



模拟电子线路

Analog Electronic Circuits

第二讲 二极管模型与基本电路



群名称:模电2018_生医和计算机
群 号:561745191

授课人: 余隽

大连理工大学

2018年9-12月

助教: 李宝玲

助教: 朱思鹏

- 创新园A-416

- QQ: 308394387

- 84706184

QQ: 1047807444

QQ: 1126842950

3 半导体二极管及其基本电路

3.1 半导体基础知识 (Semiconductor)

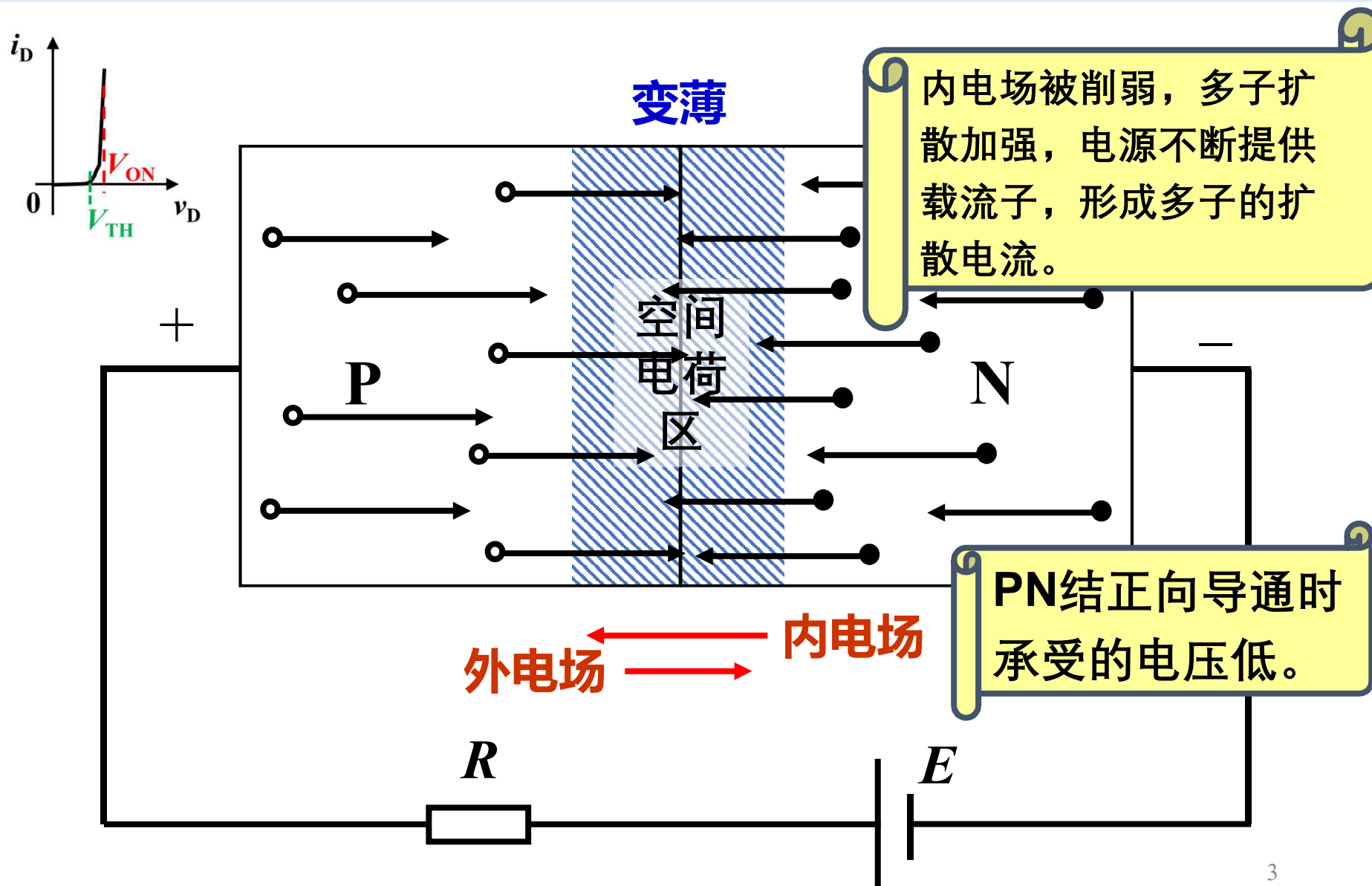
3.2 PN结的形成及特性 (PN Junction)

3.3 半导体二极管 (Diode)

3.4 二极管基本电路及其分析方法

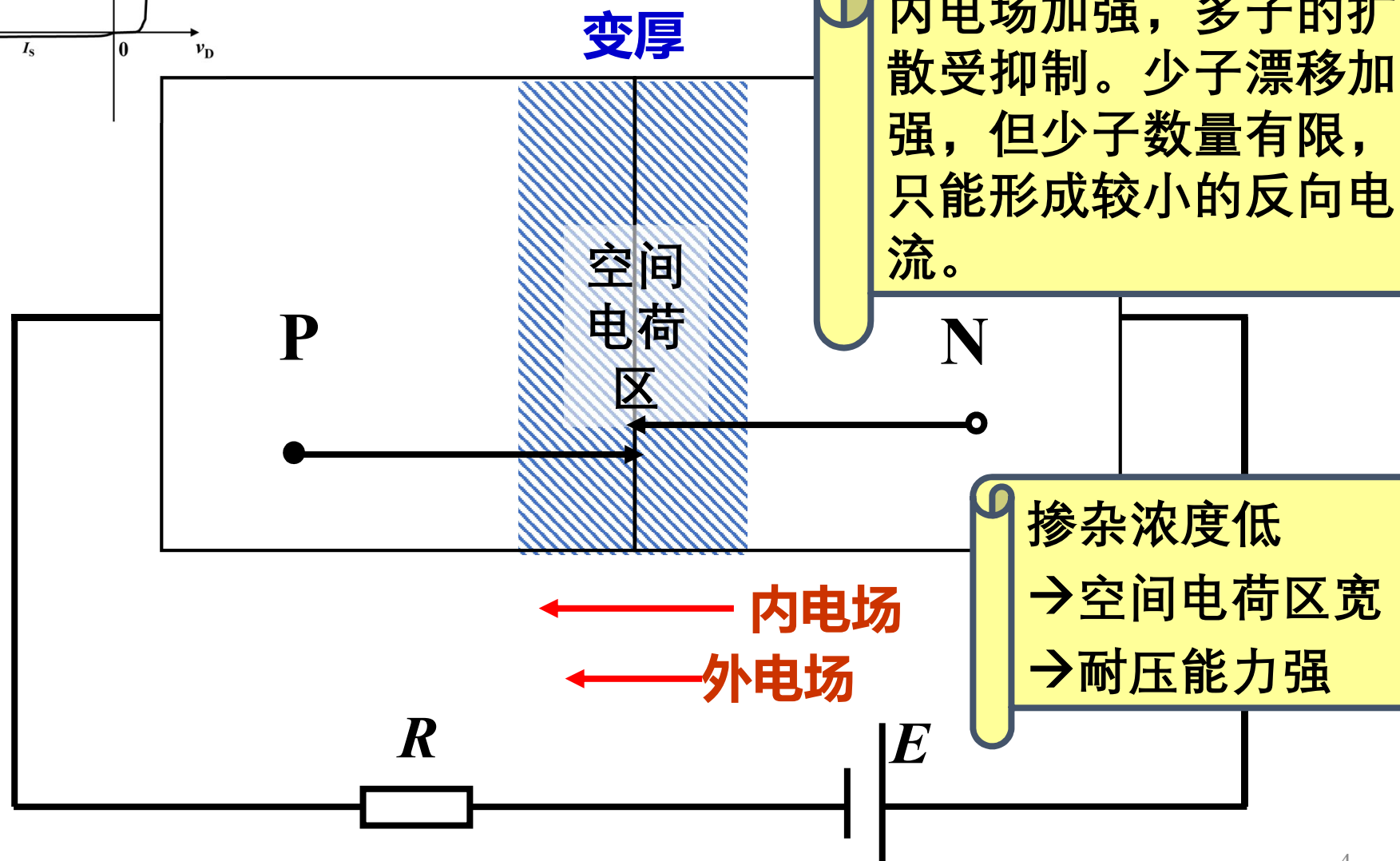
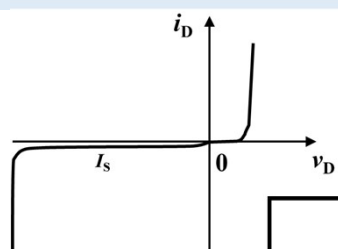
3.5 特殊二极管

