

上节知识点回顾：

PN结加正向电压时，具有较大的正向扩散电流，呈现低电阻态，相当于PN 结导通；

PN结加反向电压时，具有很小的反向漂移电流，呈现高电阻态，相当于PN 结截止。

结论：PN结具有单向导电性。

上节知识点回顾:

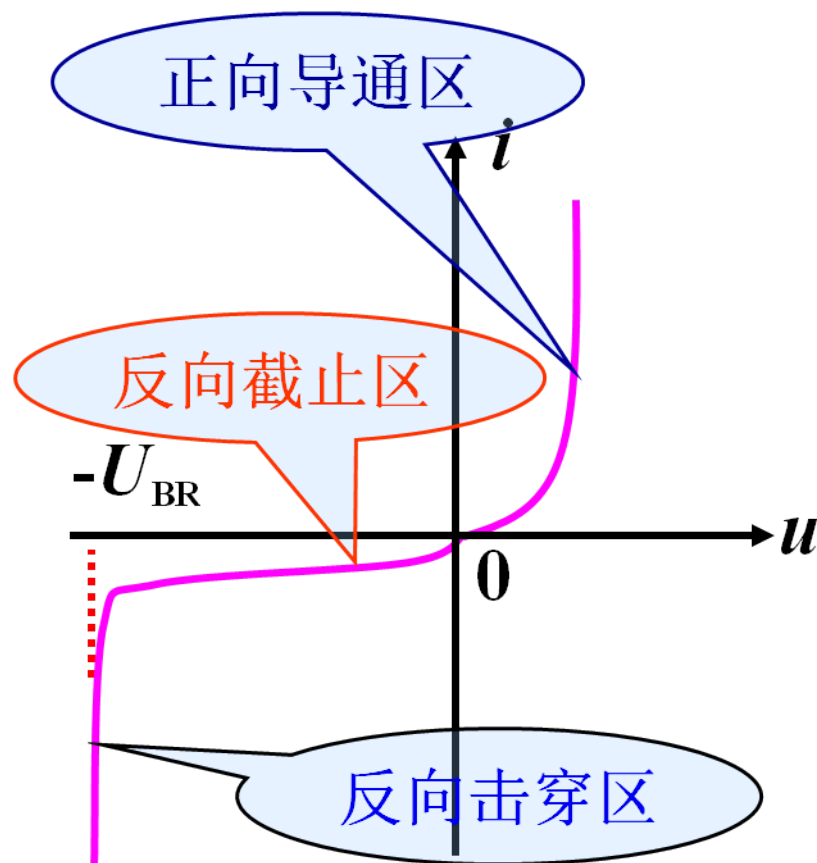


图 13. PN结的伏安特性曲线

§1.3 半导体二极管及其基本电路

PN结加上电极引线 and 管壳就形成晶体**二极管**。

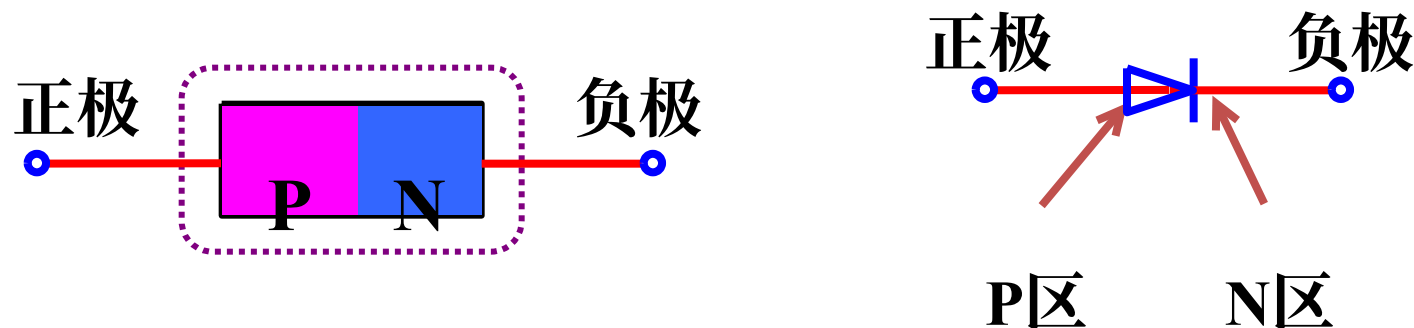
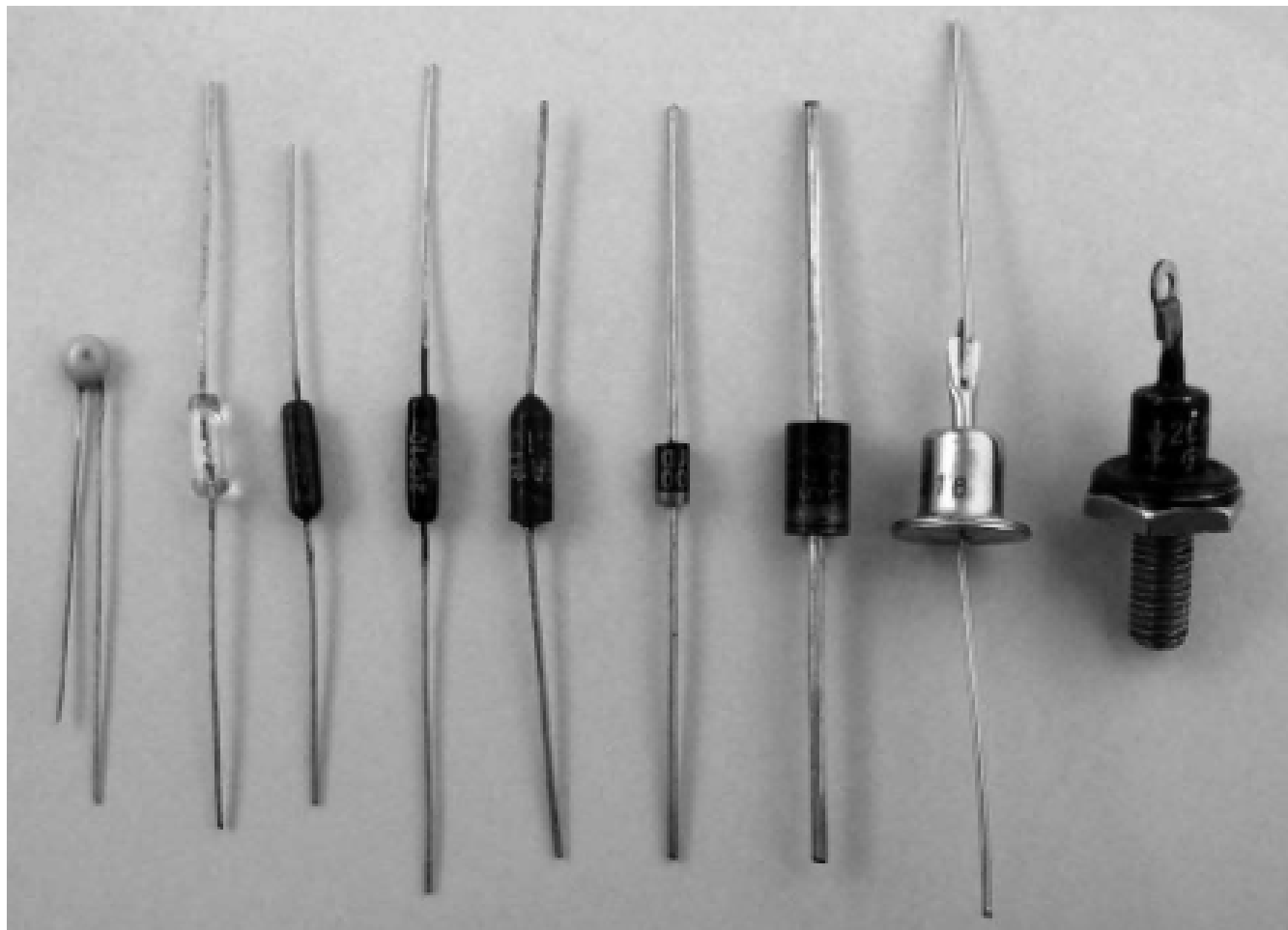


