

第7章 二极管

二极管的结构和工作原理

二极管应用电路的分析

7.1 二极管的结构和工作原理

7.1.1 本征半导体、掺杂半导体和PN结

一、本征半导体和本征激发

导体——铁、铝、铜等金属元素等低价元素，其最外层电子在外电场作用下很容易产生定向移动，形成电流。

绝缘体——惰性气体、橡胶等，其原子的最外层电子受原子核的束缚力很强，只有在外电场强到一定程度时才可能导电。

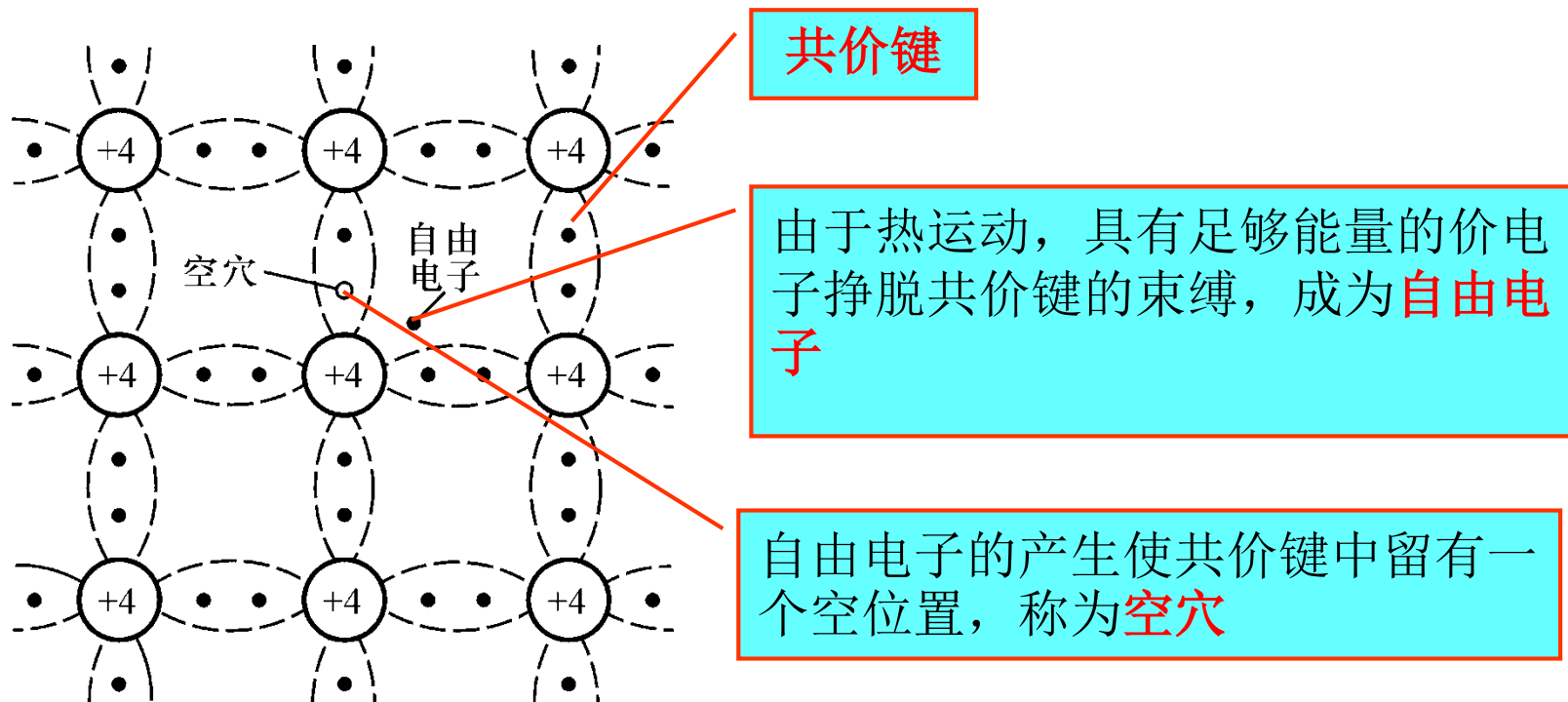
半导体——硅（Si）、锗（Ge），均为四价元素，它们原子的最外层电子受原子核的束缚力介于导体与绝缘体之间。

本征半导体是纯净的晶体结构的半导体。

无杂质

稳定的结构

1、本征共价键结构



自由电子与空穴相碰同时消失，称为复合。

动态平衡

一定温度下，自由电子与空穴对的浓度一定；温度升高，热运动加剧，挣脱共价键的电子增多，自由电子与空穴对的浓度加大。

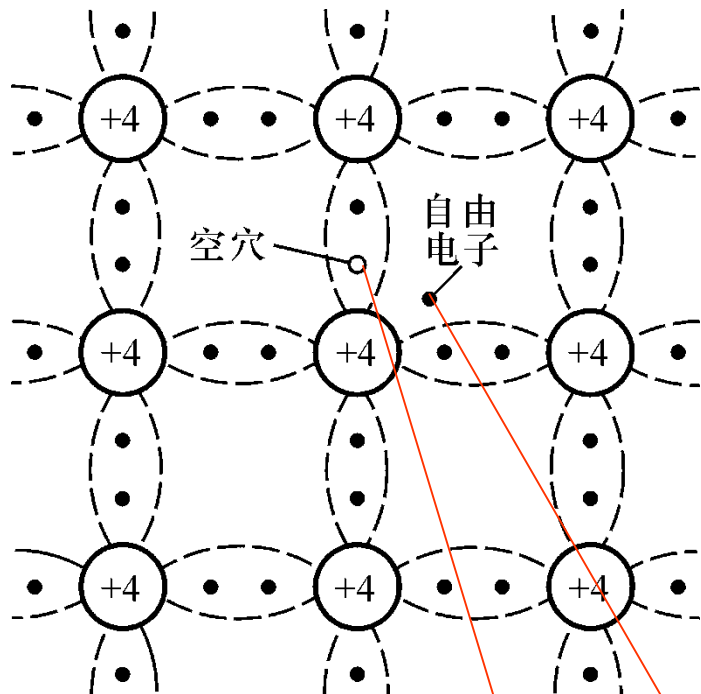
2、本征半导体中的两种载流子

运载电荷的粒子称为**载流子**。

外加电场时，带负电的自由电子和带正电的空穴均参与导电，且运动方向相反。由于载流子数目很少，故导电性很差。

热力学温度 0 K 时不导电。

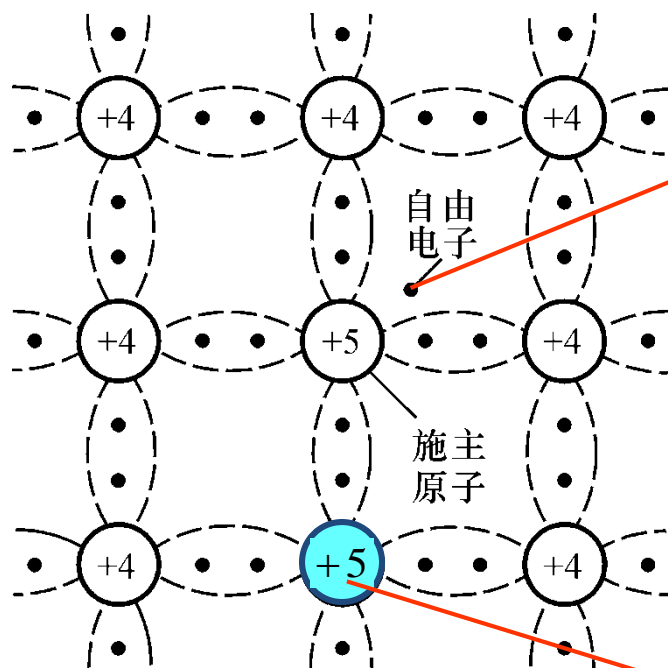
温度升高，热运动加剧，载流子浓度增大，导电性增强。



两种载流子

二、掺杂半导体

在本征半导体中，掺入一定量的杂质元素，就成为掺杂半导体。

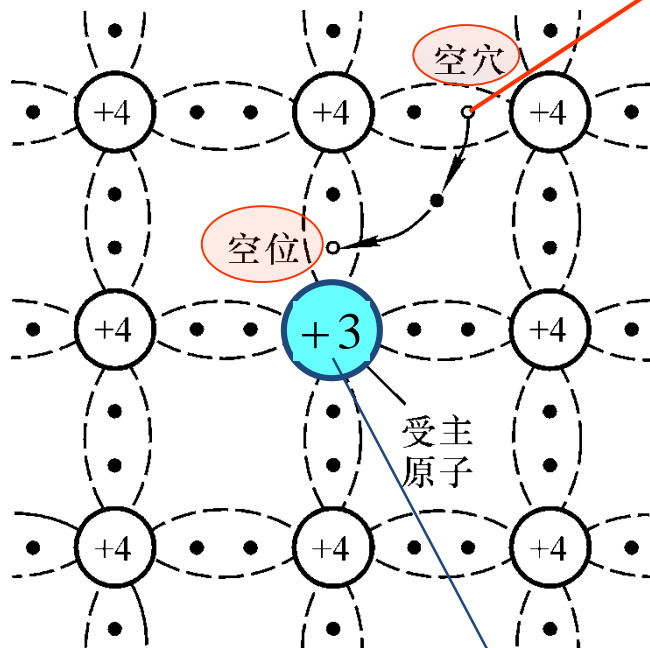


多数载流子

杂质半导体主要靠多数载流子导电。掺入杂质越多，多子浓度越高，导电性越强，实现导电性可控。

磷 (P) (施主杂质)

N型半导体



P型半导体

多数载流子

P型半导体主要靠空穴导电，掺入杂质越多，空穴浓度越高，导电性越强，

在杂质半导体中，温度变化时

- 载流子的数目变化吗？
- 少子与多子变化的数目相同吗？

硼 (B)

(受主杂质)

