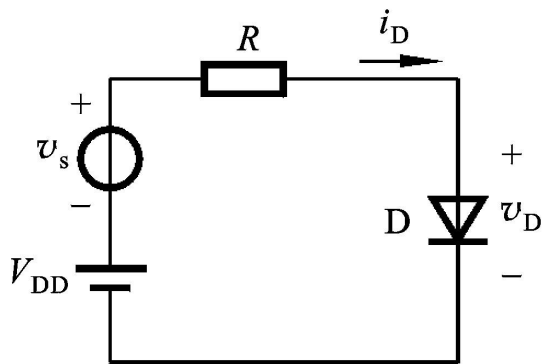
(a) $V-I$ 特性 (b) 电路模型

3.4.2 二极管电路的简化模型分析方法

1. 二极管 V - I 特性的建模

(4) 小信号模型

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



$v_s=0$ 时, Q 点称为静态工作点, 反映直流时的工作状态。

$v_s=V_m \sin \omega t$ 时 ($V_m \ll V_{DD}$), 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。

3.4.2 二极管电路的简化模型分析方法

1. 二极管 $V-I$ 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

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

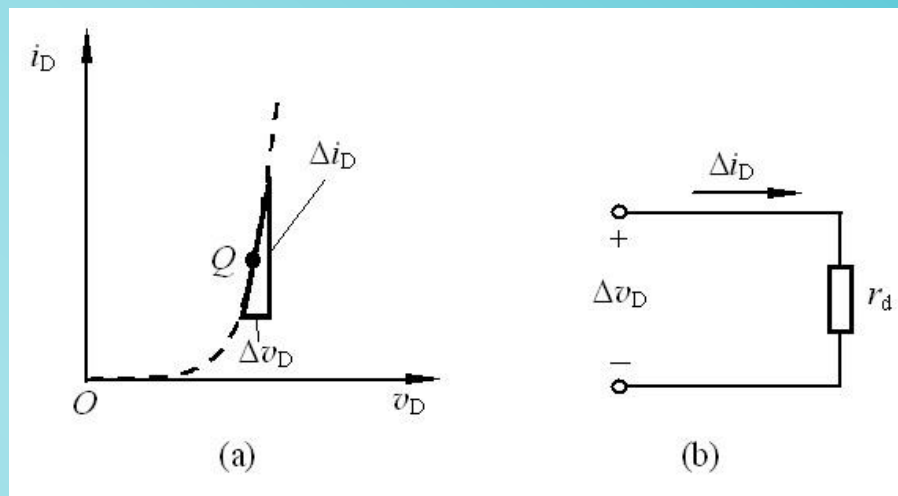
$$\text{根据 } i_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1)$$

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 ($T=300\text{K}$)

