

第3章 电子器件及其电路模型

(semiconductor elements) (circuit analysis)

3.0* 半导体基础知识

3.1 半导体二极管

3.2 晶体三极管

3.3 场效应管

3.4 集成运算放大器

3.5 数字逻辑电路基础

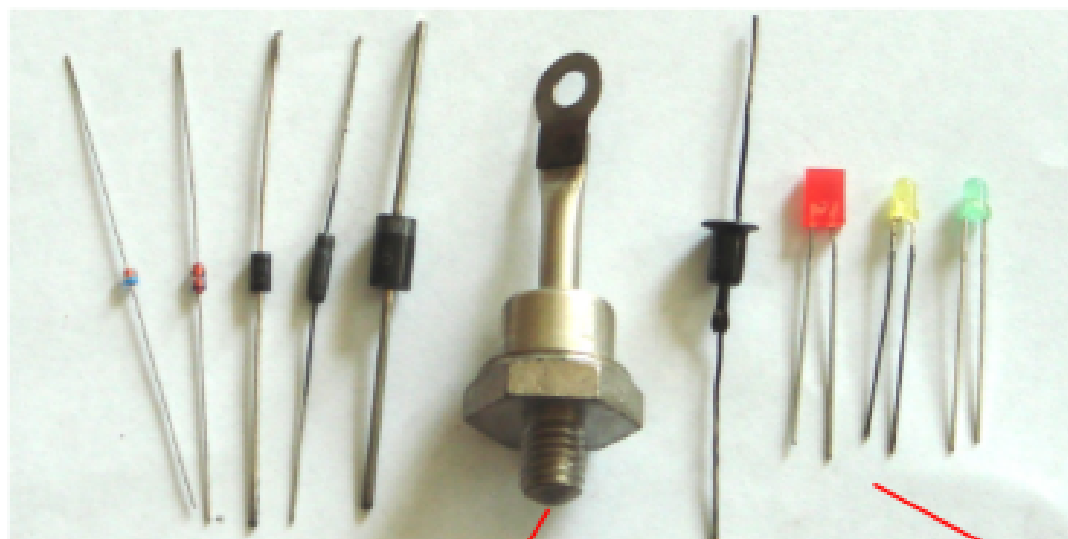
§3.1 半导体二极管

- 一、二极管的组成
- 二、二极管的伏安特性
- 三、二极管的主要参数
- 四、二极管的等效电路
- 五、稳压二极管
- 六*、特种二极管

一、二极管的组成



将PN结封装，引出两个电极，就构成了二极管。



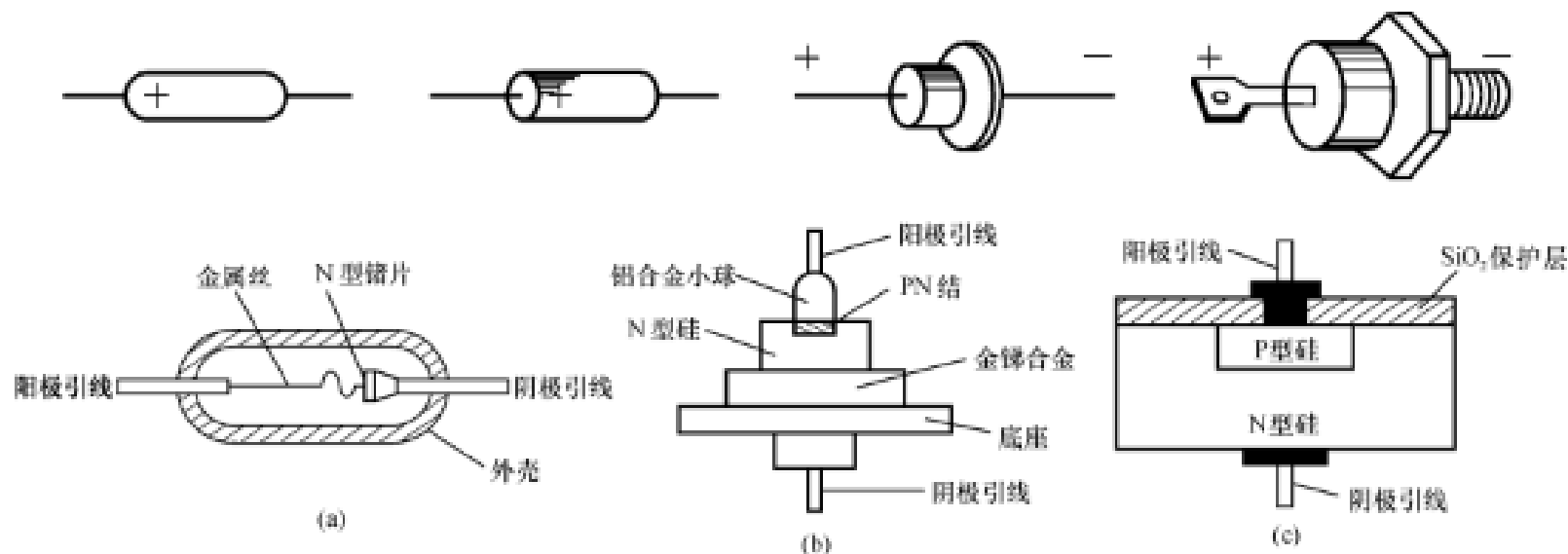
小功率
二极管

大功率
二极管

稳压
二极管

发光
二极管

一、二极管的组成



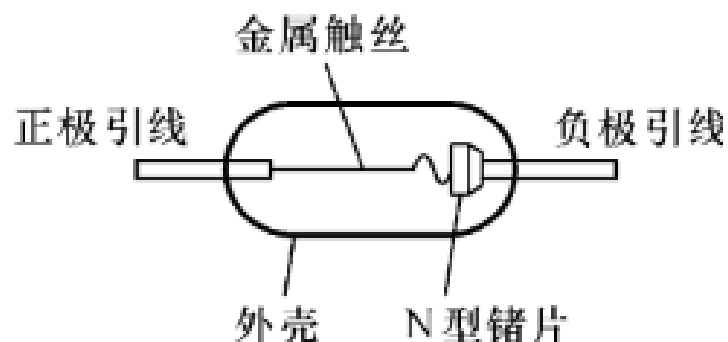
点接触型：结面积小，结电容小，故结允许的电流小，最高工作频率高。

面接触型：结面积大，结电容大，故结允许的电流大，最高工作频率低。

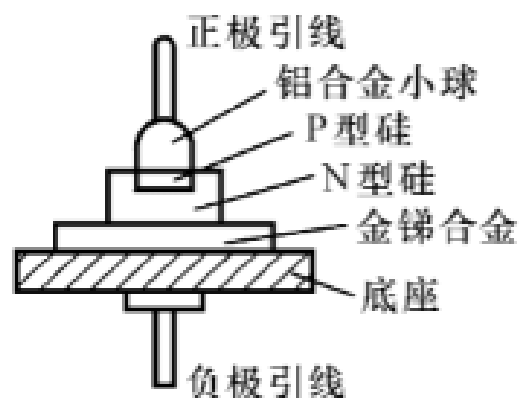
平面型：结面积可小、可大，小的工作频率高，大的结允许的电流大。

一、二极管的组成

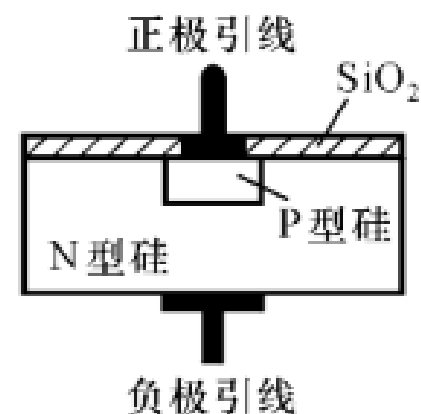
点接触型



面结合型



平面型

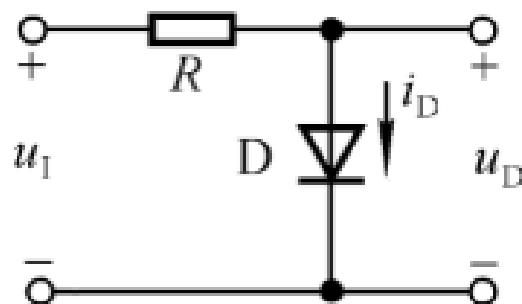


	结面积	结电容	应 用
点接触型	小	小	较高频率, 检波、混频
面结合型	较大	大	工频或低频, 大电流整流
平面型	较大	较大	大功率整流
	较小	较小	脉冲数字电路

二、二极管的伏安特性

二极管的电流与其端电压的关系称为伏安特性。

$$i = f(u)$$



$$i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (\text{常温下 } U_T = 26\text{mV})$$

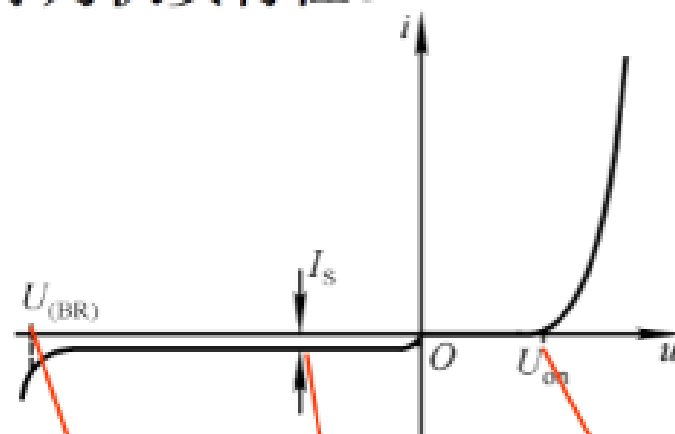
温度的电压当量

$$U_T = \frac{kT}{q}$$

T : 热力学温度;

