

电子电路基础C

是电子技术方面入门性质的技术基础课

授课老师：文凤

书山有路勤为径
学海无崖苦作舟

第1章 半导体基础元器件与非线性电路

半导体器件是现代电子技术的基础，它们都是由半导体材料构成的。

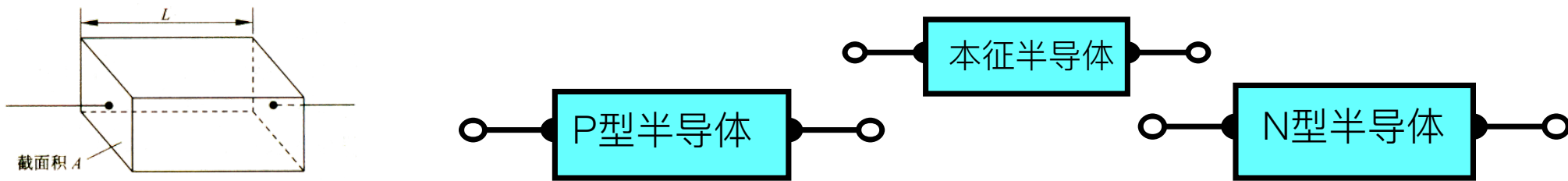
主要内容

- 1.1 半导体元器件初识
- 1.2 单一半导体的导电性能
- 1.3 半导体二极管的导电性能
- 1.4 半导体非线性电路的分析基础
- 1.5 半导体非线性电路的近似分析与电路系统设计的关系

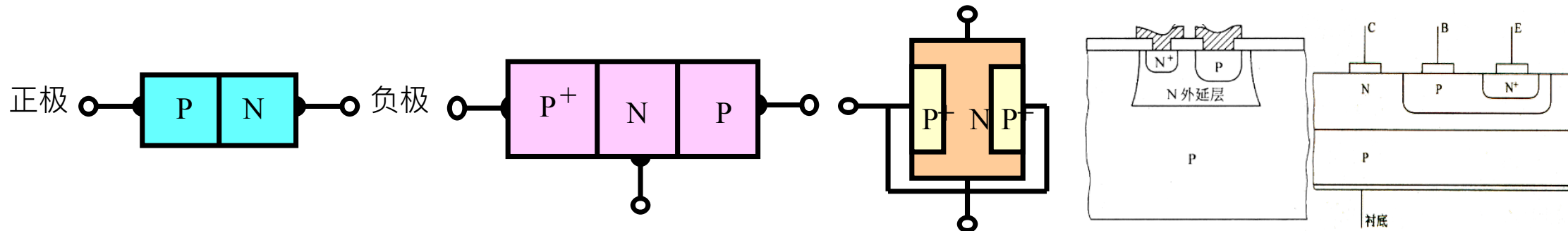
1.1 初识半导体元器

三层次的半导件元器件

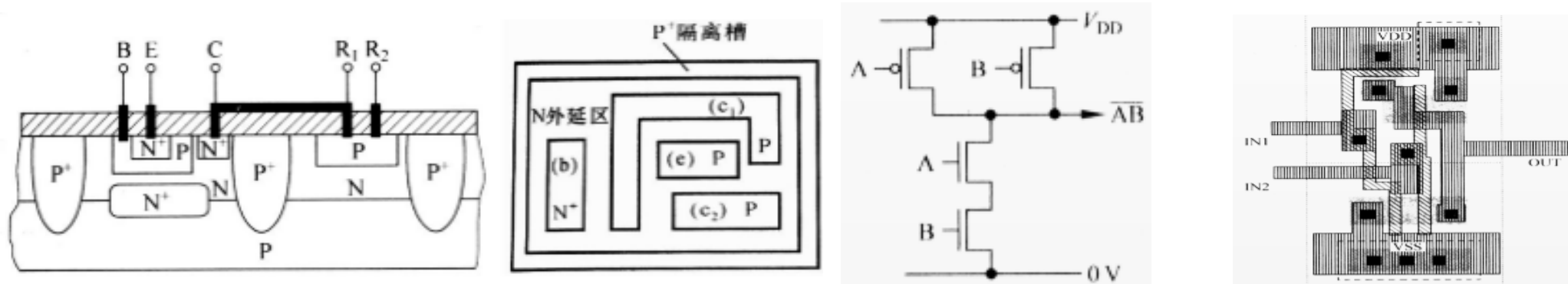
第1层 单一类型半导体材料:具有半导体的电阻特性、温度特性等



第2层 多类型半导体材料的不同简单组合:具有非线性导体性质



第3层 多类型半导体材料的复杂组合:具有半导体的信号处理功能

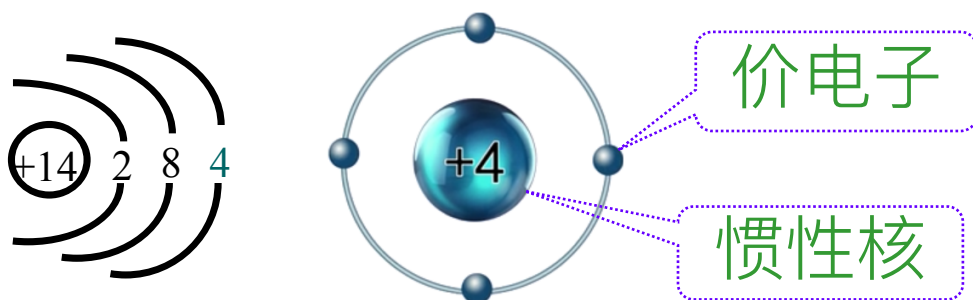


1.2 单一类型半导体的导电性能

一. **半导体**：导电能力介于导体与绝缘体之间的一种物质。

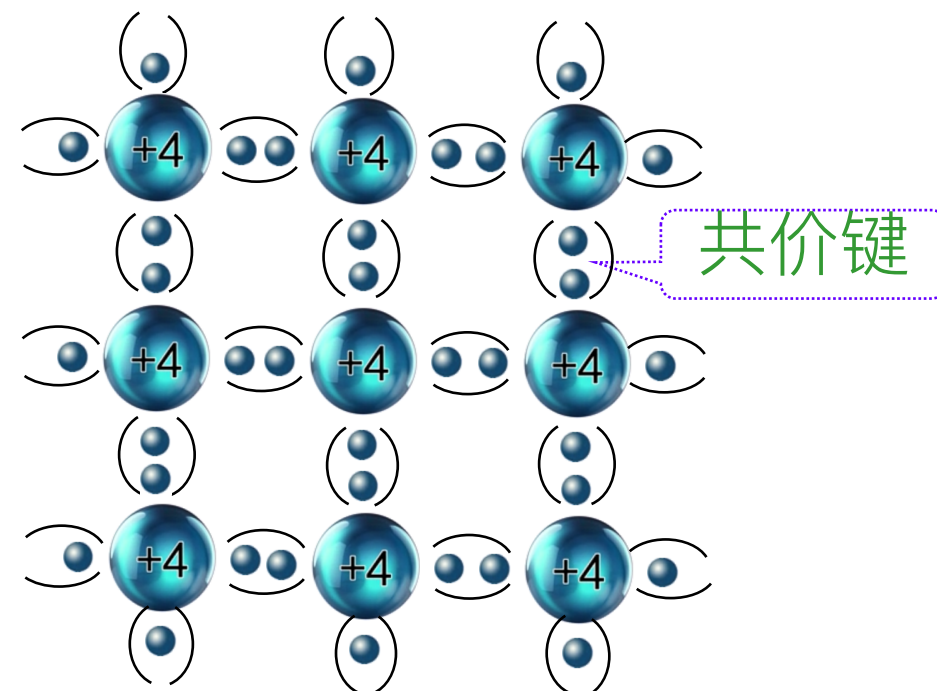
常见的半导体材料：**硅(Si)晶体**、**锗(Ge)晶体**、**砷化镓化合物**等。

最常用的硅原子平面结构及简化模型：**外层有四个价电子**



硅共价键结构示意图：

(原子与原子间形成共价键结构)

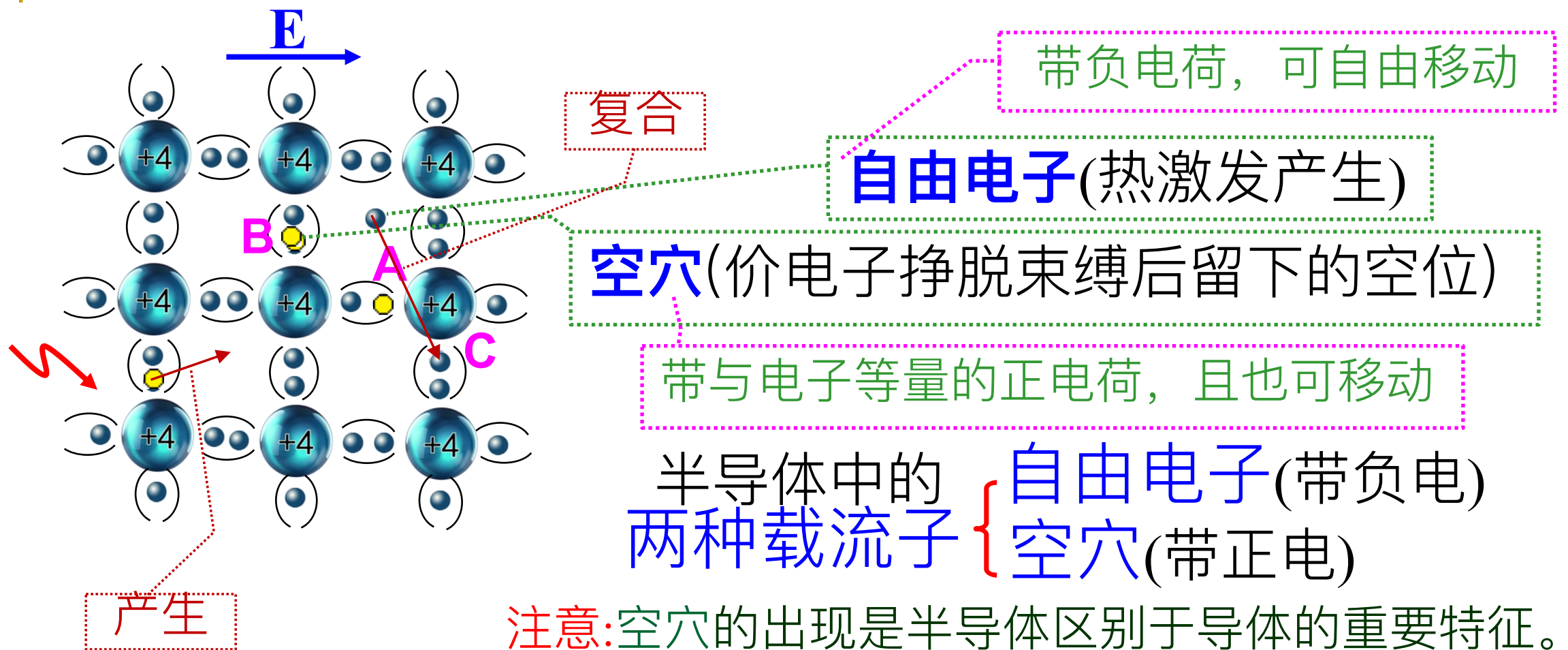


二. **本征半导体**：纯净(纯度为99.9999999%)的、不含杂质的半导体。

注意：共价键束缚力很强。当 $T=0\text{k}$ 且无外界其它能量激发时，价电子全部束缚在共价键中，导带中无自由电子，不导电！

三. **本征激发** (在光照或温度升高时)

本征激发及半导体的两种载流子



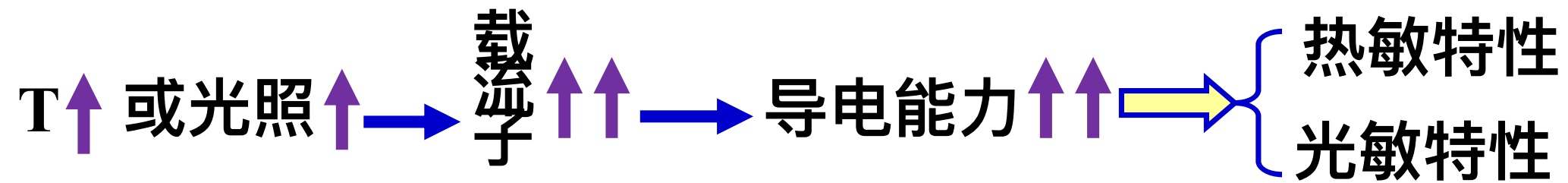
本征激发:当T升高或光线加强时 → 产生自由电子-空穴对

半导体中 { 本征激发: 产生自由电子-空穴对.
自由电子释放能量和空穴相遇而消失__复合

外部条件不变时: 载流子的产生与复合处于动态平衡状态。

半导体的热敏性、光敏性、掺杂性

四、半导体的特性：热敏性、光敏性和掺杂性



热敏性： 当环境温度升高时，
导电能力显著增强。

光敏性： 当光照加强时，
导电能力明显变化。

1. 可制成热敏、光敏器件
(如热敏电阻、光敏二极管、光敏三极管)
2. 环境对半导体性能影响大
(难满足电路正常工作的需求)

掺杂性： 往本征半导体中掺入杂质，导电能力显著提高。

本征半导体 $\xrightarrow[\text{元素}]{\text{加杂质}}$ 杂质半导体 $\left\{ \begin{array}{l} \text{P型半导体 (+3价杂质)} \\ \text{N型半导体 (+5价杂质)} \end{array} \right.$

1. 控制掺杂浓度还可以对导电性能进行控制。
2. 可减小外界环境对半导体器件性能的影响。

注意！！

注意：

共价键分析与能带分析的对应概念

	共价键理论	能带理论
电子跨能带轨道变迁	激发	价带到导带
	复合	导带到价带
电子能带内部的轨道变迁	电子运动	导带内轨道变迁
	空穴运动	价带内轨道变迁

热平衡载流子浓度：
$$n_i = AT^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_{g0}}{2kT}} = p_i$$

- (1) 本征半导体中载流子数目极少，其导电性能很差；
- (2) 温度愈高，载流子的数目愈多，半导体导电性能也就愈好。

即温度对半导体器件性能影响很大，很难满足电路正常工作的要求。为解决这个问题，可利用半导体的掺杂性。

五、杂质半导体之P型半导体(positive)

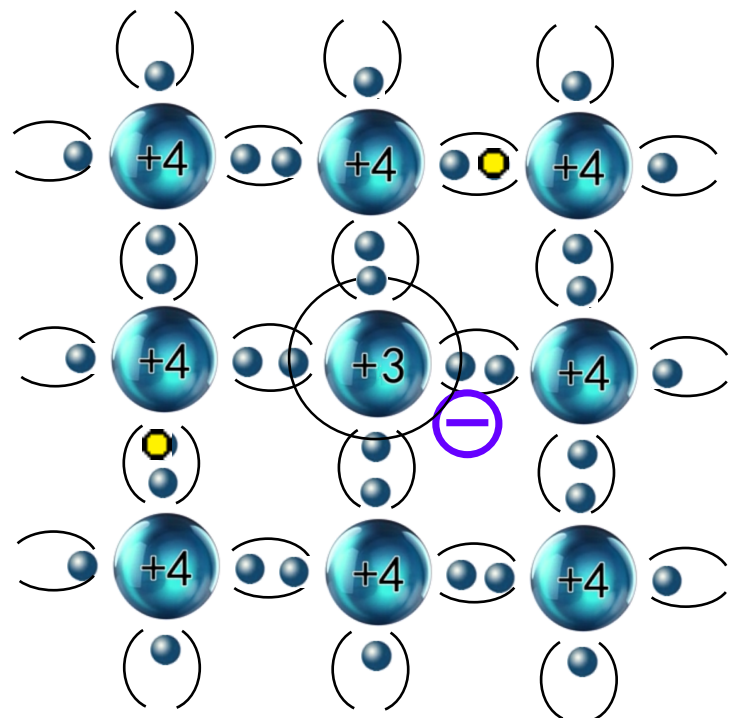
本征半导体 $\xrightarrow[\text{(如B硼)}]{\text{加三价杂质元素}}$ P型半导体