图 1. 晶体二极管(a)结构示意图及(b)电路符号



二极管实物



1. 二极管特性曲线

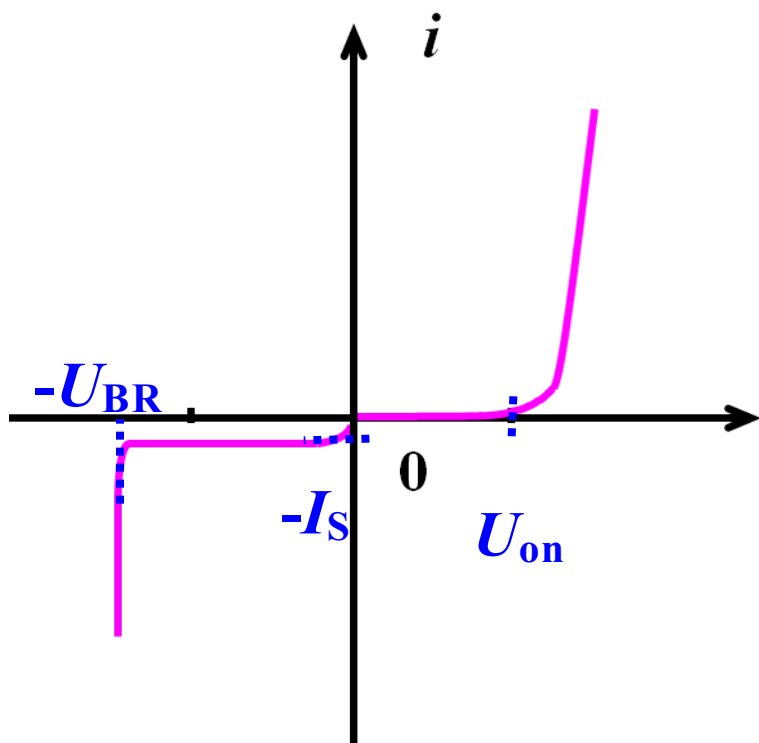


图 2. 二极管伏安特性曲线

与PN结基本相同，略有差异。

U_{on} : 导通电压或死区电压

U_{BR} : 击穿电压; I_S : 反向饱和电流

a. 正向电压

1. 当 $0 < U < U_{on}$ 时，正向电流为 0。
2. 当 $U > U_{on}$ 时，二极管导通，正向电流随电压增大而迅速增大。在正常使用的电流范围内，导通时二极管的端电压几乎维持不变，这个电压称为二极管的正向电压。

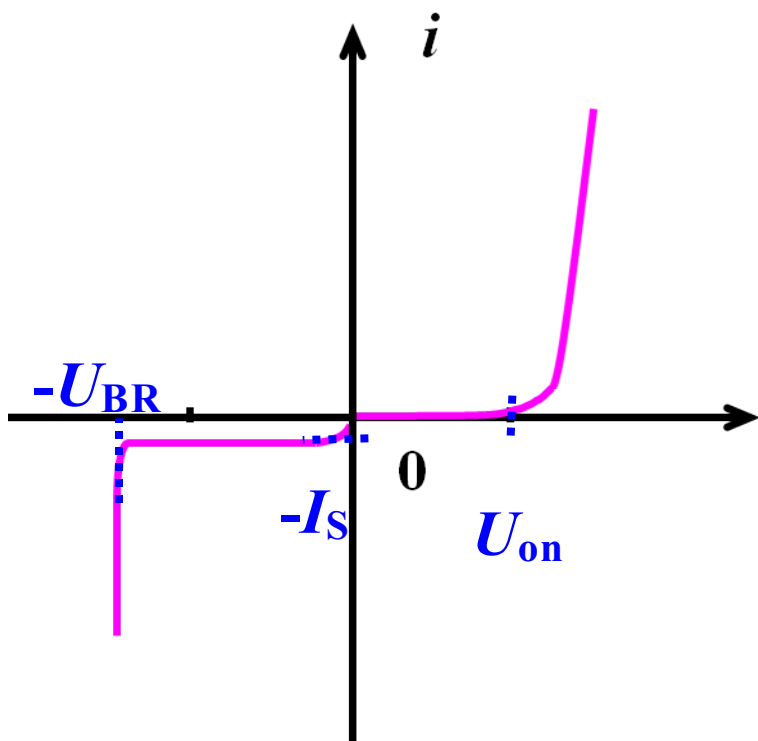


图 2. 二极管伏安特性曲线

b. 反向电压

1. 当 $U_{BR} < U < 0$ 时，反向电流很小，且基本不随反向电压的变化而变化，被称为反向饱和电流 I_S 。当温度升高时，二极管的反向饱和电流将增大。
2. 当 $U \geq U_{BR}$ 时，反向电流急剧增加，这种现象称为电击穿。

在以后的近似计算中，二极管的电流方程仍采用PN结的电流方程

$$i = I_s \cdot (e^{qu/kT} - 1)$$

其中， I_s 为反向饱和电流， k 为玻尔兹曼常数， T 为热力学温度， q 为单位电子电荷量

□ 取 $U_T = kT/q$ 为温度的电压当量，则

$$i = I_s \cdot (e^{u/U_T} - 1)$$

室温($T=300\text{K}$)下， $U_T=26\text{mV}$

2. 半导体二极管的主要参数

一、直流电阻

定义：二极管所加直流电压 U_D 与所流过直流电流 I_D 之比。

$$R_D = U_D / I_D$$

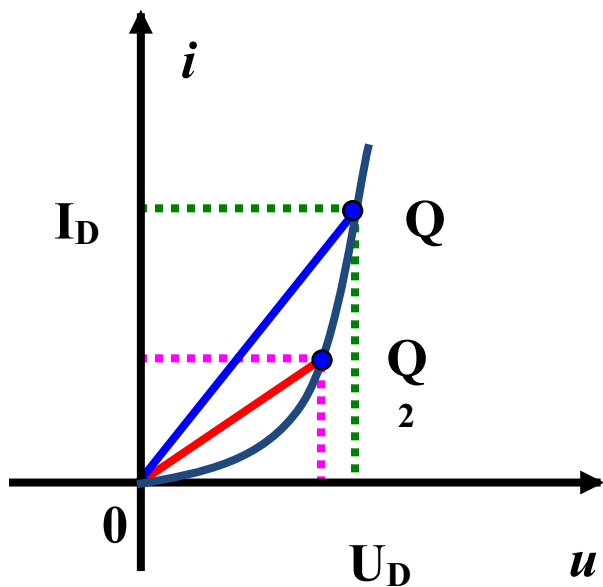


图 3(a). 直流电阻 R_D 的几何意义

R_D 的几何意义：

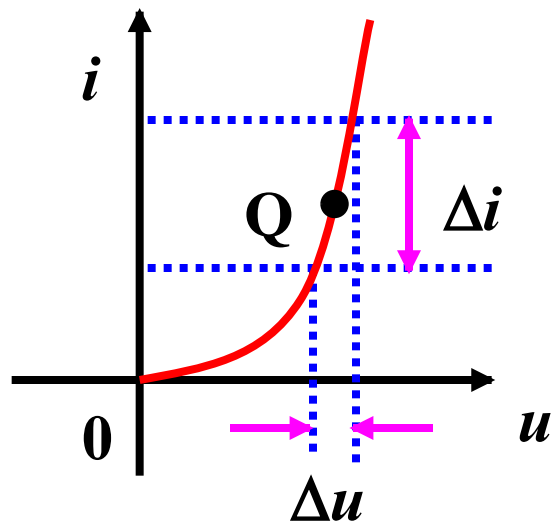
Q 点到原点直线斜率的倒数。

R_D 不是恒定的，正向的 R_D 随工作电流增大而减小。

二、交流电阻

定义：二极管在其工作状态(I_{DQ} , U_{DQ})下的**电压微变量与电流微变量之比**

$$r_D = \frac{\Delta U}{\Delta I} \bigg|_{I_{DQ}, U_{DQ}} \approx \frac{du}{di} \bigg|_{I_{DQ}, U_{DQ}}$$



$$= \frac{1}{\frac{di}{du} \bigg|_Q} = \frac{1}{\frac{I_S e^{u/U_T}}{U_T} \bigg|_Q} = \frac{U_T}{I_S e^{u/U_T} \bigg|_Q} = \boxed{\frac{U_T}{I_{DQ}}}$$