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

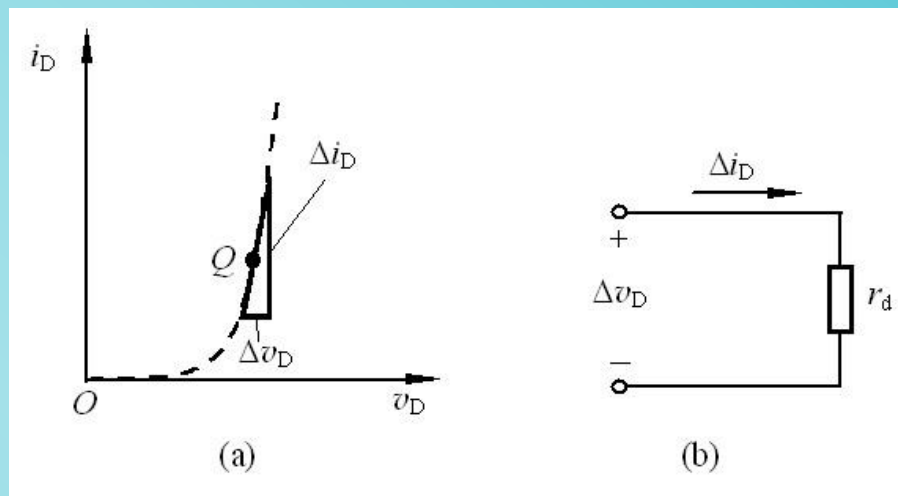


(a) $V-I$ 特性 (b) 电路模型

3.4.2 二极管电路的简化模型分析方法

1. 二极管 $V-I$ 特性的建模

(4) 小信号模型



(a) $V-I$ 特性 (b) 电路模型

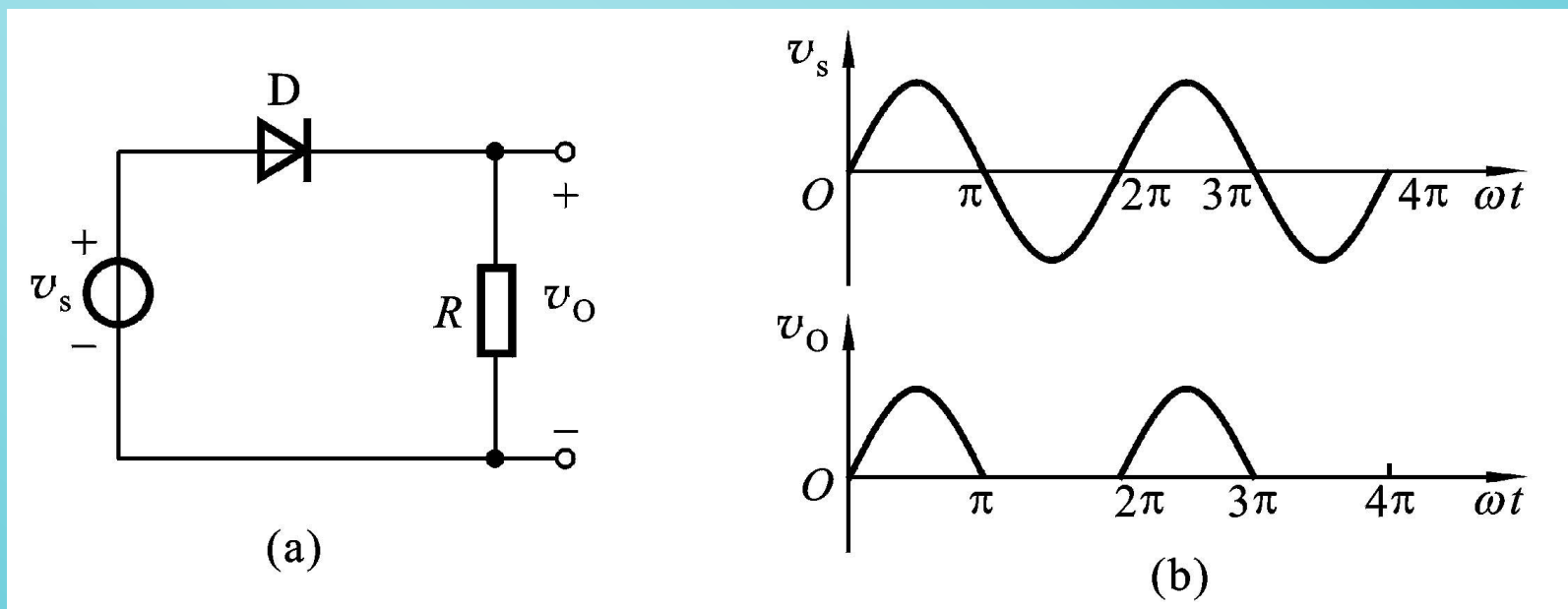
特别注意:

- 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



(a) 电路图

(b) v_s 和 v_O 的波形

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

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

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

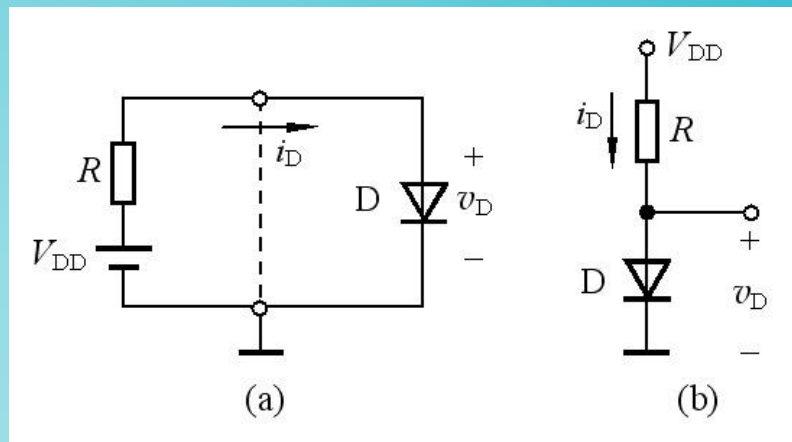
折线模型

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

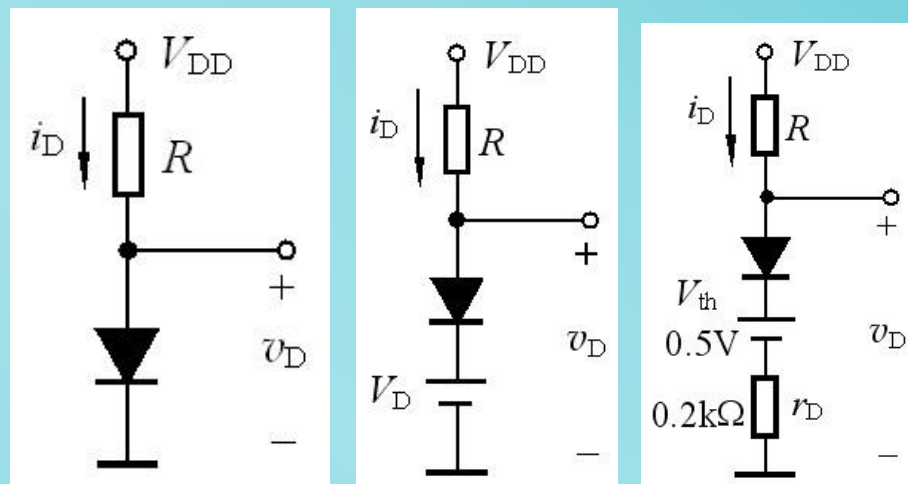
$$\text{设 } r_D = 0.2\text{k}\Omega$$

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

当 $V_{DD}=1\text{V}$ 时, (自看)



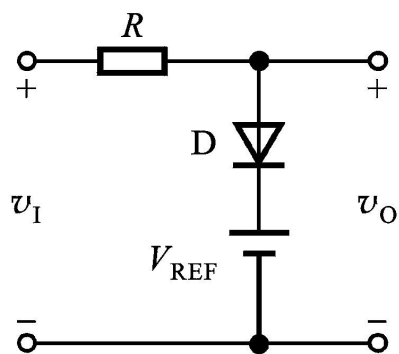
(a) 简单二极管电路 (b) 习惯画法



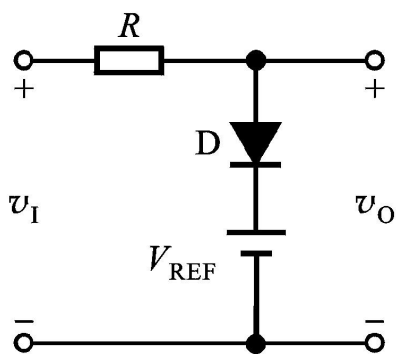
2. 模型分析法应用举例

(3) 限幅电路

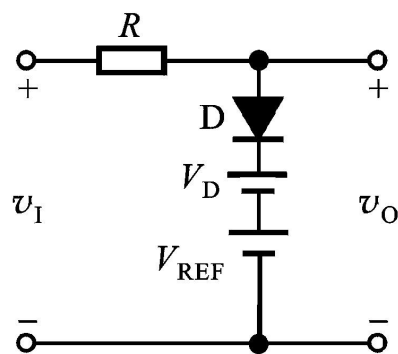
电路如图， $R = 1\text{k}\Omega$ ， $V_{\text{REF}} = 3\text{V}$ ，二极管为硅二极管。分别用理想模型和恒压降模型求解，当 $v_I = 6\sin\omega t\text{ V}$ 时，绘出相应的输出电压 v_O 的波形。