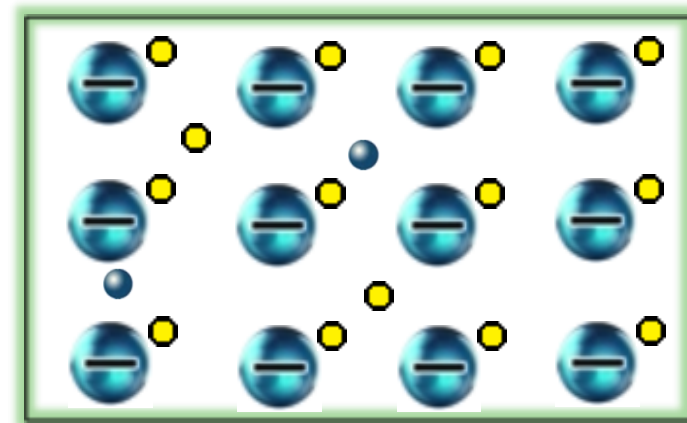
三价杂质原子 \rightarrow 接受电子 \rightarrow 称为受主杂质

杂质元素 $\xrightarrow[\text{电离}]{\text{常温}}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{空穴 (可自由移动, 参与导电)} \\ \text{负离子 (不能移动, 不参与导电)} \end{array} \right.$

本征激发产生的自由电子-空穴对。



简化模型:

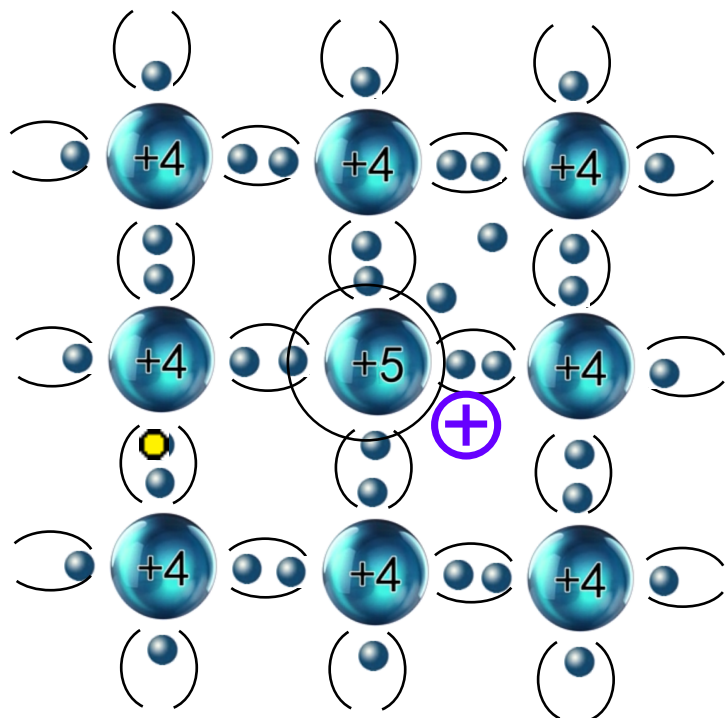


P型半导体 (空穴半导体) $\left\{ \begin{array}{l} \text{多子—空穴 (杂质电离(多数)和本征激发产生)} \\ \text{少子—自由电子 (本征激发产生)} \end{array} \right.$

N型半导体 杂质半导体小结 二极管

五、杂质半导体之N型半导体(negative)

本征半导体 $\xrightarrow[\text{(如P磷)}]{\text{加五价杂质元素}}$ N型半导体

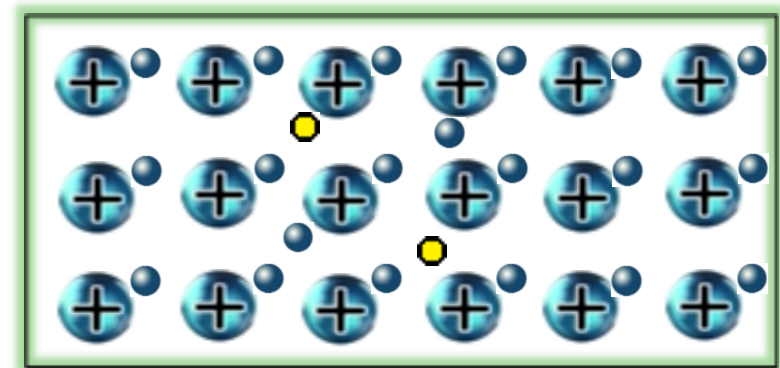


五价杂质原子 \rightarrow 提供电子 \rightarrow 称为施主杂质

杂质元素 $\xrightarrow[\text{电离}]{\text{常温}}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{自由电子 (可自由移动, 参与导电)} \\ \text{正离子 (不能移动, 不参与导电)} \end{array} \right.$

本征激发会产生自由电子-空穴对。

简化模型:



N型半导体 (电子半导体) $\left\{ \begin{array}{l} \text{多子—自由电子 (杂质电离(多数)和本征激发产生)} \\ \text{少子—空穴 (本征激发产生)} \end{array} \right.$

小结：本征半导体 + 加杂质 \Rightarrow 导电能力 $\uparrow\uparrow$

本征材料中空穴的浓度

N 型半导体 { 少子: 空穴 p (本征激发产生)
多子: 电子 $n = N_d + p \approx N_d$

$\Rightarrow n \gg p \Rightarrow$ 电子复合率 $\uparrow \Rightarrow p < p_i$

掺杂浓度

P 型半导体 { 多子: 空穴 $p = N_a + n \approx N_a$
少子: 电子 n (本征激发产生)

$\Rightarrow p \gg n \Rightarrow$ 电子复合率 $\uparrow \Rightarrow n < n_i$

外界环境对半导体的影响减小

本征材料中电子的浓度

杂质半导体 { 多子浓度主要取决于掺杂浓度。
呈电中性 { 少子浓度取决于温度的激发。

杂质半导体主要是多子导电，多子浓度取决于掺杂浓度，可以通过控制掺杂浓度来控制半导体的导电性能，从而制成各种类型的半导体器件。

而多子浓度跟温度几乎无关，因而受外界环境的影响减小。

思考题 二极管



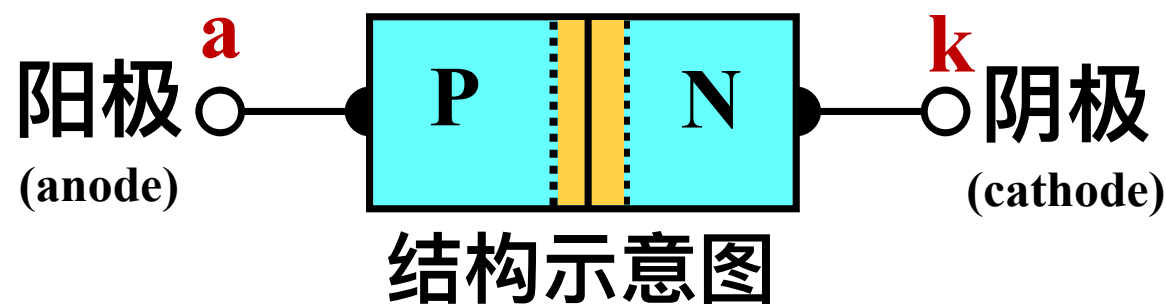
思考题：

1. 在杂质半导体中多子的数量主要由 a 决定。
(a. 掺杂浓度、b. 温度)
2. 在杂质半导体中少子的数量主要由 b 决定。
(a. 掺杂浓度、b. 温度)
3. 当温度升高时，少子的数量 (a. 减少、b. 不变、c. 增多) 。
4. N型半导体中的多子是 a。P型半导体中的多子是 b。
(a. 电子 b. 空穴)，
5. 在外加电压的作用下，N型半导体中的电流主要是 a，
P型半导体中的电流主要是 b。(a. 电子电流 b. 空穴电流)
6. 在本征半导体中加入 c 价元素形成N型半导体，加入 价元素形成P型半导体。(a. 三 b. 四 c. 五)

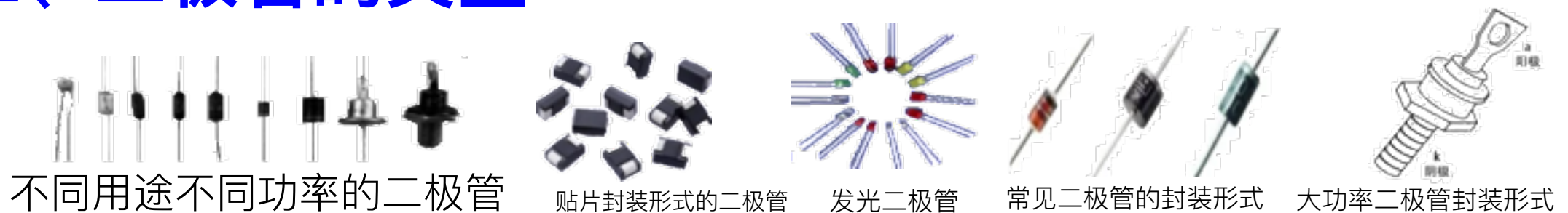
1.3 半导体二极管(Diode)的导电性能

晶体二极管、三极管的基本结构为PN结，他们的特性与PN结有关。

一、二极管结构及电路符号：



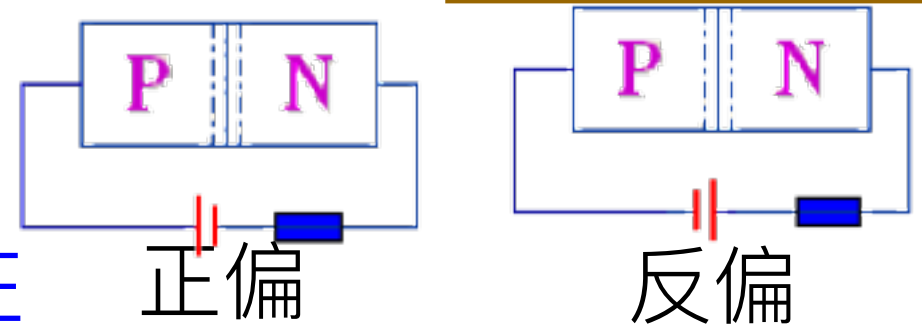
二、二极管的类型



三、二极管的特性(与PN结类似)：主要特性为单向导电性

除此外还有反向击穿特性、温度特性和电容特性。

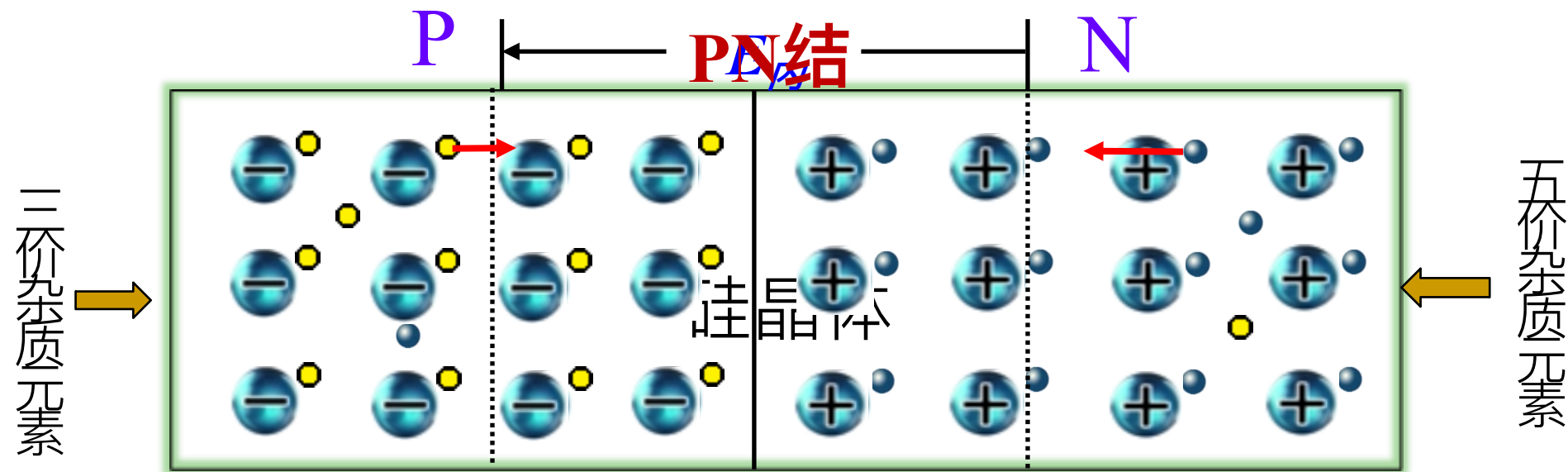
四、四种常见二极管的导电特性



二极管的分析方法

PN结的形成

半导体器件的基本结构是PN结，它们的特性与PN结有关。



因多子浓度差 → 引起多子扩散 → 产生空间电荷区 → 出现内建电场
(形成扩散电流) (电流方向跟空穴运动方向一致) N → P (内建电位差)

最终扩散和漂移达动态平衡 ← 多子扩散减弱 引起少子漂移
(形成漂移电流)

扩散电流 ⇌ 漂移电流 总电流 $I=0$

硅: 约0.5~0.7V
锗: 约0.1~0.3V

几个基本概念：内建电位差、扩散电流、漂移电流

► 内建电位差 V_{B0} 室温时 $\begin{cases} \text{锗管 } V_{B0} \approx 0.1 \sim 0.3 \text{ V} \\ \text{硅管 } V_{B0} \approx 0.5 \sim 0.7 \text{ V} \end{cases}$

掺杂浓度越大，内建电位差 V_{B0} 越大，阻挡层宽度越小。

① **扩散运动**：由于浓度差而引起的定向运动。
载流子扩散运动所形成的电流称为扩散电流。
扩散电流的大小与载流子的浓度梯度成正比。

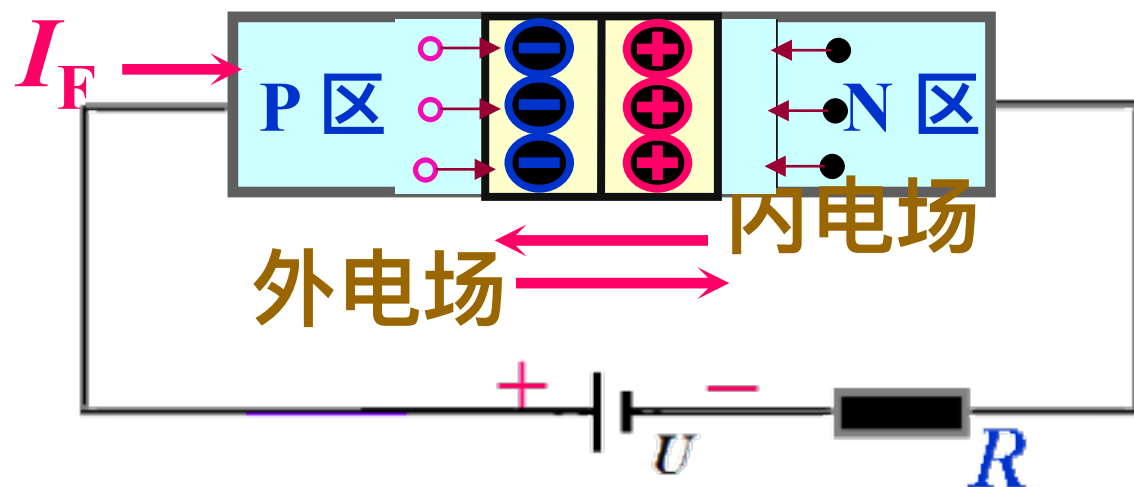
② **漂移运动**：有电场力作用时，电子和空穴产生的定向运动。
漂移运动产生的电流称为漂移电流。