$$\left(i = I_S (e^{u/U_T} - 1) \right)$$

图 3(b). 直流电阻 r_D 的几何意义

r_D 的**几何意义**：
Q点处切线的斜率的倒数。

★ 例：已知D为硅二极管，流过的直流电流

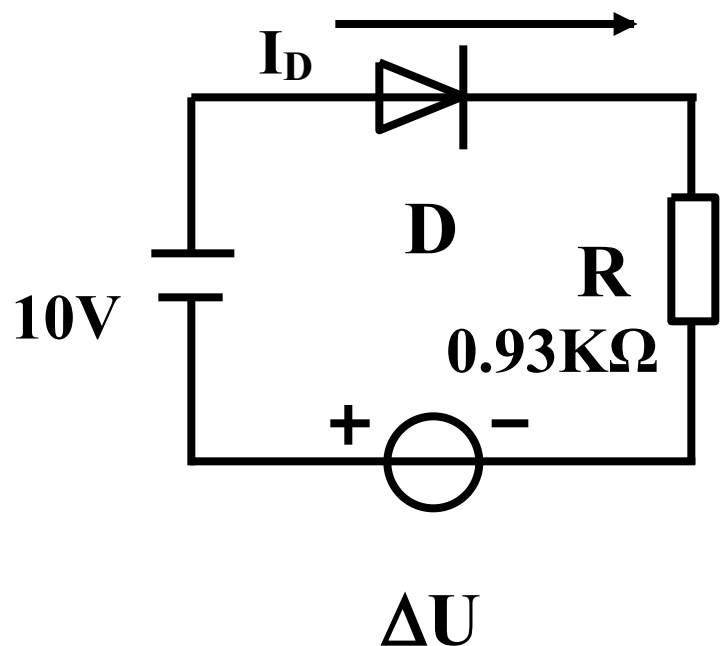
$I_D=10\text{mA}$ ，交流电压 $\Delta U=10\text{mV}$ ，求室温下流过D的交流电流 $\Delta I=?$

解：交流电阻

$$r_D \approx \frac{U_T}{I_{DQ}} \approx \frac{26(\text{mV})}{10(\text{mA})} = 2.6\Omega$$

交流电流为：

$$\Delta I = \frac{\Delta U}{R + r_D} = \frac{10(\text{mV})}{2.6 + 930(\Omega)} = 1.1 \times 10^{-2} \text{mA}$$



三、最大整流电流 I_F

允许通过的最大正向平均电流。是指二极管长期连续工作时允许通过的最大正向电流值，其值与PN结面积及外部散热条件等有关。因为电流通过管子时会使管芯发热，温度上升，温度超过容许限度时，就会使管芯过热而损坏。所以在规定散热条件下，二极管使用中不要超过二极管最大整流电流值。例如，常用的IN4001—4007型锗二极管的额定正向工作电流为1A。

四、最大反向工作电压 U_{RM}

是指二极管在工作中能承受的最大反向电压，它也是使二极管不致反向击穿的电压极限值。（因为加在二极管两端的反向电压高到一定值时，会将管子击穿，失去单向导电能力。）在一般情况下，最大反向工作电压应小于反向击穿电压 U_{BR} ，通常取 U_{BR} 的一半。选用晶体二极管时，还要以最大反向工作电压为准，并留有适当余地，以保证二极管不致损坏。

五、反向电流 I_R

是指二极管在规定的温度和最高反向电压作用下，流过二极管的反向电流。反向电流越小，管子的单方向导电性能越好。值得注意的是反向电流与温度有着密切的关系，大约温度每升高 10°C ，反向电流增大一倍。

例如2AP1型锗二极管，在 25°C 时反向电流若为 $250\mu\text{A}$ ，温度升高到 35°C ，反向电流将上升到 $500\mu\text{A}$ ，依此类推，在 75°C 时，它的反向电流已达 8mA ，不仅失去了单方向导电特性，还会使管子过热

六、最高工作频率 f_M

二极管具有单向导电性的最高交流信号的频率。由于结电容特性，当工作频率超过 f_M 时，二极管的单向导电性能变坏。

以上参数是描述二极管特性的物理量，它是反映二极管电性能的质量指标，也是合理选择和使用二极管的主要依据。在半导体器件手册或生产厂家的产品目录中，对各种型号的二极管均用表格列出其参数。