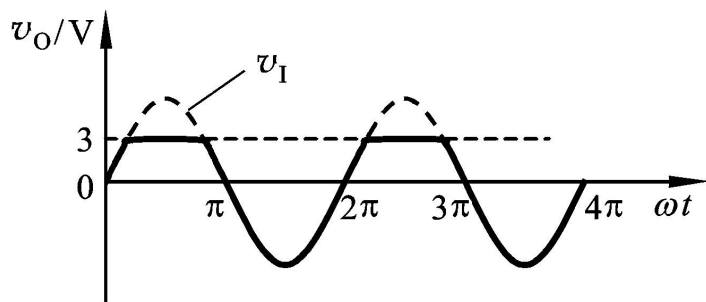
(a)



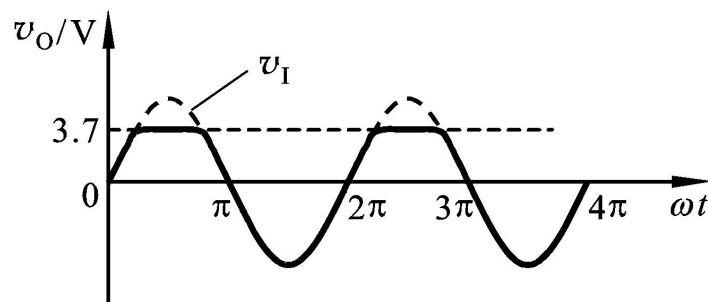
(b)



(c)



(d)



(e)