$k=1.38\text{e-}23\text{J/K}$

Q : 电子电荷量, 为 $1.6\text{e-}19\text{C}$ 。室温下, T 取 300K (或 27°C), $U_T=26\text{mV}$



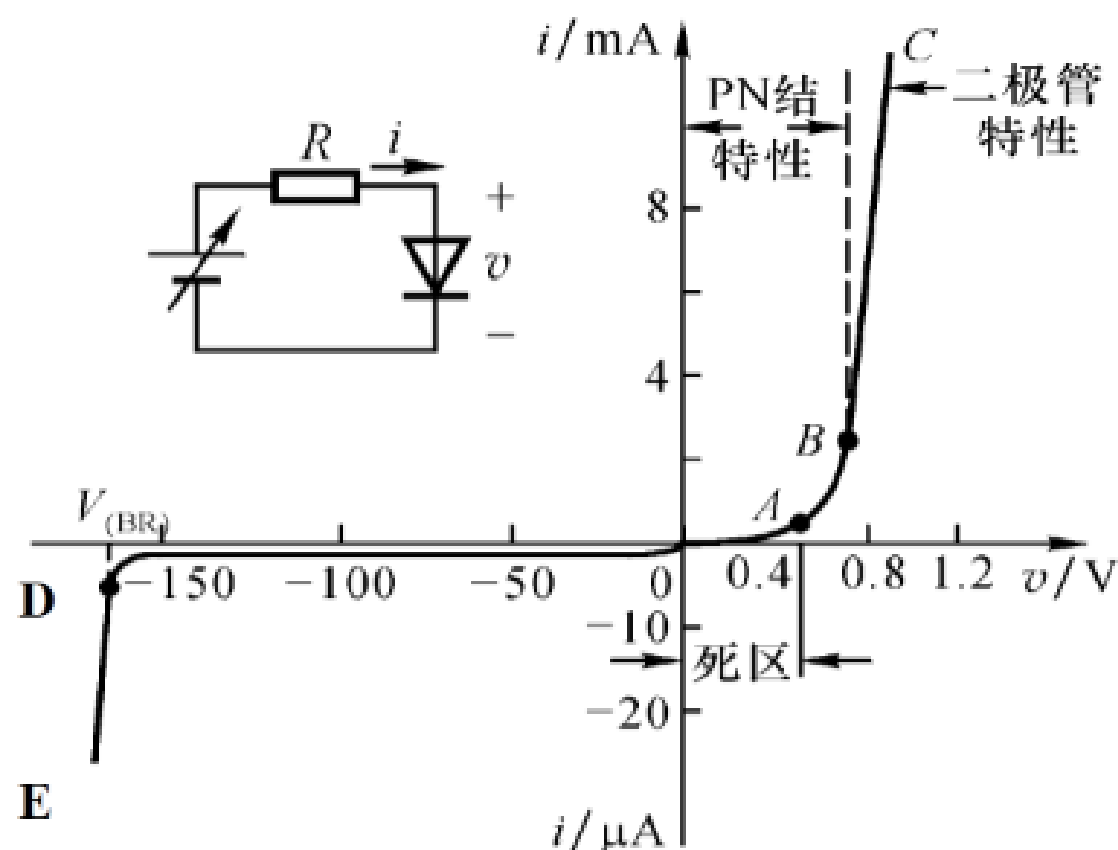
击穿电压

反向饱和电流

开启电压

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 μA 以下
锗Ge	0.1V	0.1~0.3V	几十 μA

伏安特性



OA: 死区

开启电压: V_{th}

AB: 近似指数规律

BC: 近似恒压源

导通电压: V_{on}

OD: 近似恒流源

反向电流: I_R

DE: 反向击穿特性

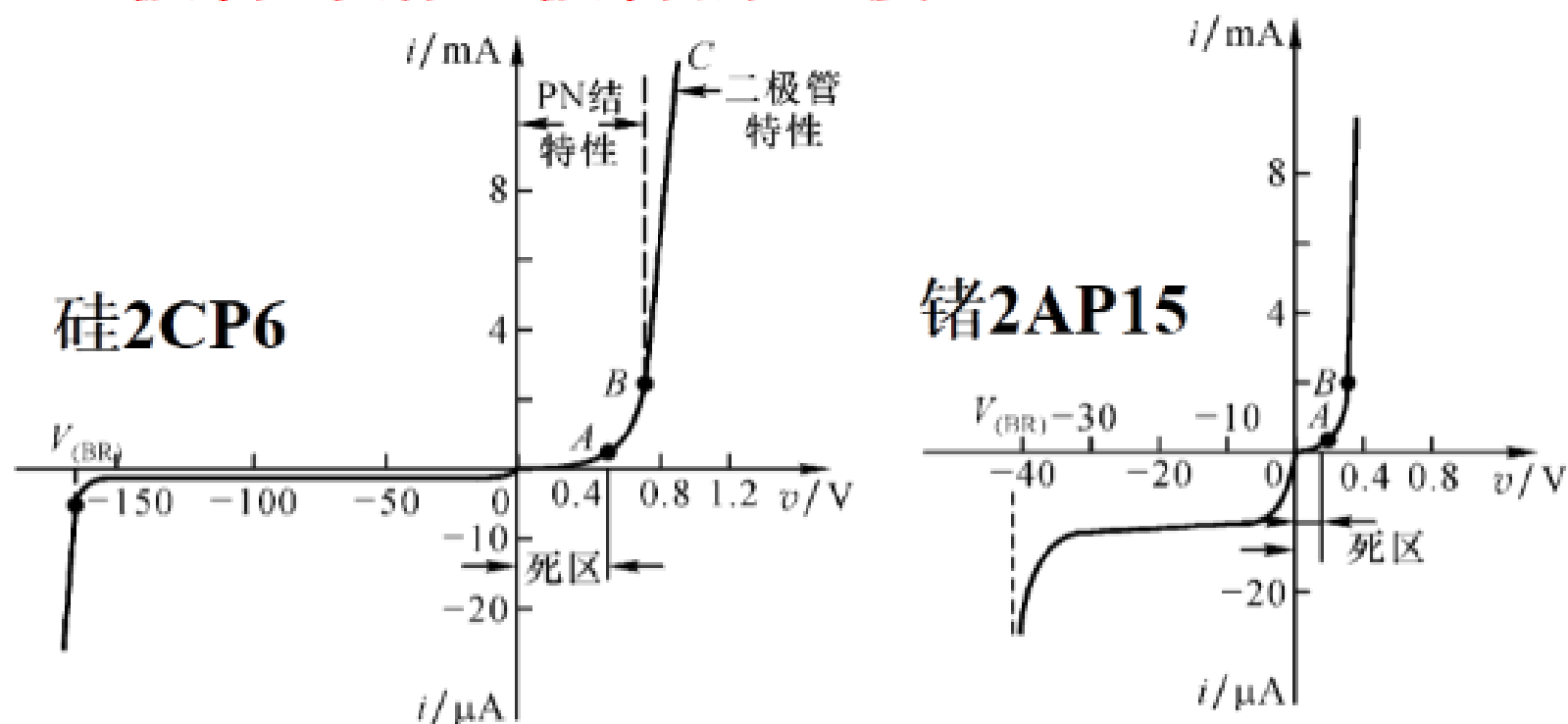
击穿电压: $V_{(BR)}$

$$i = I_S (e^{v/V_T} - 1)$$

I_S : 反向饱和电流

V_T : 电压当量, 室温下 $V_T \approx 26\text{mV}$

硅二极管与锗二极管的比较



	硅二极管	锗二极管
开启电压 V_{th}	0.5V	0.1V
导通电压 V_{on}	0.6~0.8V(取 0.7V)	0.2~0.3V(取 0.3V)
反向电流 I_R	较小(nA 级)	较大(μA 级)
击穿电压 V_{BR}	较大	较小

◎ 击穿特性

当外加反向电压超过击穿电压时，反向电流急剧增大，称为反向击穿。

齐纳击穿：外加电场将价电子直接从共价键中拉出来，使电子空穴对增多，电流增大

雪崩击穿：当电场足够强时，载流子的漂移运动被加速，将中性原子中的价电子“撞”出来，产生新的电子空穴对。形成连锁反应，使电流剧增。

齐纳击穿多发生在高掺杂的PN结中

雪崩击穿多发生在低掺杂的PN结中

4V以下为齐纳击穿

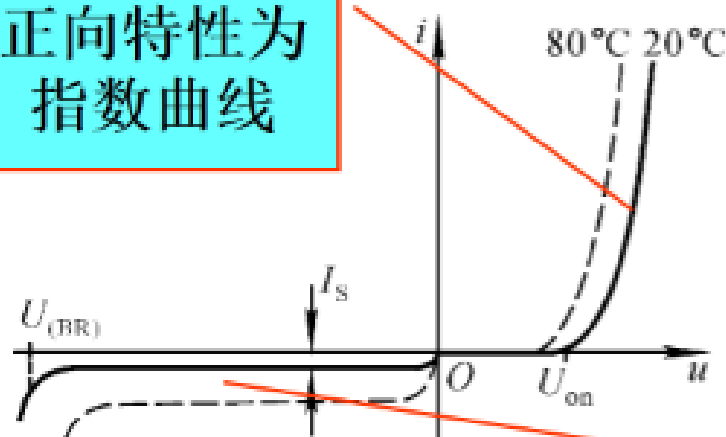
7V以上为雪崩击穿

4~7V可同时存在

从二极管的伏安特性可以反映出：

1. 单向导电性

正向特性为
指数曲线



$$i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1)$$

若正向电压 $u \gg U_T$, 则 $i \approx I_S e^{\frac{u}{U_T}}$

若反向电压 $|u| \gg U_T$, 则 $i \approx -I_S$

反向特性为横轴的平行线

2. 伏安特性受温度影响

$T (^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow$ 在电流不变情况下管压降 $u \downarrow$

\rightarrow 反向饱和电流 $I_S \uparrow$, $U_{\text{BR}} \downarrow$

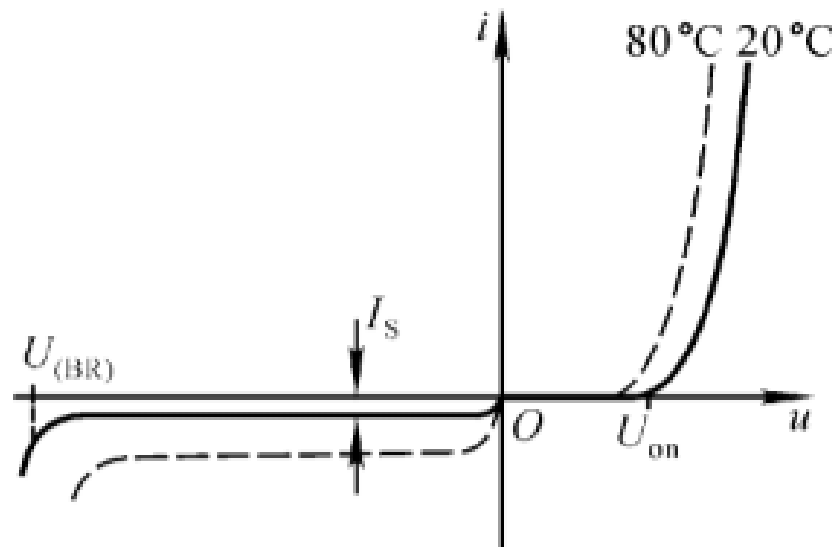
增大1倍/ 10°C

$T (^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow$ 正向特性左移, 反向特性下移

随温度增加, 齐纳击穿电压增加, 雪崩击穿电压减小!