3. 半导体二极管的电路模型

由于二极管的非线性特性，当电路加入二极管时，便成为非线性电路。实际应用时可根据二极管的应用条件作合理近似，得到相应的等效电路，化为线性电路

非线性 $\xrightarrow{\text{近似}}$ 线性

一、理想模型：开关模型

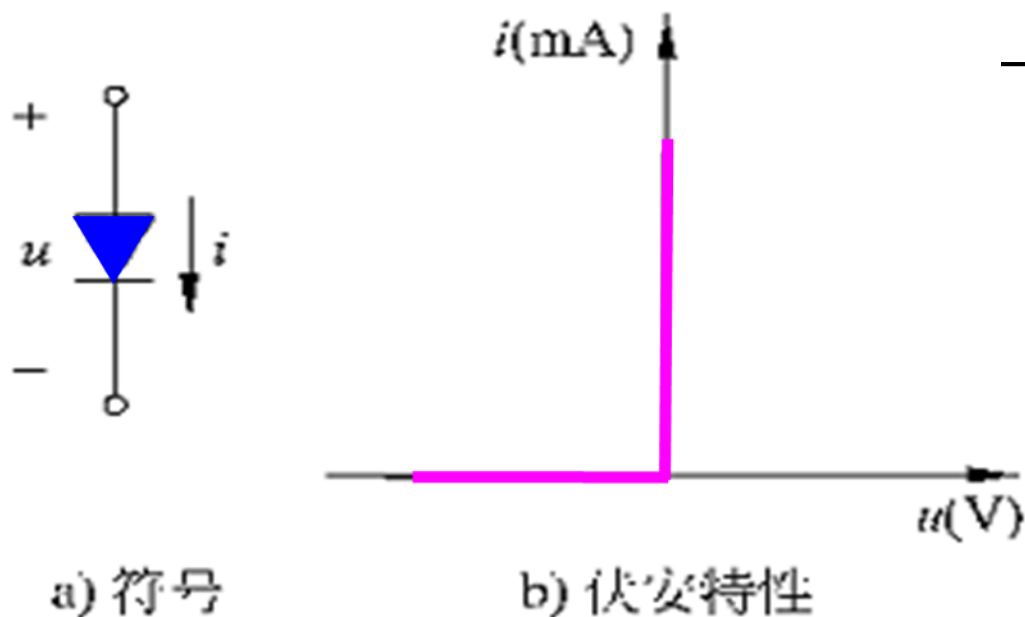


图4. 理想二极管模型

正向偏置，二极管导通，电流较大，其导通压降为零。
反向偏置时，二极管截止。二极管相当于开关，导通
相当于开关闭合，截止相当于开关打开。

二、恒压降模型：开关+电压源模型

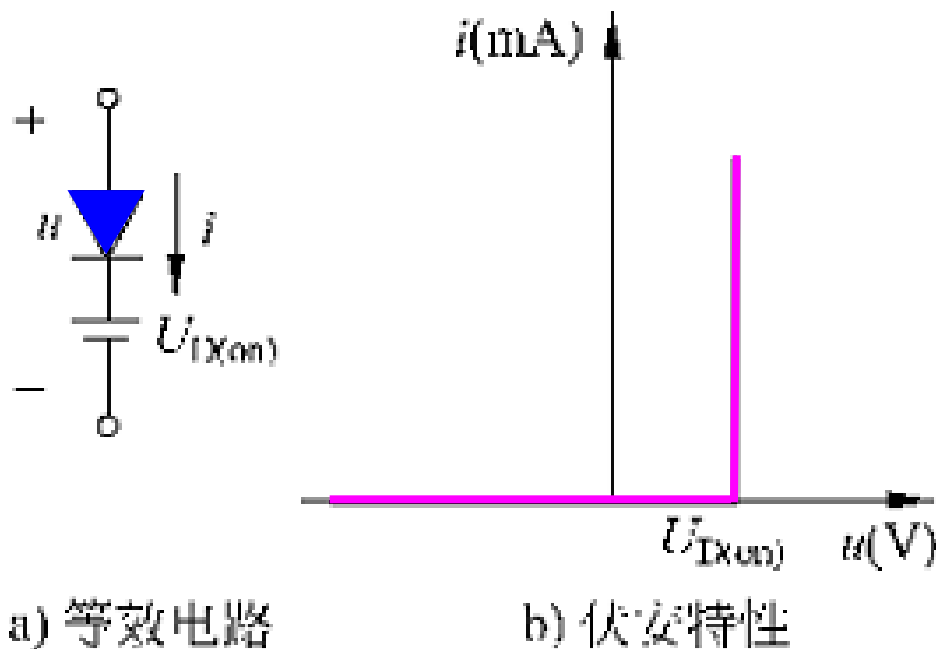


图 5. 恒压降模型

$U_{D(on)}$ 称为二极管的导通电压。

硅管： $U_{D(on)} = 0.7 \text{ V}$ 锗管： $U_{D(on)} = 0.3 \text{ V}$



理想二极管：

正偏导通，电压降为零，相当于开关合上；

反偏截止，电流为零，相当于开关断开。

恒压降模型：

正偏电压 $\geq U_{D(on)}$ 时导通，等效为恒压源 $U_{D(on)}$ ；

否则截止，相当于二极管支路断开。

三、折线模型 • 二极管由电压源和电阻模型

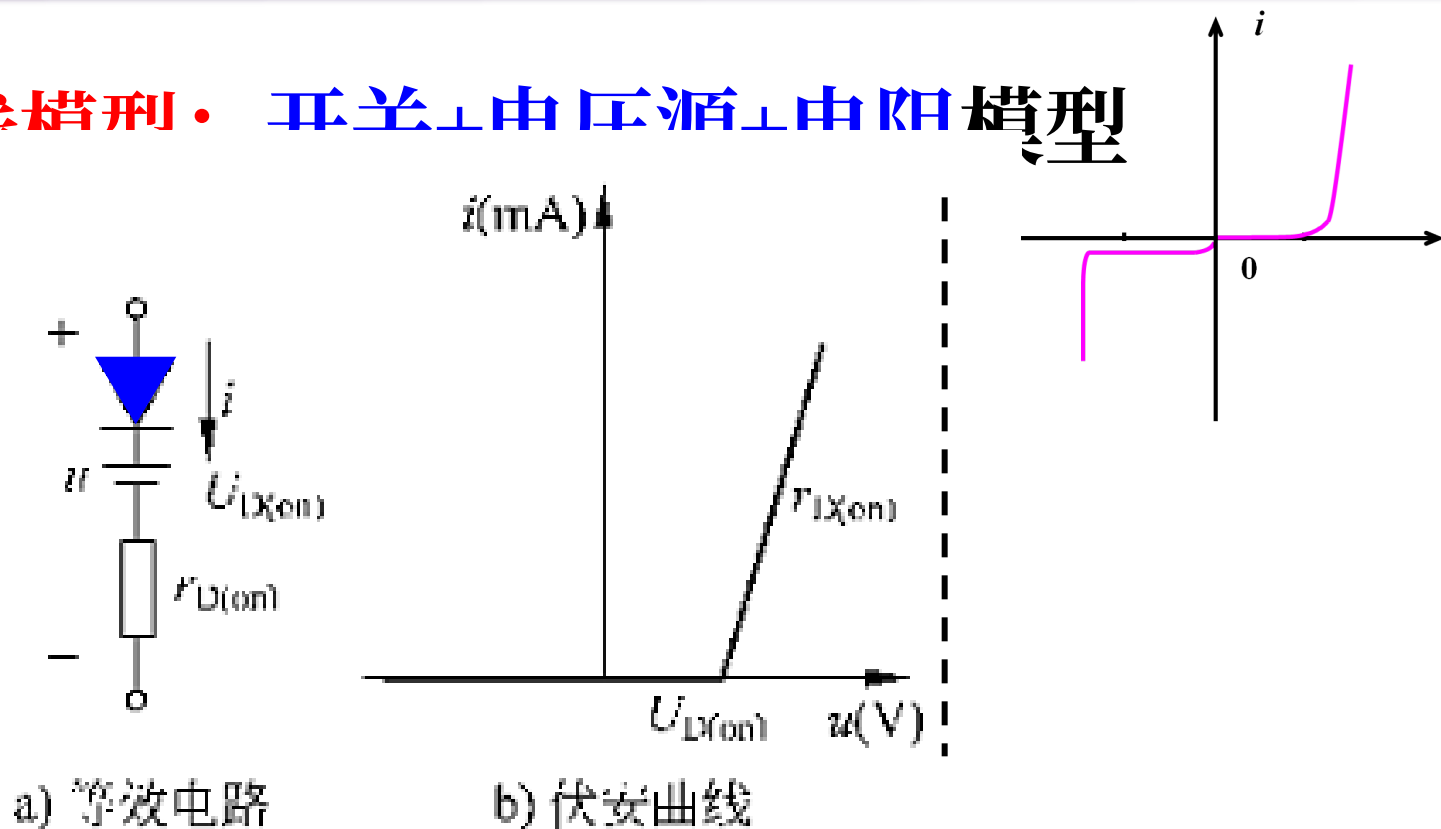


图 6. 折线模型

理想二极管串联电压源和电阻 $r_{D(on)}$ 的模型,
其中 $r_{D(on)}$ 一般为几十欧姆。

4. 二极管基本应用电路



二极管状态的判断!!!

判断二极管状态的方法如下：

假设二极管截止，给出截止状态下二极管两端的电压

$$u = u_{\text{阳极}} - u_{\text{阴极}} = u_P - u_N;$$

1. 如果电路中只有一个二极管，则只需判断该二极管：

两端的电压 $\geq 0/U_{\text{on}} \rightarrow$ 导通，导通后压降为 $0/U_{\text{on}}$ ；

两端的电压 $< 0/U_{\text{on}} \rightarrow$ 截止。

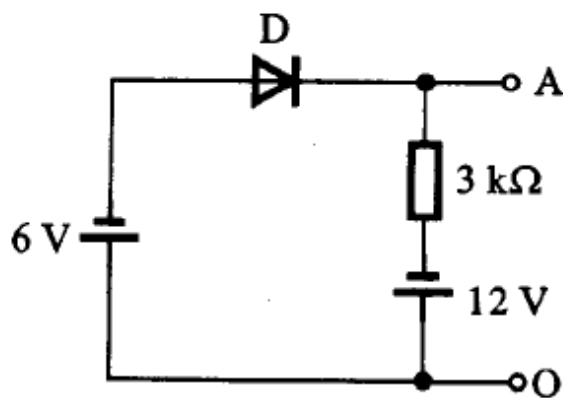
2. 如果电路中有两个二极管：

若一个正偏，一个反偏，则正偏的导通，反偏的截止；

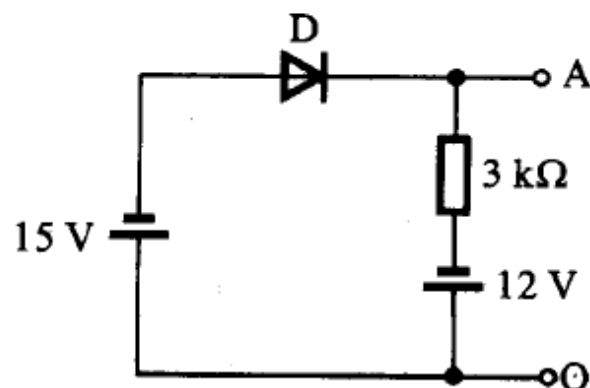
若两个都反偏，则都截止；

若两个都正偏，则正偏电压大的优先导通，进而再结合这个优先导通的导通压降判断另一只二极管的状态。

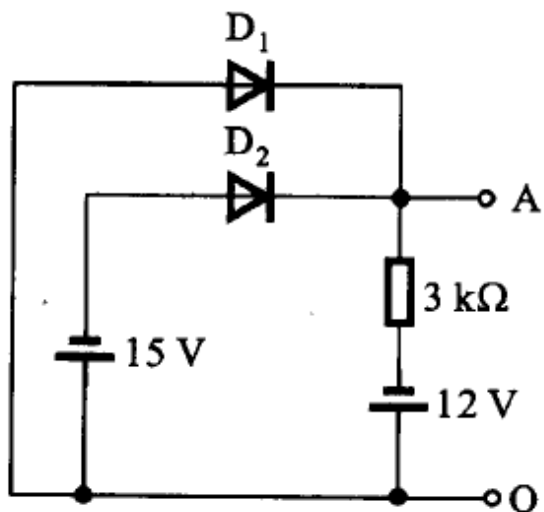
练习：二极管电路如图所示，试判断图中的二极管是导通还是截止，并求出 AO 两端电压 V_{AO} 。设二极管是理想的。