1、载流子浓度

本征硅在热激发状态下，电子数等于空穴数。

$$p = n = n_i \quad n_i^2 = BT^3 e^{-EG/kT}$$

对于掺杂半导体，常温下多数载流子数近似为掺杂浓度，且满足：

$$n_{n0} p_{n0} = n_i^2 \quad \text{或} \quad n_{p0} p_{p0} = n_i^2$$

N型半导体

$$n_{n0} = N_D$$

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

P型半导体

$$p_{p0} = N_A$$

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

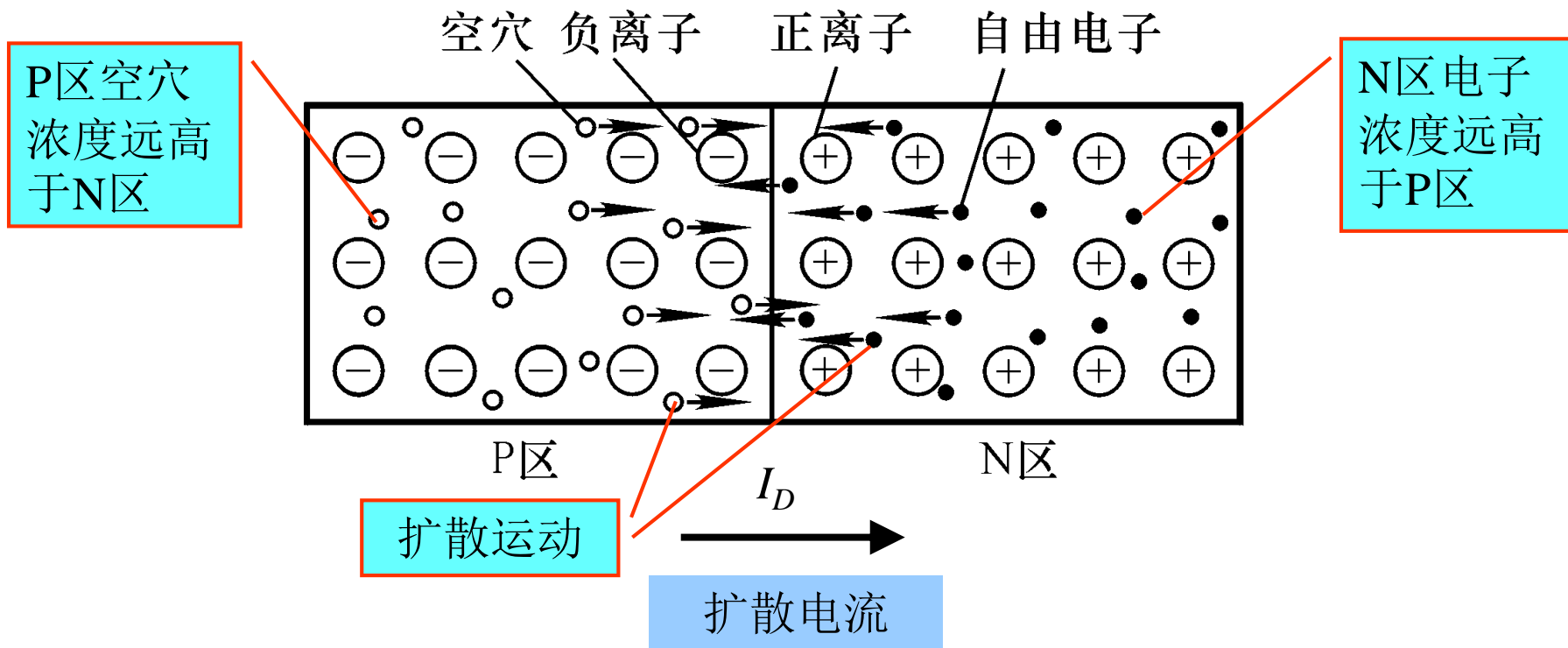
2、扩散和漂移

载流子在外电场作用下做定向移动，称为**漂移**（drift），由此形成的电流叫**漂移电流**。

载流子在浓度梯度的作用下做定向移动，称为**扩散**（diffusion），由此形成的电流称为**扩散电流**。

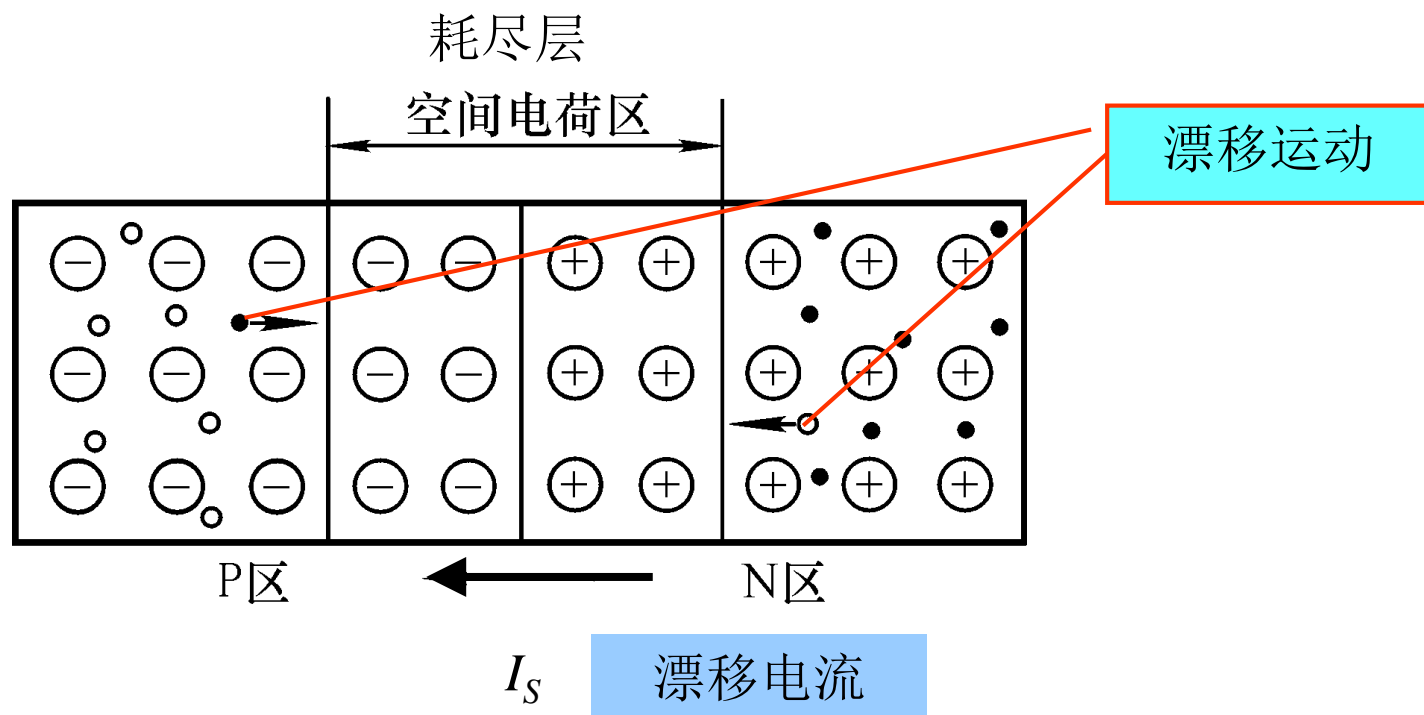
三、PN结

1、PN结的形成



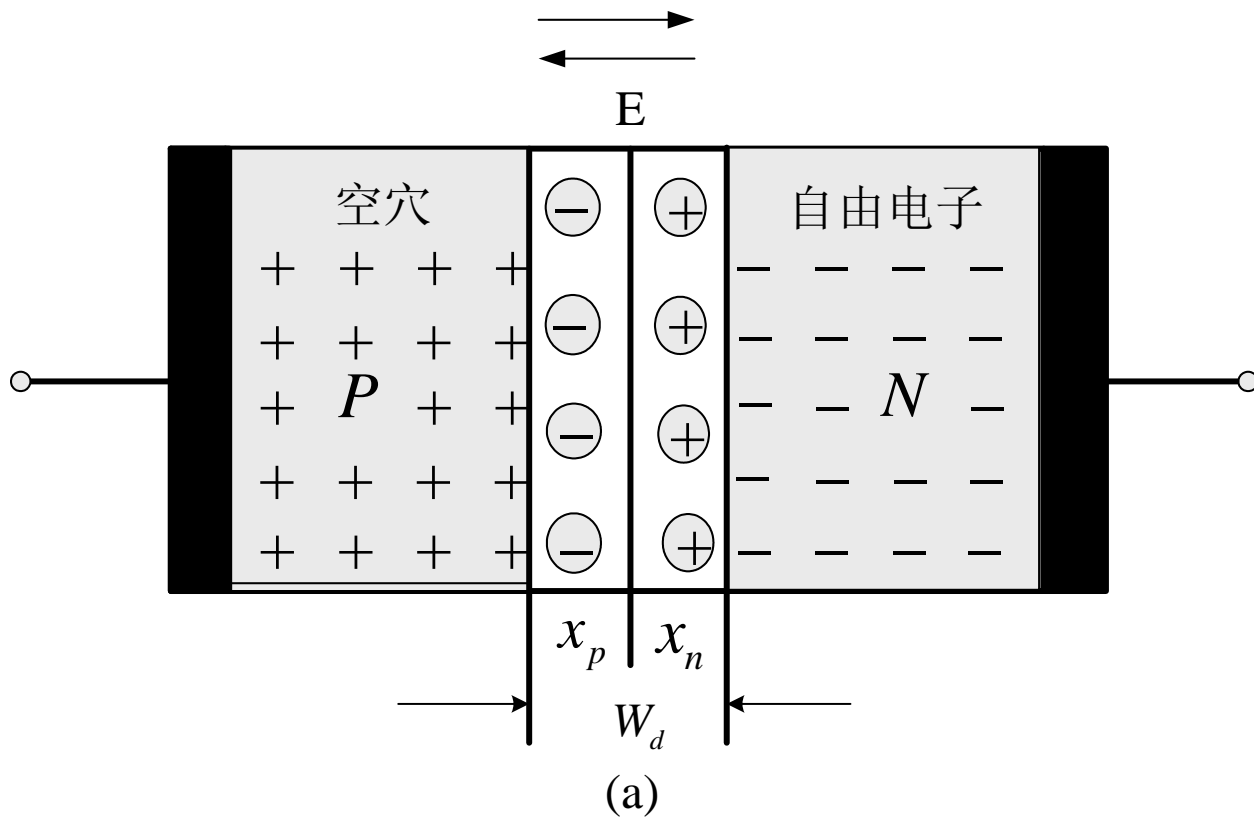
扩散运动使靠近接触面P区的空穴浓度降低、靠近接触面N区的自由电子浓度降低，产生内电场。