3.2.2 PN结的单向导电性 正偏PN结导通，电阻小

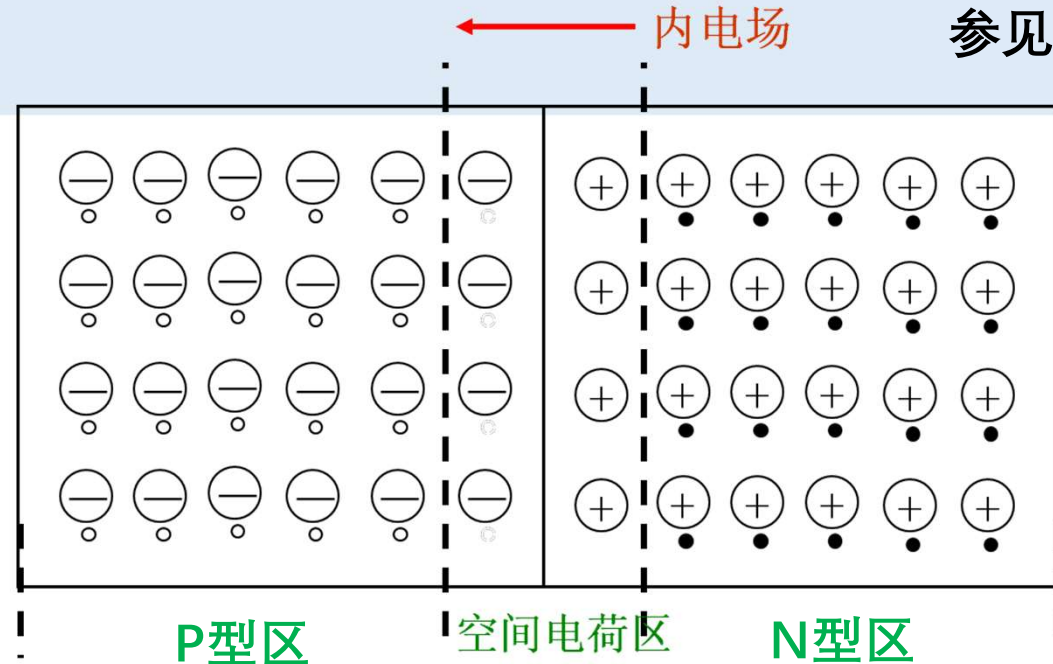


3.2.2 PN结的单向导电性

反偏PN结截止，电阻大



参见《半导体器件物理》



PN junction

**单向
导电性**

PN结正偏： P 加高电平 **外电场** → N 加低电平

抵消自建内电场，促进多子扩散，空间电荷区缩小，电阻小，**导通！**

PN结反偏： P 接低电平 **外电场** ← N 加低电平

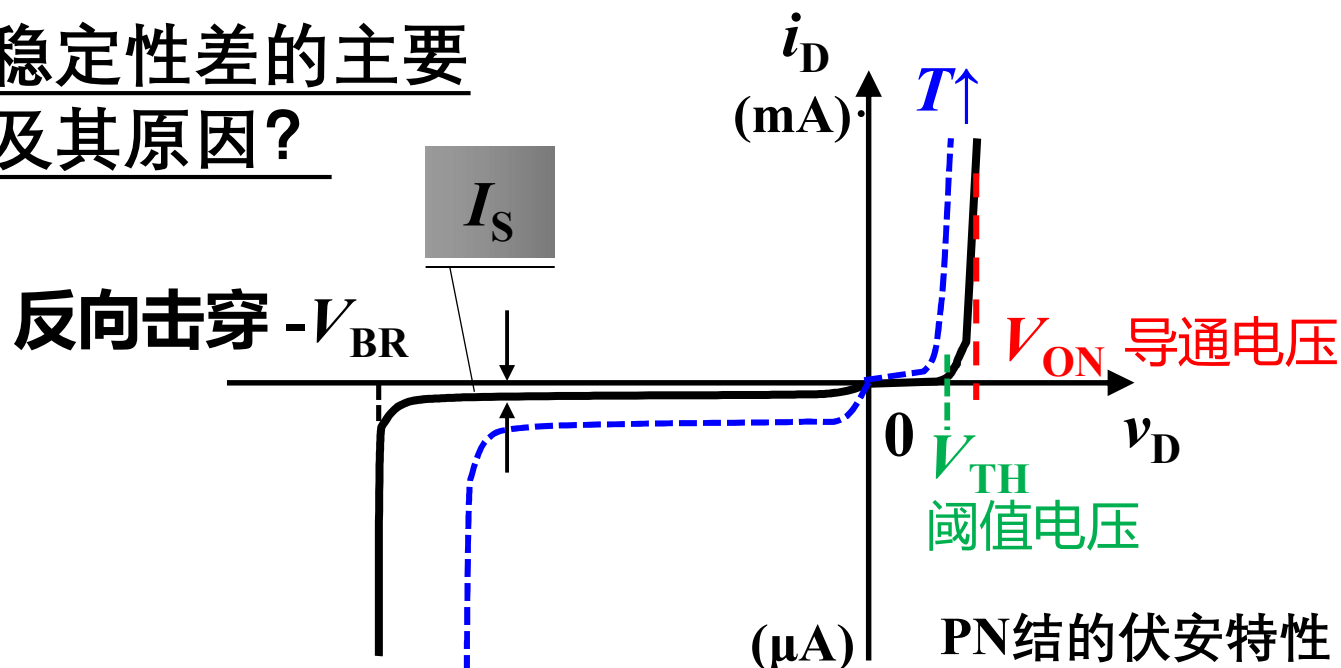
增大内电场，促进少子漂移，空间电荷区增大，电阻大，几乎**不导电！**

3.2.2 PN结的单向导电性

伏安特性的表达式 $i_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1) \begin{cases} \approx I_S e^{v_D/V_T} & \text{正偏} \\ \approx -I_S & \text{反偏} \end{cases}$