注意：PN结处于动态平衡时，扩散电流与漂移电流相抵消，
即通过PN结的电流为零。

思考：若将PN结用导线连接起来，导线上会有电流产生吗？
(a.有 b.无)

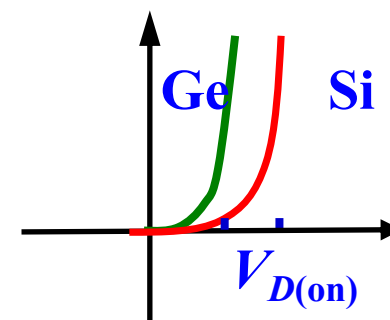
1、二极管（PN结）的单向导电性

A. PN结的正偏特性：导通,小电阻特性,理想时相当于开关闭合.

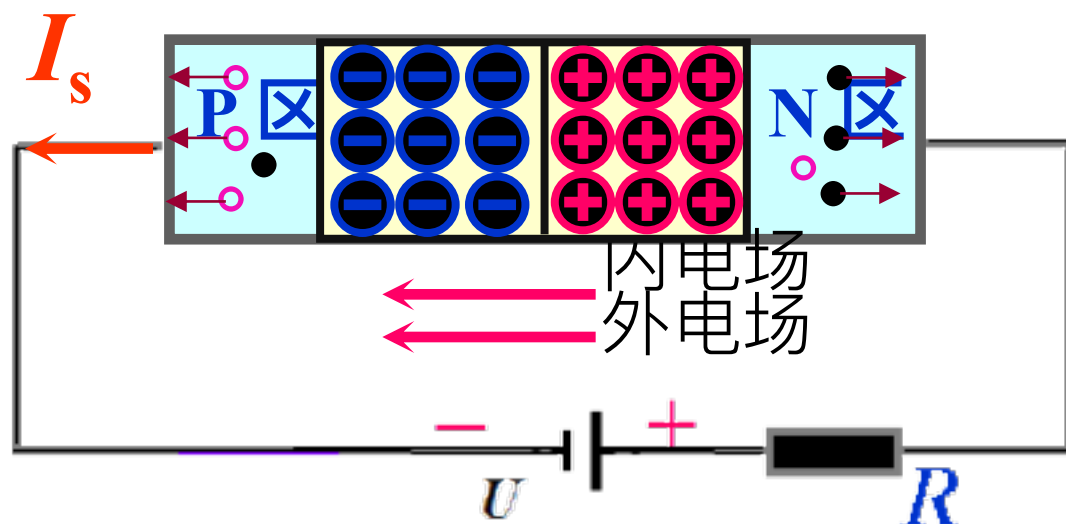


外电场使内电场减弱，扩散》漂移，使多子向 PN 结移动，中和部分离子使空间电荷区变窄→0。

多子扩散运动形成正向电流 I_F 。



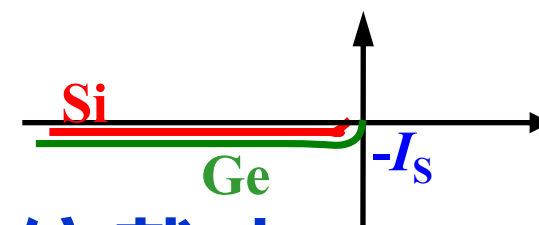
B. PN结的反偏特性：截止,大电阻特性,理想时相当于开关断开.



外电场使内电场加强，漂移》扩散，使多子背离 PN 结移动，空间电荷区变宽。

少子漂移运动加强形成反向电流 I_S

$$I_S = I_{\text{少子}} \approx 0$$



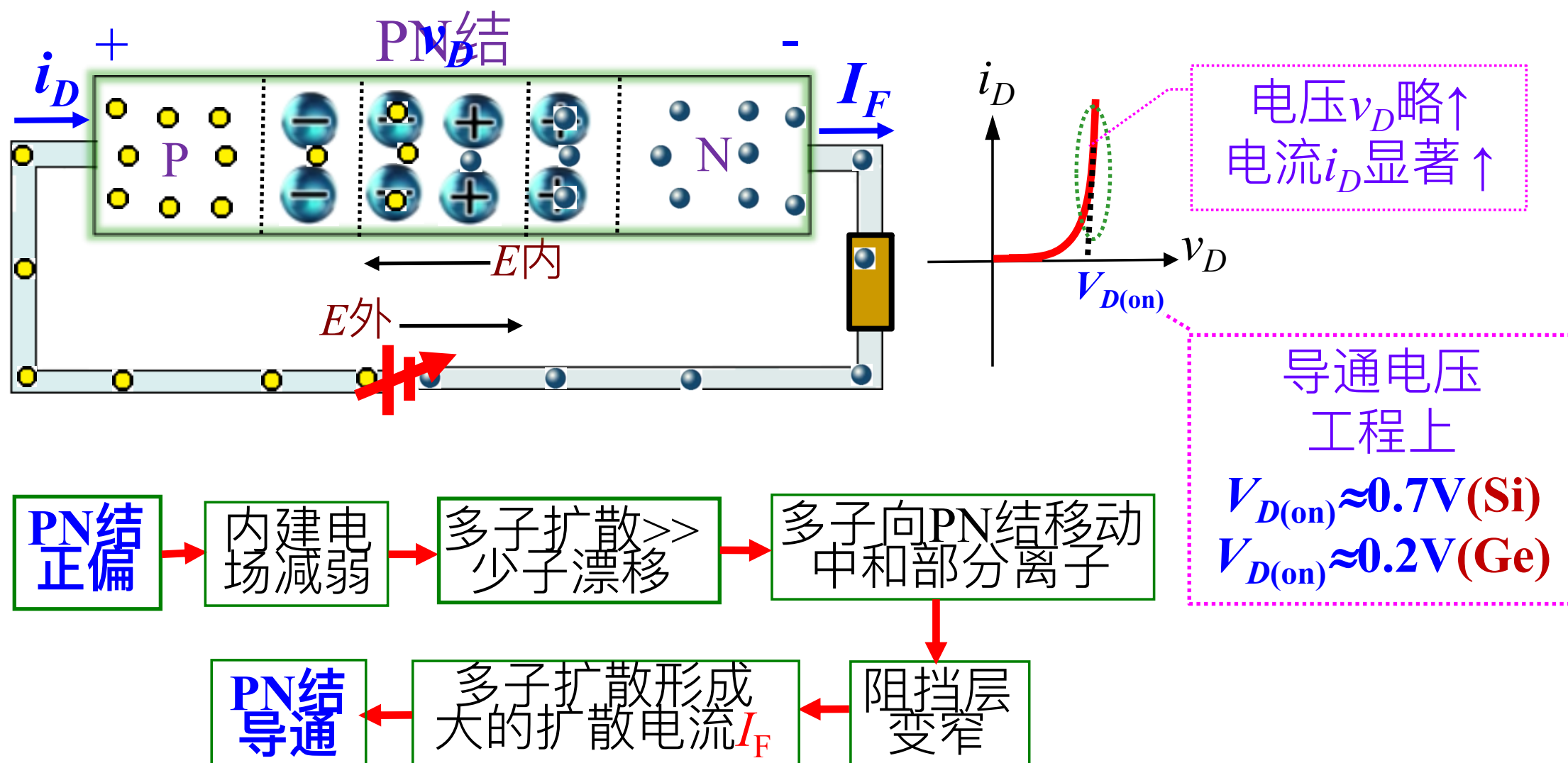
即PN 结具有单向导电性：正偏导通，反偏截止。

结合P₃₄₋₃₅习题1-3、1-4、1-5、1-11

二极管的伏安特性 返回

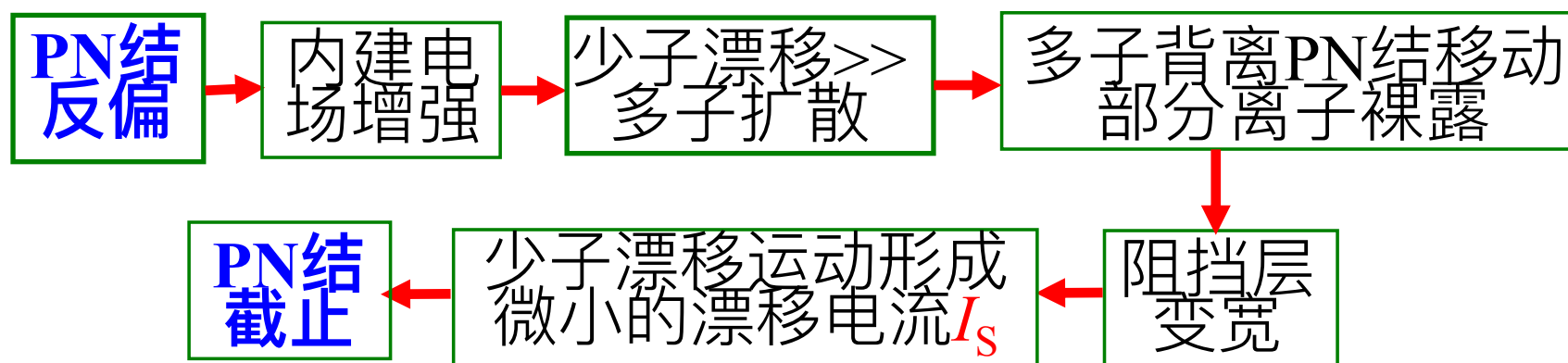
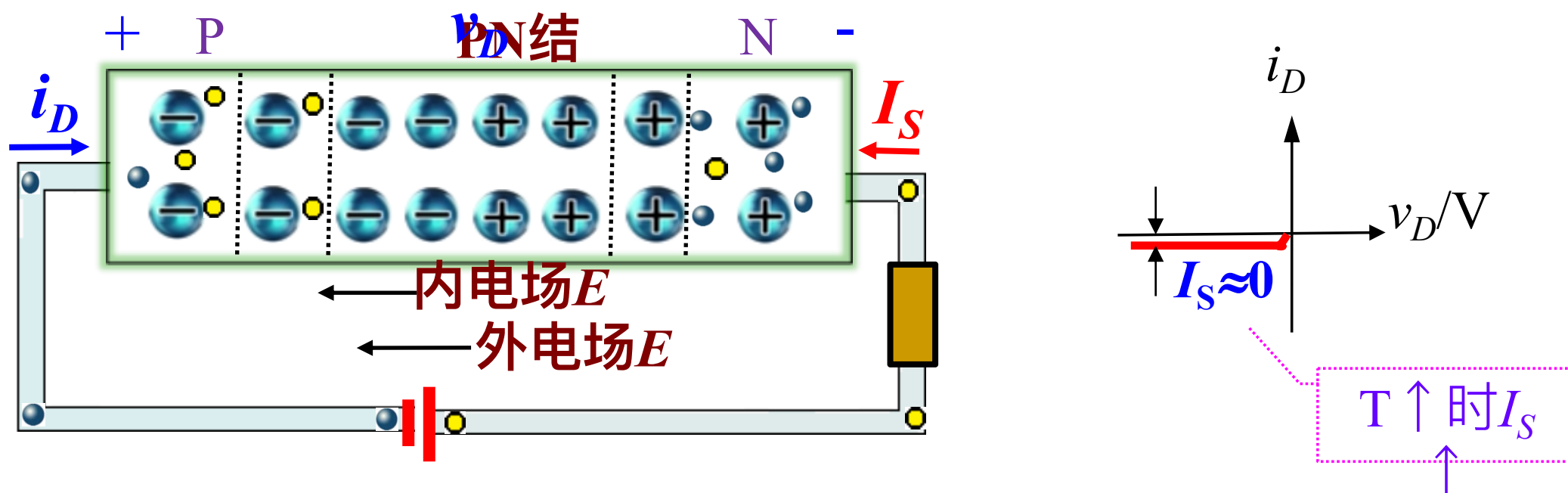
A、PN结的正偏特性：正向导通

呈小电阻特性，理想情况下相当于开关闭合，处于导通状态——简称为正向导通。



B、PN结的反偏特性：反向截止

呈大电阻特性，理想情况下相当于开关断开，处于截止状态——简称为反向截止。

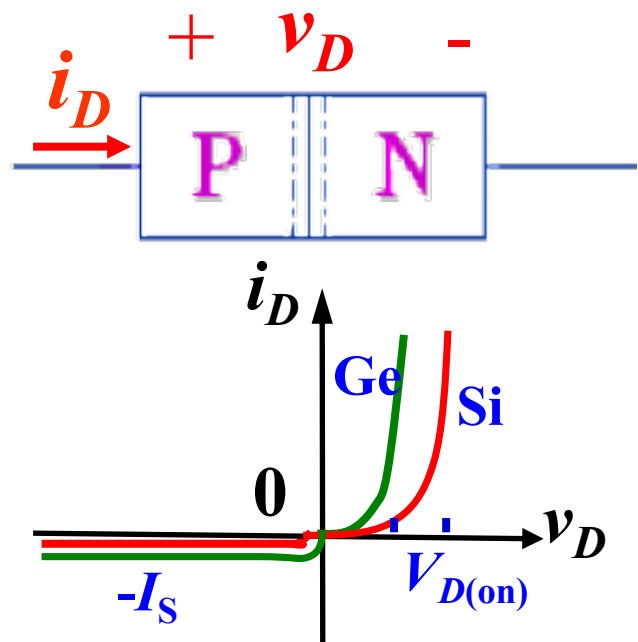


C、PN结单向导电时的伏安特性 ($v_D > -V_{BR}$)

P₃₄习题
1-2、1-10

二极管(PN结)具有单向导电性:即正向导通, 反向截止。

▶ 伏安特性曲线及温度特性



硅管 $\begin{cases} V_{D(on)} = 0.7V \text{左右} \\ I_S = (10^{-9} \sim 10^{-16})A \end{cases}$

锗管 $\begin{cases} V_{D(on)} = 0.2V \text{左右} \\ I_S = (10^{-6} \sim 10^{-8})A \end{cases}$

温度每升高 1°C , $V_{D(on)}$ 约减小 2.5mV 。
温度每升高 10°C , I_S 约增加一倍。

即PN结受温度影响大——温度特性

▶ 伏安特性方程式(单向导电性特性的数学描述)

$$i_D \approx I_S \left(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right) \text{ (非线性关系)}$$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{正偏时: } i_D \approx I_S e^{\frac{v_D}{V_T}} \\ \text{反偏时: } I \approx -I_S \approx 0 \end{array} \right.$

I_S 为反向饱和电流(很小, 近似为0)受温度影响很大。

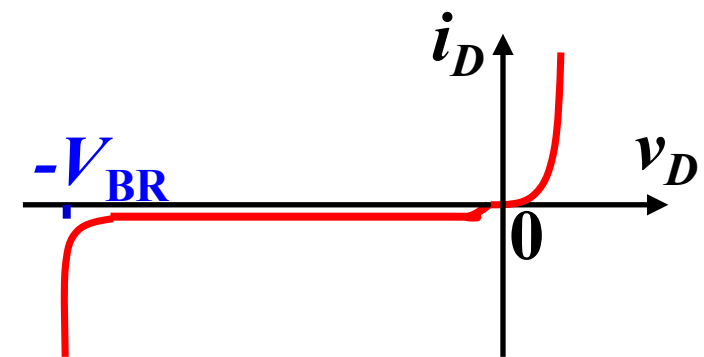
热电压 $V_T = kT/q \approx 26\text{mV}$ (室温)