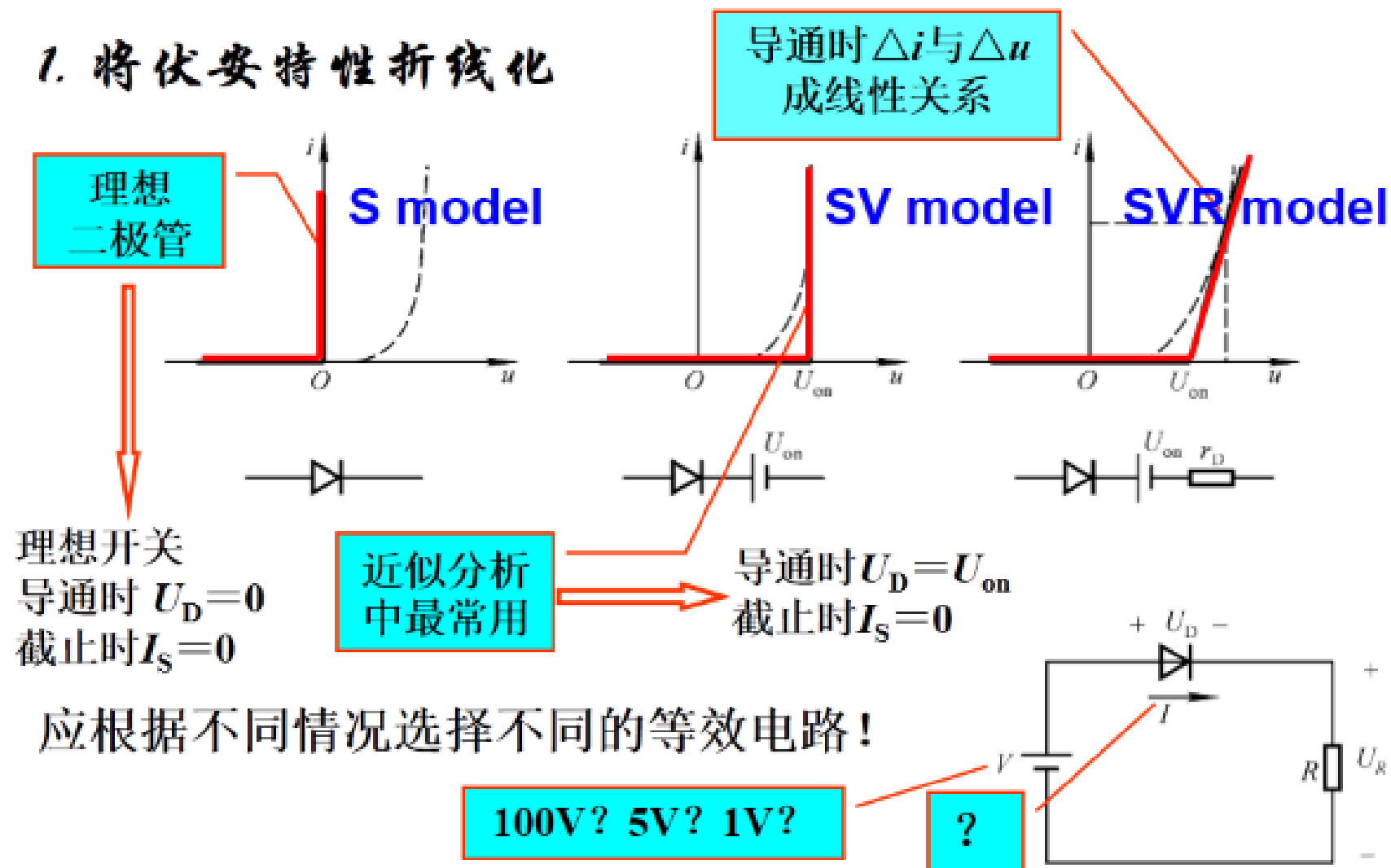
三、二极管的主要参数

- **最大整流电流 I_F** : 二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流
- **最大反向工作电压 U_R** : 二极管工作时允许外加的最大反向电压。最大瞬时值
- **反向电流 I_R** : 二极管未击穿时的反向电流。即 I_S
- **最高工作频率 f_M** : 二极管工作的上限截止频率。因PN结有电容效应



四、二极管的等效电路

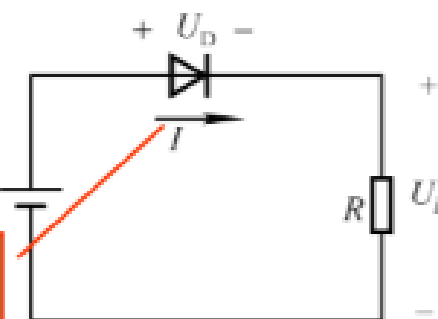
1. 将伏安特性折线化



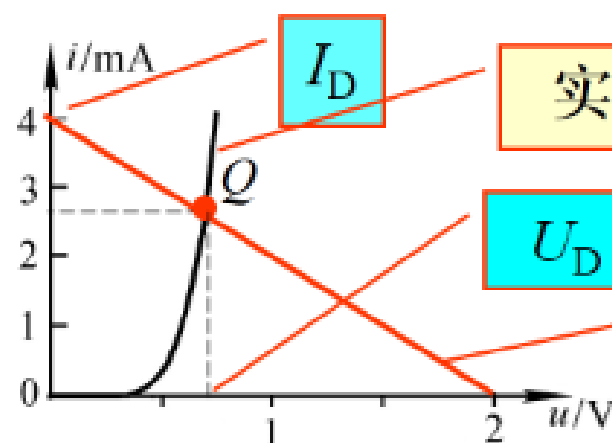
- 什么情况下应选用二极管的什么等效电路？

100V? 5V? 1V?

?



V 与 u_D 可比，则需图解：



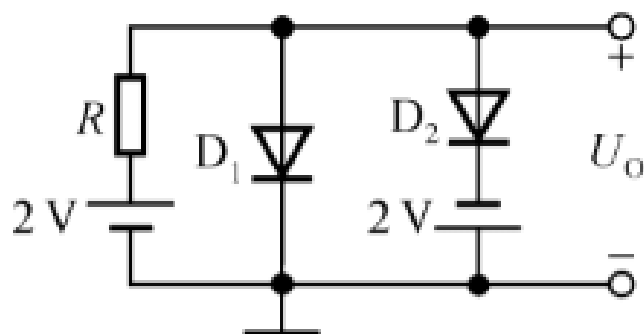
实测特性

$$i_D = \frac{V - u_D}{R}$$

$$u_D = V - iR$$

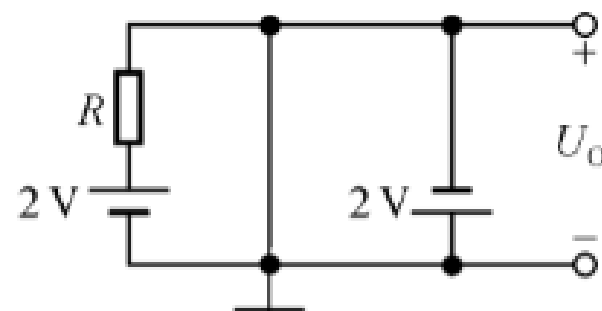
应根据不同情况选择不同的等效电路！

讨论：如何判断二极管的工作状态（S模型）？



假设状态法

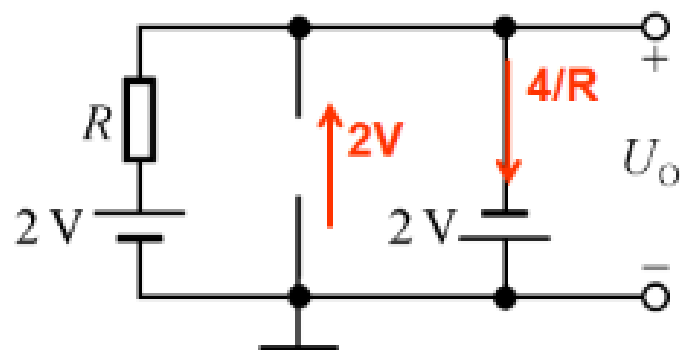
方法1：假设都导通



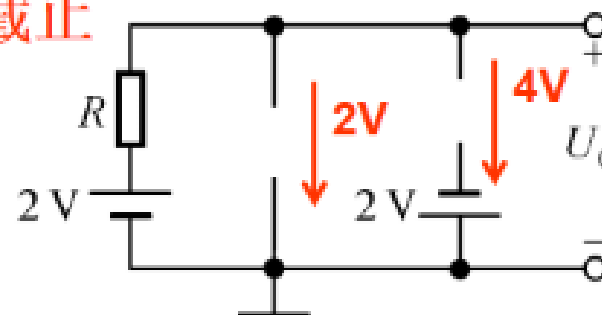
无解

方法2：假设都截止

方法3：假设 D_1 截止 D_2 导通

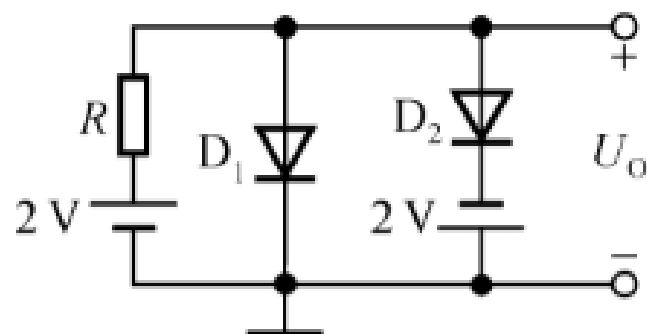


二极管状态与假设相符



二极管状态与假设不符

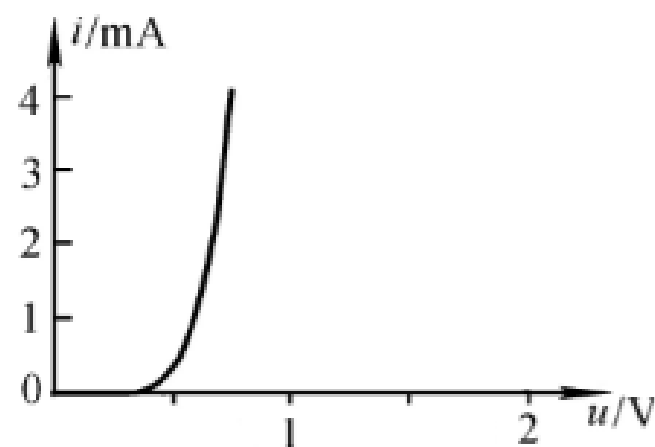
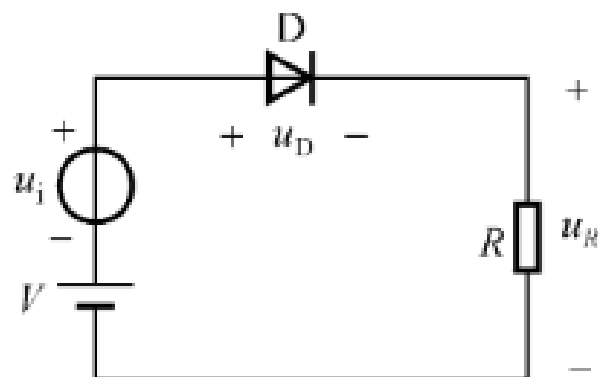
讨论：如何判断二极管的工作状态（S模型）？