由于扩散运动使P区与N区的交界面缺少多数载流子，形成内电场，从而阻止扩散运动的进行。内电场使空穴从N区向P区运动，自由电子从P区向N区运动。



参与扩散运动和漂移运动的载流子数目相同，达到动态平衡，就形成了PN结。

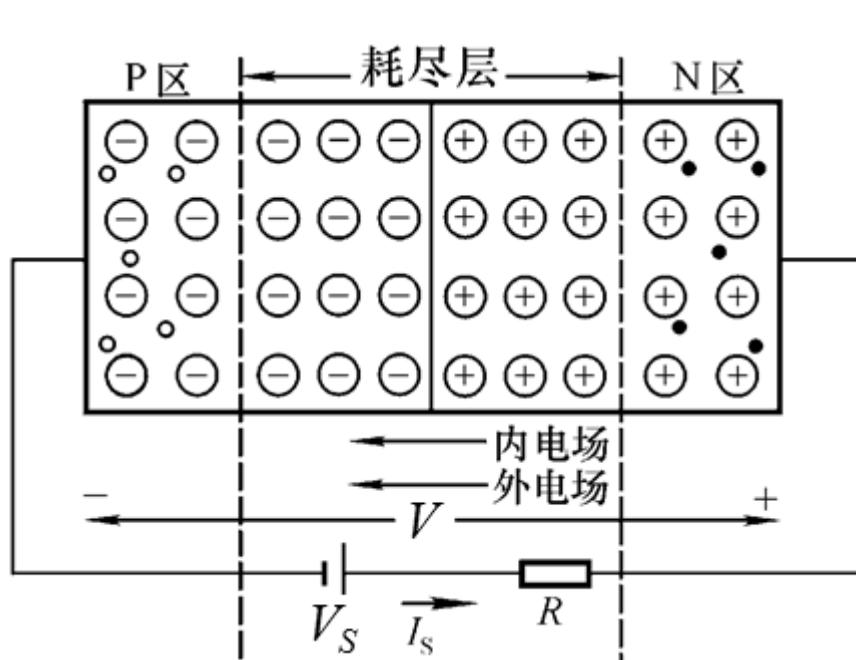
2、耗尽层的宽度



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

耗尽层任一边的宽度与该边掺杂浓度成反比。

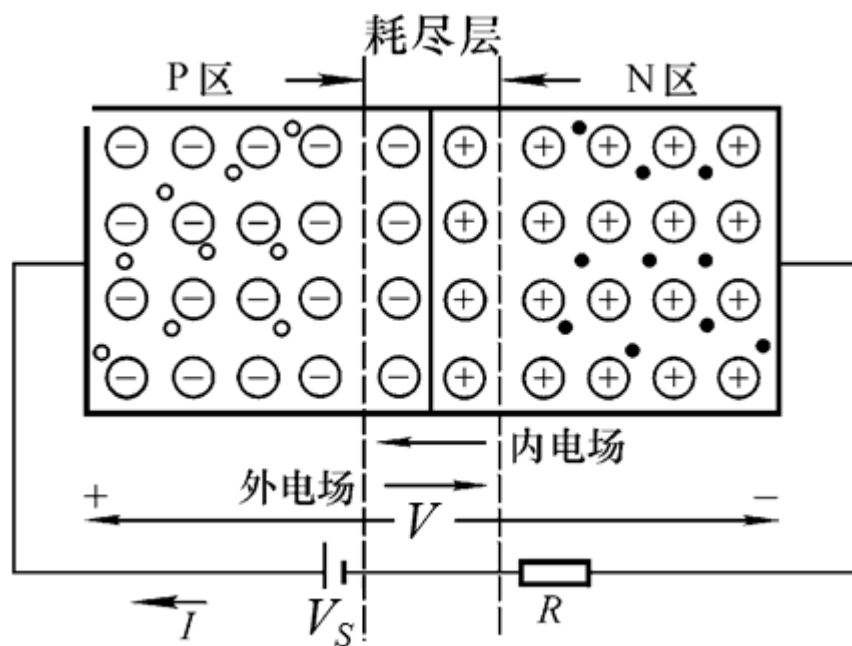
3、反偏的PN结



PN结加反向电压截止：

耗尽层变宽，阻止扩散运动，有利于漂移运动，形成漂移电流。由于电流很小，故可近似认为其截止。

4、正偏的PN结



PN结加正向电压导通：

耗尽层变窄，扩散运动加剧，由于外电源的作用，形成扩散电流，PN结处于导通状态。

5、PN 结的电容效应

① 结电容

PN结外加电压变化时，空间电荷区的宽度将发生变化，有电荷的积累和释放的过程，与电容的充放电相同，其等效电容称为结电容 C_j 。

② 扩散电容

PN结外加的正向电压变化时，在扩散路程中载流子的浓度及其梯度均有变化，也有电荷的积累和释放的过程，其等效电容称为扩散电容 C_d 。

6、PN 结的击穿

当PN结反向电压加大到一定程度时，将出现反向大电流，PN结发生击穿（Breakdown）。

① 雪崩击穿（Avalanche Multiplication）

发生在掺杂浓度较低的PN结中。耗尽层很厚，耗尽层内载流子与中性原子碰撞的机率很大。当反向电压增大到一定的数值时，载流子获得的动能足以把束缚在共价键中的价电子碰撞出来，产生新的电子—空穴对，反向电流急剧变大。雪崩击穿是不可逆的。

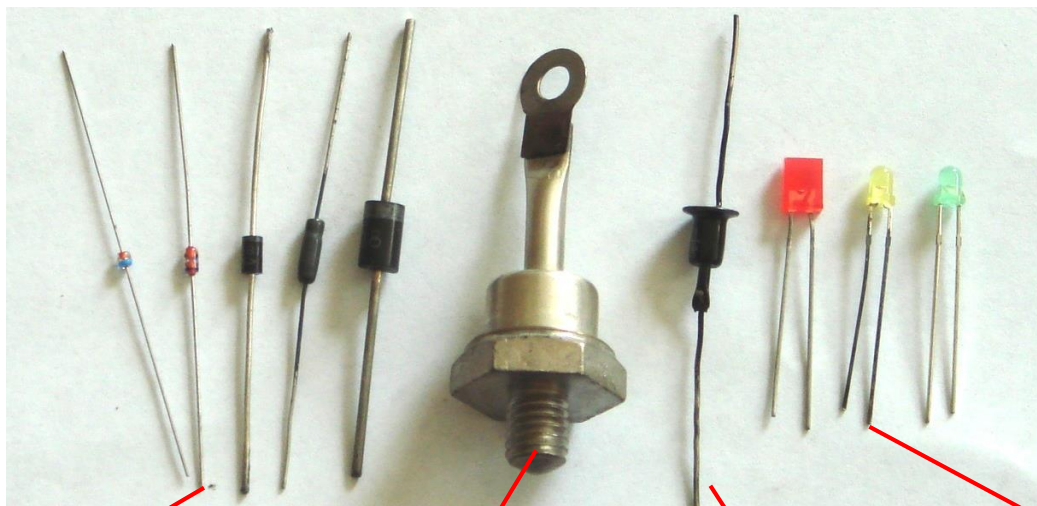
② 齐纳击穿（Zener Breakdown）

发生在掺杂浓度较高的PN结中。耗尽层很薄，耗尽层内载流子与中性原子碰撞的几率极小，不易发生碰撞电离。反向电压不大时，在耗尽层就能建立很强的电场，足以把耗尽层内中性原子的价电子直接从共价键中拉出来，产生新的自由电子—空穴对。齐纳击穿是可逆的。

7.1.2 二极管的结构及其伏安特性

一、二极管的结构

将PN结封装，引出两个电极，就构成了二极管。

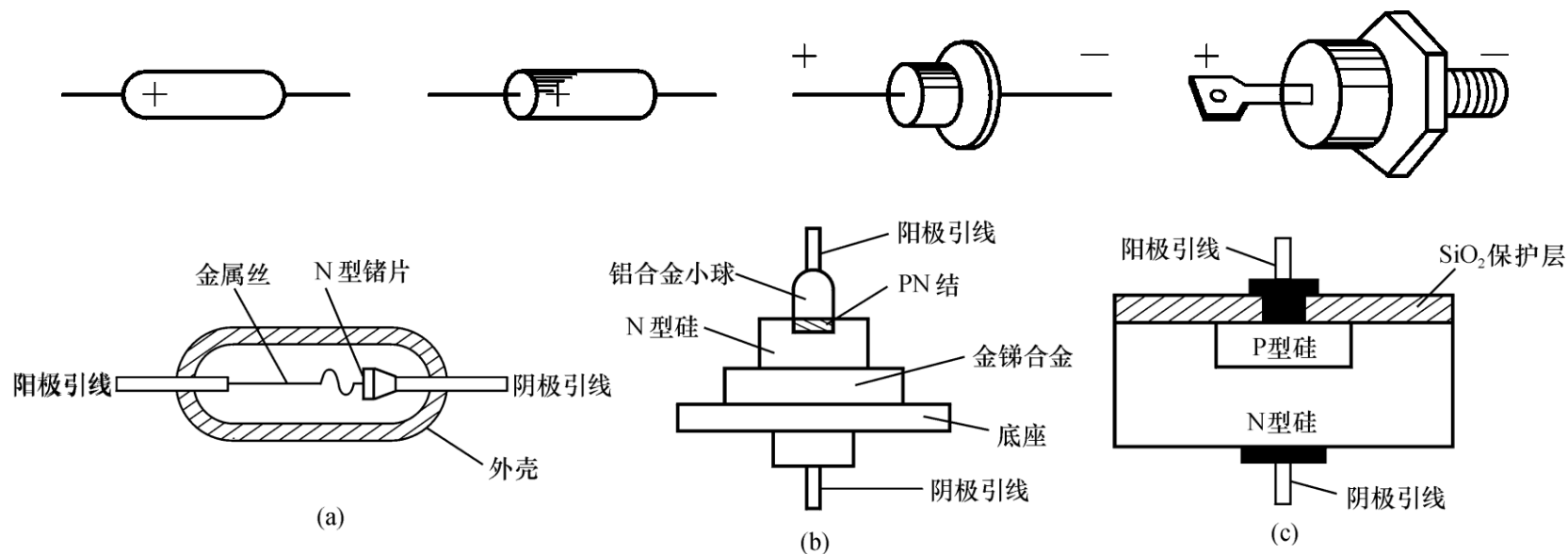


小功率
二极管

大功率
二极管

稳压
二极管

发光
二极管

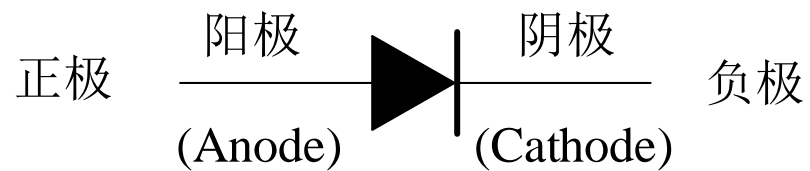
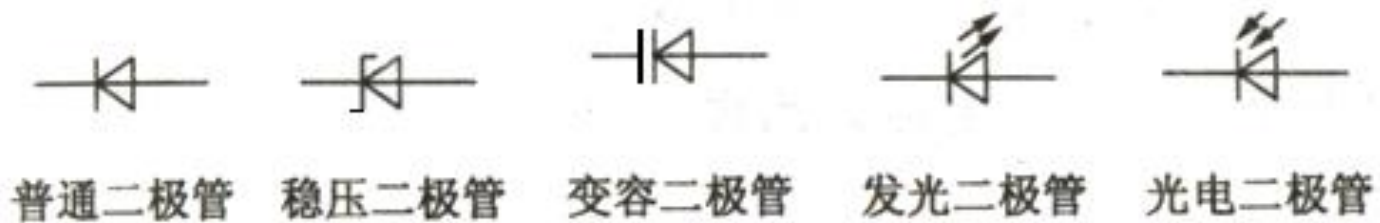