返回

2、PN结的反向击穿特性

$|v_D| \uparrow = V_{BR}$ (击穿电压) 时,

$\rightarrow |i_D|$ 急剧 $\uparrow\uparrow\uparrow \rightarrow$ PN 结反向击穿。



击穿原因: 原子中共价键束缚被破坏, 自由电子-空穴对数目急增造成的。

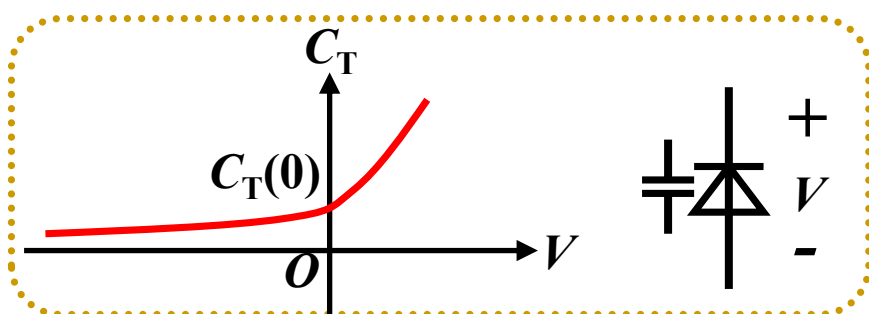
击穿 { **热击穿:** PN结烧毁 ($i_D \cdot v_D > P_M$)
(不可逆) (必须避免) PN结的耗散功率
电击穿: PN结未损坏 ($i_D \cdot v_D < P_M$) 断电或降压即恢复。
(可逆) (可利用)

电击穿 { **雪崩击穿** { **条件:** PN 结掺杂浓度较低 (l_0 较宽)
原因: 外加反向电压较大 ($> 6\text{ V}$) 时, 载流子动能增大形成 **碰撞电离**
齐纳击穿 { **条件:** PN 结掺杂浓度较高 (l_0 较窄)
原因: 外加反向电压较小 ($< 6\text{ V}$), 形成很强的反向电场, 将电子强行拉出共价键: **强致电离**

3、二极管(PN结)的电容特性

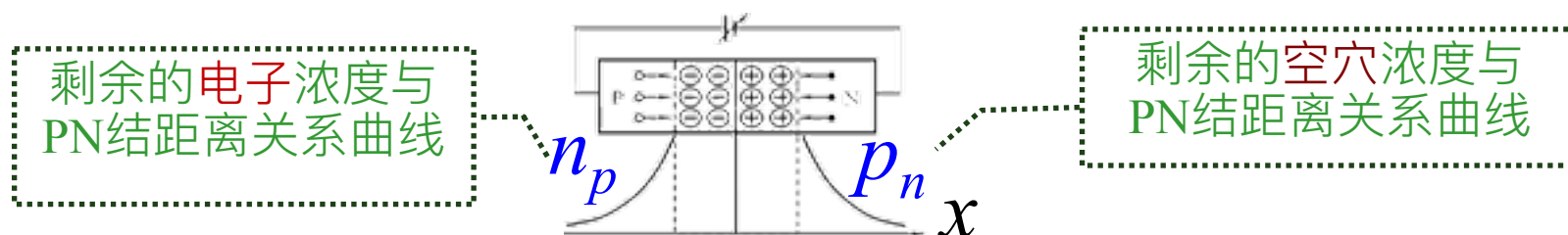
PN结上偏置电压变化时，PN结空间电荷区的宽度、PN结内储存的正负离子电荷数量、PN两侧载流子数目都会发生变化，此现象跟电容相似，即PN结具有一定的电容效应。按照产生的机理不同，PN结的电容效应包含两部分：势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D 。其值都很小，一般为几PF~几十PF。

势垒电容 C_T ：PN结内电荷量随外加电压变化产生的电容效应。



在电子设备中，常把反偏的PN结作压控电容器使用(变容二极管)

扩散电容 C_D ：PN结两侧累积的电荷量随外加电压变化产生的电容效应。



PN结正偏时，以扩散电容为主，反偏时，以势垒电容为主。

PN结总电容： $C_j = C_T + C_D$ (高频工作时必须考虑)

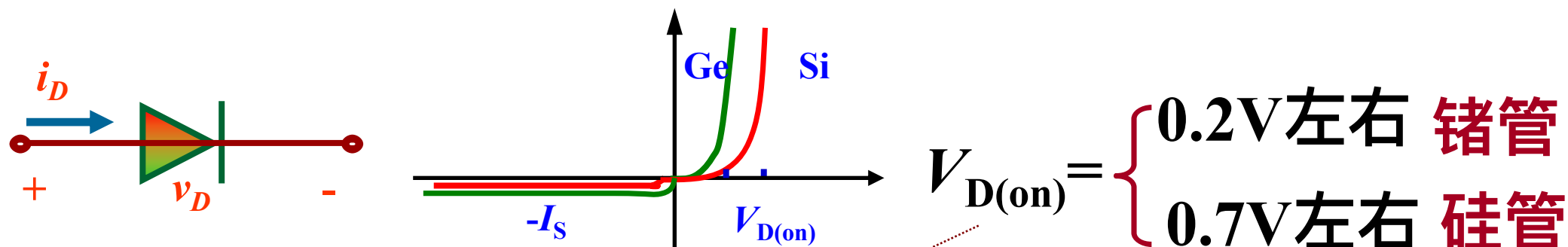
结电容越小，二极管允许的最高工作频率 f_M 越高

返回

第二次课后小结及作业

□PN结的形成：多子扩散电流 \approx 少子漂移电流

□二极管的基本特性：单向导电性——正向导通，反向截止



$$i_D \approx I_S \left(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right)$$

工程上：
二极管上的正向压降 $\approx V_{D(on)}$

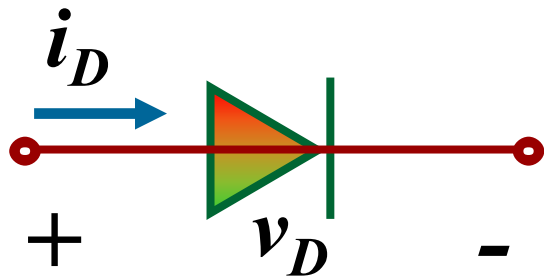
□二极管的反向击穿特性：

稳压管正偏导通，反偏截止，当反偏电压到达击穿电压时反向击穿，且满足 $I_{zmin} < I_z < I_{zmax}$ 时而稳压。

□作业：P₃₄₋₃₅ 1-4、1-5、1-6、1-15题

四、四种常见二极管导电情况

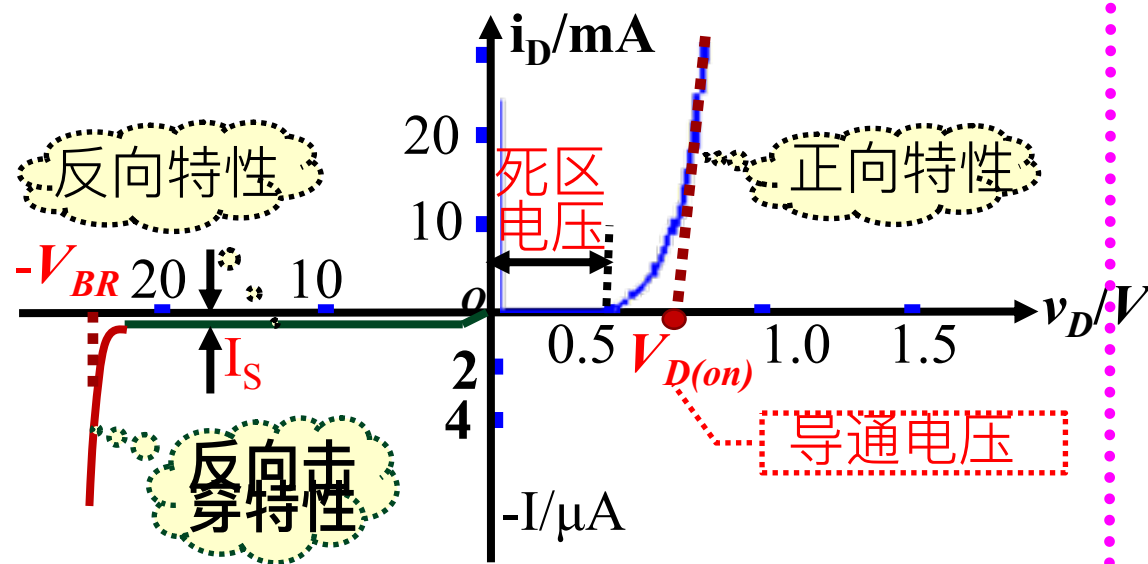
1、普通二极管:利用PN结单向导电性而专门制造的二极管。



伏安特性方程: 与PN结相同

$$i_D \approx I_S \left(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right)$$

伏安特性曲线(以硅管为例):



主要参数:

♥ 最大整流电流 I_F

指二极管长期运行时, 允许通过管子的最大正向平均电流。 I_F 的数值是由二极管允许的温升所限定。

♥ 最高反向工作电压 V_R

为了留有余地, 通常将击穿电压 V_{BR} 的一半定为 U_R 。

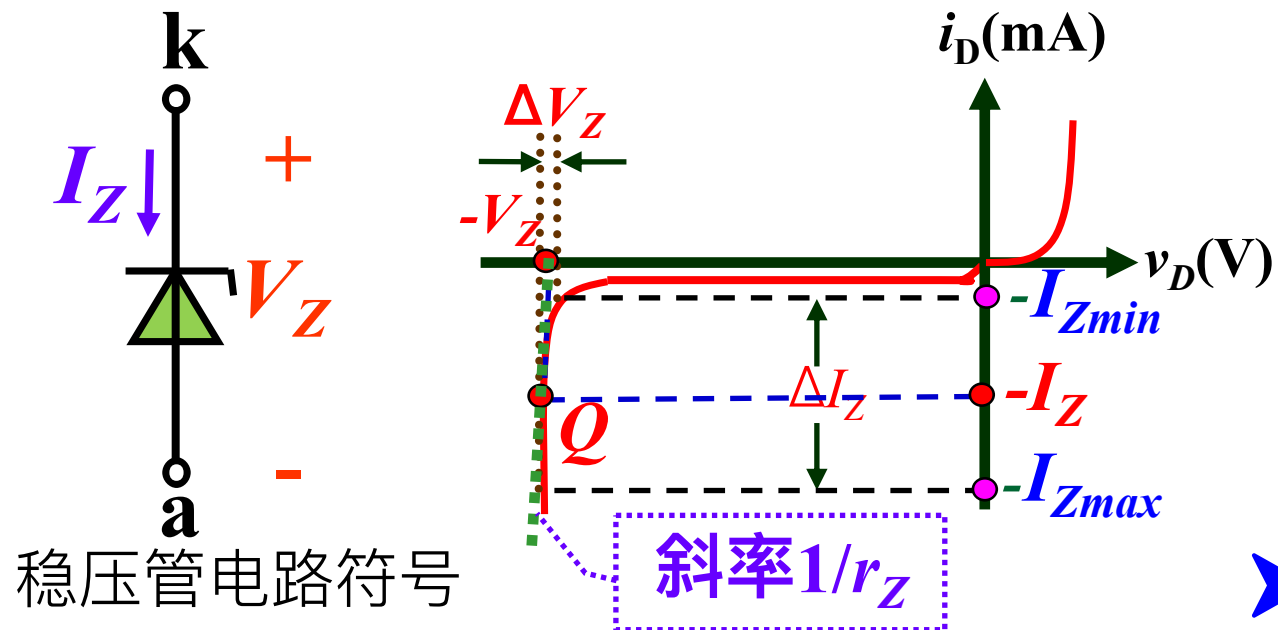
♥ 反向电流 I_S

通常希望 I_S 值愈小愈好。 I_S 受温度的影响很大。

♥ 最高工作频率 f_M

f_M 值主要决定于PN结结电容的大小。结电容愈大, 则二极管允许的最高工作频率愈低。

2、稳压二极管利用PN结的反向击穿特性制成的。



要求： $I_{Zmin} < I_Z < I_{Zmax}$

应用：用于直流稳压电路中，信号处理电路中做限幅使用。

► 使用稳压管组成电路时需注意的几个问题：

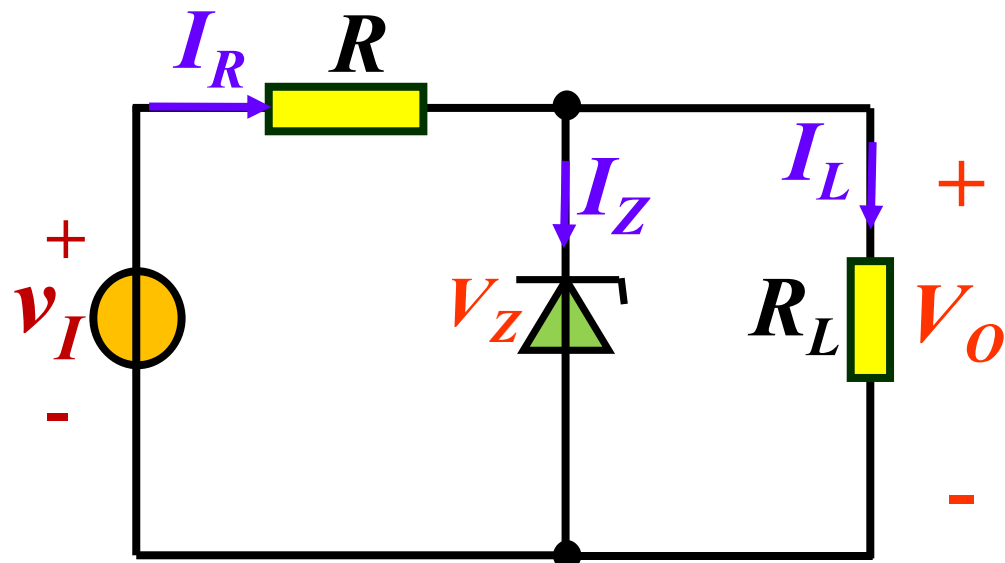
► 稳压管的主要参数

1. 最小工作电流 I_{Zmin} ；
2. 最大工作电流 I_{Zmax} ；
3. 稳定电压 V_Z 、电流 I_Z
4. 动态内阻 r_Z ： $r_Z = \Delta V_Z / \Delta I_Z$
其值越小越好。理想时 $r_Z \approx 0$
5. 耗散功耗 P_{ZM} ： $P_{ZM} > V_Z I_{Zmax}$