2. 模型分析法应用举例

(4) 开关电路

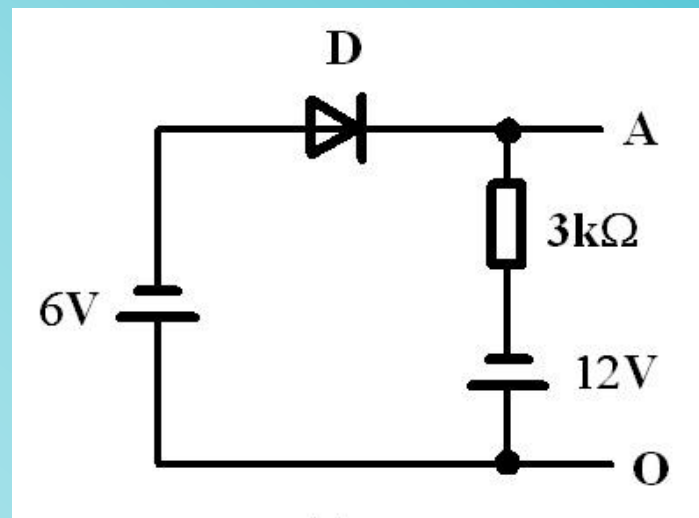
电路如图所示，求AO的电压值

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。



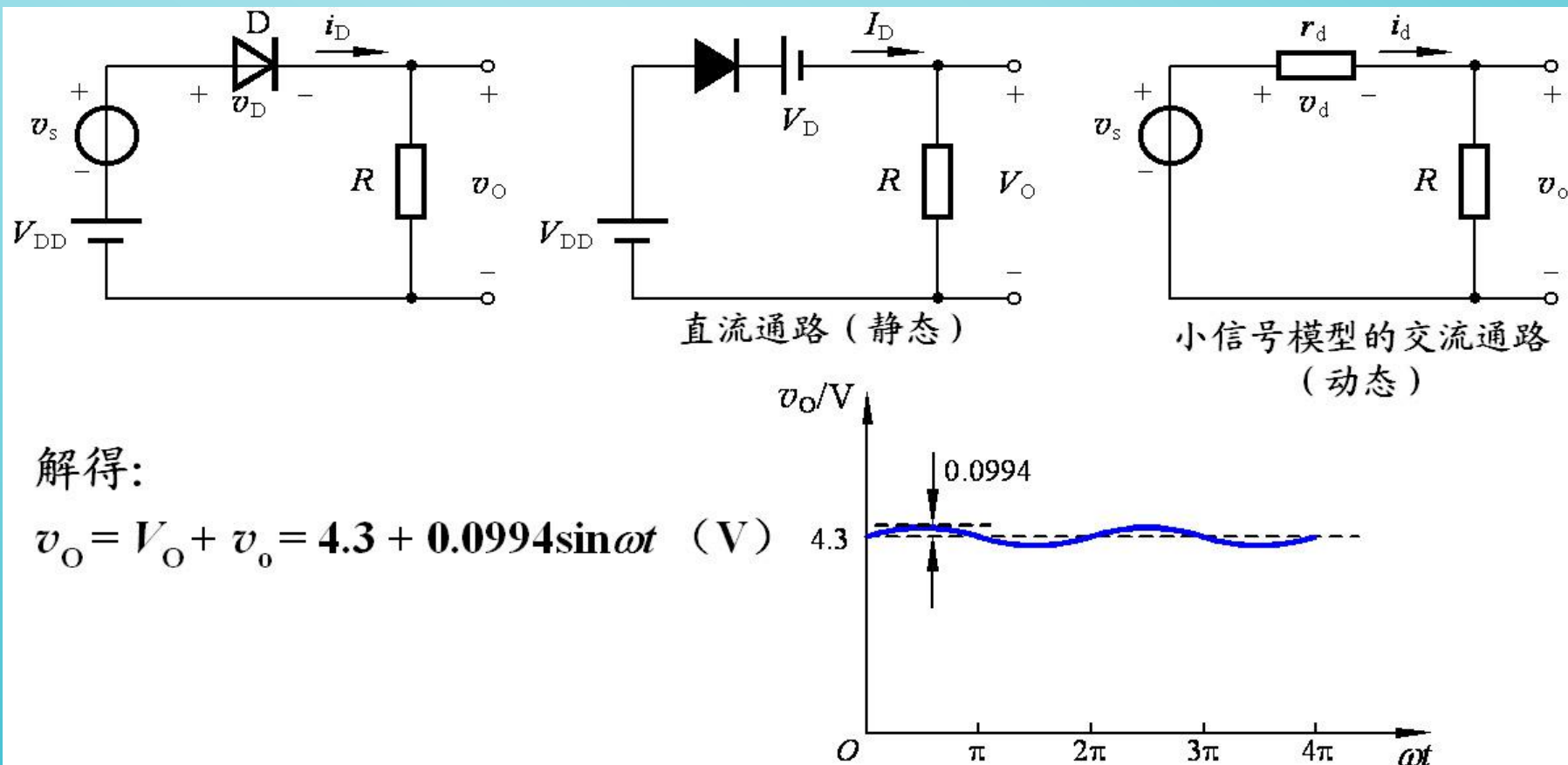
2. 模型分析法应用举例

(6) 小信号工作情况分析

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。

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。





3.5 特殊二极管

3.5.1 齐纳二极管(稳压二极管)