点接触型：结面积小，结电容小，允许通过的电流小，最高工作频率高。

面接触型：结面积大，结电容大，允许通过的电流大，最高工作频率低。

平面型：结面积可小、可大，小的工作频率高，大的允许通过的电流大。

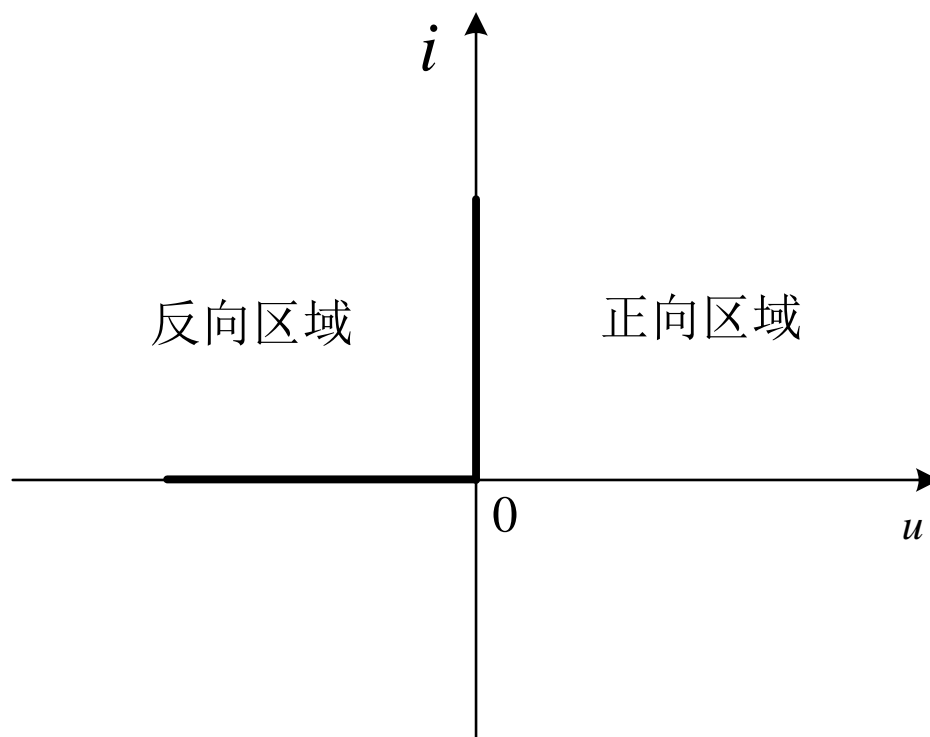
二极管电路符号



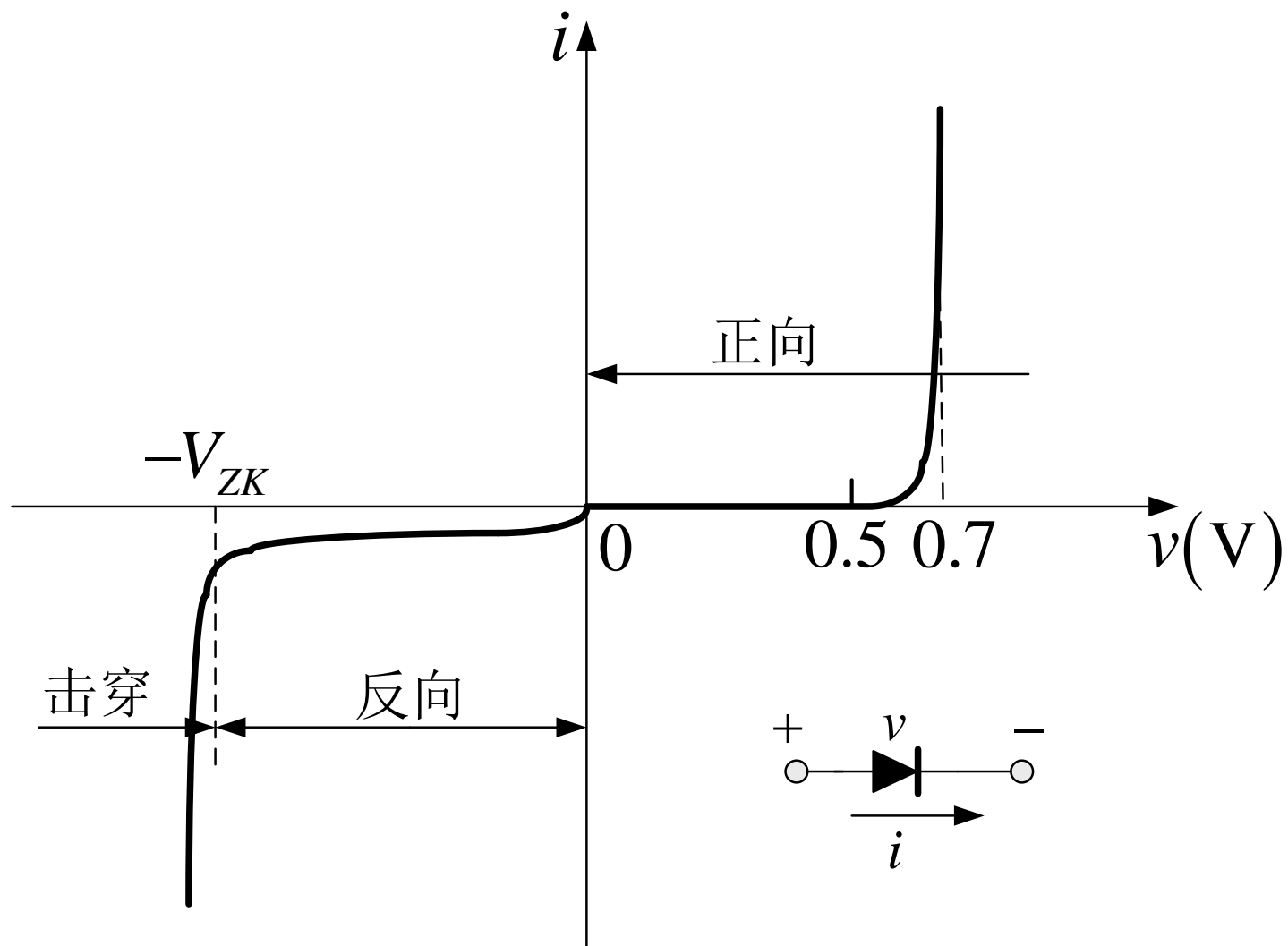
二、二极管伏安特性

理想二极管

理想二极管的性能就像一个单向的开关，正向导通无压降，反向截止无漏电。



实际二极管



$$i = I_S \left(e^{\frac{v}{nV_T}} - 1 \right)$$

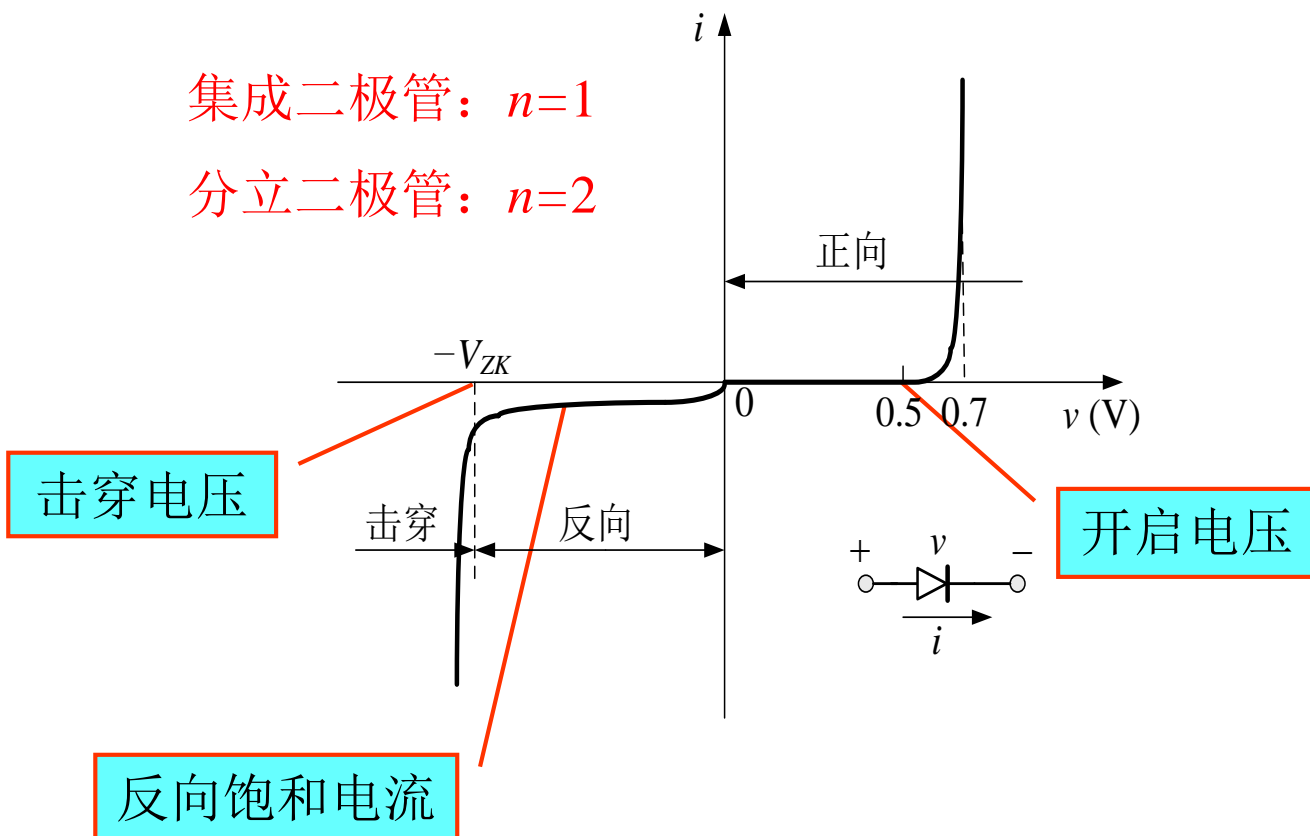
$$V_T = kT/q$$

热电压：

室温下， $V_T \approx 25 \text{ mV}$

集成二极管： $n=1$

分立二极管： $n=2$



材料	开启电压	导通电压	反向饱和电流
硅Si	0.5V	0.5~0.8V	1 μ A以下
锗Ge	0.1V	0.1~0.3V	几十 μ A

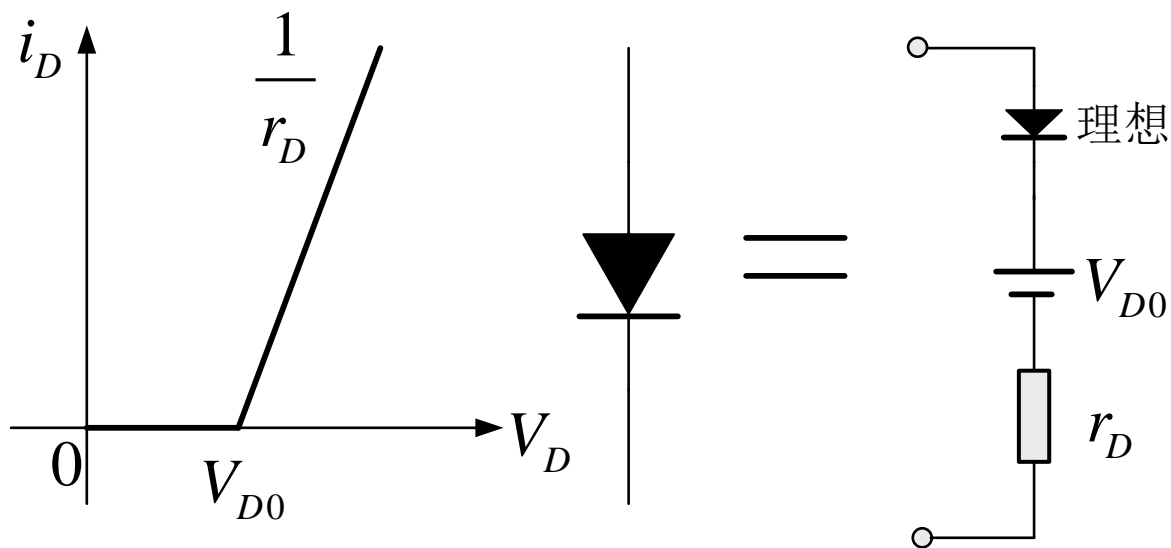
三、二极管的主要参数

- 最大整流电流 I_F ：最大平均值
- 最大反向工作电压 V_R ：最大瞬时值（反向击穿电压值的一半或三分之二）
- 反向饱和电流 I_S
- 最高工作频率 f_M ：因PN结有电容效应

7.1.3 二极管电路模型