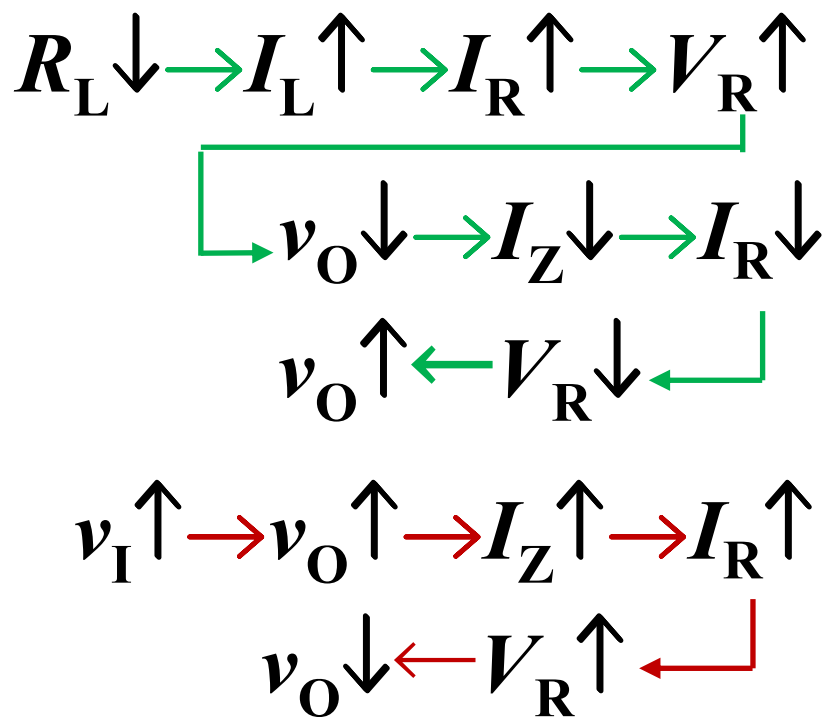
1. 稳压时应加反偏电压，以保证工作于反向击穿区
稳压管正偏时处于导通状态，反偏且电压低于击穿电压时处于截止状态。

2. 稳压管应与负载电阻并联以使输出电压稳定。
3. 必须限制稳压管的电流 I_Z

稳压电路



稳压原理:



1. 稳压时应加反偏电压，以保证工作于反向击穿区
2. 必须限制稳压管的电流 I_Z
3. 稳压管应与负载电阻并联以使输出电压稳定。

例1: 设 $V_Z=8V$ ，电阻适当，求不同条件激励时的输出 $V_O=?$

1. $V_I=10V$ 时

给稳压管加的反偏电压且达到击穿电压，所以反向击穿而稳压， $V_O=8V$

2. $V_I=5V$ 时

给稳压管加的反偏电压但未达到击穿电压，所以反向截止， $V_O \approx V_I R_L / (R_L + R) V$

3. $V_I=-5V$ 时

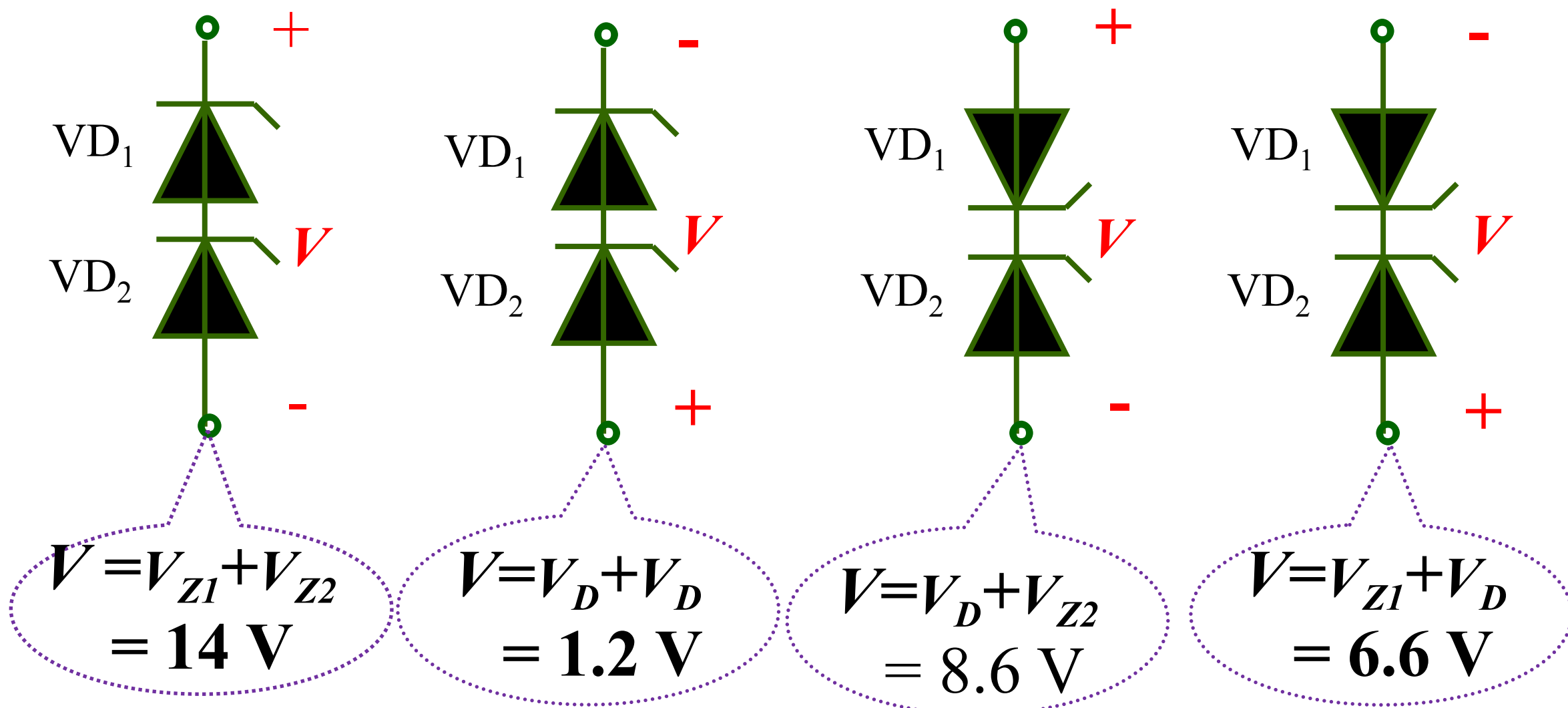
给稳压管加的正偏电压，所以处于导通状态， $V_O \approx -V_{D(on)}$

例子2

返回反向击穿特性

► 稳压管例子2

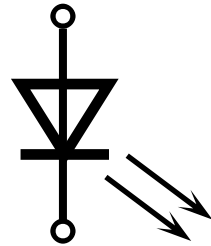
有两个稳压管 VD_1 和 VD_2 ，它们的稳压值为 $V_{Z1} = 6V$ ， $V_{Z2} = 8V$ ，正向导通压降均为 $V_D = 0.6V$ ，将它们串联可得到几种稳压值？（假设工作都安全）



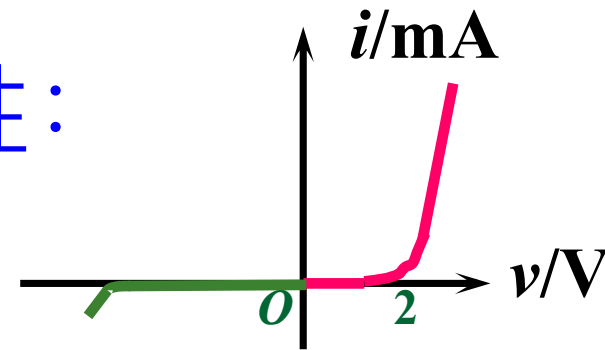
3、发光二极管 LED

将PN结上的能耗有效地转换成光强发射出来的特种二极管。

符号:



特性:



工作条件: 正向偏置 (多子扩散过程中, 相遇而复合, 从而释放能量, 当此能量大于内耗时, 就会在半导体内产生光强)

一般工作电流: 10~20 mA; 导通电压: (1.5 ~ 2.3) V

不同材料制成的管子会发出不同颜色(波长)的光。

采用透光材料进行封装。常用于显示屏、电气设备中的电源指示灯。

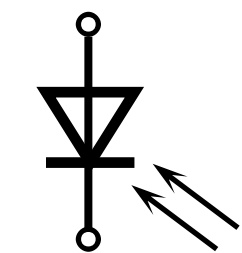
发光类型: { 可见光: 红、黄、绿
不可见光: 红外光

显示类型: 普通 LED, 七段LED, 点阵LED

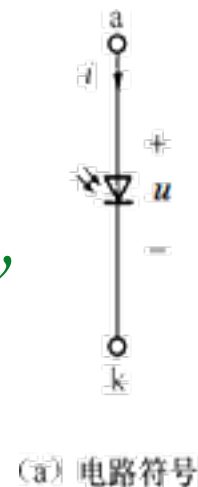
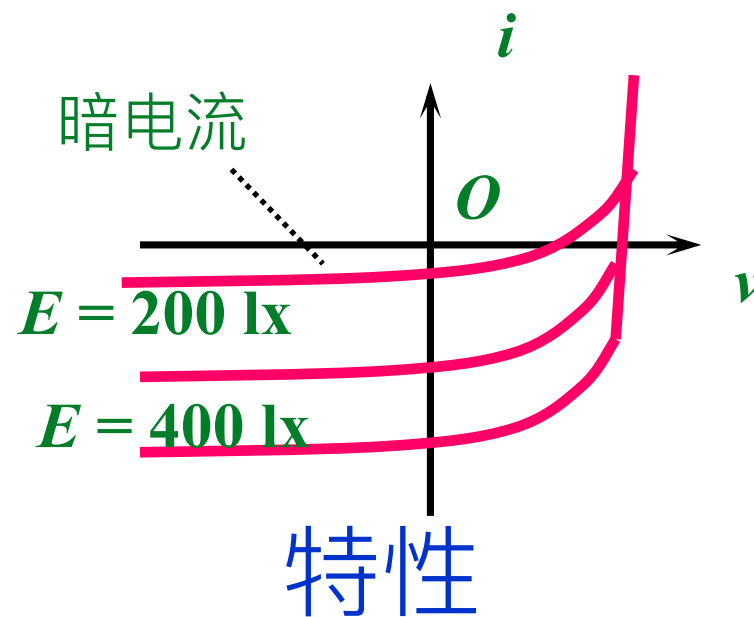
4、光电二极管(光敏二极管)

❓ 光生伏特效应器件, 与半导体有关的两端元件。

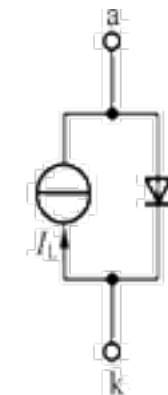
❓ 其反偏电流随光照强度的变化而变化



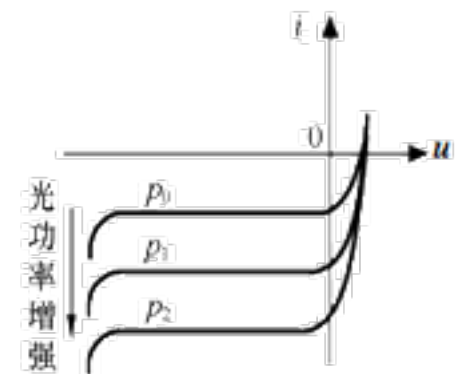
符号



(a) 电路符号



(b) 等效符号



(c) 伏安特性曲线

$$i = I_S \left(e^{\frac{(u - iR_S)/(nU_T)}{nU_T}} - 1 \right) - I_L$$

工作条件: 反向偏置 (主要是少数载流子漂移运动, 光照越强, 本征激发越剧烈, 产生的自由电子-空穴对越多, 形成的漂移电流越大)

主要参数: 电学参数: 暗电流, 光电流, 最高工作范围
光学参数: 光谱范围, 灵敏度, 峰值波长

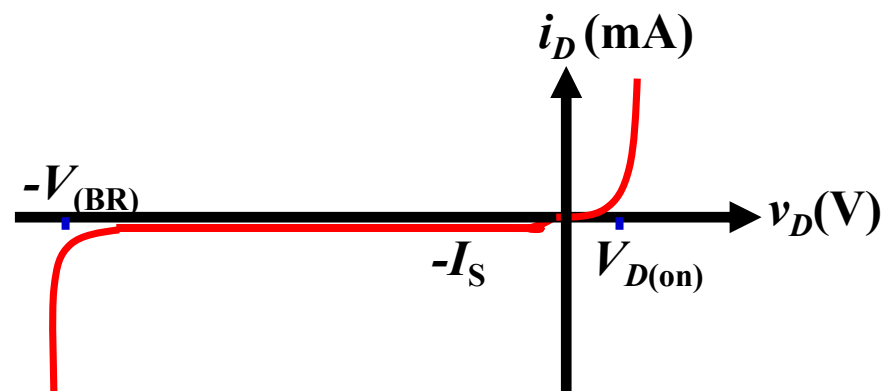
1.4、二极管的分析方法(半导体非线性电路的分析基础)

一、二极管的几种常见模型:

❑ 便于计算机辅助分析的数学模型——伏安特性方程式

理想模型: $i_D \approx I_S (e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1)$

❑ 适于任一工作状态的通用曲线模型



当 $v_D > V_{D(on)}$ 时 → 导通

当 $v_D < V_{D(on)}$ 时 → 截止

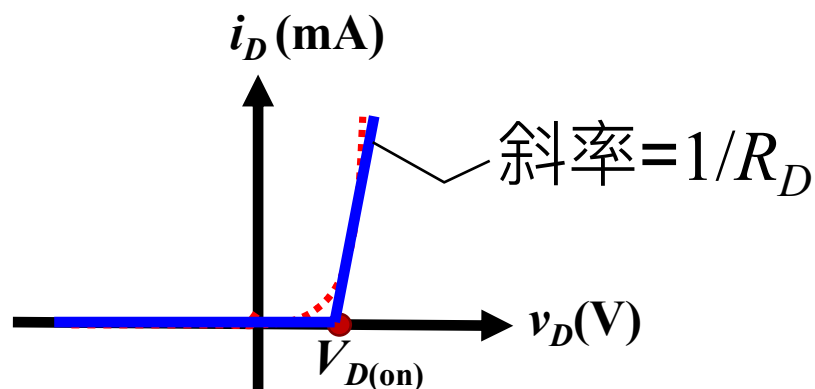
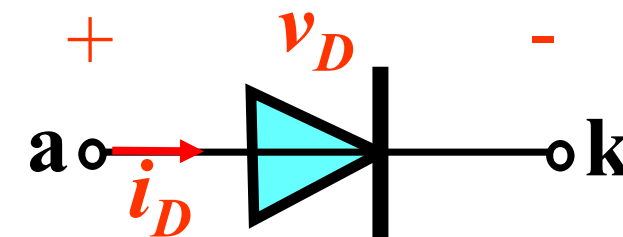
当反向电压 $|v_D| \geq V_{(BR)}$ 时 → 击穿

非线性 → 分析复杂 → 工程上不适用

❑ 电路分析、设计时采用简化模型 { 直流简化电路模型 { 恒压模型
交流小信号电路模型 { 折线模型
理想模型

利于工程上近似快速分析, 适用于电路的功能分析计算

二极管的大信号模型 (将特性分段线性化)

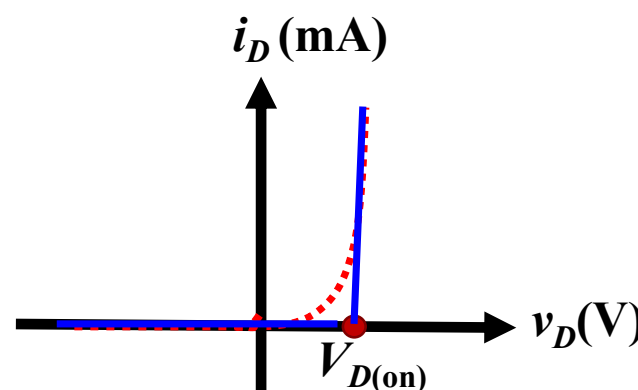


直折线模型

利用单向导电性的电路中，实际二极管的伏安特性曲线

截止时: $i_D \approx 0$

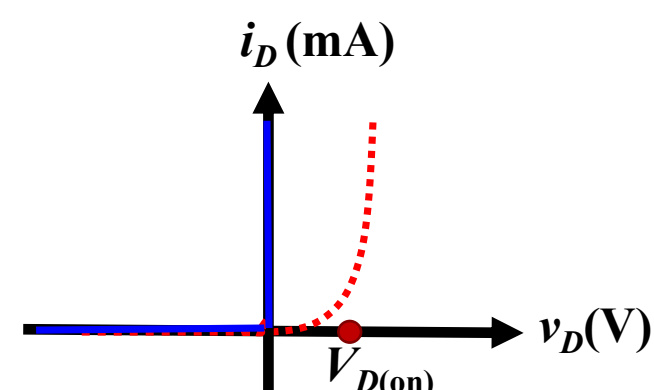
导通时: $v_D = R_D i_D + V_{D(on)}$



恒压降模型

近似分析中最常用 (忽略 R_D)