- 反向饱和电流 I_S 与材料、工艺有关，随温度升高而显著上升；
- 热电压 $V_T = kT/q$ 。 $V_T = 26\text{mV}$ @ $T=300\text{K}$ (室温)。

温度稳定性差的主要体现及其原因？



3.2.3 PN结的击穿特性 Breakdown

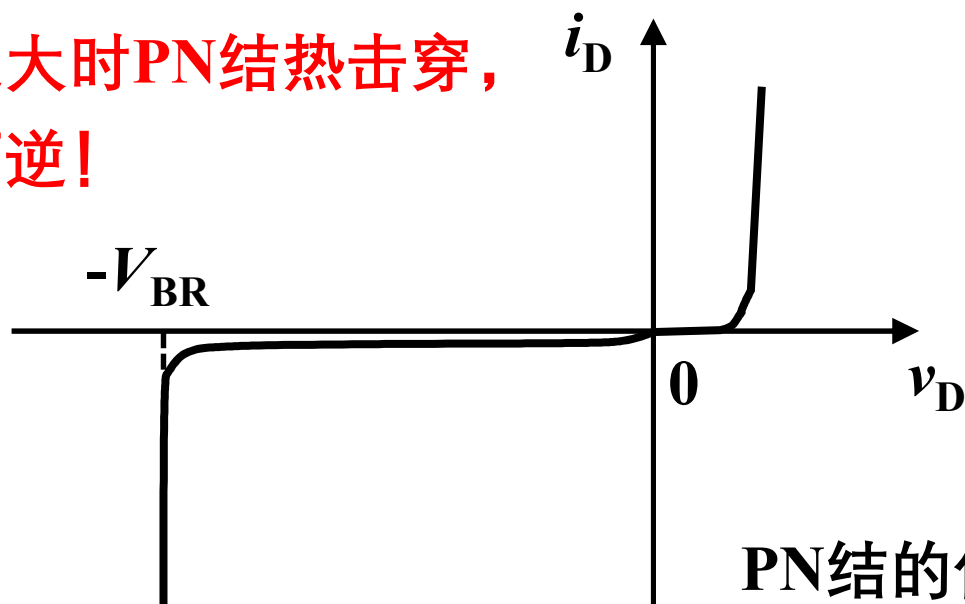
PN结反偏时电压过大可能发生击穿，**击穿电压** V_{BR}

雪崩击穿 Avalanche

齐纳击穿 Zener

(均可逆)

击穿电流过大时PN结热击穿，
热击穿不可逆！

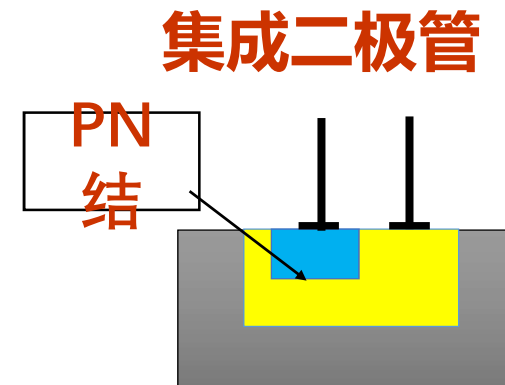
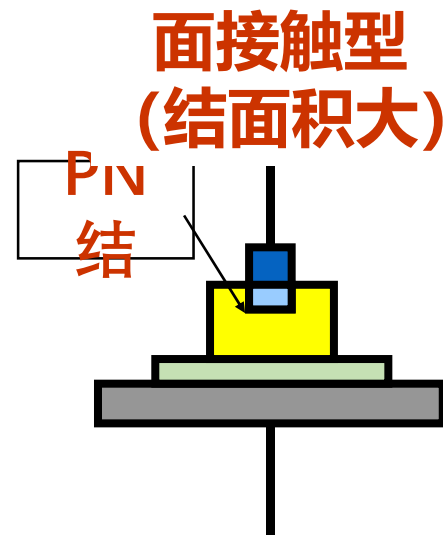
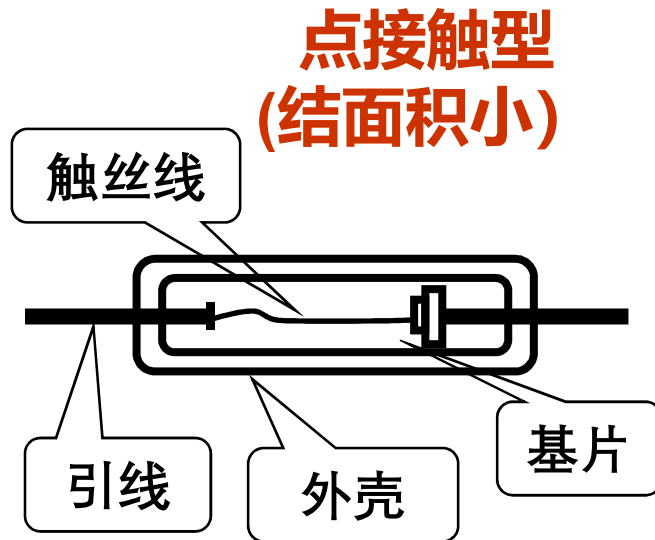