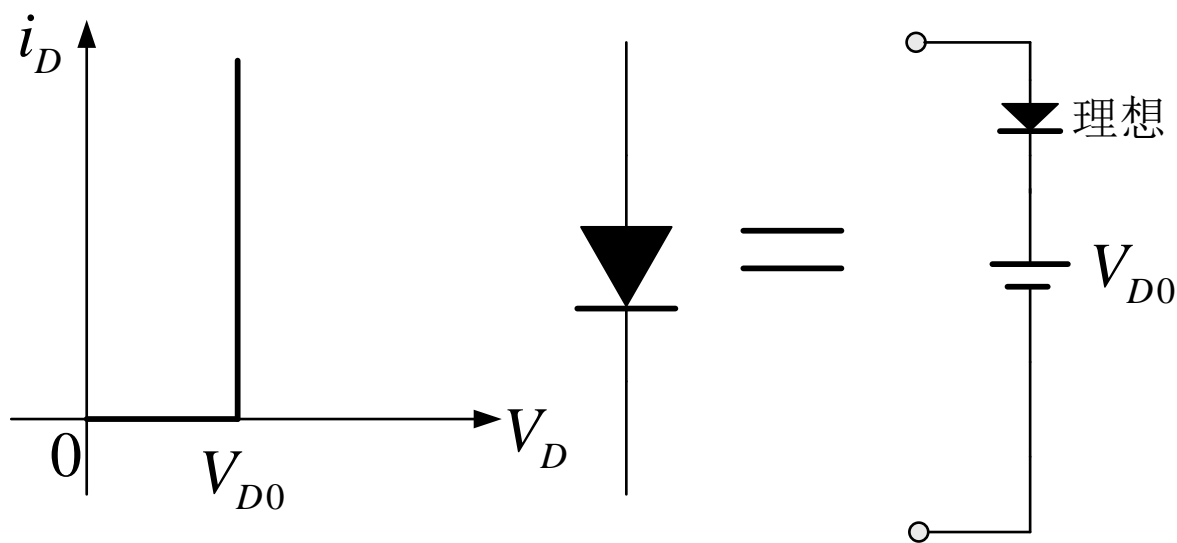
一、简化二极管模型

把一个普通的二极管等效为一个理想二极管、一个电压源和一个等效电阻的串联。



二、恒压降模型

把一个二极管等效成一个理想二极管和一个电压源的串联。



三、小信号模型

采用叠加原理分析二极管电路。

$$v_D = V_D + v_d(t)$$

$$i_D(t) = I_S e^{(V_D + v_d)/nV_T} = I_S \cdot e^{V_D/nV_T} \cdot e^{v_d/nV_T} = I_D \cdot e^{v_d/nV_T}$$

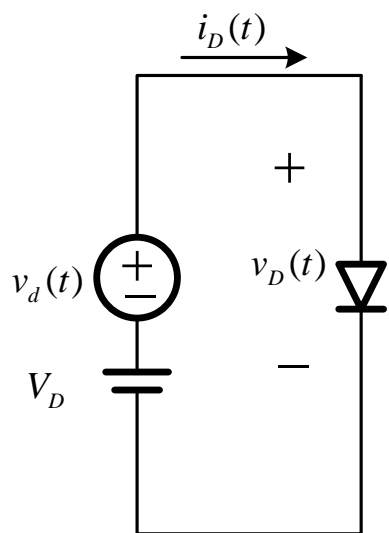
$$\text{若 } \frac{v_d}{nV_T} \ll 1$$

$$i_D(t) \approx I_D \left(1 + \frac{v_d}{nV_T} \right) = I_D + \frac{I_D}{nV_T} \cdot v_d = I_D + i_d$$

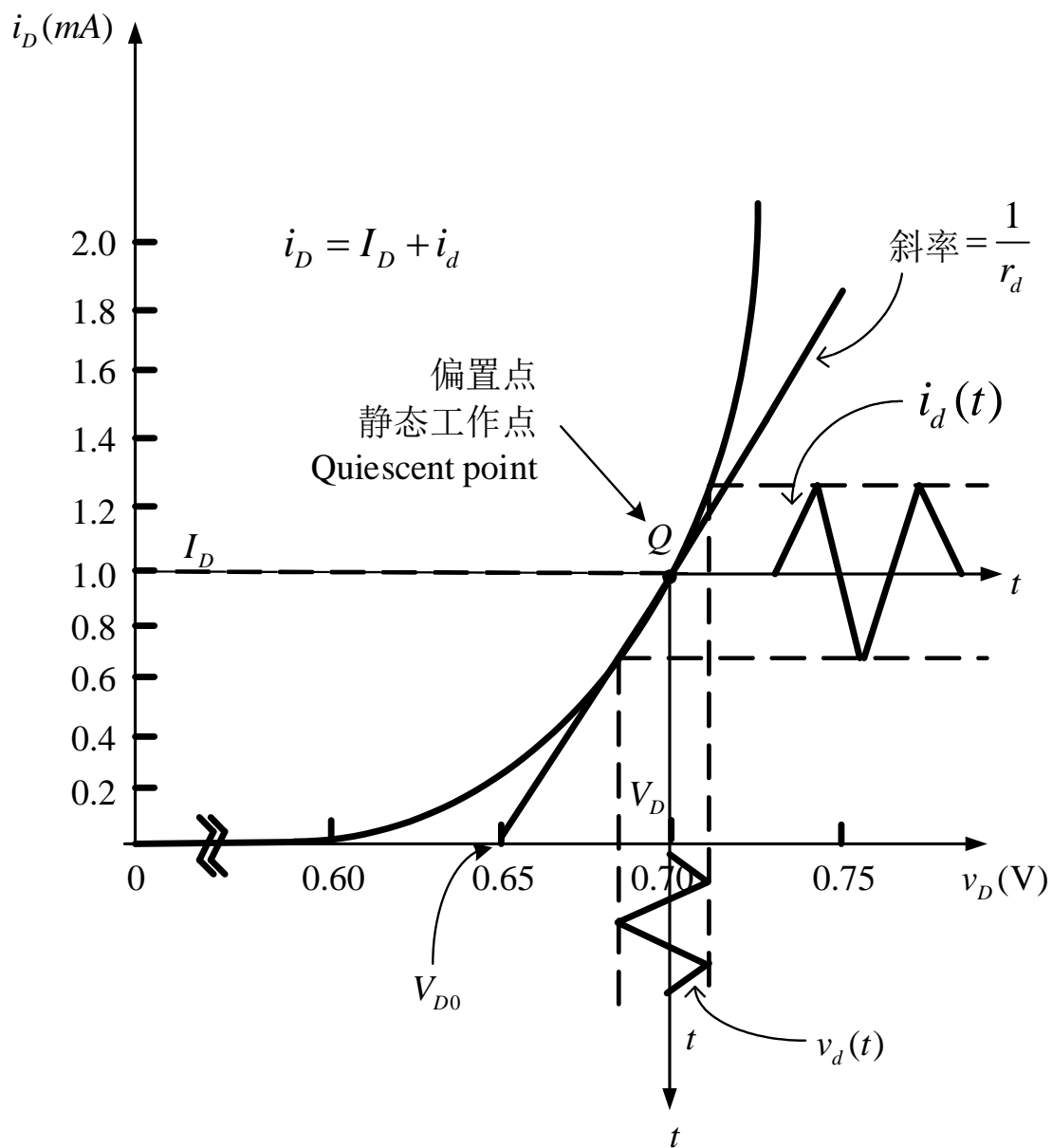
$$i_d = \frac{I_D}{nV_T} v_d = \frac{v_d}{r_d}$$

$$r_d = \frac{v_d}{i_d} = \frac{nV_T}{I_D}$$

增量电阻

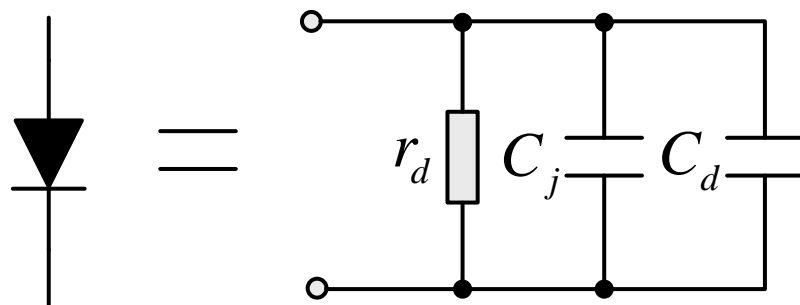


(a)