导通时: $v_D = V_{D(on)}$
截止时: $i_D = 0$



理想模型

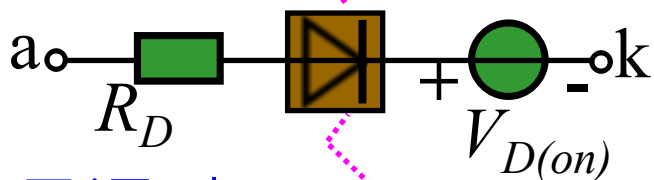
理想二极管 (忽略 R_D 、 $V_{D(on)}$)

理想开关

导通时: $v_D = 0$
截止时: $i_D = 0$

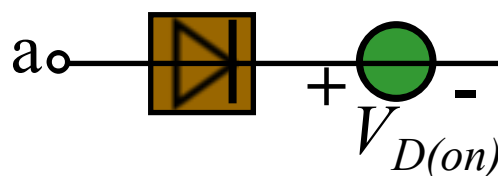
电路模型

截止时:

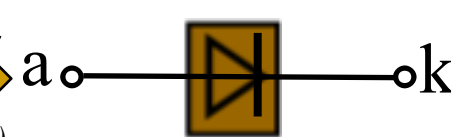


导通时:

忽略 R_D

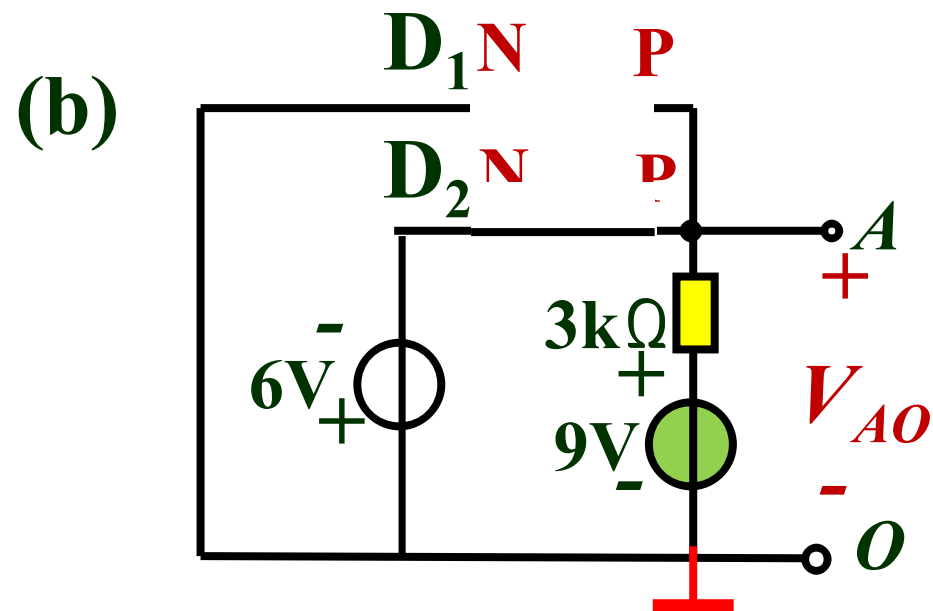
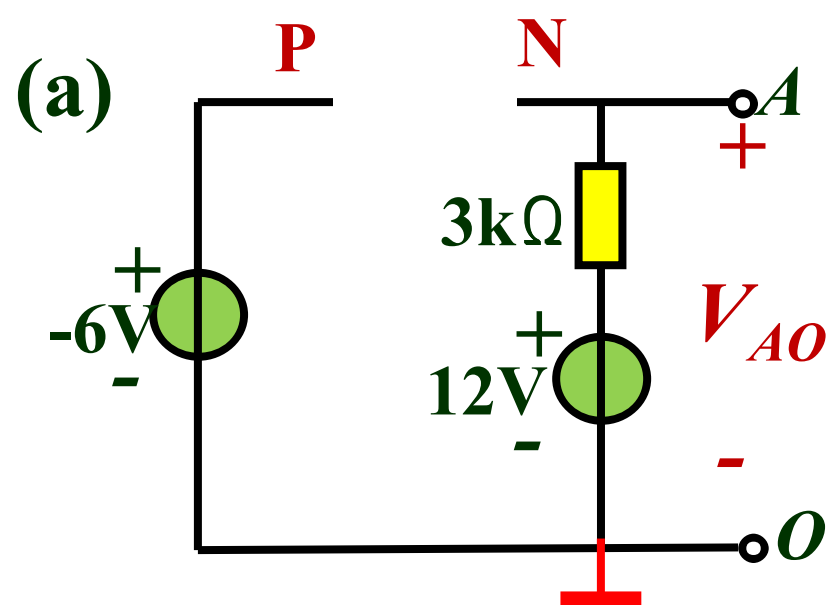


忽略 $V_{D(on)}$



应根据不同情况选择不同的等效电路!

例1： 设二极管是理想的， 求 V_{AO} 值。(工程估算法)



解：图(a)，假设D开路，则D两端电压：

$$V_D = -6 - 12 = -18 < 0V, \text{ 故D截止。 } V_{AO} = 12V。$$

图(b)，假设 D_1 、 D_2 开路，则D两端电压：

$$V_{D1} = 9V > 0V, \quad V_{D2} = 9 - (-6) = 15V > 0V$$

由于 $V_{D2} > V_{D1}$ ，则 D_2 优先导通。

此时 $V_{D1} = -6V < 0V$ ，故 D_1 截止。 $V_{AO} = -6V$ 。

▶ 二极管的分析方法之一：工程估算法

▶ 简化分析法（工程估算法）：

即将电路中二极管用简化电路模型代替，利用所得到的简化电路进行分析、求解。

※ 判断二极管是导通还是截止？

☐ 假设电路中二极管全部开路，分析其两端的电位。

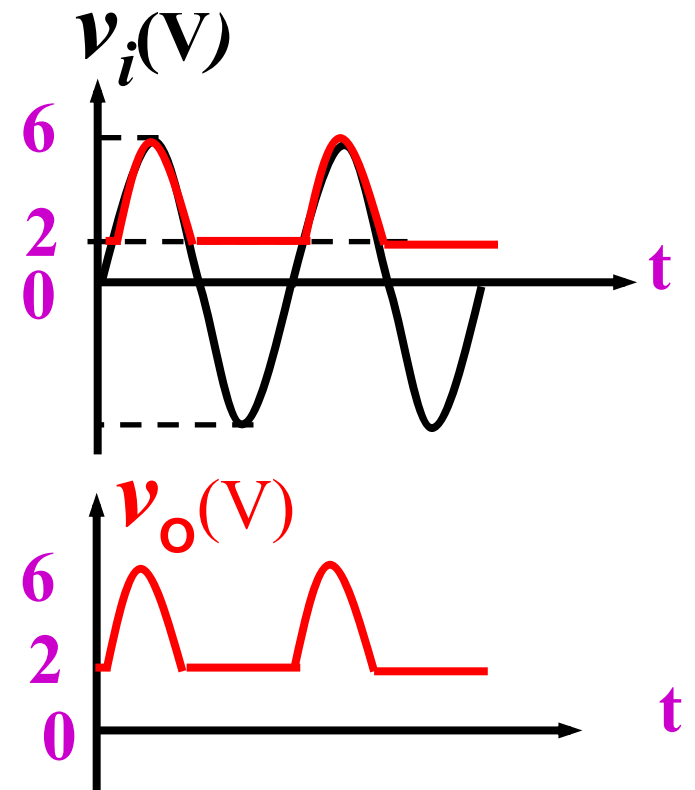
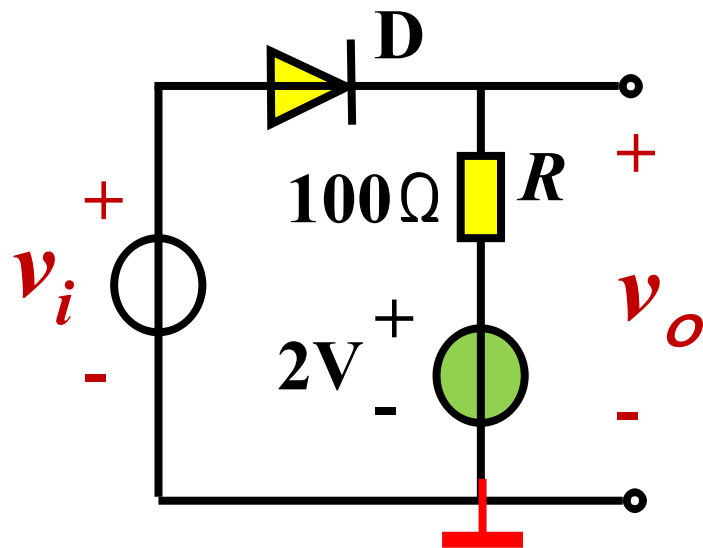
理想二极管：若 $V > 0$ ，则管子导通；反之截止。

实际二极管：若 $V > V_{D(on)}$ ，管子导通；反之截止。

☐ 当电路中存在多个二极管时，正偏电压最大的管子优先导通。其余管子需重新分析其工作状态。

※ 将截止的二极管开路，导通的二极管用对应的简化电路模型替代，然后分析求解。

例2 设二极管是理想的, $v_i = 6\sin\omega t(\text{V})$, 试画 v_o 波形。



分析: 根据输入信号大小→判断二极管的导通与截止
→找出 v_o 与 v_i 关系→画输出信号波形。

解: $v_i > 2\text{V}$ 时, D导通, 则 $v_o = v_i$

$v_i \leq 2\text{V}$ 时, D截止, 则 $v_o = 2\text{V}$

由此可画出 v_o 的波形。

例3： 整流电路

► 半波整流电路

若输入信号为正弦波：

当 $v_i > 0V$ 时，D导通，则 $v_o = v_i$

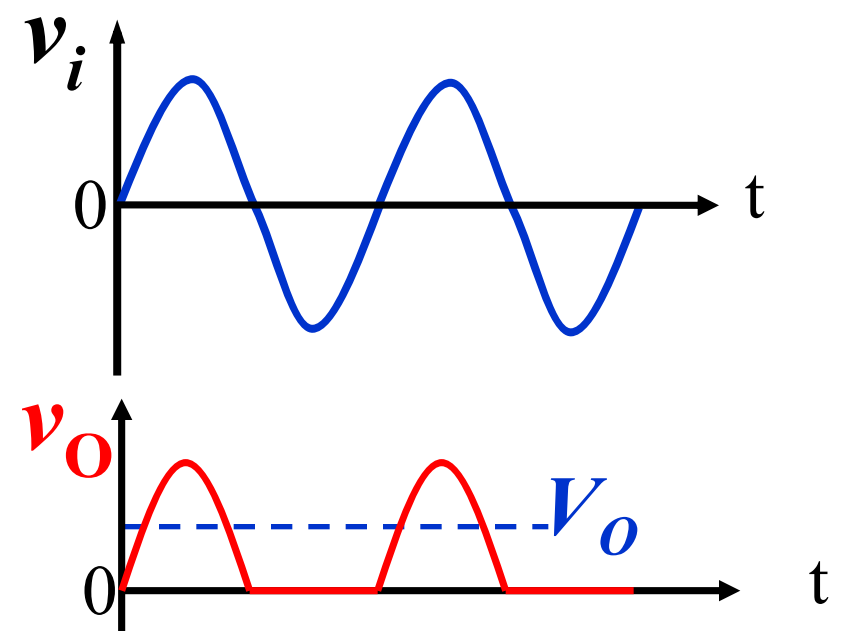
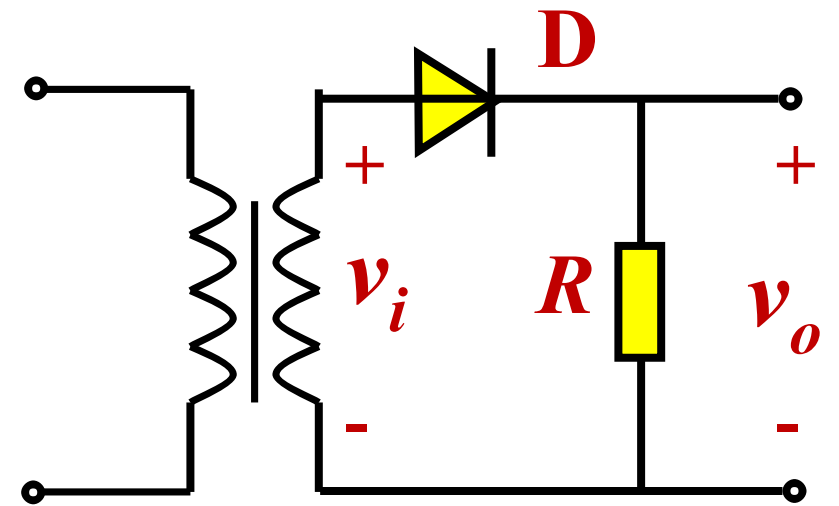
当 $v_i \leq 0V$ 时，D截止，则 $v_o = 0V$

由此，利用二极管的单向导电性，实现了半波整流。

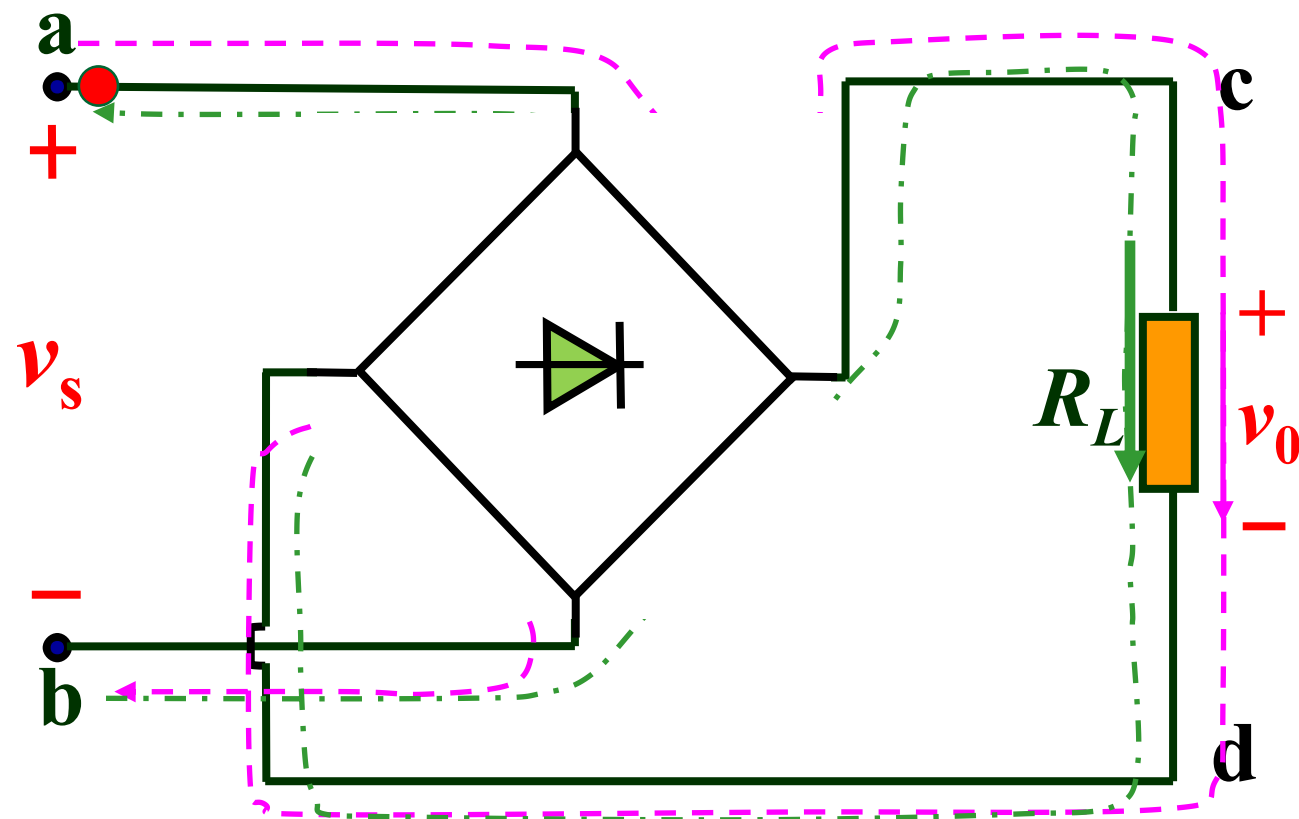
$$\text{平均值: } V_o \approx \frac{1}{\pi} V_{im}$$