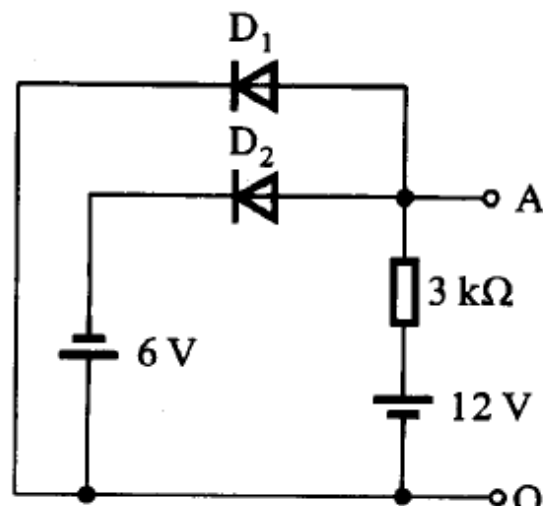
(a)



(b)



(c)



(d)

解：

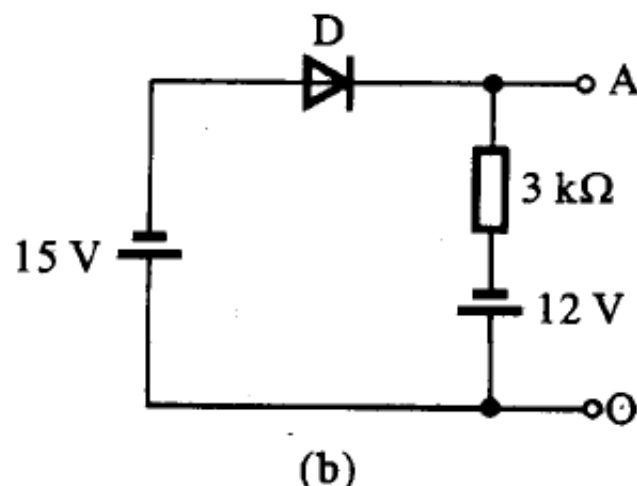
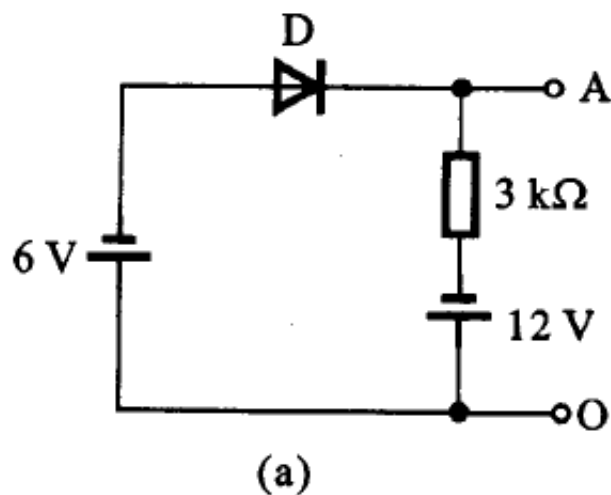


图 a：将 D 断开，以 O 点为电位参考点，D 的阳极电位为 -6 V ，阴极电位为 -12 V ，故 D 处于正向偏置而导通， $V_{AO} = -6\text{ V}$

图 b：将 D 断开，以 O 点为电位参考点，D 的阳极电位为 -15 V ，阴极电位为 -12 V ，D 被反向偏置而截止，回路中无电流，无压降， $V_{AO} = -12\text{ V}$ 。

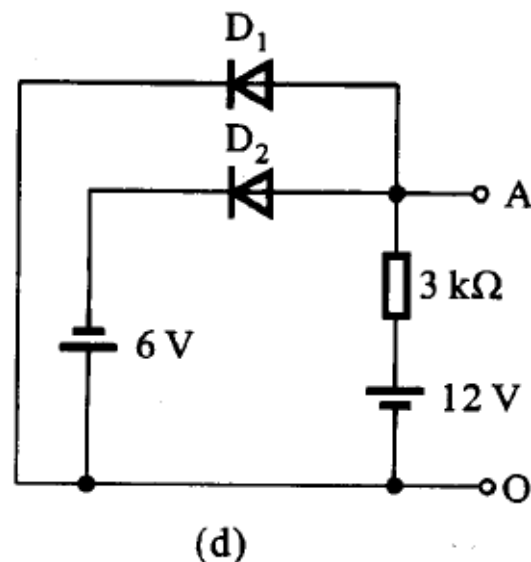
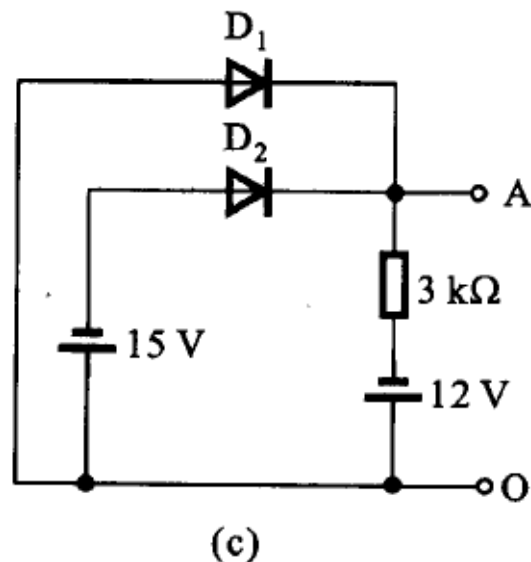
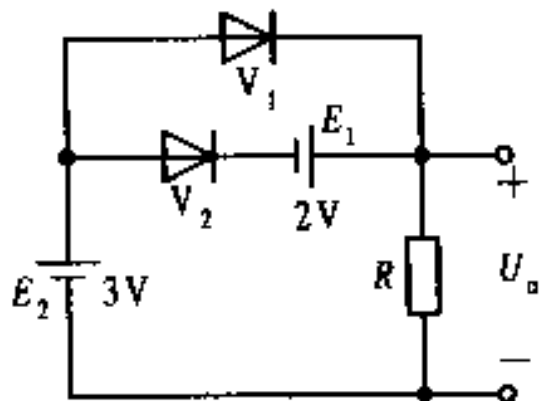


图 c: 将 D_1 和 D_2 均断开, 以 O 点为电位参考点, D_1 的阳极电位为 0V , 阴极电位为 -12V ; D_2 的阳极电位为 -15V , 阴极电位为 -12V 故 D_1 导通, D_2 截止, D_1 导通后使 A 点的电位为 0V , $V_{AO} = 0\text{V}$ 。

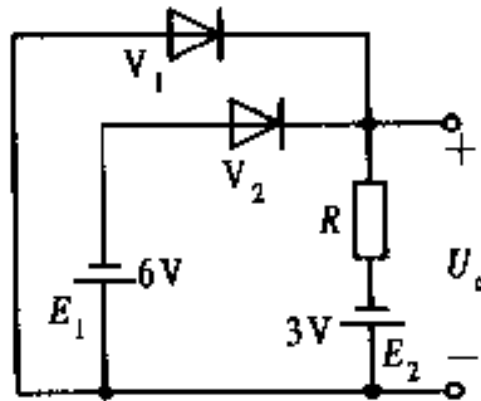
图 d: 将 D_1 和 D_2 均断开, 以 O 点为电位参考点, D_1 的阳极电位为 12V , 阴极电位为 0V ; D_2 的阳极电位为 12V , 阴极电位为 -6V , 即 D_1 和 D_2 都为正向偏置。但 D_2 上的正偏电压大, 所以 D_2 优先导通。 D_2 一旦导通, D_1 的阳极电位将变为 -6V , D_1 便不能再导通。所以此电路 D_1 截止, D_2 导通, $V_{AO} = -6\text{V}$ 。

练习

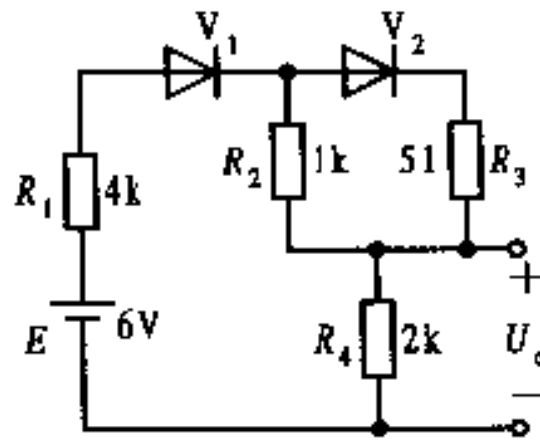
电路如下图，二极管等效为理想模型，分析二极管的工作状态及输出电压。



(a)