3.5.2 变容二极管

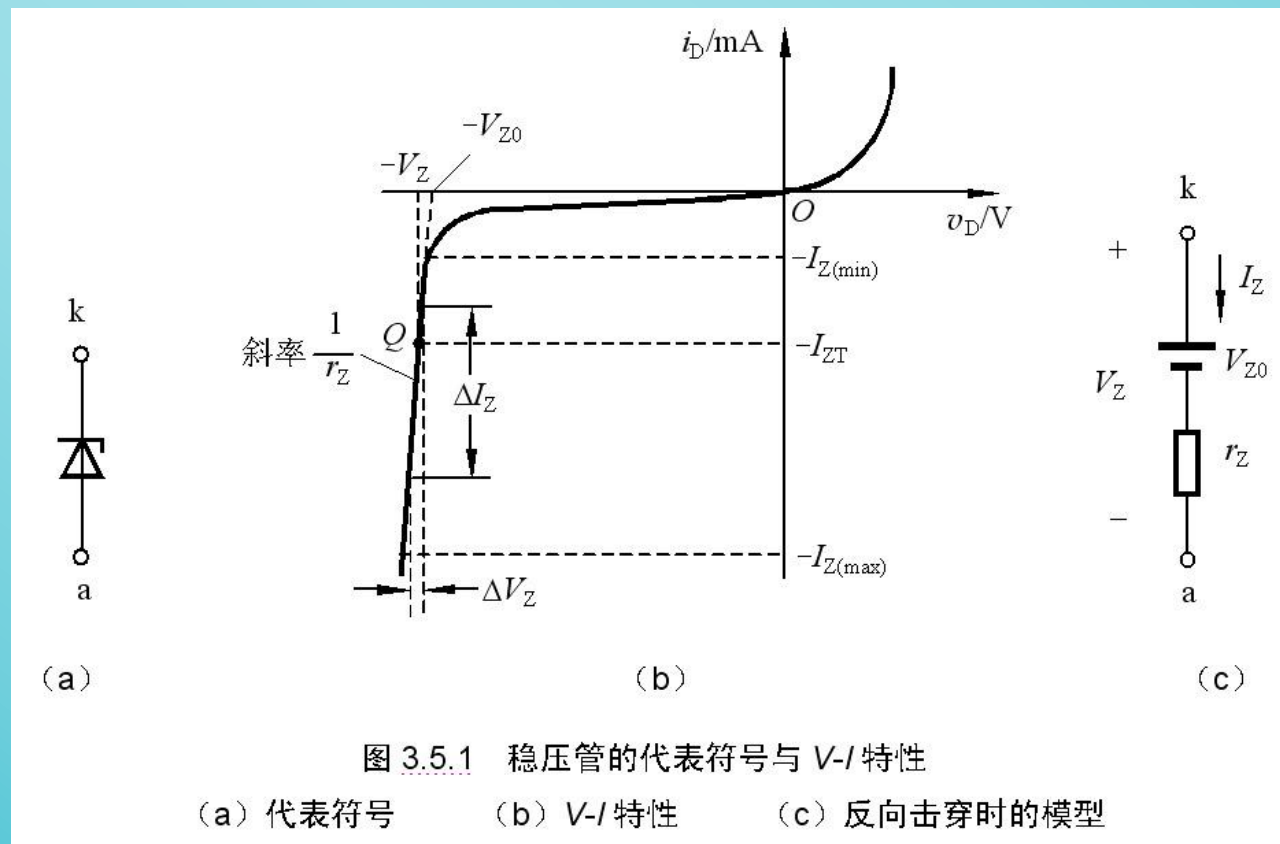
3.5.3 肖特基二极管

3.5.4 光电子器件

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。



3.5.1 齐纳二极管

2. 稳压二极管主要参数

(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。

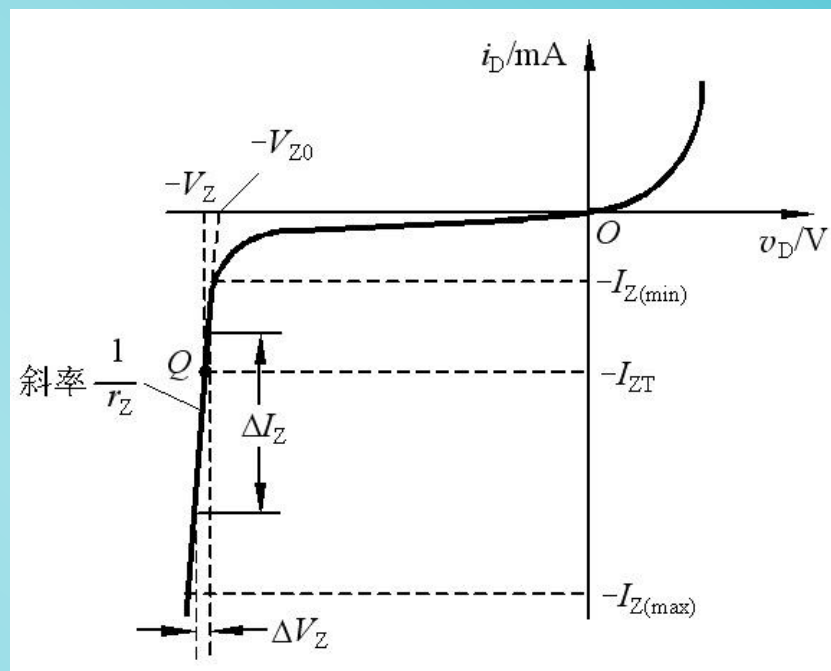
(2) 动态电阻 r_Z