PN结的伏安特性

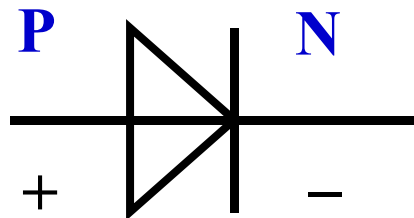
3.3 半导体二极管 diode

3.3.1 基本结构

PN 结加上管壳和引线，就成为半导体二极管。



符号：



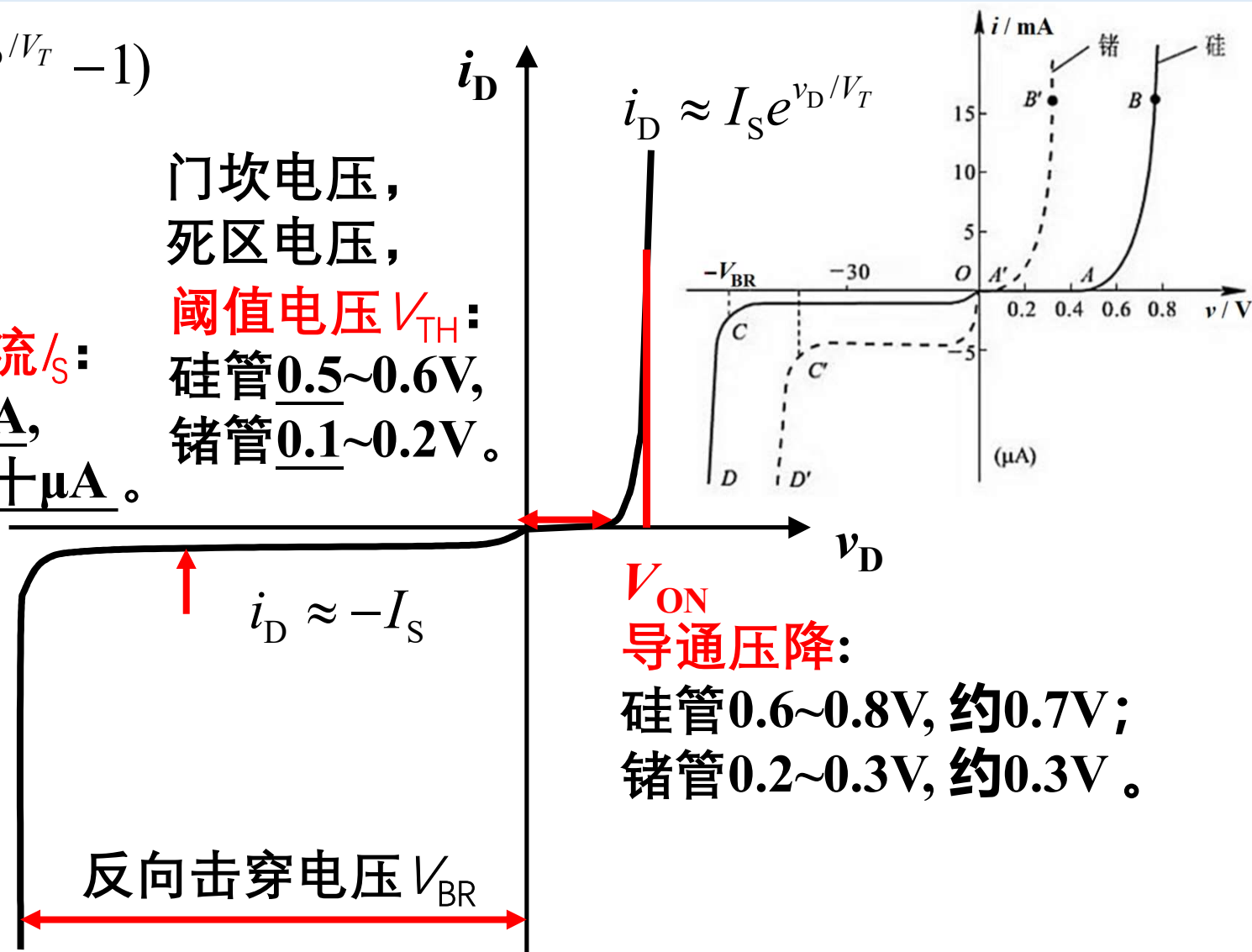
色环端为负极

3.3 半导体二极管 diode 3.3.2 伏安特性

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

反向饱和电流 I_S ：
硅管小于 $1\mu\text{A}$ ，
锗管小于几十 μA 。

门坎电压，
死区电压，
阈值电压 V_{TH} ：
硅管 $0.5\sim 0.6\text{V}$ ，
锗管 $0.1\sim 0.2\text{V}$ 。



3.3.3 主要直流参数

1. 最大整流电流 I_F 结温升的限制

二极管长期使用时，允许流过二极管的最大正向平均电流。

2. 反向击穿电压 V_{BR}

击穿时反向电流剧增，二极管的单向导电性破坏，甚至过热烧坏。手册上给的最高反向工作电压 V_{WRM} 一般是 V_{BR} 的一半。

3. 反向电流 I_R (I_S)

- 反向电流大，管子的单向导电性差，因此反向电流越小越好。
- 反向电流受温度的影响，温度越高反向电流越大。
- 锗管的反向电流要比硅管大几十到几百倍。

普通整流二极管DIODE RECTIFIERS (GENERAL PURPOSE)

类型TYPE	最大反向峰值电压 Maximum Peak Reverse Voltage	最大半波整流电流 50HZMaximum Average Rectified Current at Half-wave Resistive load 50HZ		最大正向峰值浪涌电流 50HZMaximum Forward Peak Surge Current 50HZ Superimposed	最大反向电流 PRV. TA=25℃ Maximum Reverse Current at PRV and TA=25℃	最大正向电压 在TA=25℃ Maximum Forward Voltage at TA=25℃	
	PRV	Io at TA		IFSM	IR	IFM	VFM
	V	A	℃	A	μA	A	V
1N4001	50	1	75	30	5	1	1
1N4002	100	1	75	30	5	1	1
1N4003	200	1	75	30	5	1	1
1N4004	400	1	75	30	5	1	1
1N4005	600	1	75	30	5	1	1
1N4006	800	1	75	30	5	1	1
1N4007	1000	1	75	30	5	1	1

3.3.4 主要交流参数

1) 微变电阻 r_d

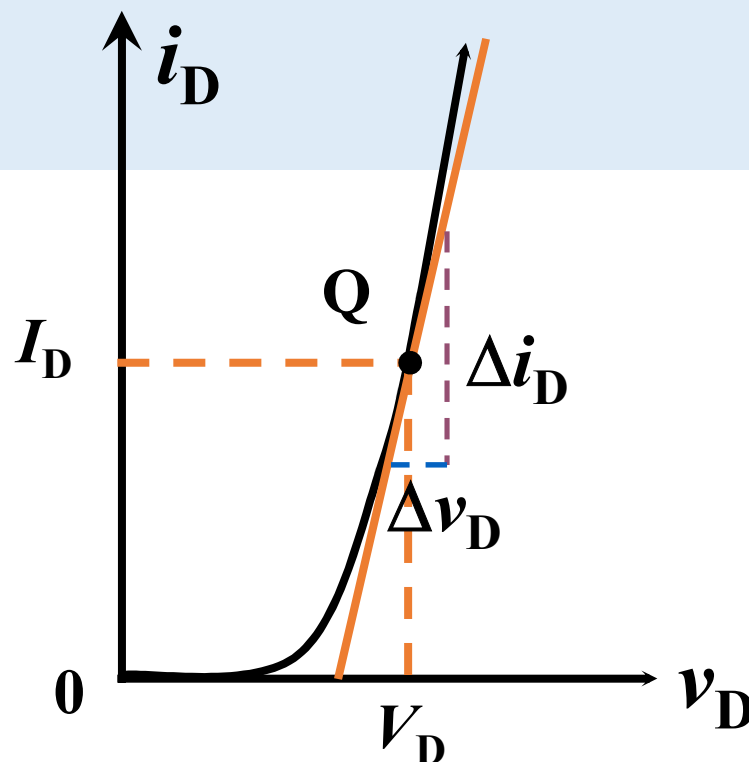
r_d 是二极管特性曲线上工作点Q 附近电压的变化与电流的变化之比:

$$r_d = \frac{\Delta v_D}{\Delta i_D}$$

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

$$g_d = \left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_Q = \left. \frac{I_S e^{v_D/V_T}}{V_T} \right|_Q = \left. \frac{i_D}{V_T} \right|_Q = \frac{I_D}{V_T}$$

$$r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{V_T}{I_D} = \frac{26(\text{mV})}{I_D(\text{mA})} \quad @300\text{K}$$