(b)

四、高频小信号模型



7.1.4 齐纳（或称稳压）二极管及其应用

一、工作原理

当击穿电压小于5 V时，通常是**齐纳效应**；

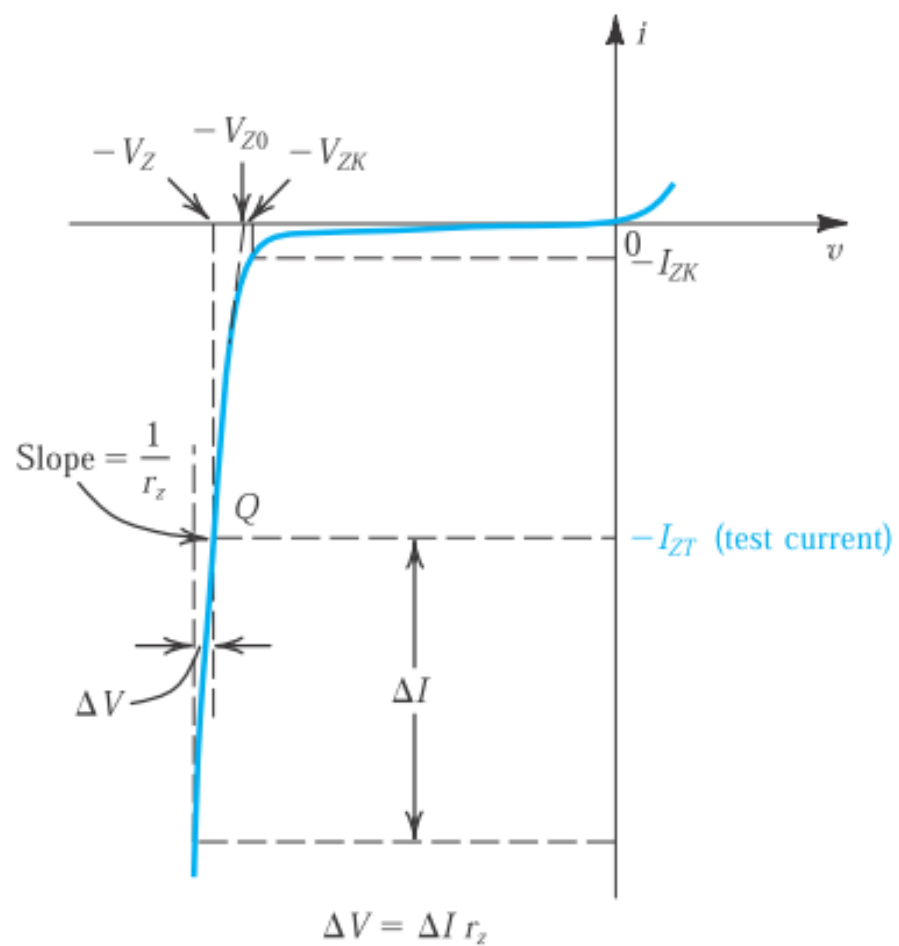
当击穿电压大于7 V时，通常是**雪崩效应**。

当击穿电压在5~7 V时，则两种情况兼而有之。



电路符号

二、伏安特性



三、齐纳二极管的主要参数

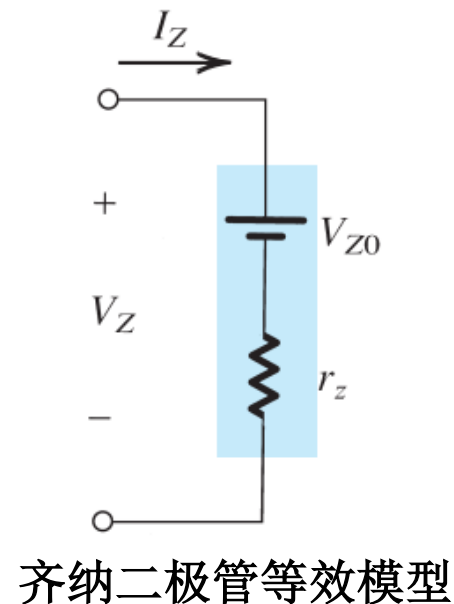
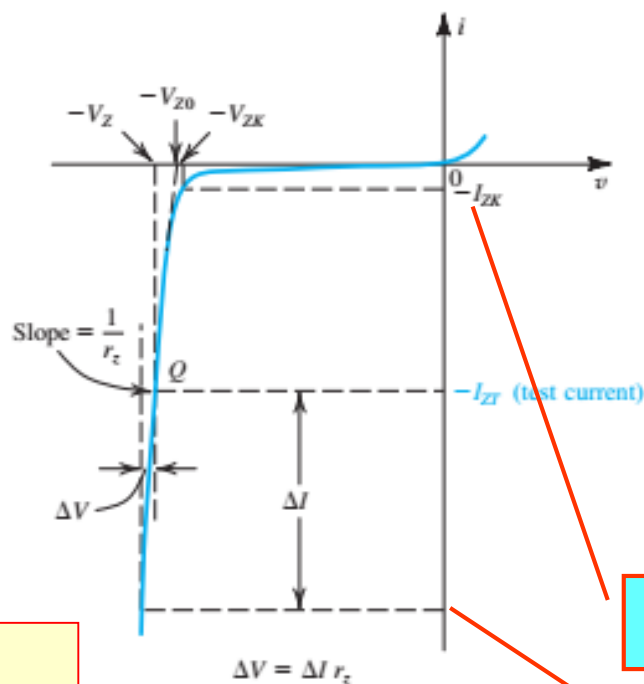
稳定电压 V_Z

最大稳定电流 I_{\max}

最小稳定电流 I_{\min}

动态电阻 $r_z = \Delta V / \Delta I$

最大功耗 $P_{ZM} = I_{\max} V_Z$

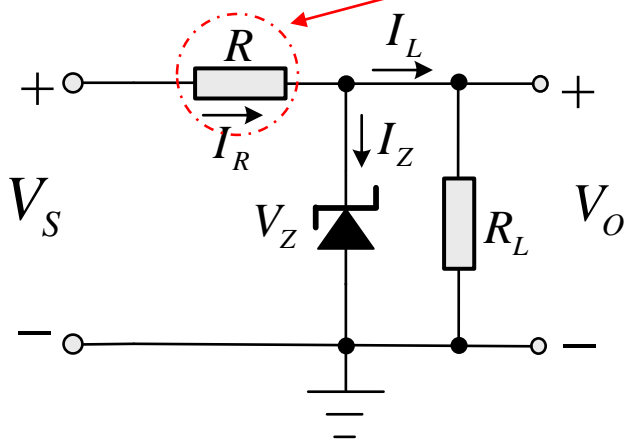


进入稳压区的最小电流

不至于损坏的最大电流

四、齐纳二极管的应用电路

若通过稳压管的电流太小则不能稳压，太大则会因功耗过大而损坏，因而稳压管电路中必须有限制稳压管电流的**限流电阻**！



$$I_{\min} < I_Z < I_{\max}$$

电源稳定度 $\frac{\Delta V_O}{\Delta V_S}$

$$I_{\min} < I_R - I_L < I_{\max}$$

负载稳定度 $\frac{\Delta V_O}{\Delta I_L}$

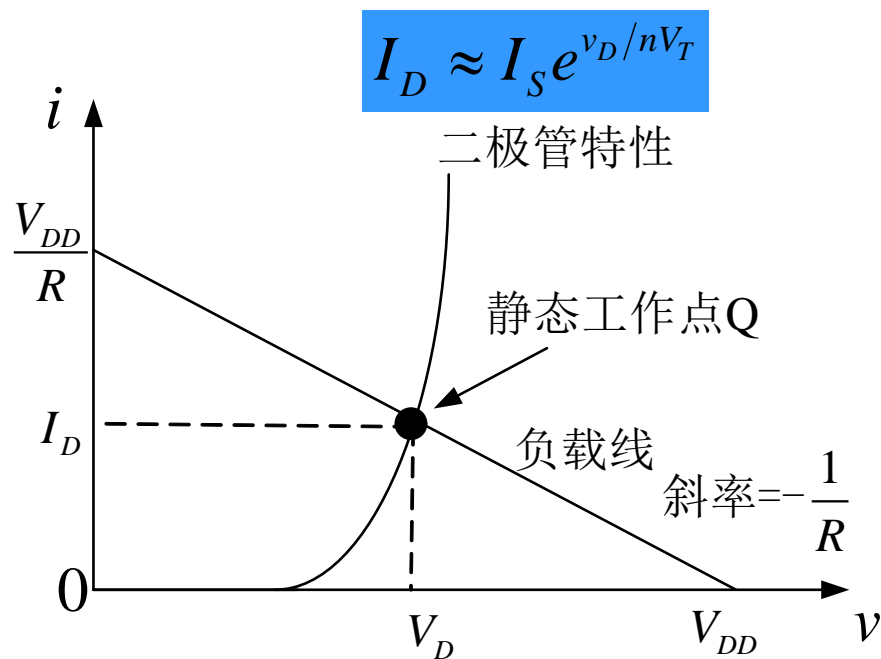
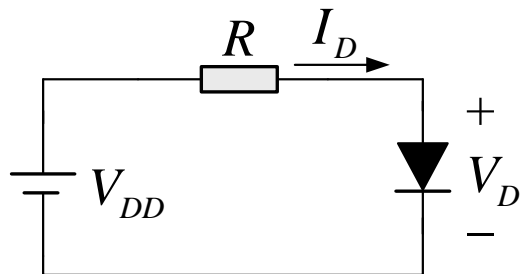
$$I_{\min} < \frac{V_S - V_Z}{R} - \frac{V_Z}{R_L} < I_{\max}$$

稳压系数 $S = \frac{\Delta V_O / V_O}{\Delta V_S / V_S}$

7.2 二极管应用电路的分析

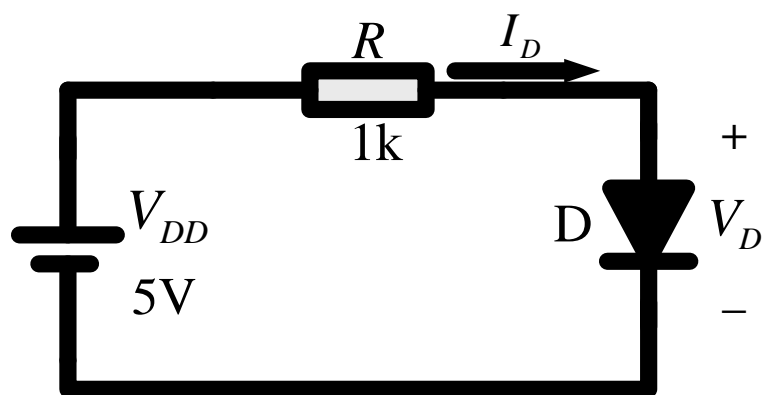
➤ 二极管电路分析方法

1、图解分析法



$$V_{DD} = I_D R + V_D$$

2、重复分析法（迭代法）



设定初始值 V_1

$$I_1 = \frac{V_{DD} - V_1}{R}$$

$$I_2 = I_S e^{V_1/nV_T}$$



$$V_2 - V_1 = 2.3nV_T \log \frac{I_2}{I_1}$$



(已知 V_1 、 I_1 、 I_2)