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

(3) 最大耗散功率 P_{ZM}

(4) 最大稳定工作电流 I_{Zmax} 和最小稳定工作电流 I_{Zmin}

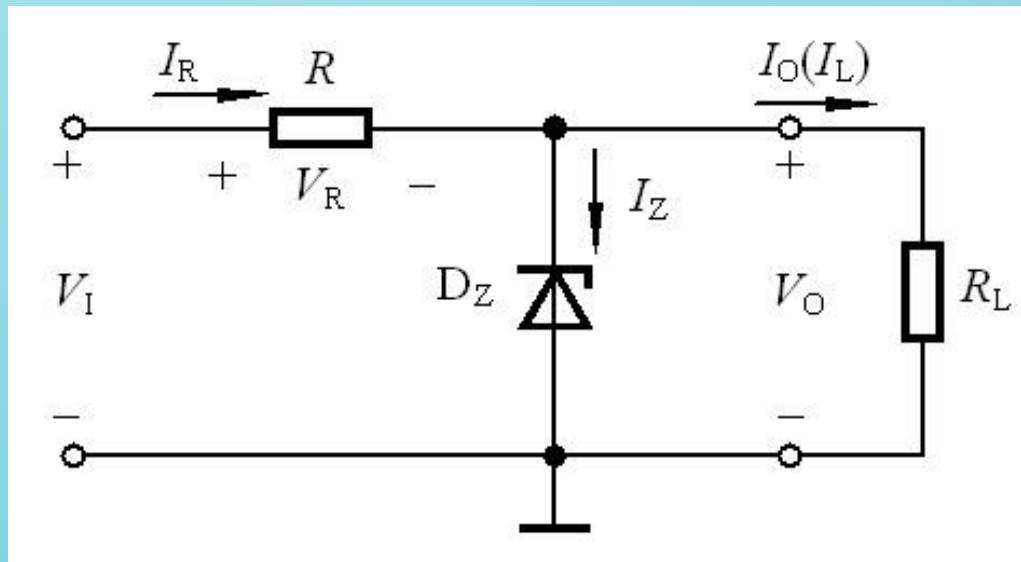
(5) 稳定电压温度系数—— α_{V_Z}



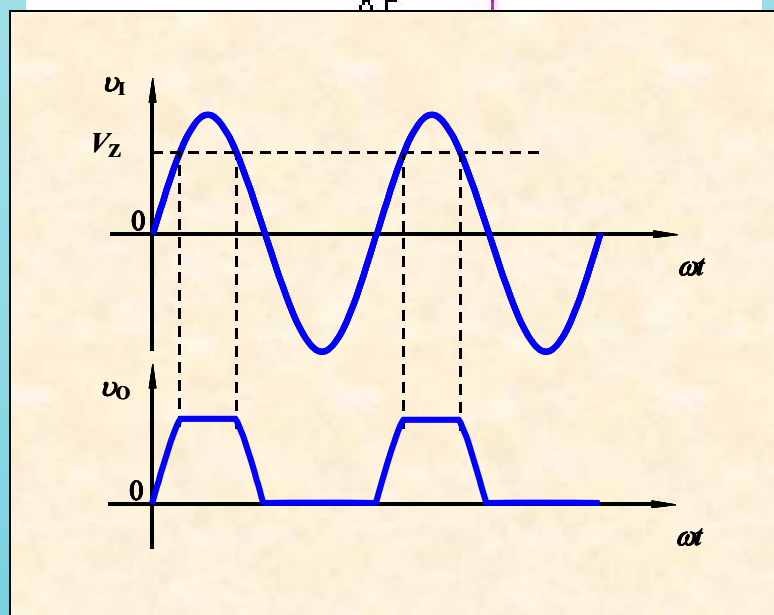
3.5.1 齐纳二极管

3. 稳压电路

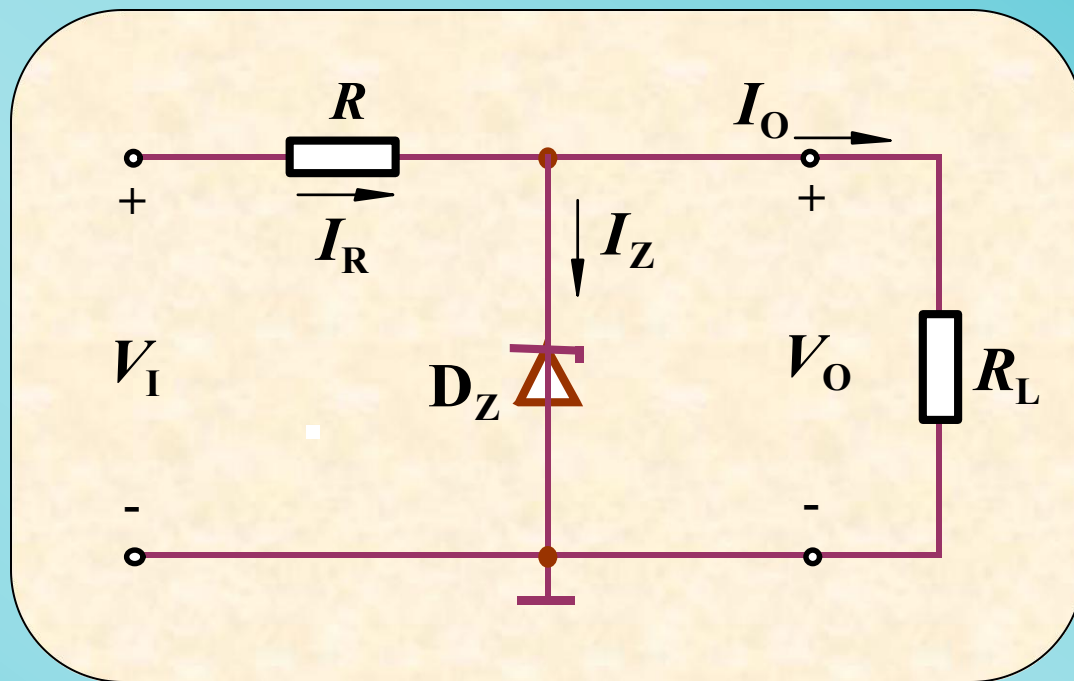