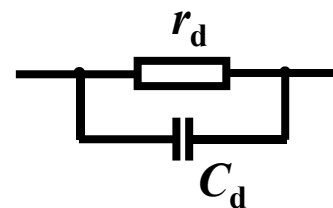


2) 二极管的极间电容

由两部分组成: 势垒电容 C_b 和扩散电容 C_d 。

两端电压变化, 电容也发生显著变化。

二极管高频小信号
等效电路模型



3.4 二极管基本电路及其分析方法

二极管伏安特性是非线性指数曲线，求解困难。

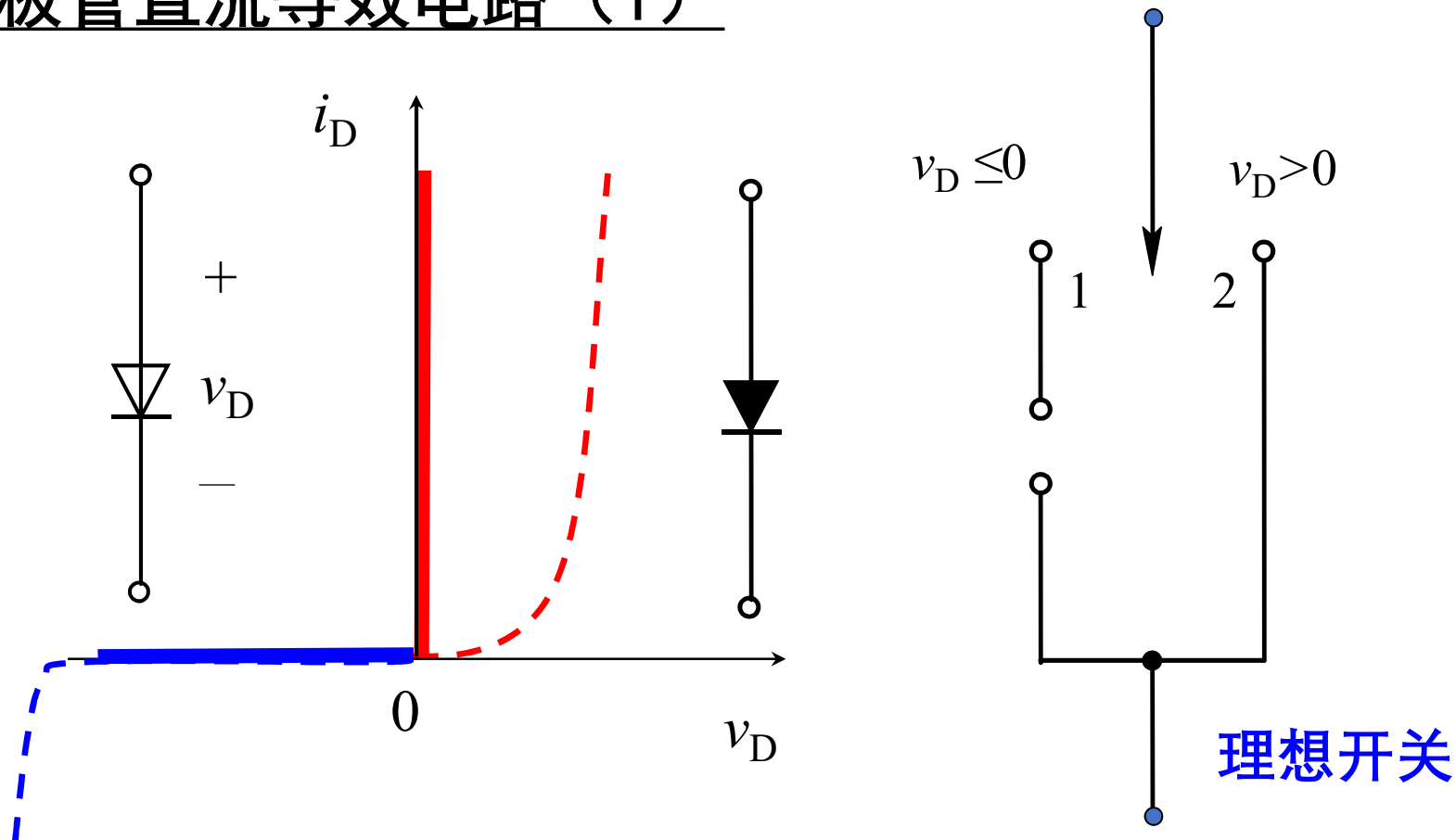
工程应用中常常需要快速初略估算。

3.4.2 晶体二极管简化模型

- 用于对电子线路进行定量分析；
- 在工程分析中，力求模型简单、实用→近似、折线处理；
- 明确模型适用范围，前提条件。

3.4.2 晶体二极管简化模型

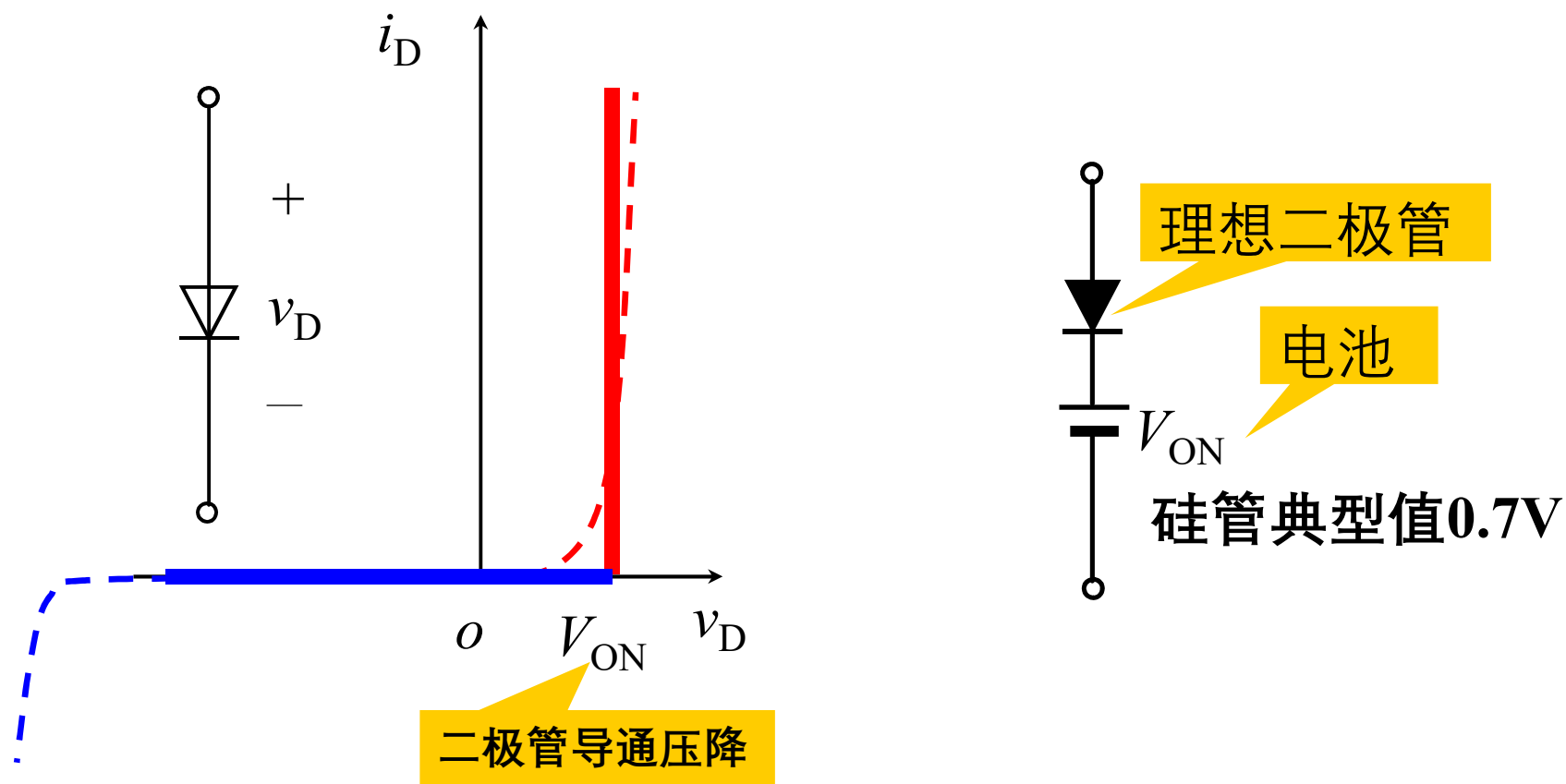
二极管直流等效电路 (1)