假设状态法

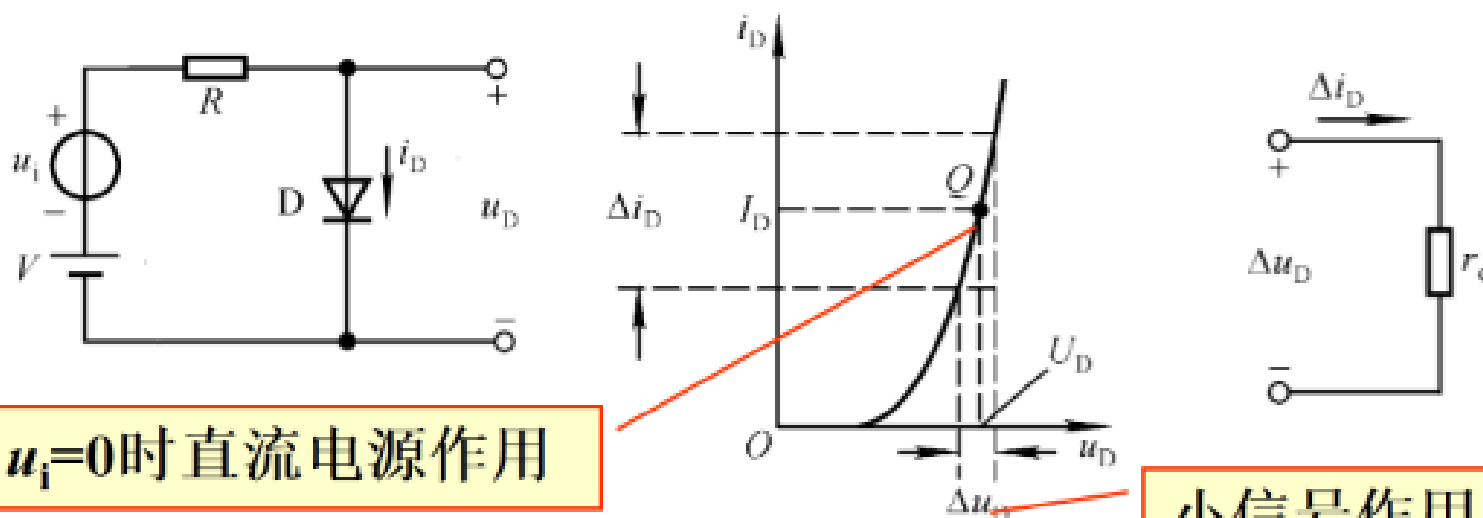
对 V 和 U_i 二极管的模型有什么不同？

$V \gg U_i$



2. 微变等效电路（参见chapter11）

当二极管在静态基础上有一动态信号作用时，则可将二极管等效为一个电阻，称为动态电阻，也就是微变等效电路。



$u_i=0$ 时直流电源作用

根据电流方程， $r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \approx \frac{U_T}{I_D}$

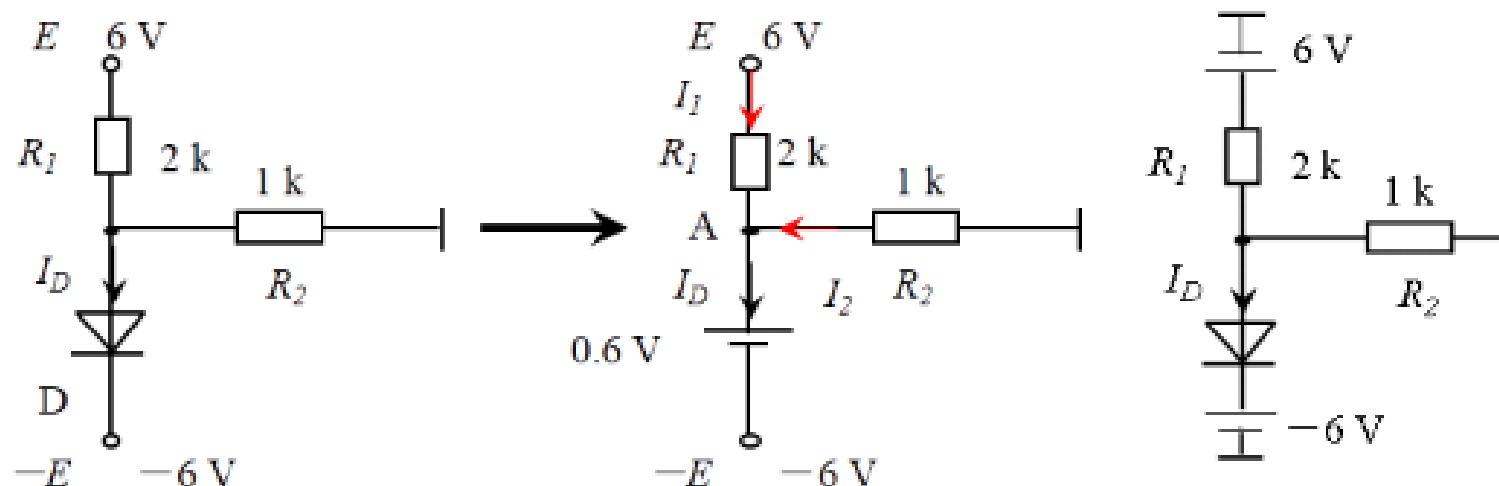
小信号作用

Q 越高， r_d 越小。

静态电流

$$i_D = I_D + \frac{di_D}{du_D} \Delta u_D + \dots \quad i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad \begin{matrix} \text{变量符号约定} \\ i_D & I_D & i_d \end{matrix}$$

例 1: 电路如图 (a) 所示, 计算二极管中的电流 I_D 。已知二极管的导通电压 $U_{D(on)} = 0.6 \text{ V}$, 交流电阻 r_D 近似为零。



解: **step1:** 可以判断二极管处于导通状态

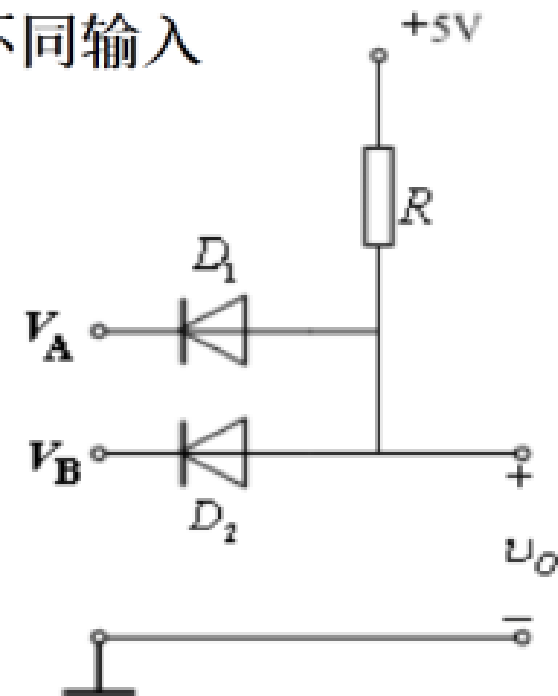
step2: 将相应的电路模型代入, 得到图 (b)。

step3: 解等效线性电路。

节点 A 的电压 $U_A = -E + U_{D(on)} = -5.4 = E - I_1 R_1 = -I_2 R_2$,
解得 $I_1 = 5.7 \text{ mA}$, $I_2 = 5.4 \text{ mA}$, 于是 $I_D = I_1 + I_2 = 11.1 \text{ mA}$ 。

例2： 已知二极管正向压降 $V_D=0.7V$ ，求不同输入状态下的输出电压 U_O

- 1) $V_A = V_B = 3V$, $U_0 = 3.7V$;
- 2) $V_A = 3V, V_B = 0V$, $U_0 = 0.7V$;
- 3) $V_A = 0V, V_B = 3V$, $U_0 = 0.7V$;
- 4) $V_A = V_B = 0V$, $U_0 = 0.7V$;



数字逻辑

若 $>2.5V \rightarrow$ “1”

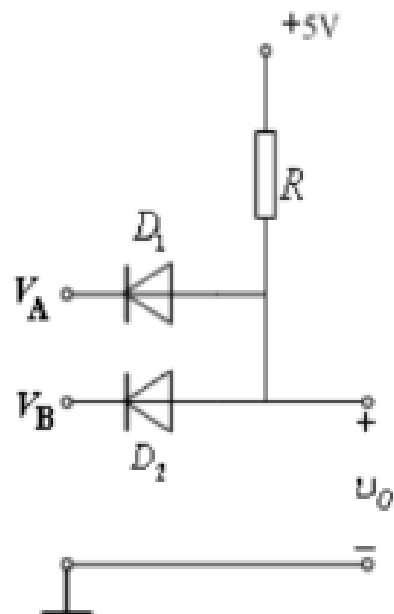
若 $<1.5V \rightarrow$ “0”