正常稳压时 $V_O = V_Z$



稳压二极管



$$= V_Z$$



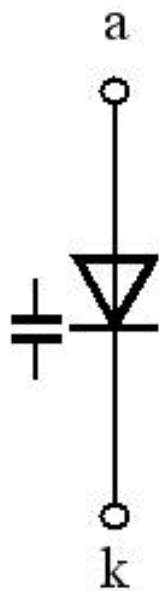
稳压条件是什么？

$$I_{Zmin} \leq I_Z \leq I_{Zmax}$$

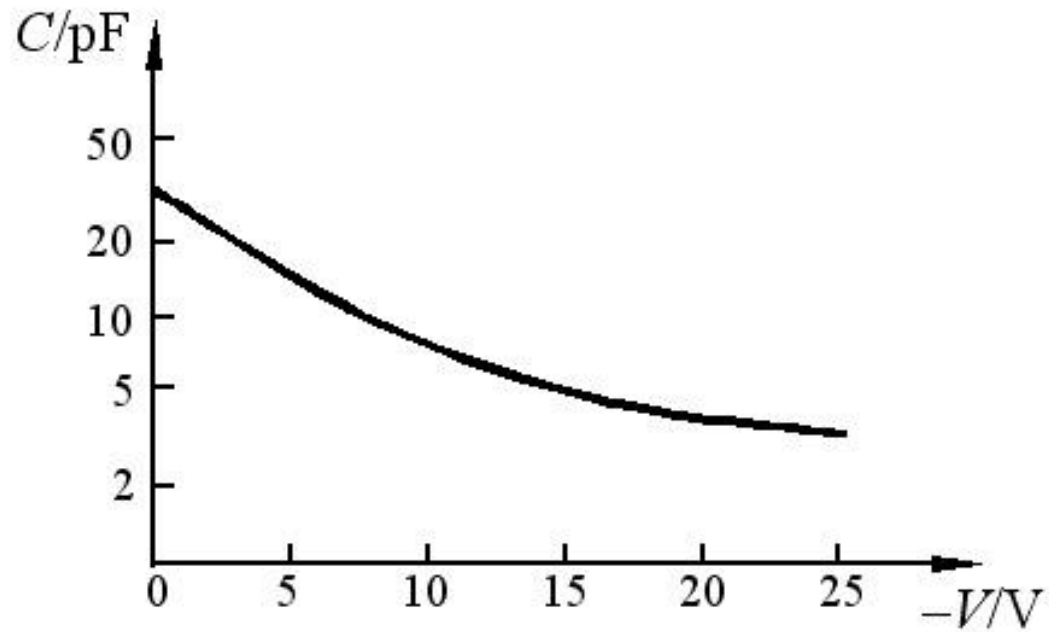
不加R可以吗？

上述电路 V_1 为正弦波，且幅值大于 V_Z ， V_0 的波形是怎样的？

3.5.2 变容二极管



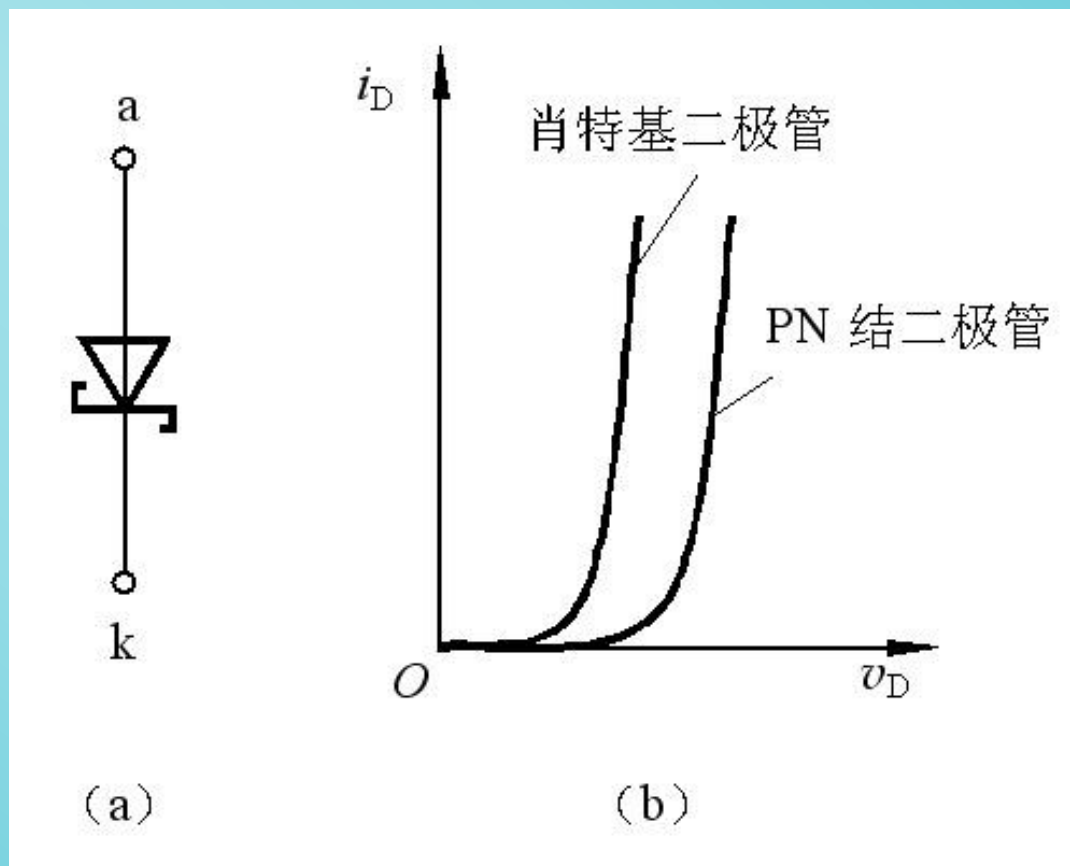
(a)