二极管理想模型

应用条件：电源电压远比二极管的管压降大

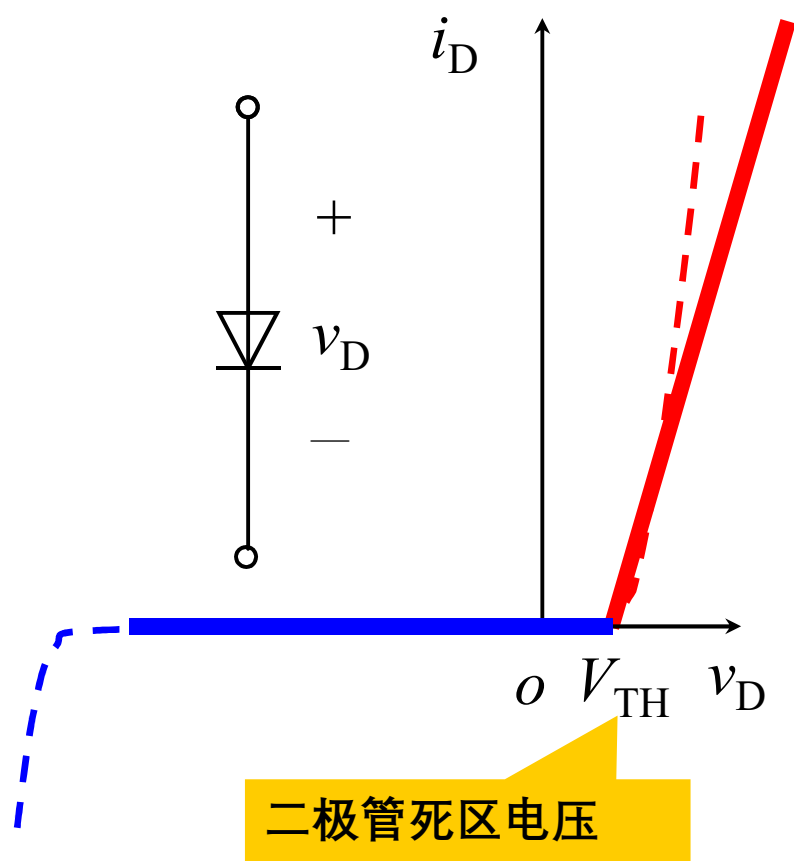
3.4.2 晶体二极管简化模型 直流等效电路（2）



二极管恒压降模型

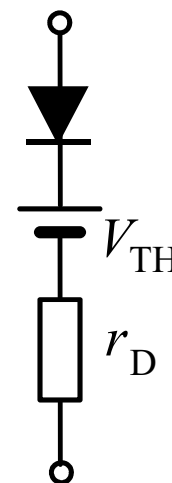
应用条件：二极管的电流 i_D 较大，且 v_D 不可忽略

3.4.2 晶体二极管简化模型 直流等效电路 (3)



硅管: $v_D = V_{TH} = 0.5V$ 时, $I_D = 0$;
当 $v_D = V_{ON} = 0.7V$ 时, $I_D = 1mA$, 则