V_A	V_B	V_O
1	1	1
0	1	0
1	0	0
0	0	0

输入与输出
构成“与”，
称为与门

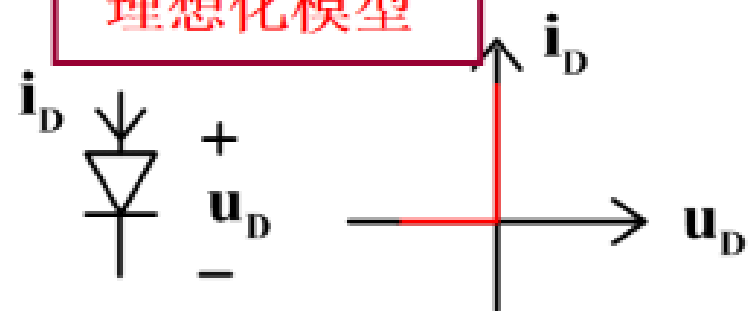
例2续： 若已知输入波形，求输出波形，且二极管可简化为理想模型。



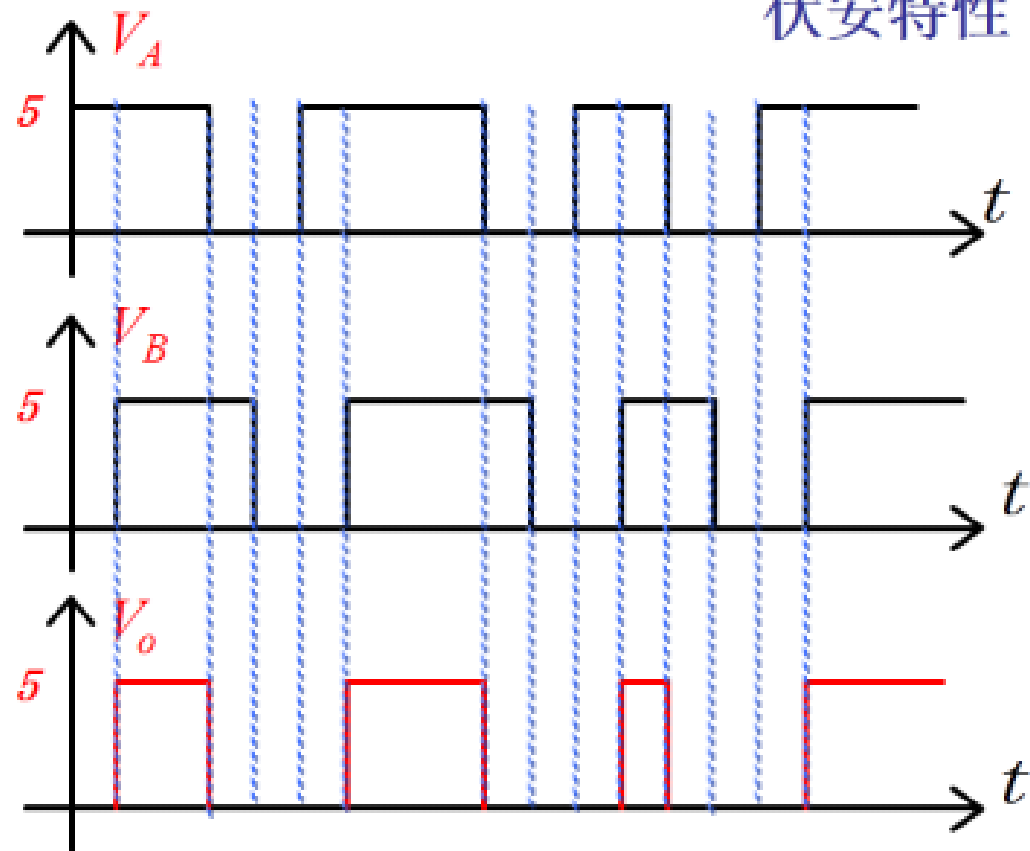
数字逻辑

V_A	V_B	V_O
1	1	1
0	1	0
1	0	0
0	0	0

理想化模型



伏安特性

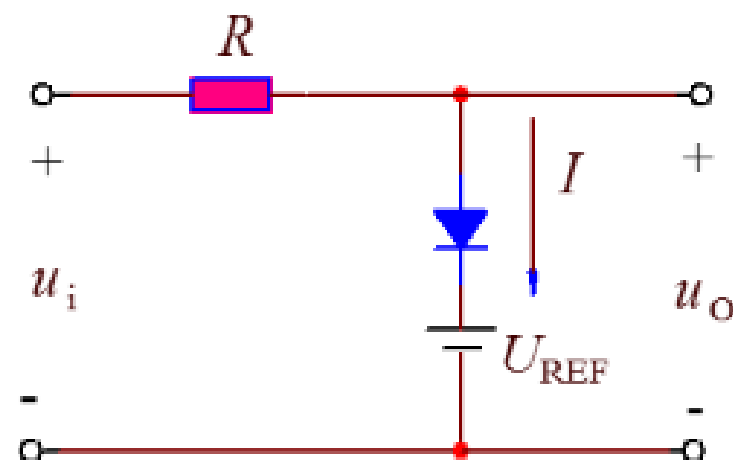


例3：二极管构成的限幅电路如图所示， $R=1\text{k}\Omega$ ， $U_{\text{REF}}=2\text{V}$ ，
 (1)若 u_i 为4V的直流信号，分别采用理想二极管模型、理想二极管串联电压源模型计算电流 I 和输出电压 u_o 。

解： (1) 采用理想模型分析。

$$I = \frac{u_i - U_{\text{REF}}}{R} = \frac{4\text{V} - 2\text{V}}{1\text{k}} = 2\text{mA}$$

$$u_o = U_{\text{REF}} = 2\text{V}$$

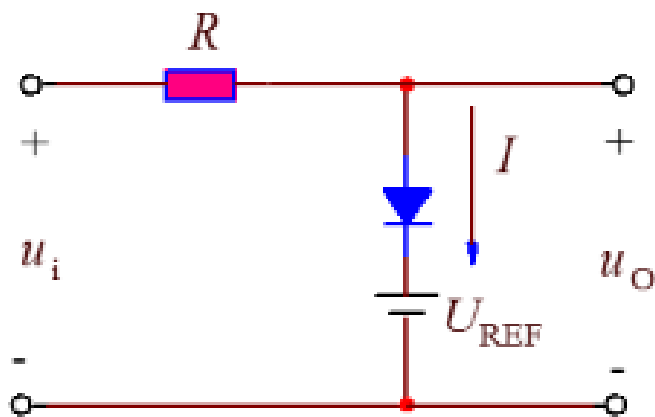


(2) 采用理想二极管串联电压源模型分析。

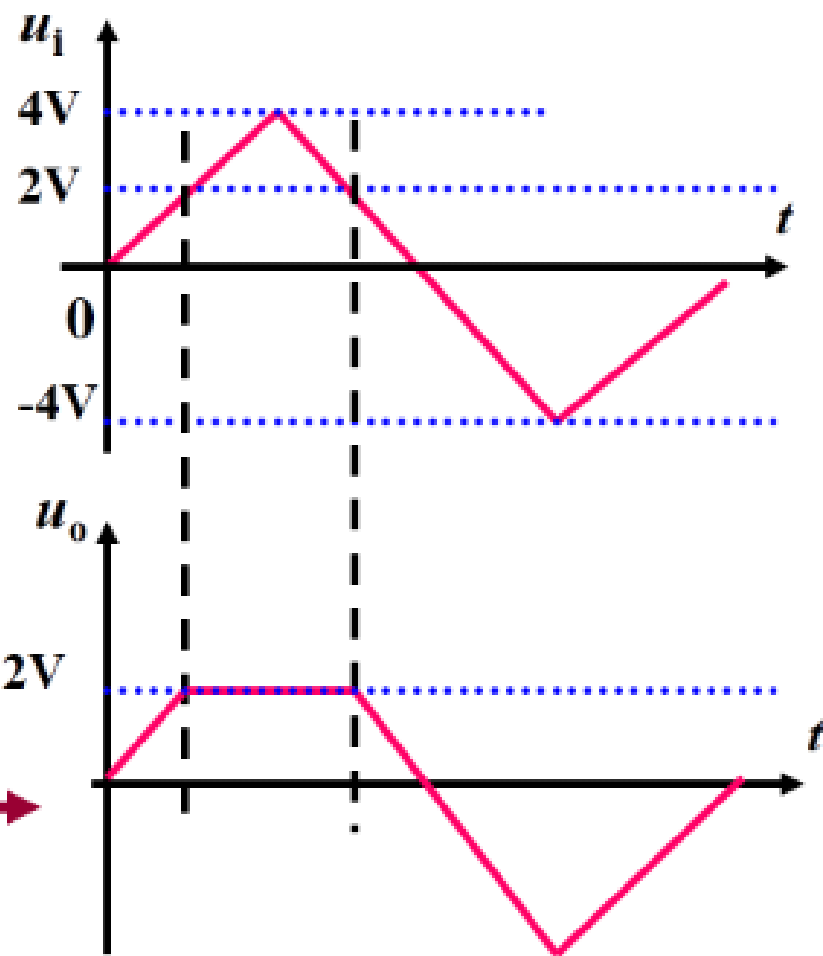
$$I = \frac{u_i - U_{\text{REF}} - U_D}{R} = \frac{4\text{V} - 2\text{V} - 0.7\text{V}}{1\text{k}} = 1.3\text{mA}$$

$$u_o = U_{\text{REF}} + U_D = 2\text{V} + 0.7\text{V} = 2.7\text{V}$$

(2) 如果 u_i 为幅度 $\pm 4V$ 的三角波，波形如图所示，采用理想二极管模型分析电路并画出相应的输出电压波形。

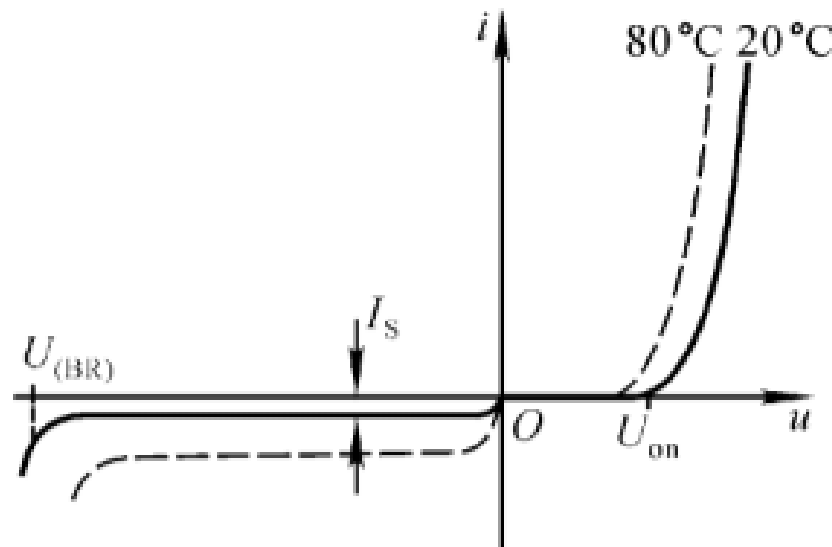


解：采用理想二极管模型分析。波形如图所示。 →



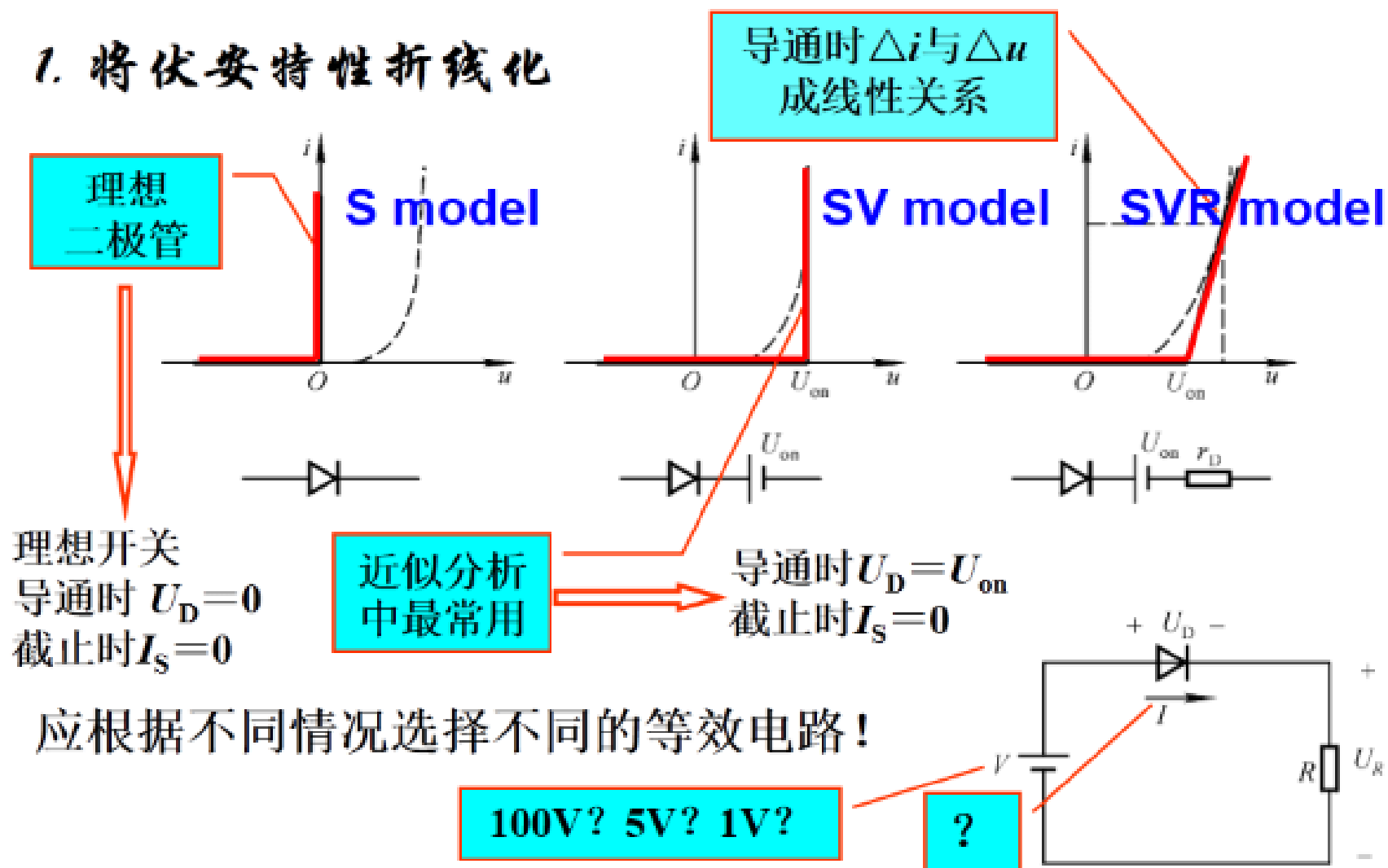
三、二极管的主要参数

- **最大整流电流 I_F** : 二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流
- **最大反向工作电压 U_R** : 二极管工作时允许外加的最大反向电压。最大瞬时值
- **反向电流 I_R** : 二极管未击穿时的反向电流。即 I_S
- **最高工作频率 f_M** : 二极管工作的上限截止频率。因PN结有电容效应