(b)

(a) 符号 (b) 结电容与电压的关系 (纵坐标为对数刻度)

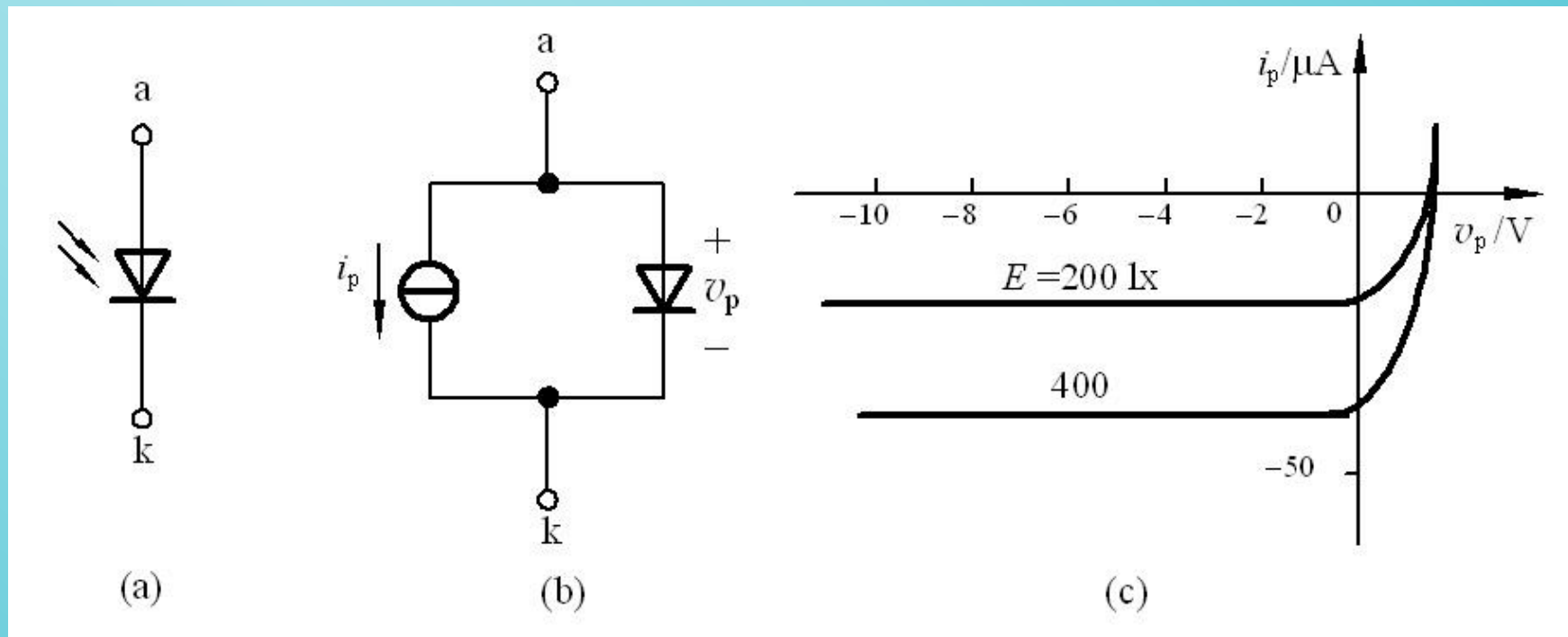
3.5.3 肖特基二极管



(a) 符号 (b) 正向 V - I 特性

3.5.4 光电子器件

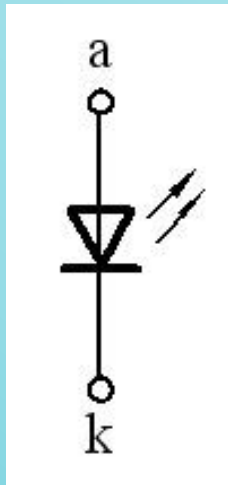
1. 光电二极管



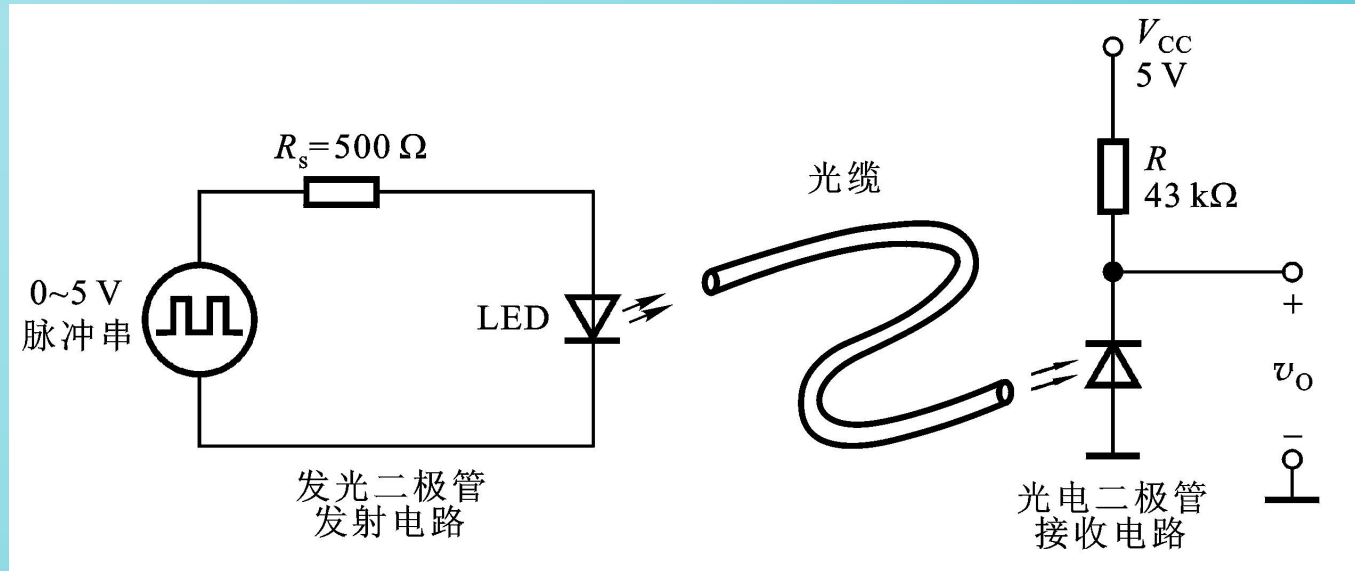
(a) 符号 (b) 电路模型 (c) 特性曲线

3.5.4 光电子器件

2. 发光二极管



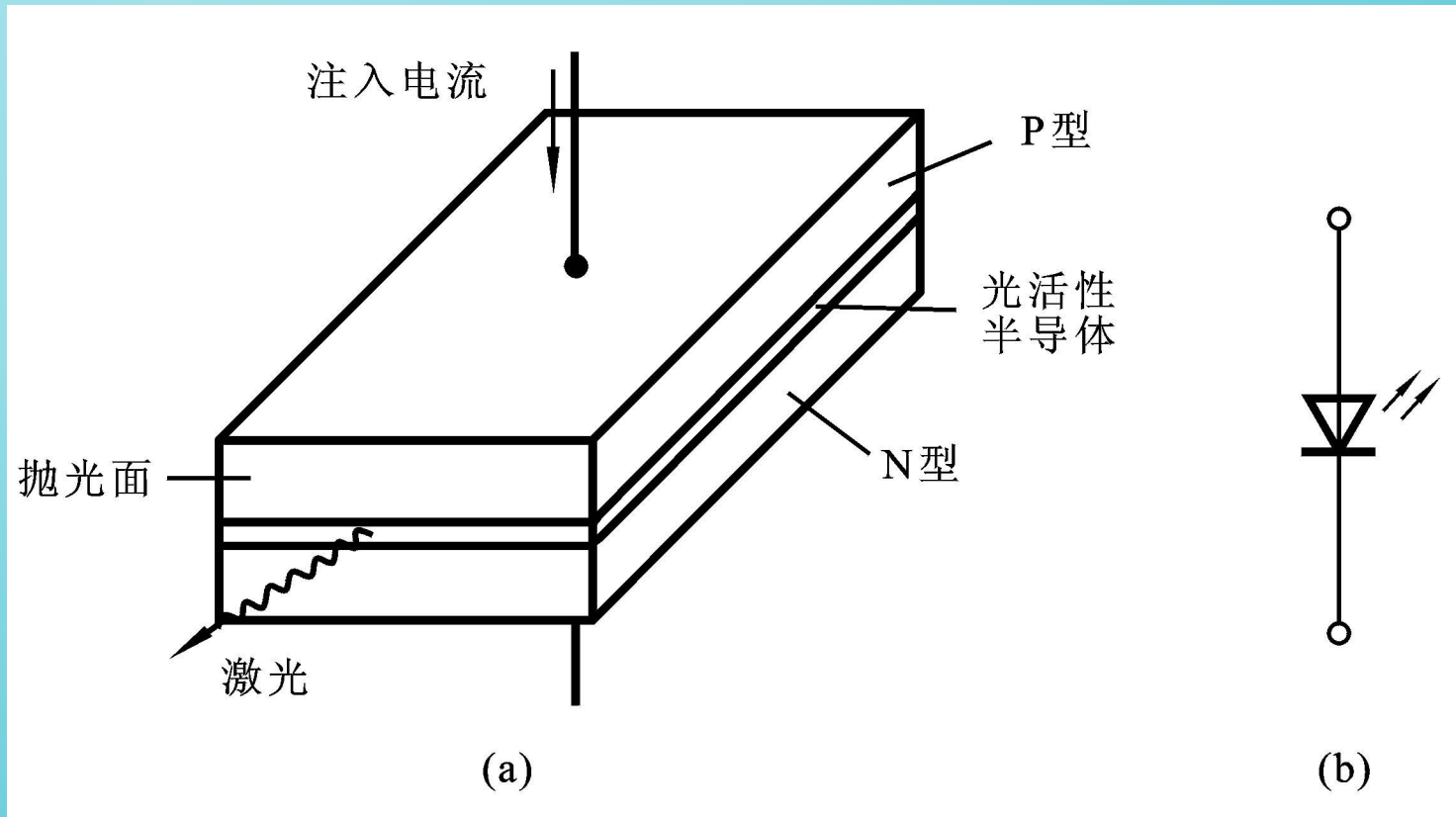
符号



光电传输系统

3.5.4 光电子器件

3. 激光二极管



(a) 物理结构 (b) 符号