(b)



(c)

图 P1 - 4

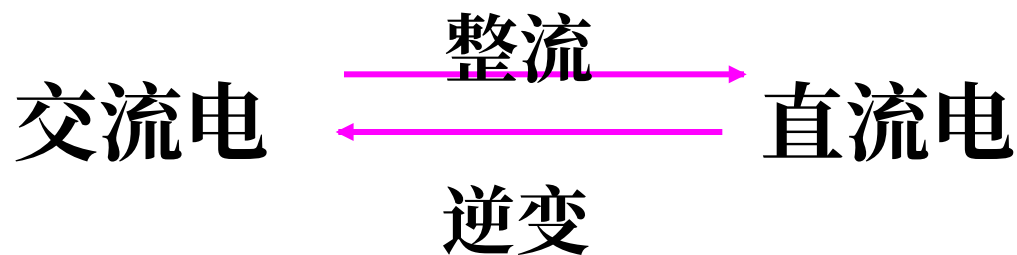
V_2 导通, V_1 截止,
 $U_0 = 5V$ 。

V_1 导通, V_2 截止,
 $U_0 = 0V$ 。

V_1 导通, V_2 导通
 $U_0 = 1.98V$ 。

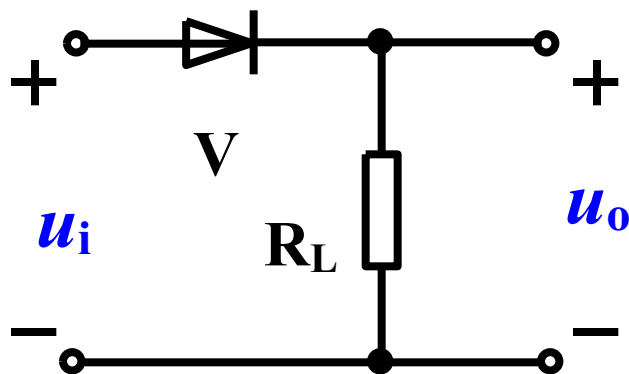
一、二极管整流电路

- ❖ 把交流电转变为直流电称为“整流”。
- ❖ 反之称为“逆变”。

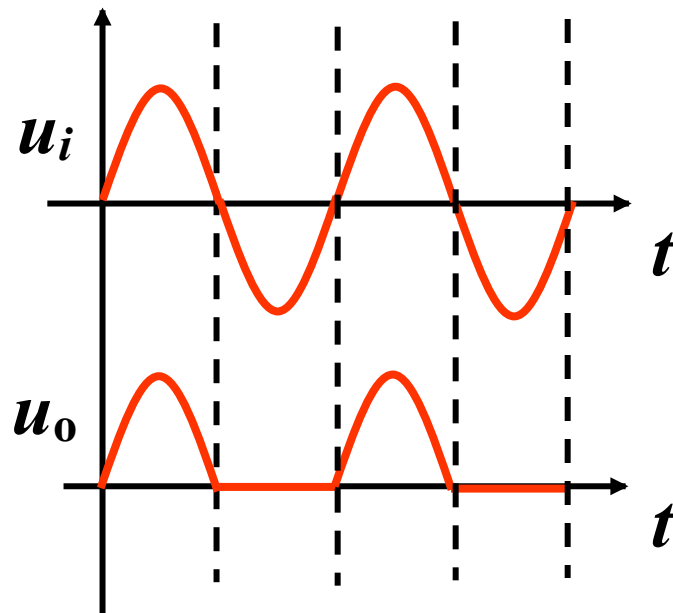


例：

电路如下图，试利用二极管理想模型，画出 u_o 的波形



(a)电路

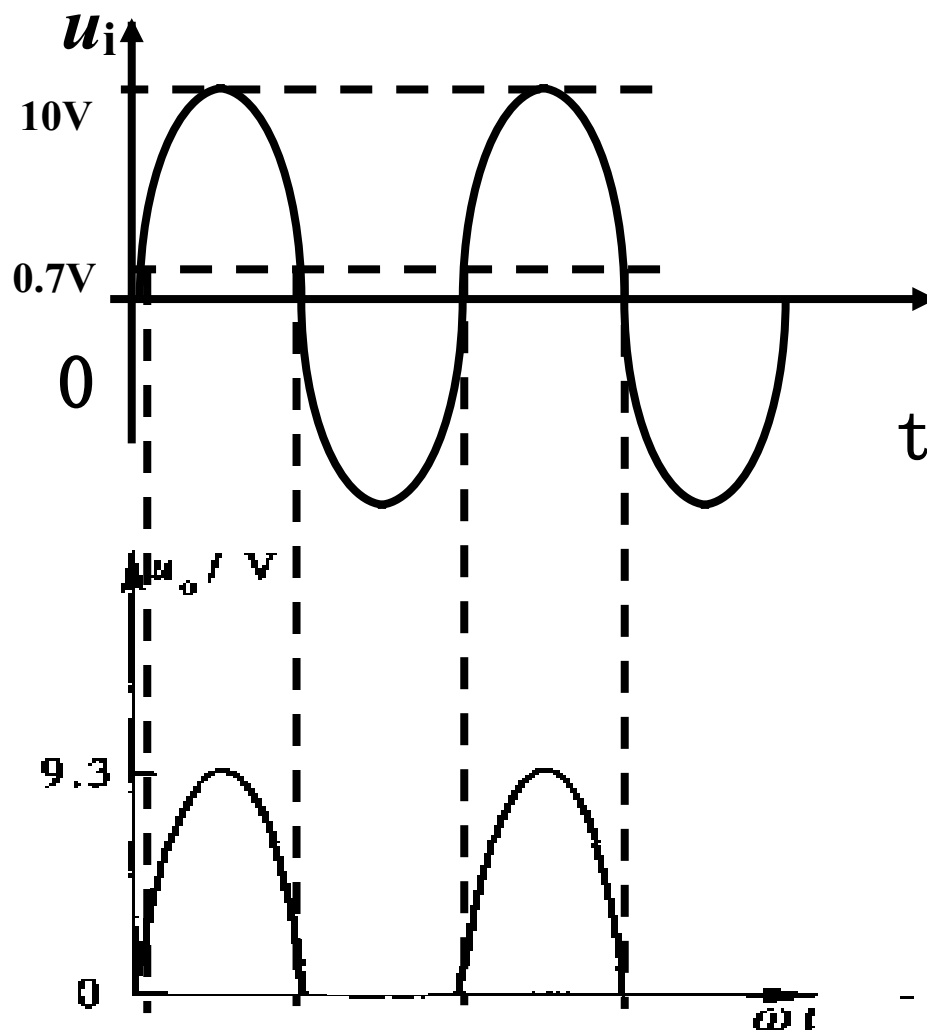


(b)输入、输出波形关系

图7. 二极管半波整流电路及波形

思考：二极管近似为恒压降模型的电路输出？硅管

思考：二极管近似为恒压降模型的电路输出？

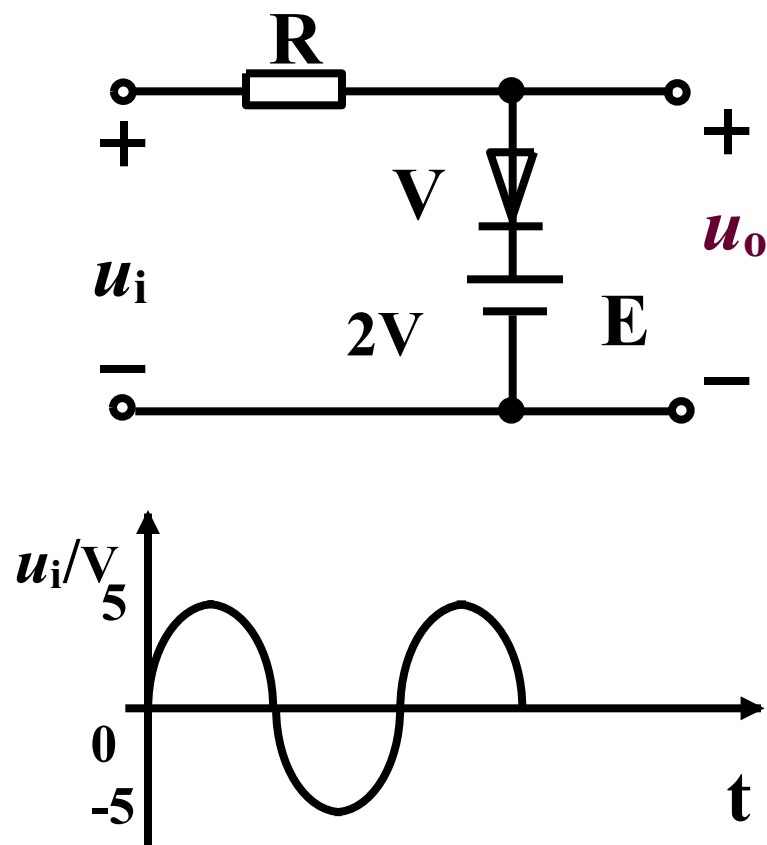


二、二极管限幅电路

- ❖ 又称为：“削波电路”。
- ❖ 能够把输入电压变化范围加以限制，常用于波形变换和整形。

例:

电路如下图, 试利用恒压降模型(硅管), 画出 u_o 的波形



① 当 $u_i > 2.7V$, V 导通,
 $u_o = E + 0.7 = 2.7V$;

② 当 $u_i \leq 2.7V$ 时, V 截止,
即开路, $u_o = u_i$ 。

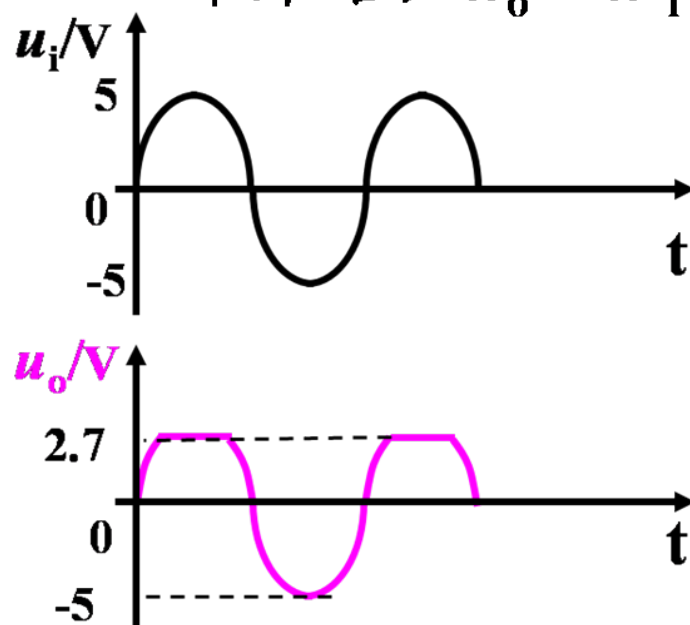


图8. 限幅电路及输入波形关系

三、二极管开关电路

可以用来构成数字电路门电路。

表 1.3.1 例 1.3.4 输入、输出电压关系

u_1	u_2	二极管工作状态		u_o
		V_1	V_2	
0V	0V	导通	导通	0V
0V	5V	导通	截止	0V
5V	0V	截止	导通	0V
5V	5V	截止	截止	5V

5V

二极管理想模型

§1.4 特殊二极管

1. 稳压二极管

一、特性:反向击穿时, 曲线更加陡峭。电流在很大范围内变化时($I_{Zmin} \sim I_{Zmax}$), 其两端电压 U_Z 几乎不变。



曲线越陡,
稳压性能越好。

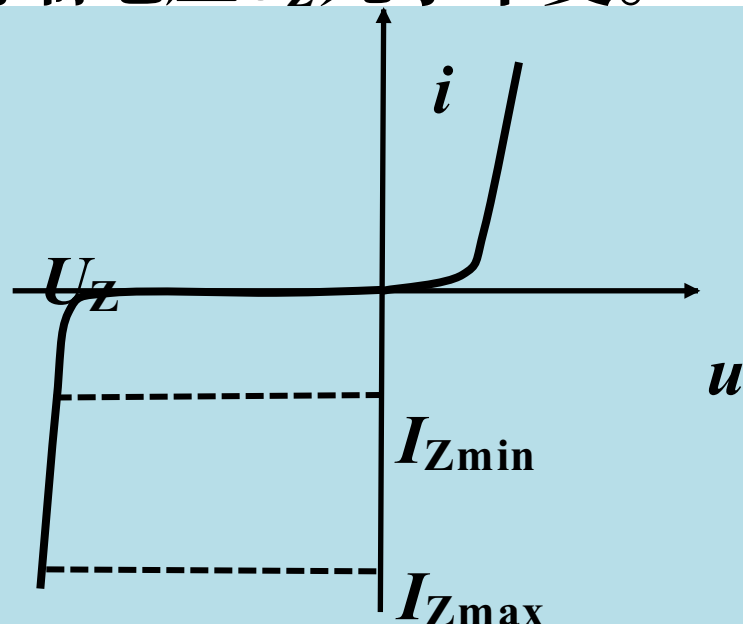
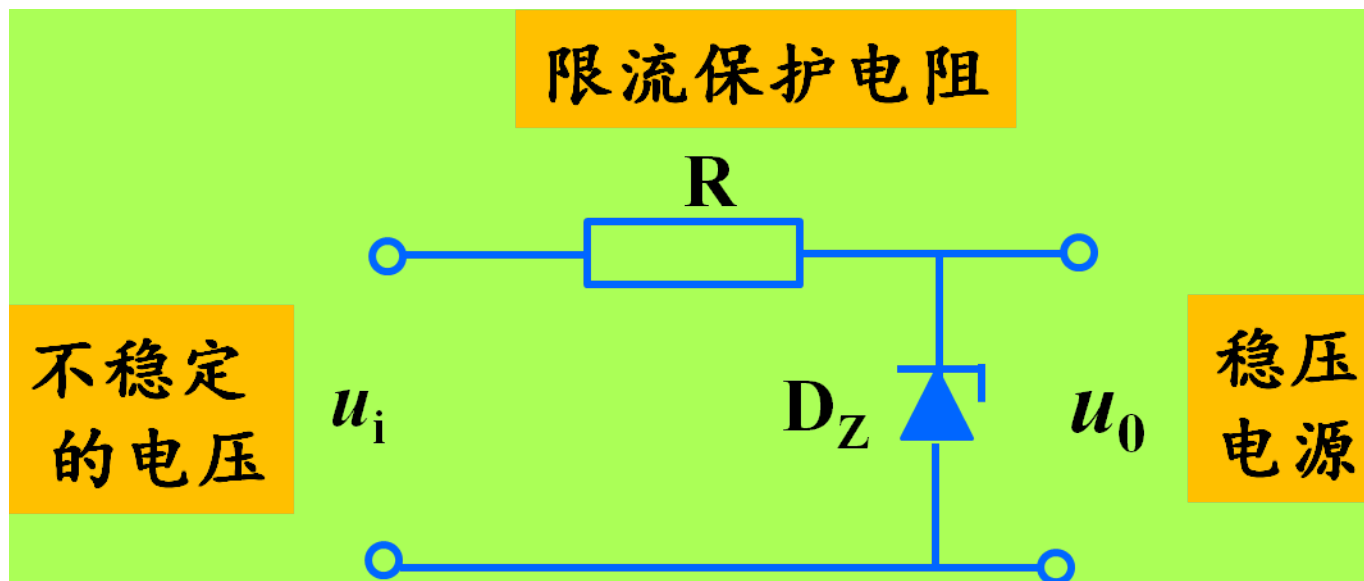


图9. 稳压二极管(a)符号及(b)其特性曲线

利用击穿特性制作稳压二极管，它与一般的二极管不同，可以长期工作在击穿状态，用稳压管的时候要给它串连一个电阻，一旦电压高出稳压管的稳压值以后稳压管反向击穿，电流会很大，所以需要串联电阻。



二、稳压二极管主要参数

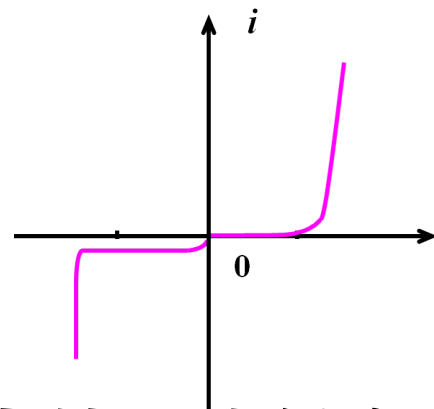
1. 稳压电压 U_Z : 管子长期稳定时的工作电压, 即反向击穿电压。

1. 稳定电流 I_Z : $I_{Z\min} < I_Z < I_{Z\max}$

2. 额定功耗 P_Z : $P_Z = U_Z \times I_{Z\max}$

3. 动态(交流)电阻 $r_Z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$: 工作点处切线斜率的倒数, 一般为几欧姆到几十欧姆(越小越好)。