V_2

否

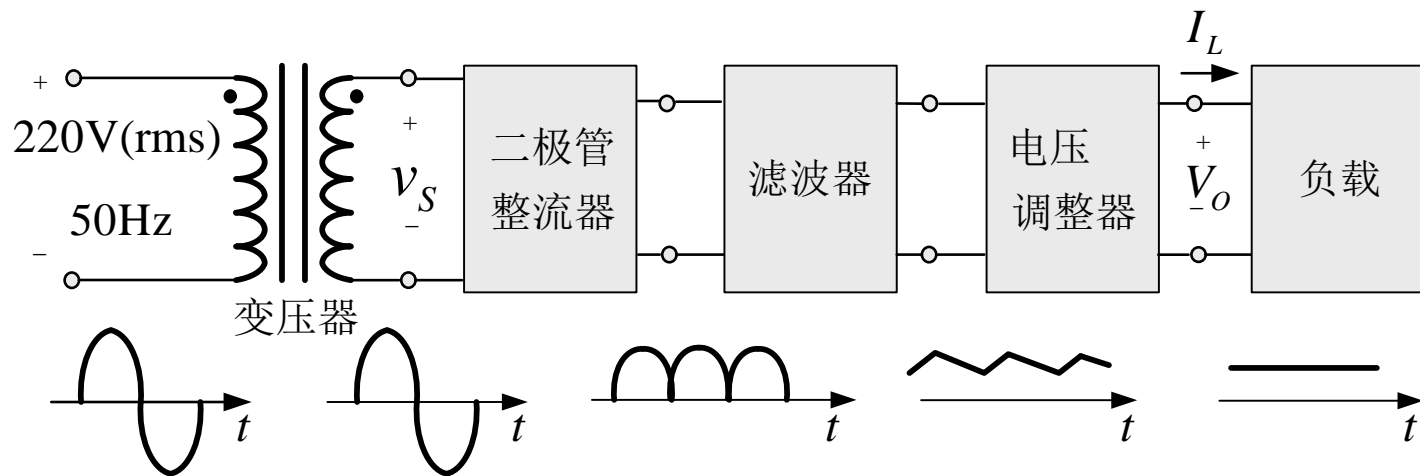
$$|V_2 - V_1| < \varepsilon ?$$



是

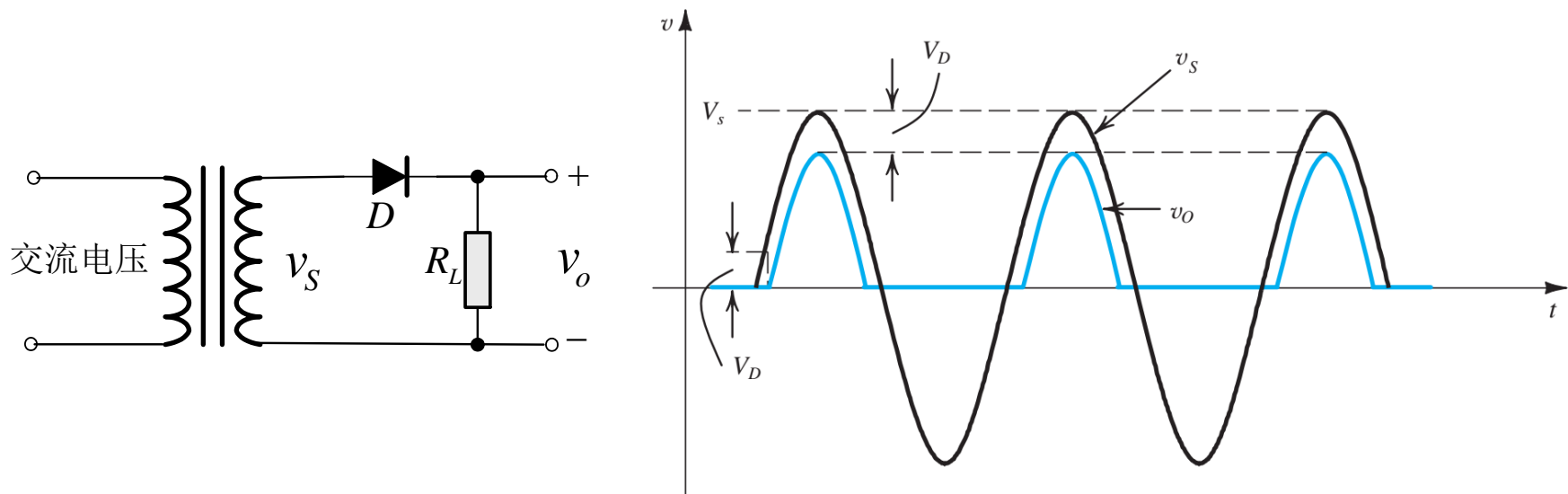
结束

7.2.1 整流电路 (Rectifiers)



直流稳压电路

一、半波整流器 (Half - wave rectifier)



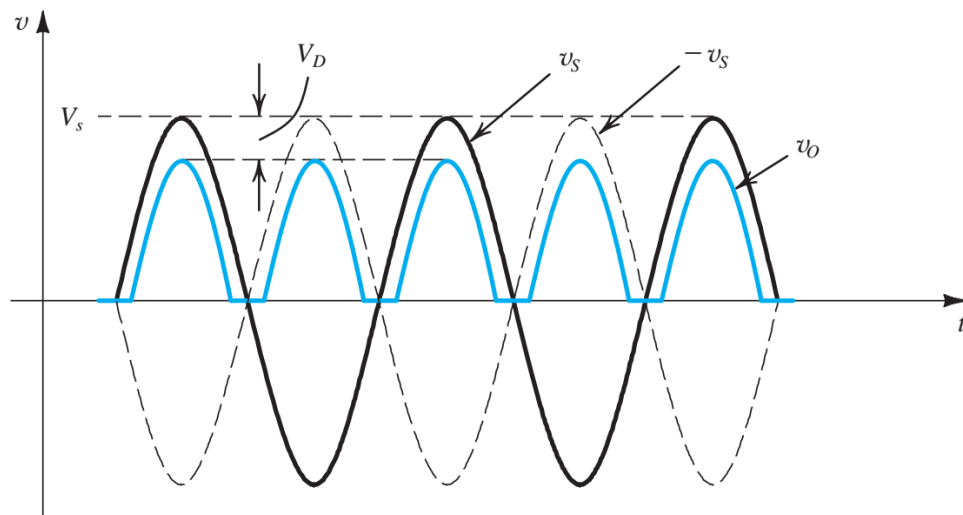
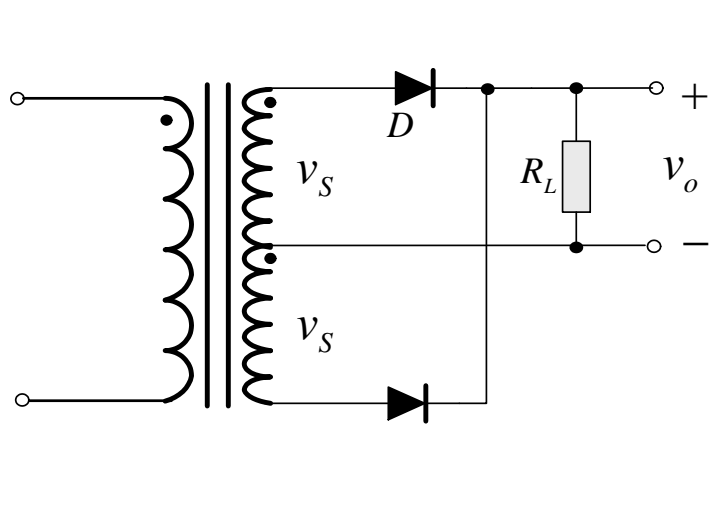
反峰电压 (Peak Inverse Voltage) $PIV = V_s$

v_s 的峰值电压

输出直流电压
(忽略 V_D)

$$V_O = \frac{\int_0^\pi \sqrt{2}V_{orms} \sin \phi d\phi}{2\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{orms} \approx 0.45V_{orms}$$

二、全波整流器 (Full - wave rectifier)

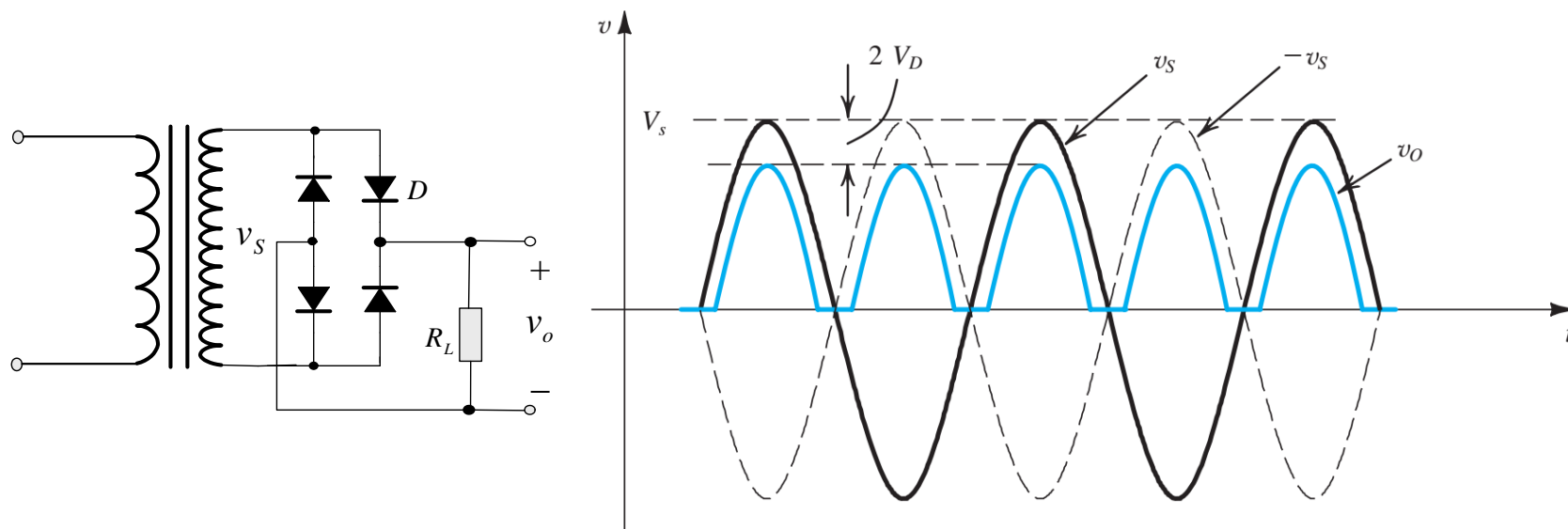


$$PIV = 2V_s - V_D \approx 2V_s$$

输出直流电压
(忽略 V_D)

$$V_o = \frac{\int_0^\pi \sqrt{2}V_{orms} \sin \phi d\phi}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{orms} \approx 0.9V_{orms}$$