$$r_D = \frac{0.7V - 0.5V}{1mA} = 200\Omega$$



二极管折线近似及电路模型

应用条件: 二极管的电流 i_D 较小, 且 v_D 不可忽略

3.4.3 基本应用电路

利用单相导电性：

(1) 整流

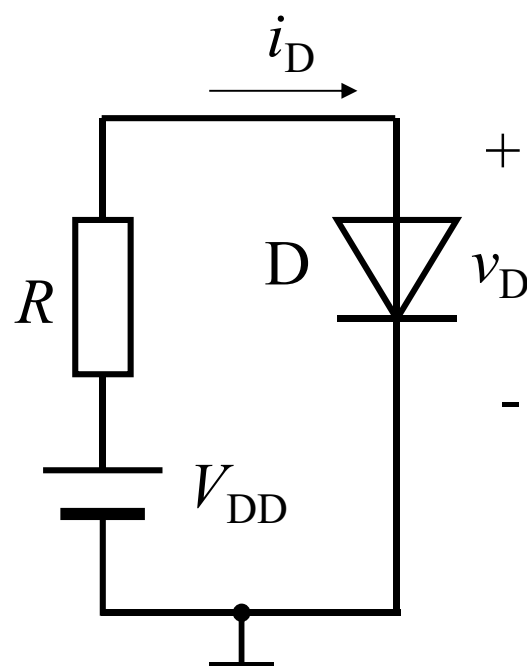
Rectifier

(2) 限幅

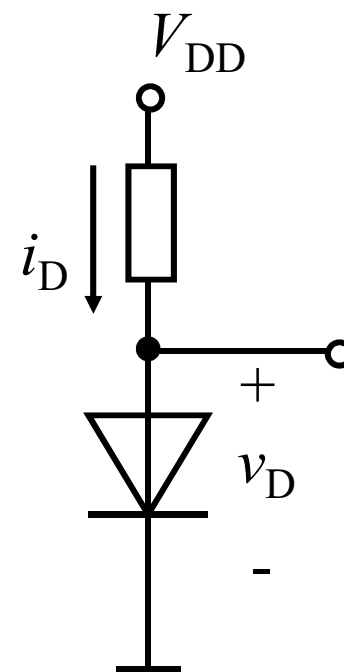
Clipper

(3) 逻辑

Diode Logic



简单二极管电路



习惯画法

用哪种等效模型？

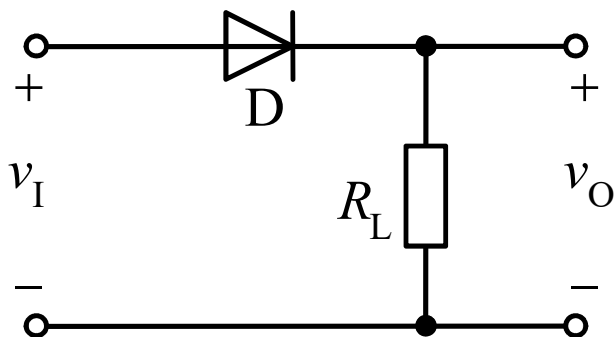
误差可接受的前提下
尽量简化

v_{ON} 可忽略	理想模型
v_{ON} 不可忽略，大电流	恒压模型
v_{ON} 不可忽略，小电流	折线模型

3.4.3 基本应用电路

(1) 二极管整流电路

整流：将交流电变为脉动直流电。



假设 D 不导通，则 $v_D = v_I$

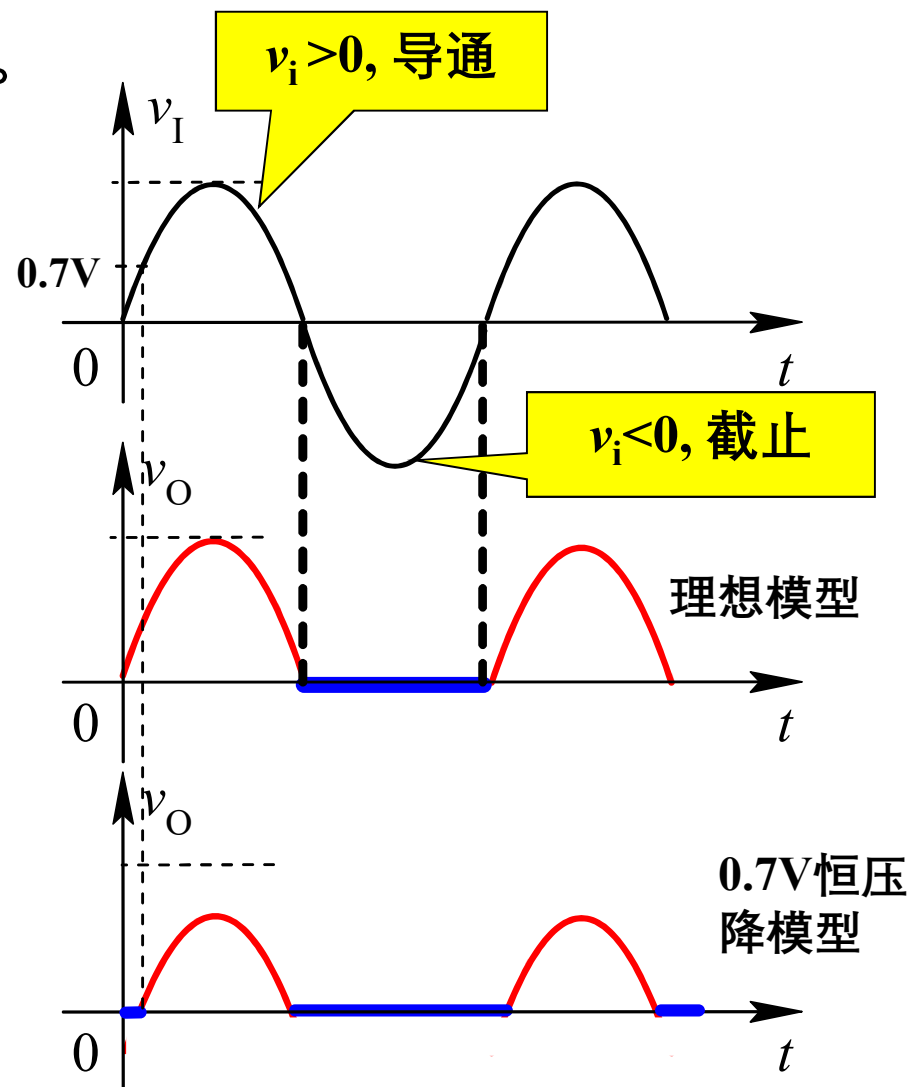
理想模型： $v_I > 0$ ， D 导通， $v_O = v_I$

$v_I \leq 0$ ， D 截止， $v_O = 0$