二极管的最高反向电压: $V_{R\max} = \sqrt{2}V_i$

通过二极管的电流平均值: $I_D = I_L \approx \frac{0.45V_i}{R_L}$



例4： 单相桥式整流电路



1. 当 $v_s > 0$ 时,

$D_1 D_3$ 导通, $D_2 D_4$ 截止

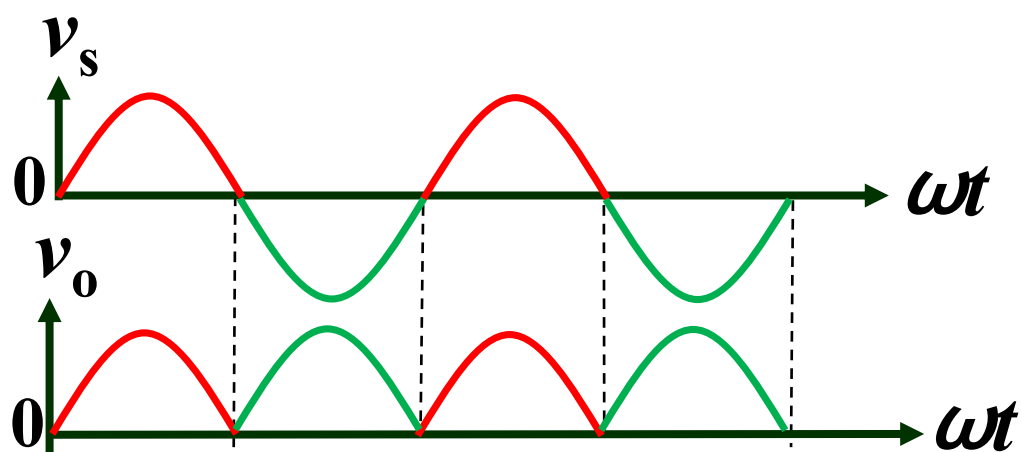
$$v_o = v_{ab} = v_s$$

2. 当 $v_s \leq 0$ 时,

$D_2 D_4$ 导通, $D_1 D_3$ 截止

$$v_o = v_{ba} = -v_s$$

3. 综合1、2得: $v_o = |v_s|$

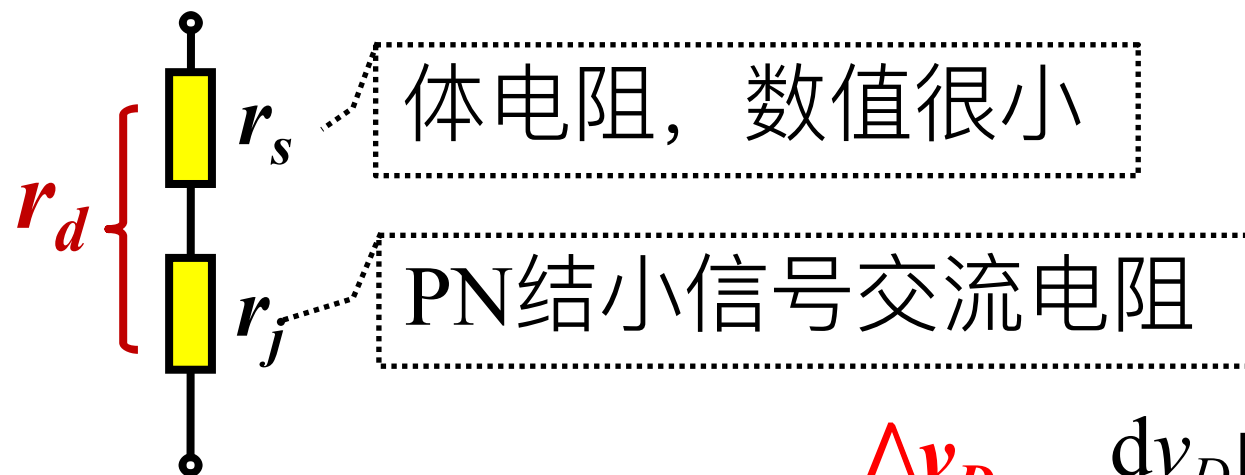


输出电压 u_o 平均值(直流分量):

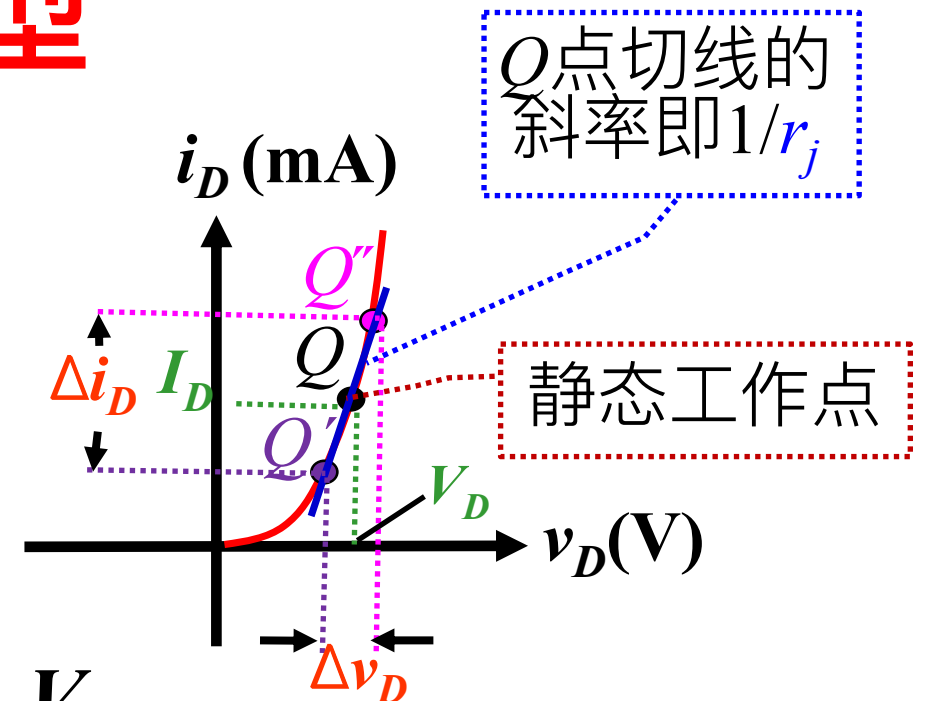
$$V_O = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} V_2 \sin \omega t d\omega t \approx 0.9 V_2$$

➤ 二极管的小信号电路模型

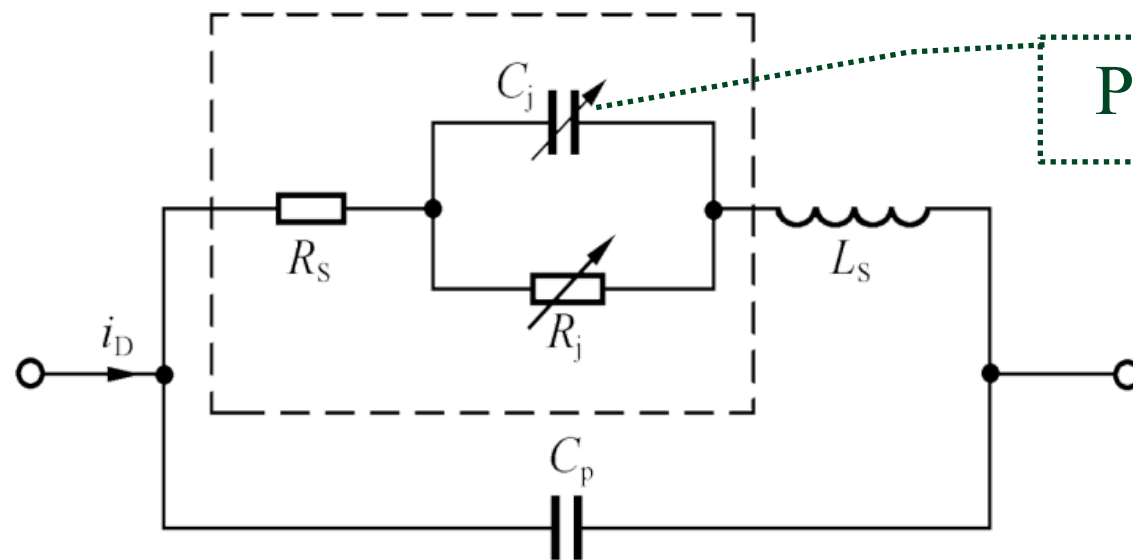
1. 二极管低频小信号模型



$$r_d = r_s + r_j \approx r_j = \frac{\Delta v_D}{\Delta i_D} \approx \left. \frac{dv_D}{di_D} \right|_Q = \frac{V_T}{I_D}$$



2. 二极管高频小信号模型(了解)



PN结结电容, 由 C_D 和 C_T 两部分构成

注意: 高频工作时, C_j 容抗很小
PN结单向导电性会因 C_j 的交流旁路作用而变差, 所以需考虑 C_j 影响。

► 二极管的小信号分析方法

将电路中的二极管用小信号电路模型代替，用得到的小信号等效电路分析电压或电流的变化量。

分析步骤：

- ❑ 将直流电源短路，画交流通路。
- ❑ 用小信号电路模型代替二极管，得小信号等效电路。
- ❑ 利用小信号等效电路分析电压与电流的变化量。

总结及作业

❓ 练习题:1-1、1-2、1-3、1-4、1-5、1-6、1-7、1-9、1-10、1-11、1-15等

总结

半导体的基础知识

半导体---导电能力介于导体和绝缘体之间的物质(如硅Si、Ge)。

本征激发：温度↑或光照加强时会产生自由电子-空穴对

两种载流子：电子（带负电）、空穴（带正电）

特性：光敏性、热敏性、掺杂性

本征半导体：纯净的具有单晶结构的半导体

杂质半导体：在本征半导体中加入杂质元素形成的半导体

N型半导体：加五价元素、多子是电子，少子是空穴

P型半导体：加三价元素、多子是空穴，少子是电子

多子主要由掺杂浓度决定，少子主要由温度决定

二极管(PN结)的特性

主要特性：单向导电性（正向导通，反向截止）

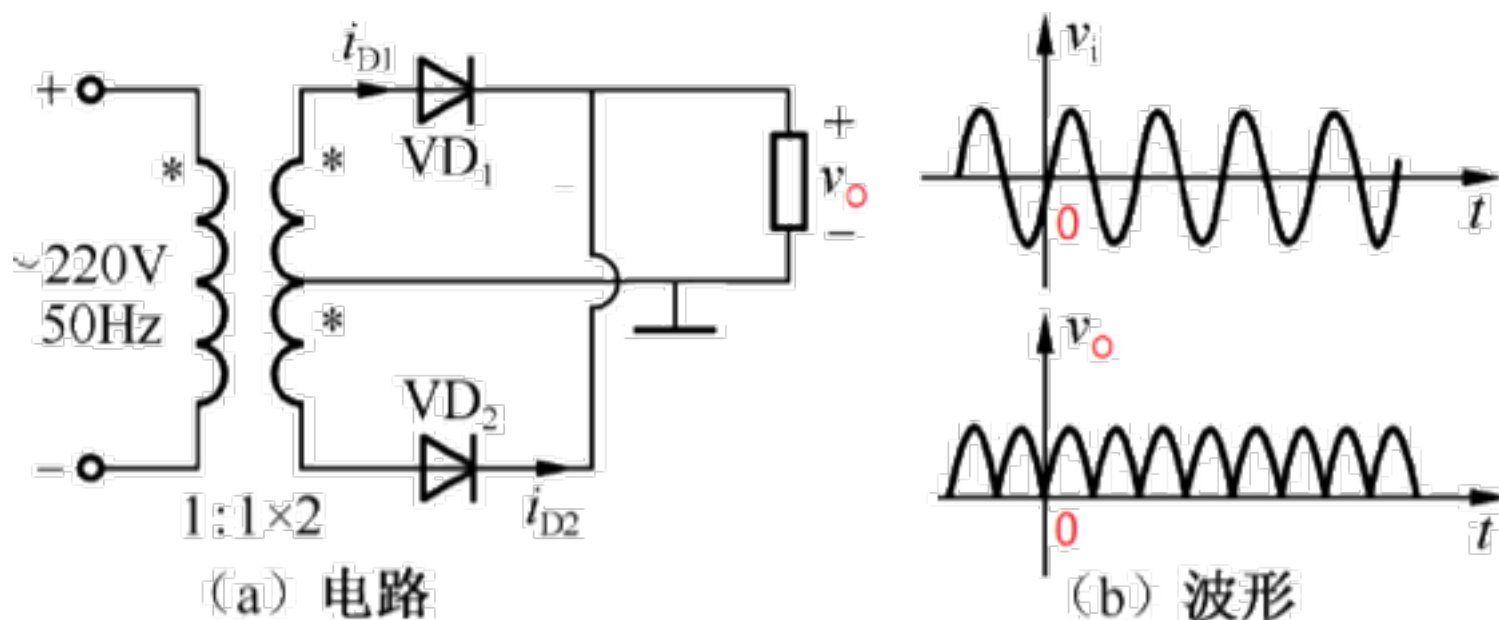
反向击穿特性：利用此特性可构成稳压二极管

温度特性：二极管性能与外界环境有关($T \uparrow$ 时: $I_s \uparrow$, $V_{D(on)} \downarrow$)

电容特性：正偏时以扩散电容为主，反偏时以势垒电容为主
(高频时必须考虑) 利用此特性可制成变容二极管

典型分析案例1: 1.5.3单元电路与电路结构

- 1) 将输入双向转成输出单向电量:利用二极管的单向导电性实现
- 2) 将输入正、负半周电量分别用不同通路来实现;



1.当 $v_i > 0$ 时, D_1 导通

D_2 截止, $v_o = v_i$

2.当 $v_i < 0$ 时, D_2 导通

D_1 截止, $v_o = -v_i$

则电路输出电压为:

$$v_o = |v_i|$$

输入较小时, 输出表达式不能反映实际情况。

3) 电路功能分析---近似分析
(若二极管选用理想模型)

电路输出电压平均分量为:

$$\bar{v}_o = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} V_m \sin \omega t dt = \frac{2V_m}{\pi}$$

4) 电路实现分析---精度误差分析(了解)