三、桥式整流器 (Bridge rectifier)



$$PIV = V_s - V_D \approx V_s$$

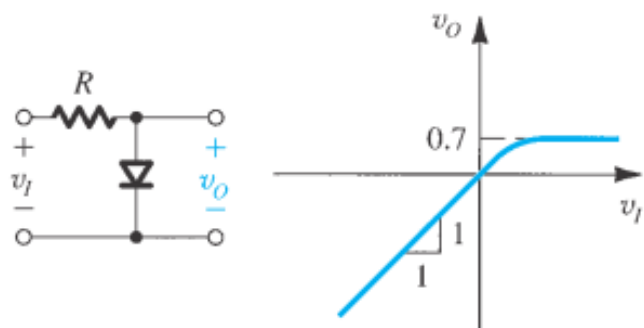
输出直流电压
(忽略 V_D)

$$V_O = \frac{\int_0^\pi \sqrt{2}V_{orms} \sin \phi d\phi}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{orms} \approx 0.9V_{orms}$$

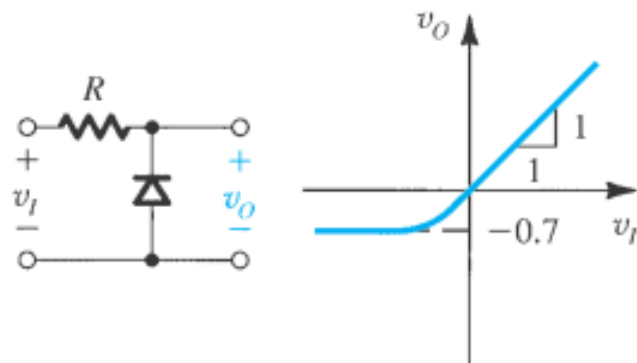
7.2.2 限幅和钳位电路

一、限幅电路（Limiter Circuit）

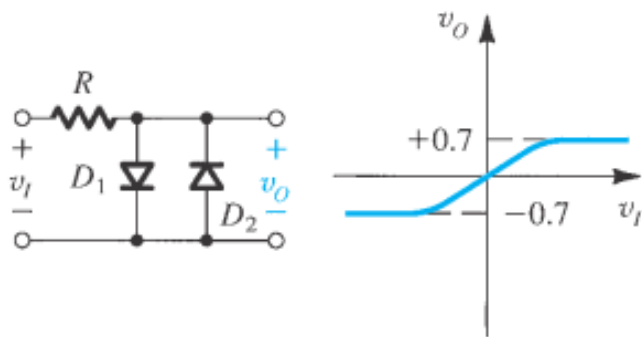
正向限幅电路



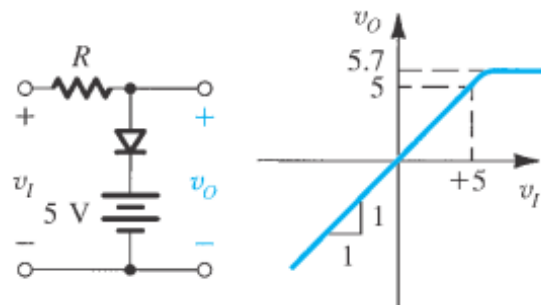
反向限幅电路



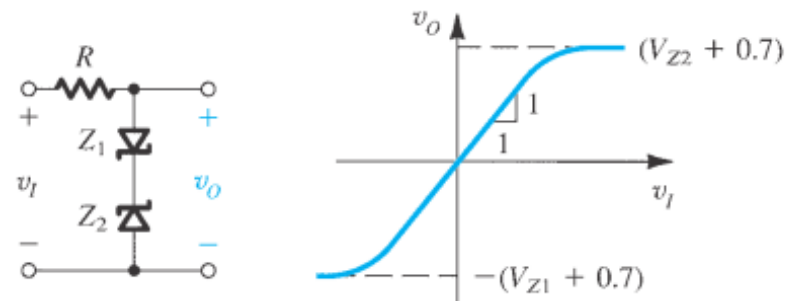
双向限幅电路



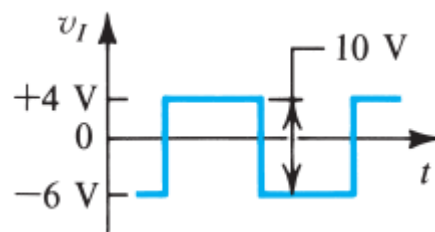
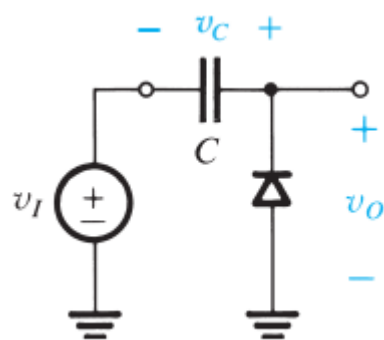
正向限幅电路



双向限幅电路

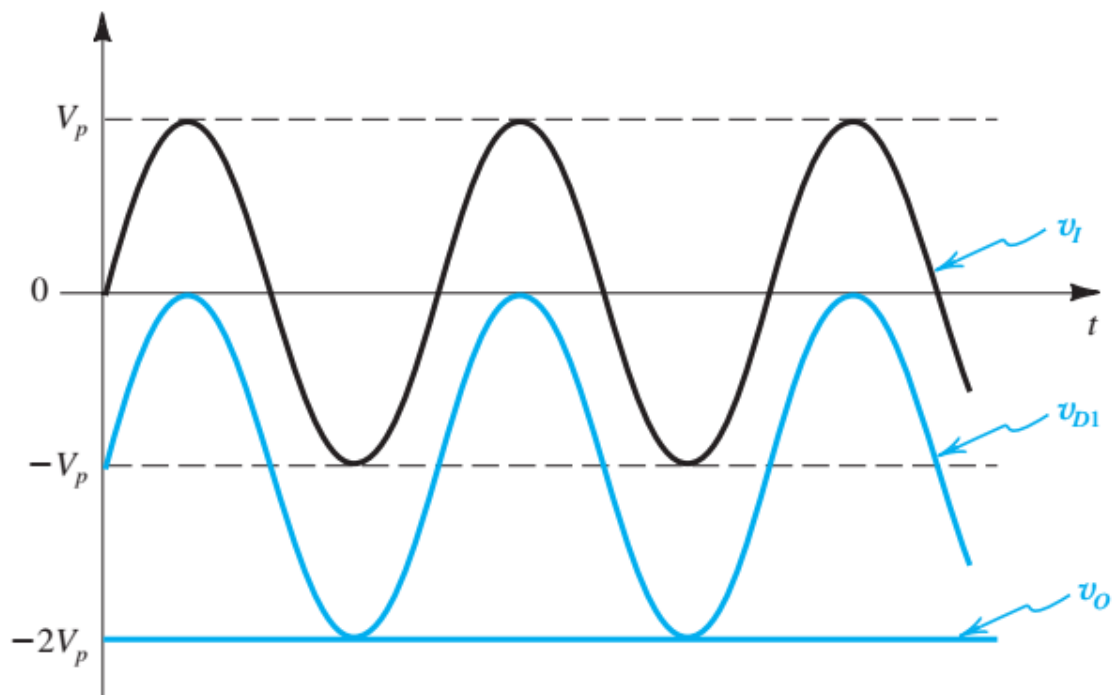
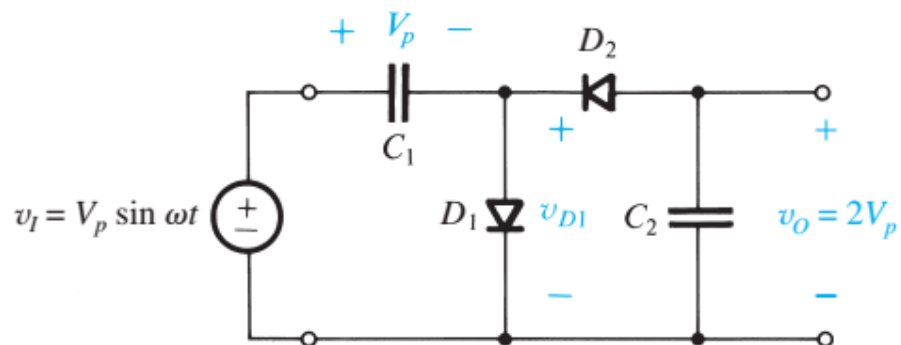


二、箝位电路或直流恢复器（Clamped capacitor or DC restorer）



$$v_O = v_I + v_C$$

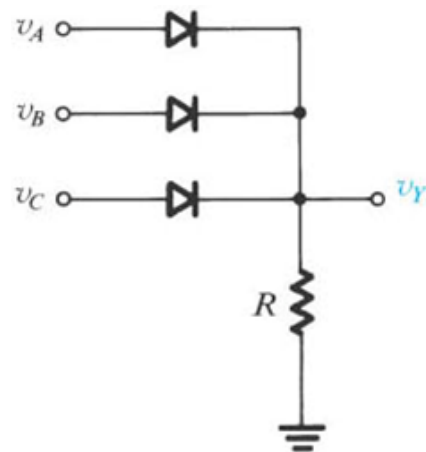
7.2.3 电压倍增器 (Voltage doubler)



7.2.4 逻辑门

一、或门

- 高电平表示1，低电平表示0
- 若 v_A 、 v_B 、 v_C 中任意一个输入高电平
 - 对应二极管导通
 - v_Y 输出高电平
- 若所有输入均为低电平
 - 所有二极管截止
 - v_Y 输出低电平



二、与门

- 高电平表示1，低电平表示0
- 若 v_A 、 v_B 、 v_C 中任意一个输入低电平
 - 对应二极管导通
 - v_Y 输出低电平
- 若所有输入均为高电平
 - 所有二极管截止
 - v_Y 输出高电平