4. 温度系数 α : 指单位温度变化引起稳定电压的相对变化量。



三、稳压二极管稳压电路

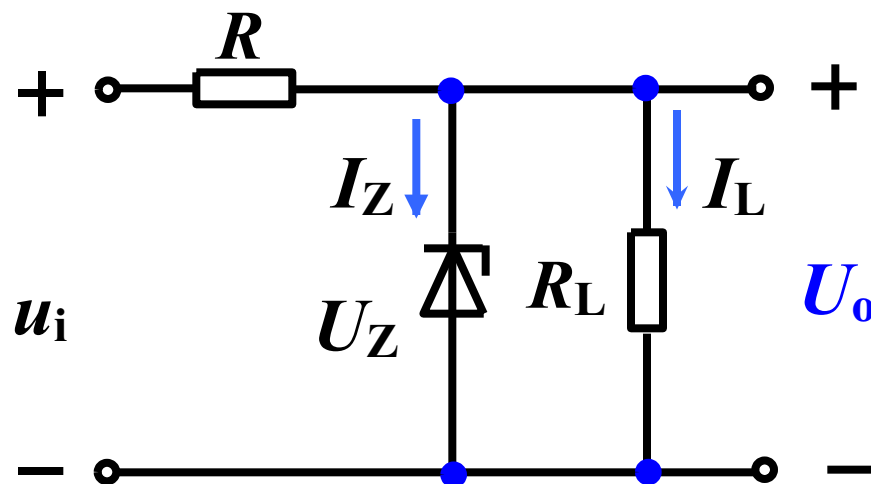


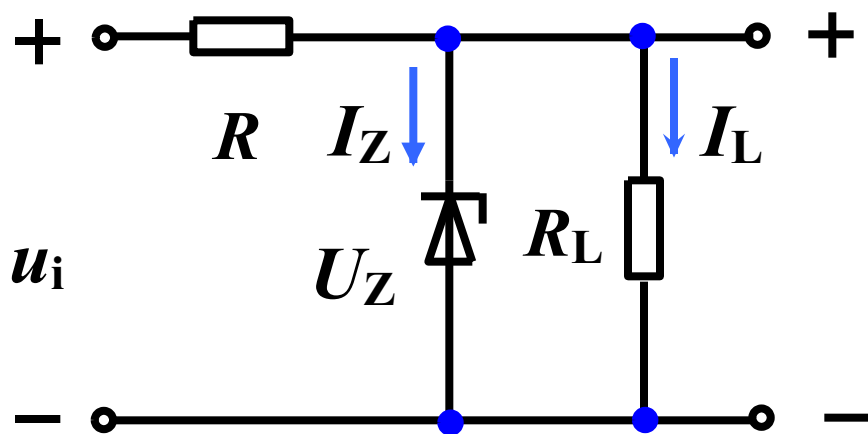
图10. 稳压二极管稳压电路

所谓稳压指当 U_i 、 R_L 变化时， U_o 保持恒定。

稳压原理：

若 R_L 不变， $U_i \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow I_L$ 不变 $\rightarrow U_o$ 基本不变
若 U_i 不变， $R_L \downarrow \rightarrow I_Z \downarrow \rightarrow I_L \uparrow \rightarrow U_o$ 基本不变

限流电阻 R 的选择: 当 U_i, R_L 变化时, I_Z 满足 $I_{Z\min} < I_Z < I_{Z\max}$



分析: 根据电路:



$$I_Z = \frac{u_i - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_L}$$

所以:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_{i\max} - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_{L\max}} < I_{Z\max} \\ \frac{U_{i\min} - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_{L\min}} > I_{Z\min} \end{array} \right.$$

即：

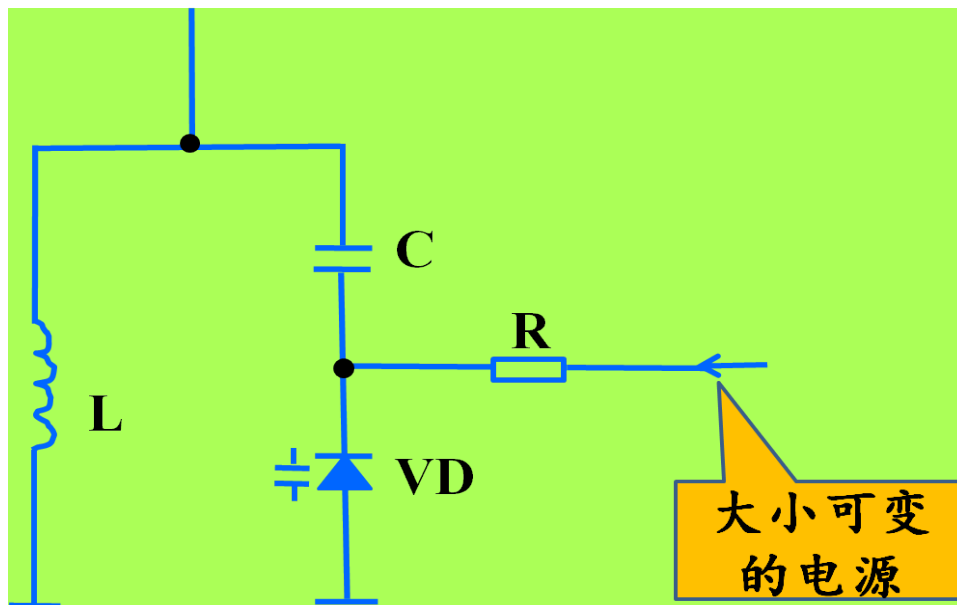
$$\left\{ \begin{array}{l} R > \frac{U_{i\max} - U_Z}{R_{L\max} \cdot I_{Z\max} + U_Z} \cdot R_{L\max} = R_{\min} \\ R < \frac{U_{i\min} - U_Z}{R_{L\min} \cdot I_{Z\min} + U_Z} \cdot R_{L\min} = R_{\max} \end{array} \right.$$

因此，限流电阻 R 的取值范围为：

$$R_{\min} < R < R_{\max}$$

2. 变容二极管

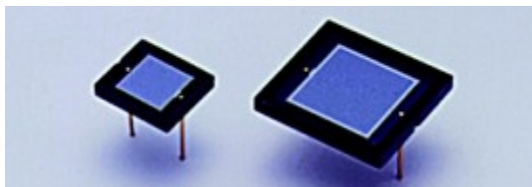
利用结电容随外电压变化效应制作变容二极管也称压控变容器。当这电源大小变化时，VD的偏压大小就会改变，其结电容大小也就改变，这样LC并联谐振电路的谐振频率也随之改变。**常用在收音机的检波电路中。**



3. 光电二极管

普通二极管在反向电压作用时处于截止状态，只能流过微弱的反向电流，光电二极管在设计 and 制作时尽量使PN结的面积相对较大，以便接收入射光。光电二极管是在反向电压作用下工作的，没有光照时，反向电流极其微弱，叫暗电流；有光照时，反向电流迅速增大到几十微安，称为光电流。光的强度越大，反向电流也越大。

具有光电转换功能，主要用在光电传感自动控制电路。



4. 发光二极管(LED)

初时多用作作为指示灯、显示板等；随着白光LED的出现，也被用作照明。它被誉为21世纪的新型光源，具有效率高，寿命长，不易破损等传统光源无法与之比较的优点。加正向电压时，发光二极管能发出单色、不连续的光，这是电致发光效应的一种。改变所采用的半导体材料的化学组成成分，可使发光二极管发出在近紫外线、可见光或红外线的光。



本章小结

1. N型半导体中，电子是多子，空穴是少子；P型半导体中，空穴是多子，电子是少子；多子浓度由掺杂浓度决定，少子浓度很小且随温度的变化而变化。
2. PN结是现代半导体器件的基础。它具有单向导电性、击穿特性和电容特性。
3. 半导体二极管由一个PN结构成，大信号应用时表现为开关特性。
4. 利用PN结的击穿特性可制作稳压二极管。用稳压二极管构成稳压电路时，首先应保证稳压管反向击穿，另外必须串接限流电阻。

作业

1.1 (1) (2)
)

1.3

1.4

1.6

1.7

1.10