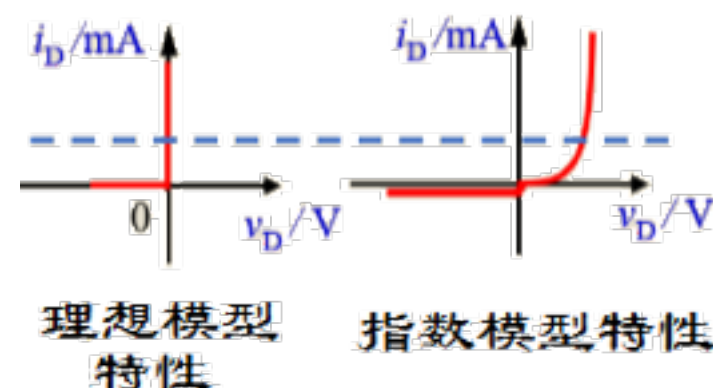
结论:

电路结果与需求有误差,
即电路需优化(8章)

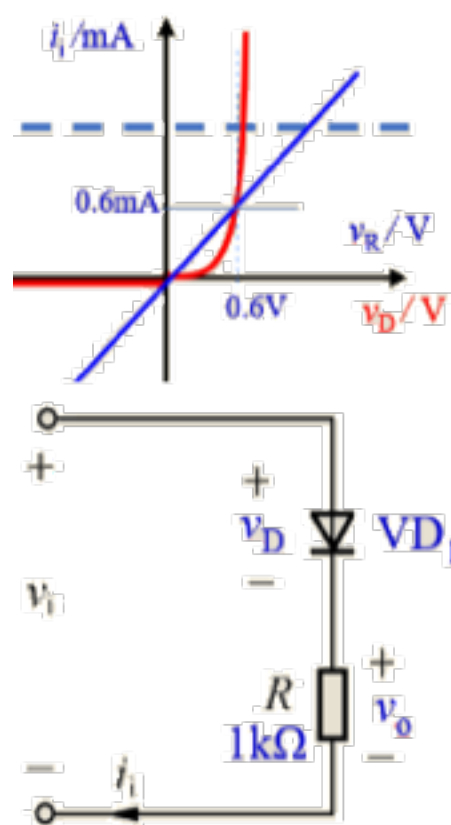
4) 电路实现分析----精度误差分析(了解)

1. 二极管理想模型的电压误差评估

随着输入增加, v_D 误差在: $0 \sim 0.8V$



2. 输入信号作用下, 二极管的电压占比评估



在给定元件的实际伏安特性后, 发现:

$0 < v_i < 1.2V$ 时, $v_R < v_D$ $\frac{v_D}{v_i} = \frac{v_D}{v_R + v_D} > 0.5$ v_D 不能近似为零

$1.2 < v_i < 311V$ 时, $v_R > v_D$, 且在 $0.6 < v_D < 0.8V$ 时, 二极管特性近似为一条直线

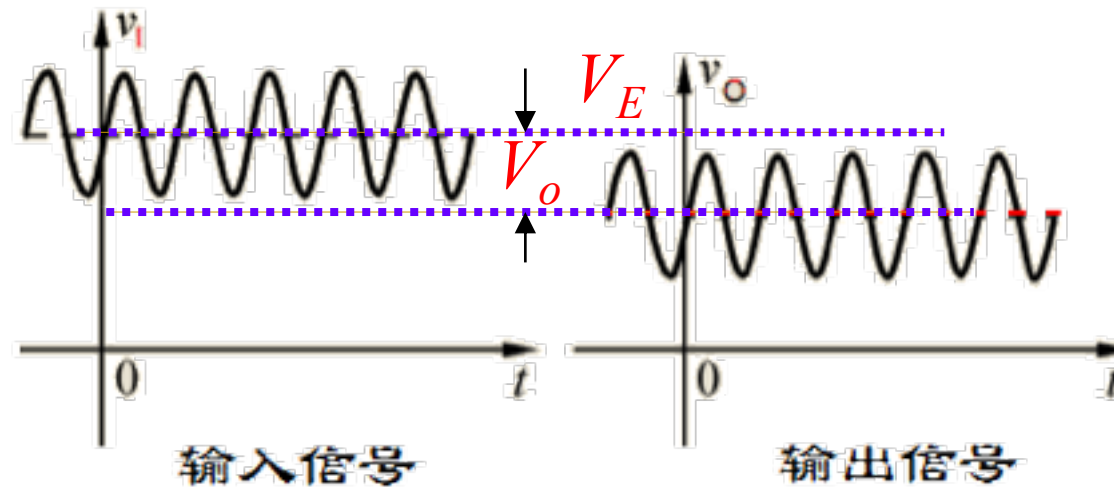
$$\frac{v_D}{v_i} = \frac{v_D}{v_R + v_D} = \frac{1}{1 + v_R/v_D} = 0.5 \sim 2.5 \times 10^{-3}$$

输入电压增长, v_D 占比减小, 将 v_D 视为零可行

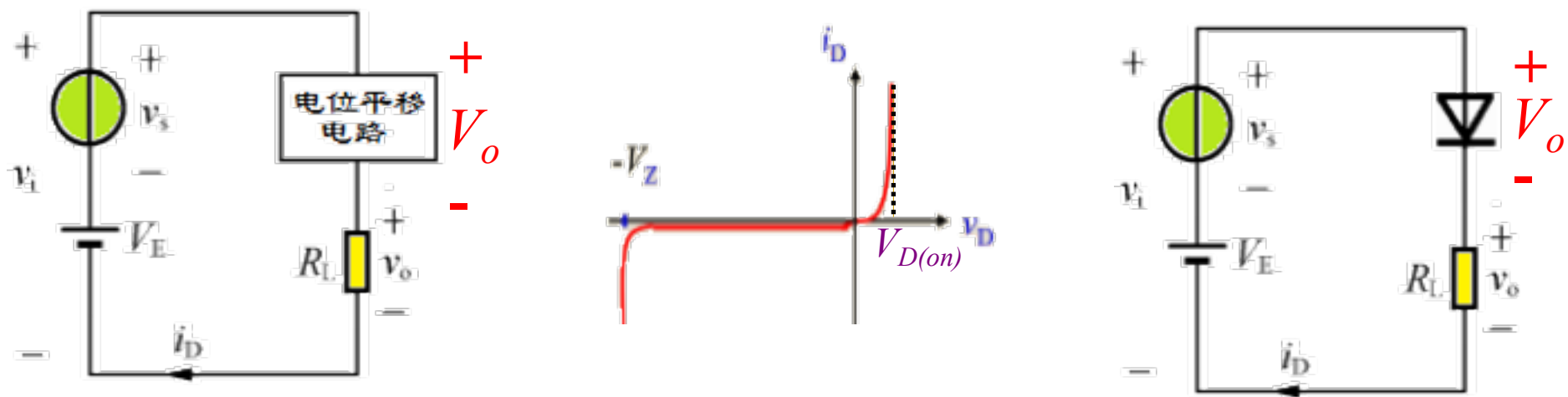
返回

典型分析案例2--- 1.4.2 电位平移电路目标与二极管运用

已知：



确定电路：■ 输入与输出相差一直流电压($v_i - v_o = V_o$ (常数))
[?] 可依据二极管的导通区(或反向击穿区)来实现。



简单分析(工程近似分析): $v_o = v_i - V_o = v_i - V_{D(on)}$

精确分析(了解):

精确分析

依据高等数学的泰勒级数，即

$$v_o = f(v_i) \approx f(V_E) + \left. \frac{df(v_i)}{dv_i} \right|_{v_i=V_E} \cdot v_s \quad \text{其中}$$

$V_{o1} = f(V_E)$ 只与输入直流有关，
可由右图来计算

近似分析： $V_{o1} = V_E - V_{D(on)}$

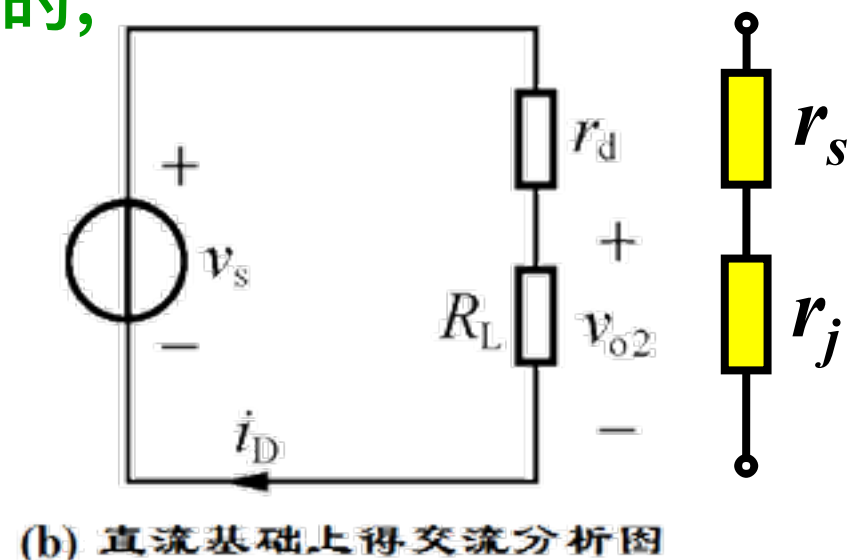
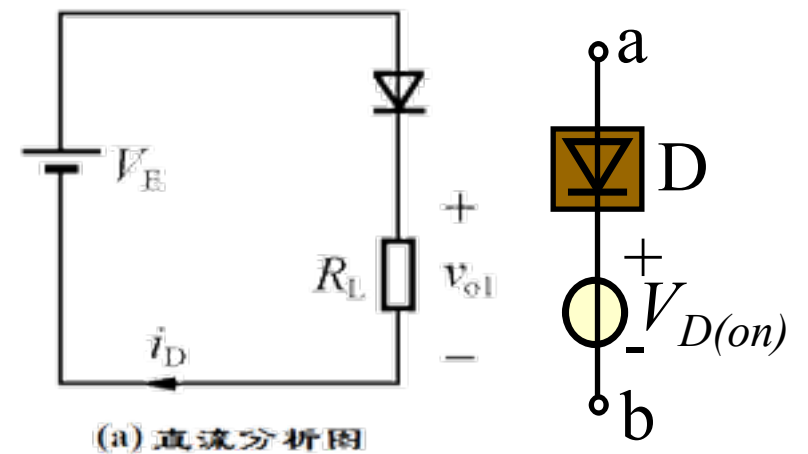
是在直流基础上，因输入交流变化引起的，
可由二极管特定区域小信号模型来计算

$$v_{o2} = \left. \frac{df(v_i)}{dv_i} \right|_{v_i=V_E} \cdot v_s$$

近似分析： $v_{o2} \approx v_s \cdot R_L / (r_d + R_L)$

最终结果： $v_o \approx V_E - V_{D(on)} + v_s \cdot R_L / (r_d + R_L)$ 其中 $r_d = r_j + r_s$

当 r_d 很小时有： $v_o \approx V_E - V_{D(on)} + v_s = V_E + v_s - V_{D(on)} = v_i - V_{D(on)}$



典型分析案例3： 1.4.2 分析模型选择与典型运用分析

元器件模型(按实际需求选择)

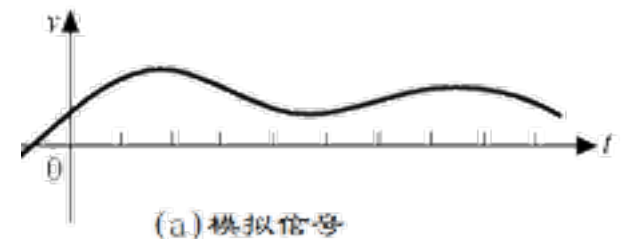
- 简单模型(利于工程上近似快速分析, 适用于电路的功能分析计算)
- 复杂模型(用于计算机分析, 便于数值分析对比、以利于电路最终工程实现和优化)

1. 数字信息处理与二极管的开关运用

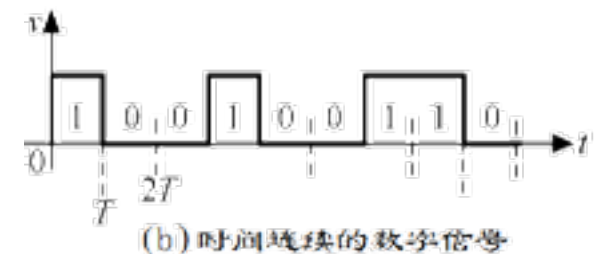
分析步骤:

- 确定信息类型和表述特点
- 选定元器件模型
- 确定分析手段

模拟信号: 能连续反映信息的变化,
可有一定范围的无穷取值可能。

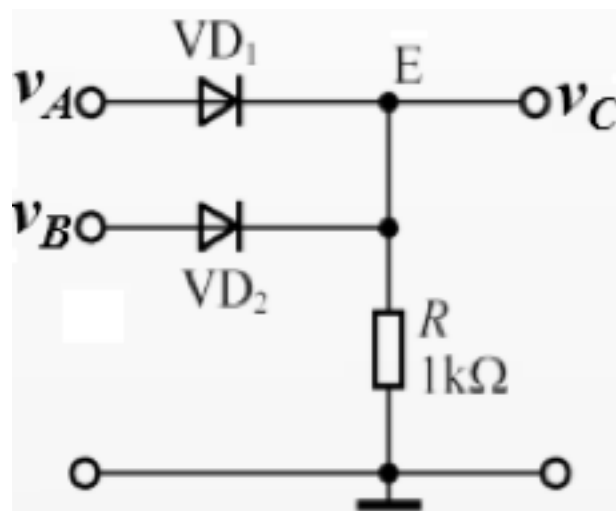


数字信号: 在时间 T 内只能表示一个信息。
只有0、1两种信息对应的高低电位取值。



典型分析案例3续：或逻辑电路分析

已知：



对应信息表述

A	B	C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

v_A

v_B

v_C

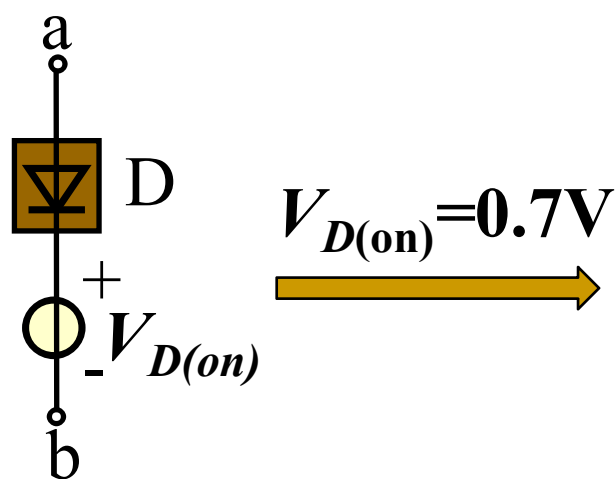
或逻辑关系：
 $C=A+B$

在0V左右

数字信息 { 0:用有一定误差的低电平表述
1:用有一定误差的高电平表述

→ 二极管用忽略 R_D 的直折线模型

在4.3-5V左右



直折线模型计算

v_A	v_B	v_C
0	0	0
0	5	4.3
5	0	4.3
5	5	4.3

选用的元器件模型
没有影响信息的表述，能说明问题。

结合P₃₆习题1-15

1.5 半导体非线性电路的近似分析与电路系统设计的关系

- 1.根据系统数学要求---构造电路模块结构---进行系统仿真
- 2.考虑各电路模块误差对系统结构影响---进行行为级仿真
- 3.完成各电路模块的具体电路构造---进行电路级仿真
- 4.对电路板布线---进行PCB版仿真设计

上述步骤应反复进行，以完成低成本、高质量的电路设计，其中仿真工具的使用是必需的。