四、二极管的等效电路

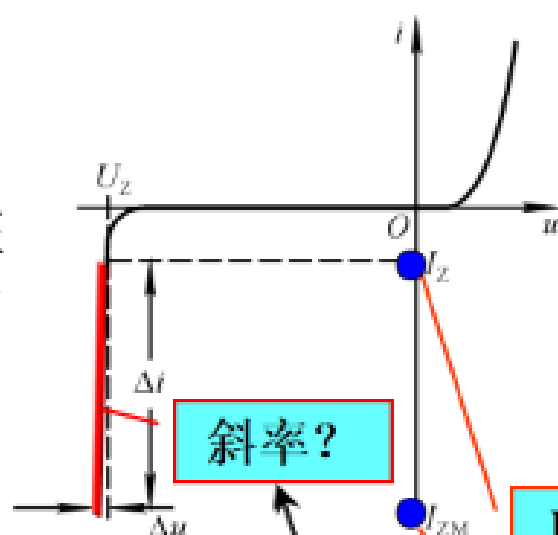
1. 将伏安特性折线化



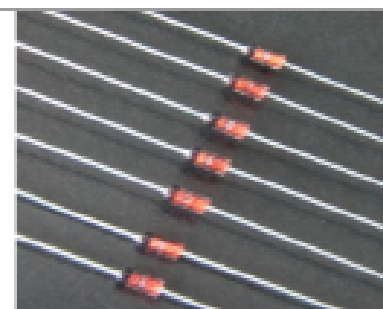
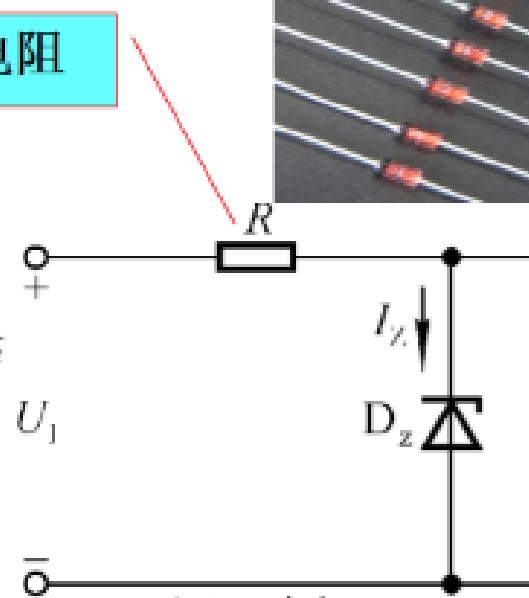
五、稳压二极管

1. 伏安特性

由一个PN结组成，反向击穿后在一定的电流范围内端电压基本不变，为稳定电压。



限流电阻



2. 主要参数

稳定电压 U_Z 、稳定电流 I_Z

最大功耗 $P_{ZM} = I_{Zmax} U_Z$

动态电阻 $r_z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$

I_{Zmin} 进入稳压区的最小电流

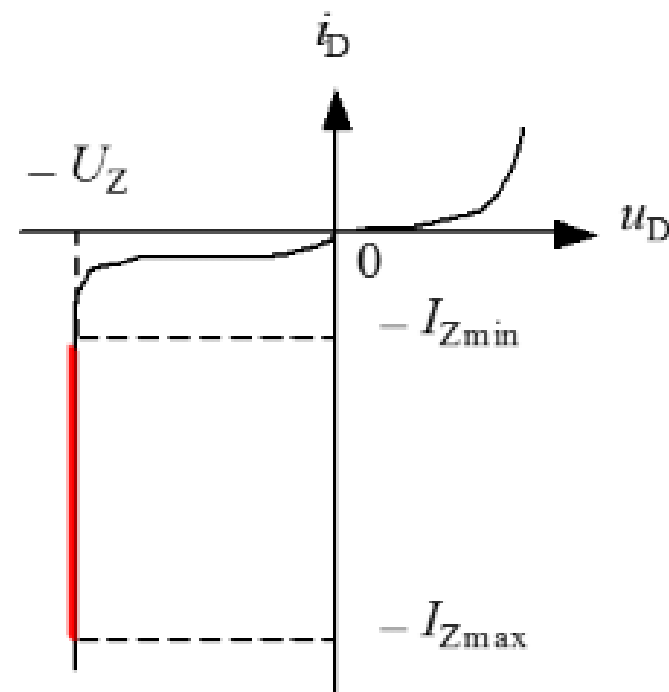
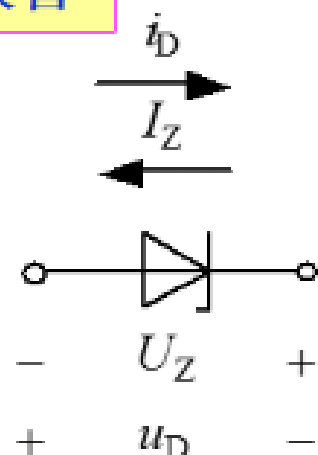
I_{Zmax} 不至于损坏的最大电流

若稳压管的电流太小则不稳压— I_{Zmin}

若稳压管的电流太大则会因功耗过大而损坏— I_{Zmax}

因而稳压管电路中必需有限制稳压管电流的限流电阻！

稳压二极管

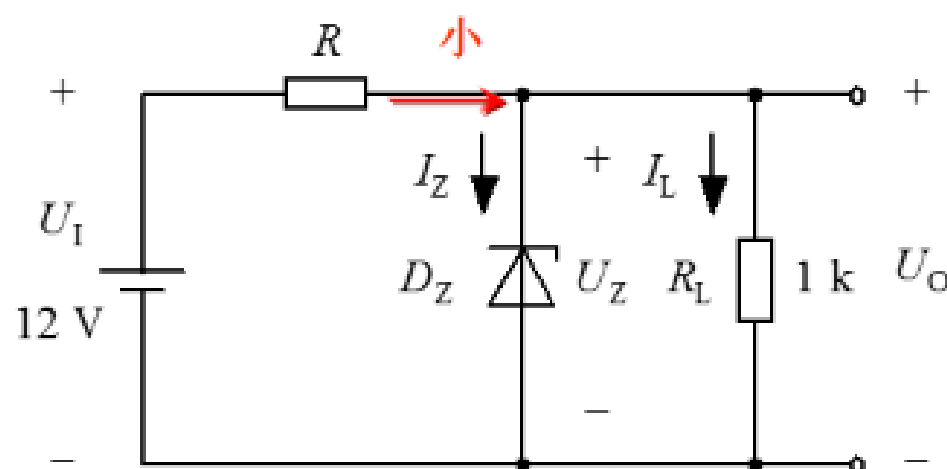


工作电流 I_Z 可以在 I_{Zmin} 到 I_{Zmax} 的较大范围内调节，两端的反向电压成为稳定电压 U_Z 。 I_Z 应大于 I_{Zmin} 以保证较好的稳压效果。同时，外电路必须对 I_Z 进行限制，防止其太大使管耗过大，甚至烧坏PN结，如果稳压二极管的最大功耗为 P_M ，则 I_Z 应小于 $I_{Zmax} = P_M / U_Z$ 。

例4：稳压二极管电路如图所示，稳定电压 $U_Z = 6\text{ V}$ 。当限流电阻 $R = 200\ \Omega$ 时，求工作电流 I_Z 和输出电压 U_O ；

当 $R = 11\text{ k}\Omega$ 时，再求 I_Z 和 U_O 。

两种电阻对于稳压管有什么区别？



解：当 $R = 200\ \Omega$ 时，稳压二极管 D_Z 处于击穿状态

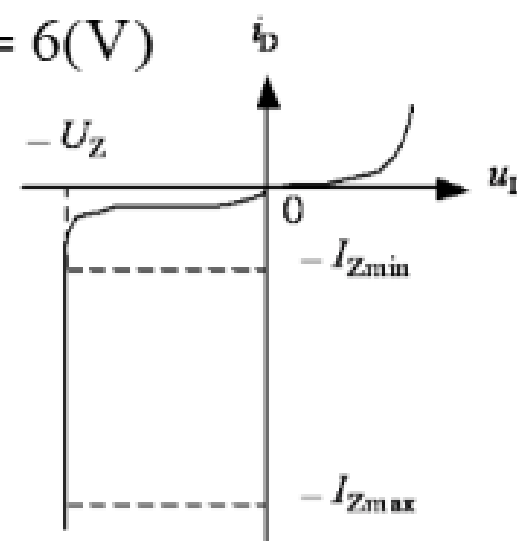
$$I_Z = \frac{U_1 - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_L} = 24(\text{mA})$$

$$U_O = U_Z = 6(\text{V})$$

当 $R = 11\text{ k}\Omega$ 时， D_Z 处于截止状态， $I_Z = 0$

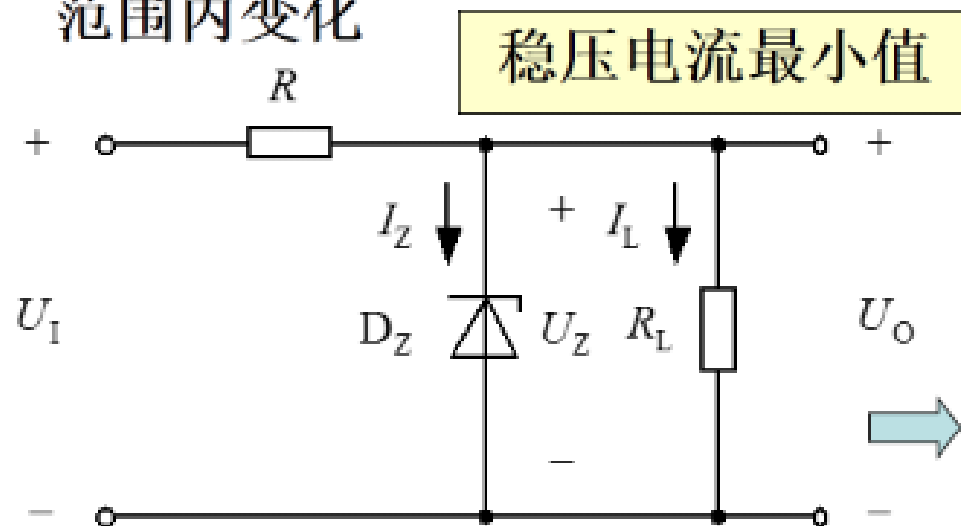
$$U_O = \frac{R_L}{R + R_L} U_1 = 1(\text{V})$$

选取限流电阻的依据？？？



选取限流电阻的依据

设，电源电压有波动，负载在一定范围内变化



$$I_Z = \frac{U_1 - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_L}$$

$$\{U_{Imin}, U_{Imax}\} \quad \{R_{Lmin}, R_{Lmax}\}$$

$$\frac{U_{Imin} - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_{Lmin}} > I_{Zmin}$$

$$\Rightarrow R < \frac{U_{Imin} - U_Z}{I_{Zmin} R_{Lmin} + U_Z} R_{Lmin} = R_{max}$$

$$\frac{U_{Imax} - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_{Lmax}} < I_{Zmax}$$

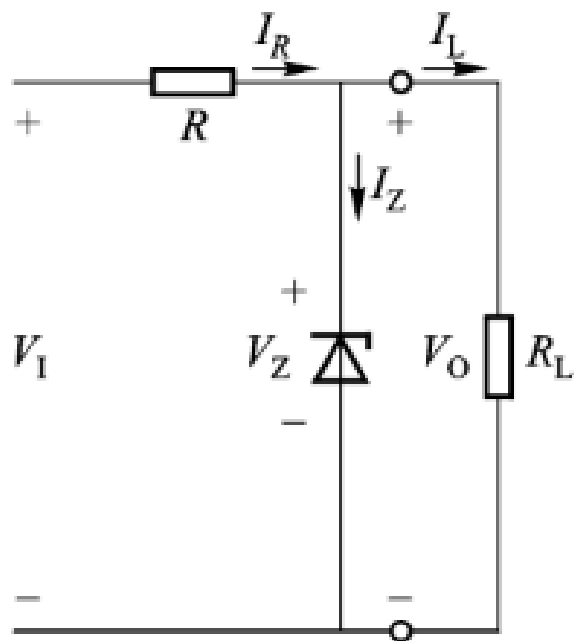
$$\Rightarrow R > \frac{U_{Imax} - U_Z}{I_{Zmax} R_{Lmax} + U_Z} R_{Lmax} = R_{min}$$

稳压电流最大值

$$\frac{U_{Imax} - U_Z}{I_{Zmax} R_{Lmax} + U_Z} R_{Lmax} < R < \frac{U_{Imin} - U_Z}{I_{Zmin} R_{Lmin} + U_Z} R_{Lmin}$$

例5：确定限流电阻并检验稳压管能否正常工作

$$V_I = 12\text{V}, \quad V_Z = 6\text{V}, \quad I_{Z\text{正常}} = 10\text{ mA}, \quad P_{Z\text{max}} = 150\text{ mW}, \quad R_L = 600\ \Omega$$



✓ 根据正常工作要求计算 R

$$I_R = I_Z + I_L = 20\text{ mA}$$

$$R = \frac{V_I - V_Z}{I_R} = \frac{12 - 6}{20} = 300\ \Omega$$

✓ 检验负载开路时稳压管的功耗

$$I_Z = I_R - I_L = 20\text{ mA}$$

$$P_Z = I_Z \cdot V_Z = 20 \times 6 = 120\text{ mW} < P_{Z\text{max}}$$

- ✓ 稳压管的主要参数
 - 稳定电压 V_Z
 - 动态电阻 r_d
- ✓ 最大允许耗散功率 $P_{Z\text{max}}$
- ✓ 稳定电压的温度系数

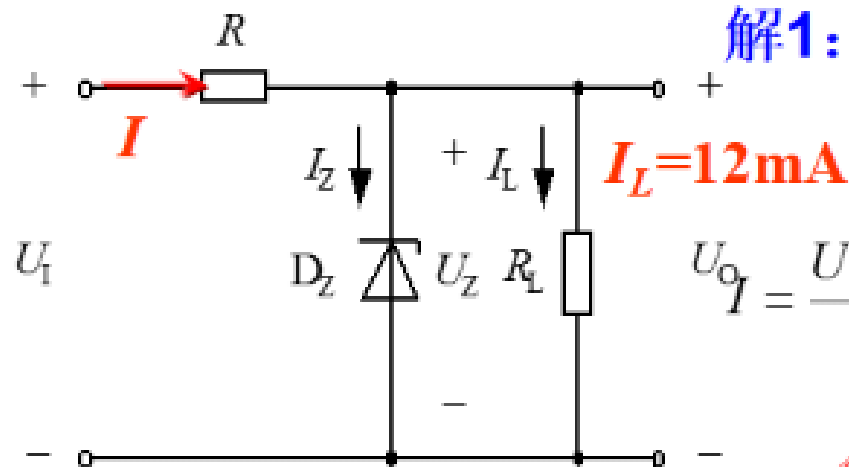
例6: 已知 $R=1k\Omega$, $R_L=500\Omega$, 稳压管稳定电压 $U_Z=6V$, 最小稳定电流和最大稳定电流分别为**5mA**和**25mA**

稳压管烧坏

(1) 当 U_I 分别为10V、15V、35V时输出电压的值

(2) 若 $U_I=35V$ 时负载开路, 则会出现什么情况? 为什么?

解1: 假设稳压管处于稳压状态 (击穿)



$$U_O = \frac{U_I - U_Z}{R}$$

$$I = \frac{10 - 6}{1} = 4mA$$

$$I = \frac{15 - 6}{1} = 9mA$$

$$I = \frac{35 - 6}{1} = 29mA \rightarrow U_O = 6V$$

稳压管不可能击穿

$$U_O = U_I \frac{R_L}{R + R_L} = 10 \frac{0.5}{1 + 0.5} = 3.33V$$

稳压管不可能击穿

$$U_O = U_I \frac{R_L}{R + R_L} = 15 \frac{0.5}{1 + 0.5} = 5V$$

稳压管
击穿

解2: 假设管子处于截止状态 \rightarrow 求稳压管端电压 $\rightarrow < U_Z$, 假设成立

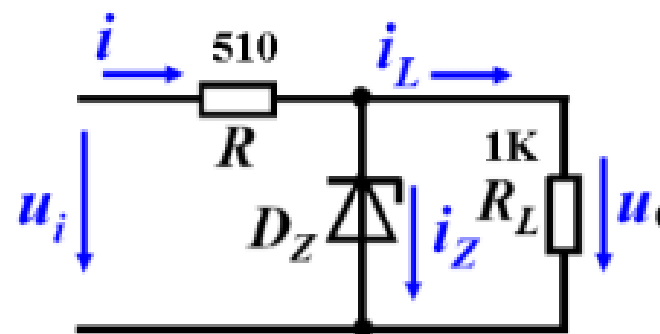
稳压管的应用电路

例7： 已知外加电压 $u_i = 20V$ ，稳压管稳定电压 $u_Z = 9V$

稳压管动态电阻 $r_Z = 20\Omega$ 负载电阻 $R_L = 1K\Omega$

1) 求各电流；

2) 外加电压下降4V时，输出电压变化量。



解： 1) 求各电流
$$I = \frac{u_i - u_Z}{R} = \frac{20 - 9}{510} = 21.6mA$$

$$I_L = \frac{u_Z}{R_L} = \frac{9}{1000} = 9mA$$

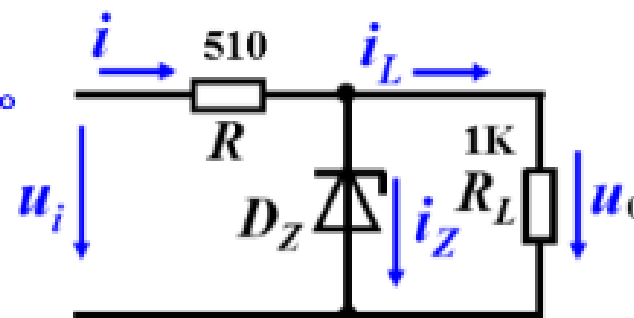
$$I_Z = I - I_L = 12.6mA$$

例7: 已知外加电压 $u_i = 20V$, 稳压管稳定电压 $u_Z = 9V$

稳压管动态电阻 $r_Z = 20\Omega$ 负载电阻 $R_L = 1K\Omega$

2) 外加电压下降4V时, 输出电压变化量。

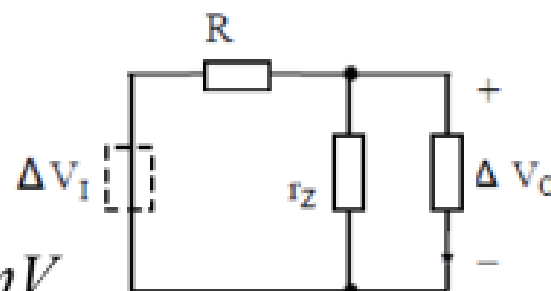
解: 设稳压管稳定电压基本不变
(工程计算方法)



解答1: $\frac{-4}{510} \times 20 = 158mV$

解答2: $\frac{-4}{510 + 20 // 1000} \times 20 // 1000 = 148mV$

解答3: $\left(\frac{16-9}{510} - \frac{20-9}{510} \right) \times 20 // 1000 = 154mV$

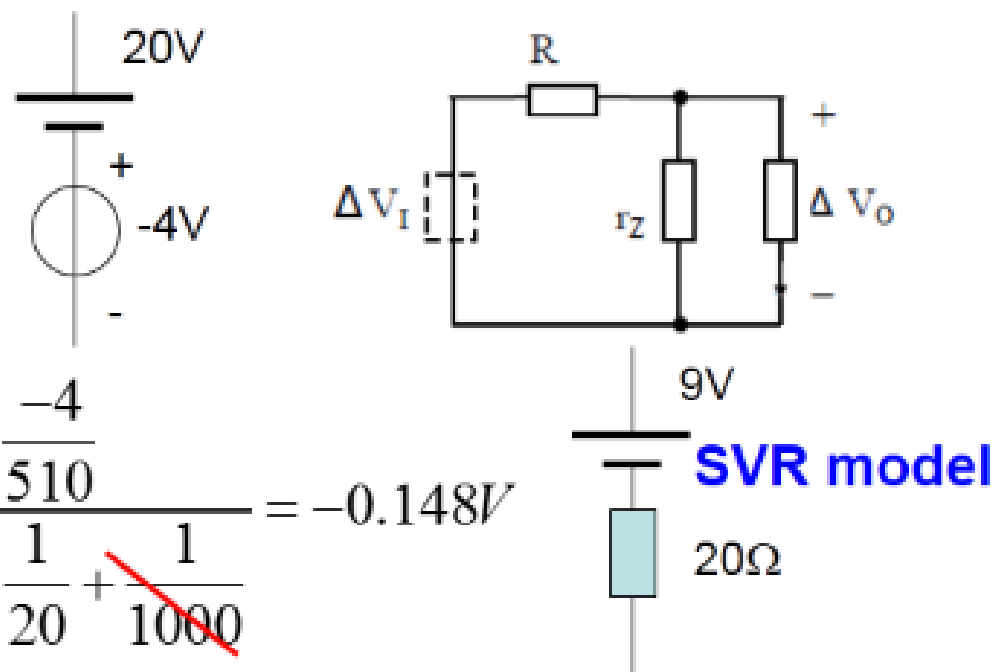


怎样来的?

例7: 已知外加电压 $u_i = 20V$, 稳压管稳定电压 $u_Z = 9V$

稳压管动态电阻 $r_Z = 20\Omega$ 负载电阻 $R_L = 1K\Omega$

2) 外加电压下降4V时,
输出电压变化量。



-4V单独作用

$$U_o = \frac{510}{\frac{1}{510} + \frac{1}{20} + \frac{1}{1000}} = -0.148V$$

设稳压管稳定电压基本不变
(工程计算方法)

$$\Delta u_o \approx \Delta I'_Z \times r_Z = -158mV$$

稳压管近似为理想电压源

$$\Delta u_o = \left\{ \left(\frac{16 - u_Z}{R} - \frac{u_Z}{R_L} \right) - \left(\frac{20 - u_Z}{R} - \frac{u_Z}{R_L} \right) \right\} r_Z = \frac{-4}{R} r_Z$$

SV model SV model

单选题

稳压电路如图所示，已知稳压管稳定电压 $V_Z=6V$ 。

1) $R_L=2k\Omega$ ，求稳压管中电流

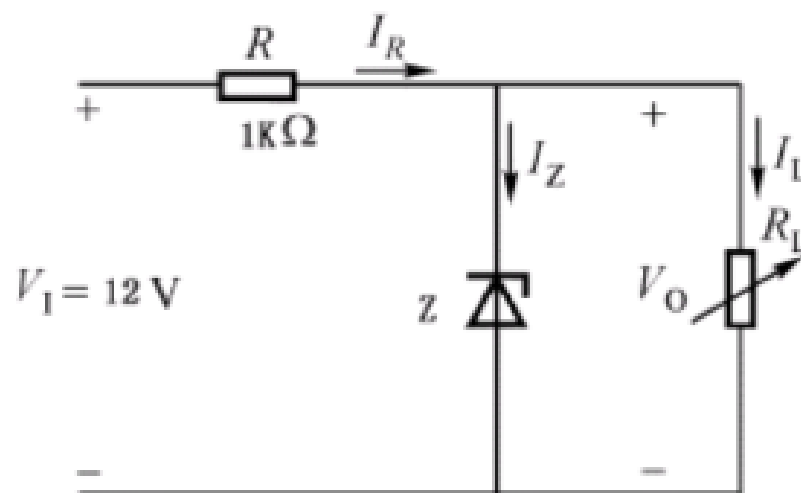
2) $R_L=?$ 稳压管失去稳压作用

A 6mA; 3k

B 3mA; 3k

C 3mA; 1k

D 6mA; 1k



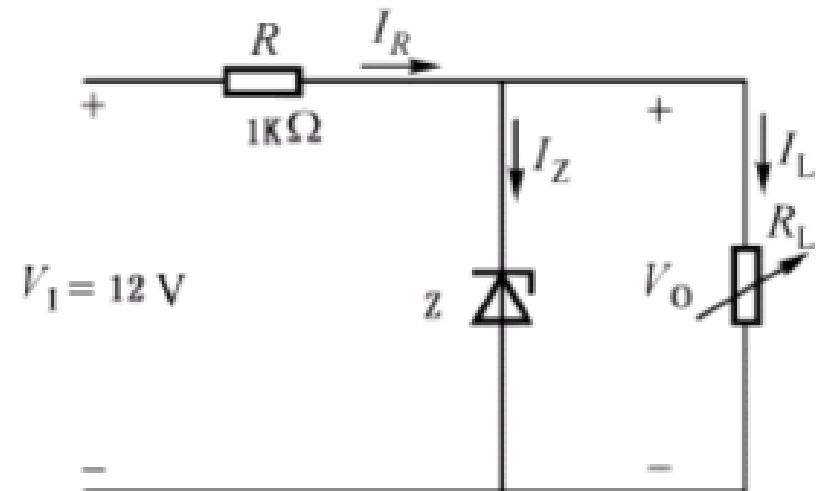
作业

- 3.1, 2, 5, 6 二极管
- 3.9, 10, 11 稳压管
- 3.12, 13, 14, 15, 16 三极管工作状态
- 3.17, 18, 19, 22, 23 场效应管
- 3.29, 30, 31, 32 运算放大器
- 3.36, 37, 39 (6, 7) 数电基础

测试题： 稳压电路如图所示，已知稳压管稳定电压 $V_z=6V$ 。

1) $R_L=2k\Omega$ ，求各支路电流

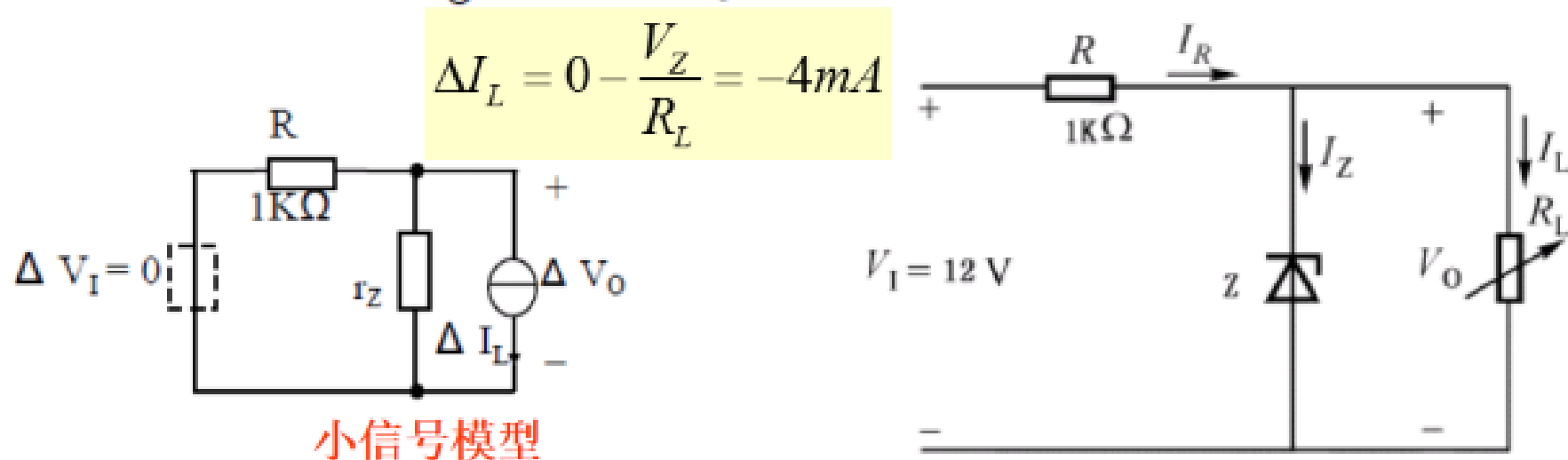
2) $R_L=?$ 稳压管失去稳压作用



【例】 分析稳压管电路如图1所示， R 为限流电阻， R_L 为负载电阻，（设稳压管稳定电压 $V_Z=6V$ ，动态内阻 $r_z=20\Omega$ ）

（1）分析 $R_L=2K\Omega$ 时各支路电流 I_R 、 I_Z 、 I_L ，并分析当 R_L 为何值时，稳压电路失去稳压作用。

（2）用小信号模型分析当 R_L 由开路变化至 $1.5K\Omega$ 时，稳压电路输出电压 V_O 的变化 ΔV_O 。



（1）**6mA， 3mA， 3mA。** $R_L < 1k$ 失去稳压作用。

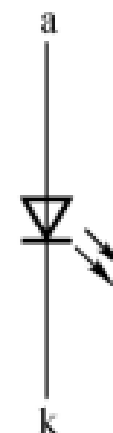
（2） **$\Delta V_O = -4mA \times (r_z // R) \approx -4mA \times 0.02 = -0.08V$**

六*、特种二极管

■ 发光二极管

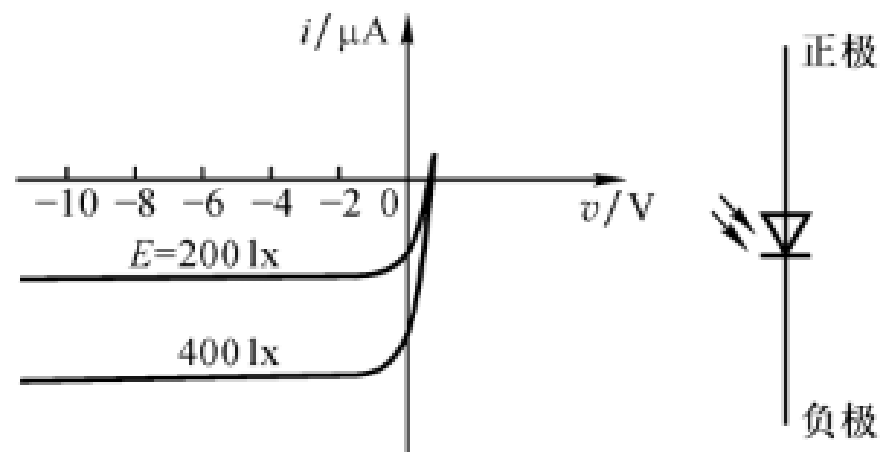


- ✓ 由磷砷化镓(GaAsP)、磷化镓(GaP)等半导体做成的PN结正偏工作时，多子大量复合，释放出能量，其中一部分能量会变为光能，使半导体发光；
- ✓ 发光二极管的电路符号：
- ✓ 光谱范围窄，光的波长与所用材料有关；
- ✓ 伏安特性与一般二极管相似，
但开启电压可达1.3~2.4V，反压一般大于3伏；
- ✓ 发光亮度与正向电流（毫安级）成正比；
- ✓ 具功耗小，易于和IC相匹配，驱动简单，
响应时间快(启亮或熄灭仅需几个ns)、寿命长，耐冲击等优点。

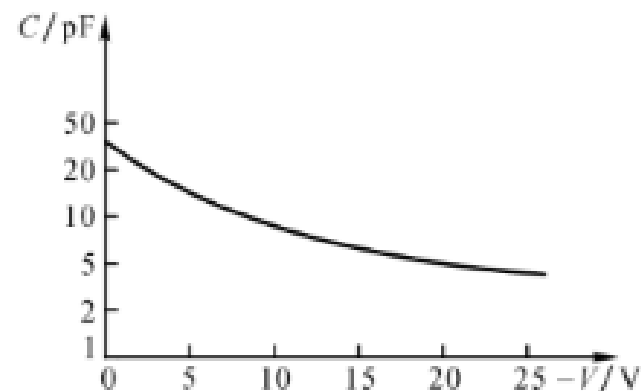
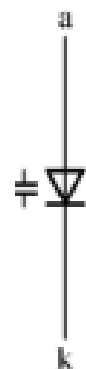


■ 光电二极管

- ✓ 正常应用：
光电二极管工作在反向偏置状态；
- ✓ 无光照时只有很小的反向饱和电流 I_S ，称为暗电流；
- ✓ 有光照时，光电二极管受光激发，产生大量电子—空穴对，形成较大的光生电流，且随光照强度的增加而增大；
- ✓ 特性要求：
 - 很好的线性性；
 - 同时 I_S 又要较大。



■ 变容二极管



- ✓ 正常应用：
变容二极管工作在反向偏置状态；
- ✓ 改变反向偏压，
即可改变其等效电容的大小；
- ✓ 变容二极管的电容很小，
一般为PF数量级，常用于高频电路。

■ 肖特基二极管

✓ 内部有一个金属结面；



✓ 电路符号：

✓ 显著特点：

- 导通电压 (V_{on}) 很低，仅为0.3V；
- 导通时存贮的非平衡少数载流子数量很少，关断时间很短，工作频率高。