恒压降模型：

$v_I > 0.7V$ ， D 导通， $v_O = v_I - 0.7$

$v_I \leq 0.7V$ ， D 截止， $v_O = 0$

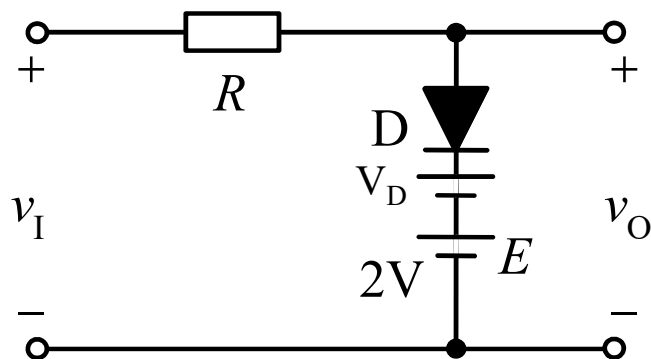


判断方法：断开二极管，判断二极管两端电压，判断实际通断

3.4.3 基本应用电路

(2) 二极管限幅电路

也称为削波电路，常用于波形变换和整形。



v_I 不大，采用恒压降模型：

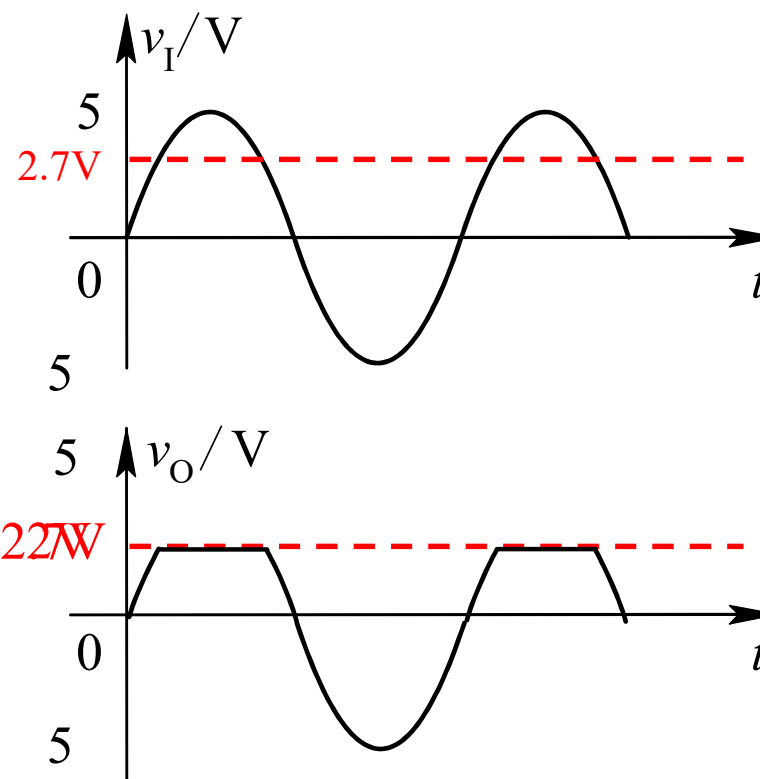
$v_I \leq 2.7V$ ， D 截止， $v_O = v_I$

$v_I > 2.7V$ ， D 导通， $v_O = 2.7V$

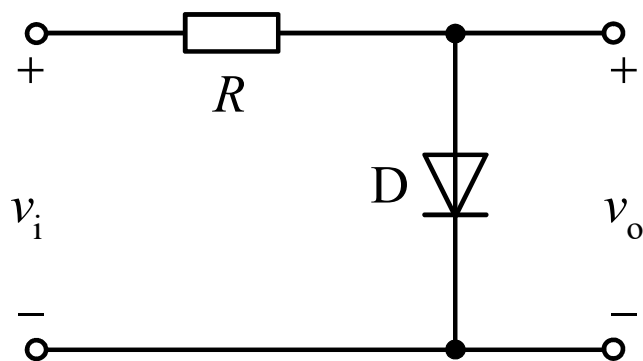
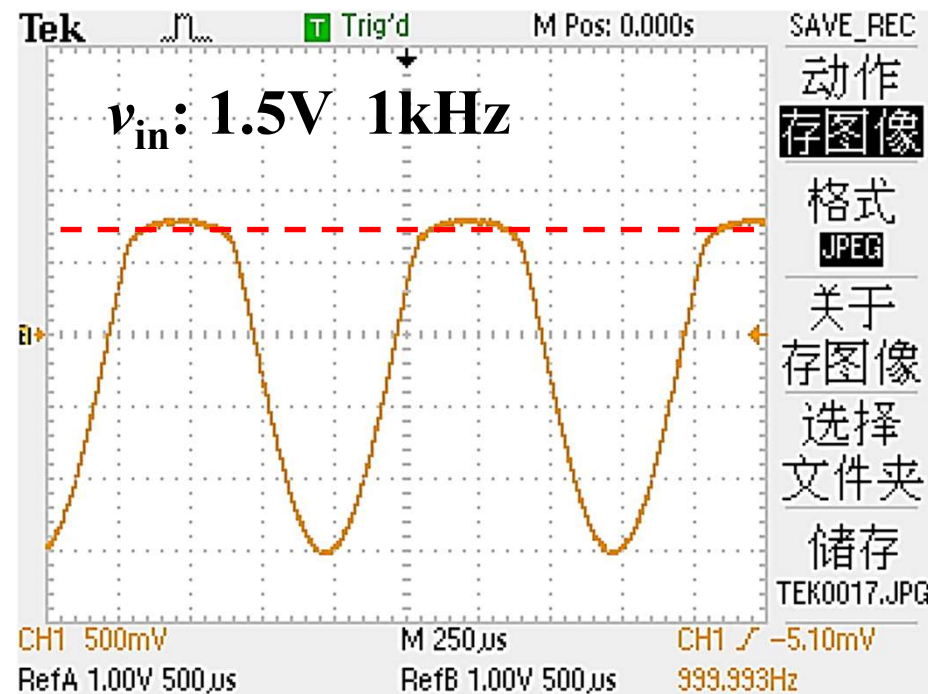
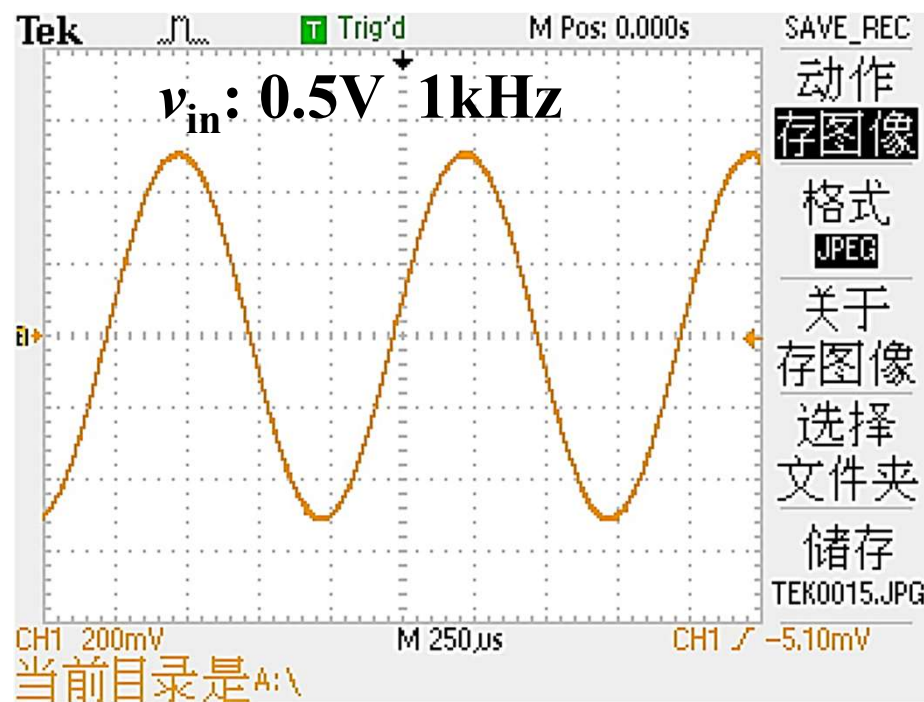
若指定采用理想模型：

$v_I \leq 2V$ ， D 截止， $v_O = v_I$

$v_I > 2V$ ， D 导通， $v_O = 2V$



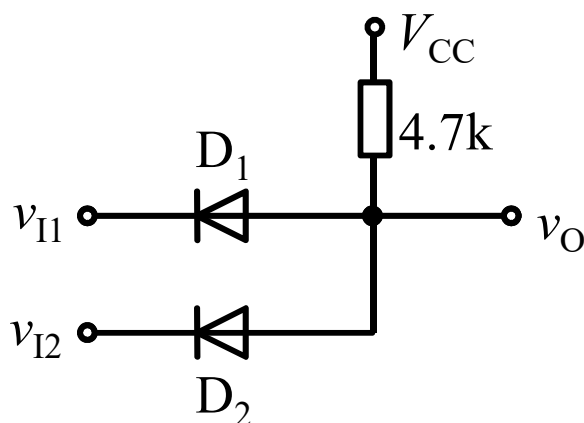
实际二极管限幅特性



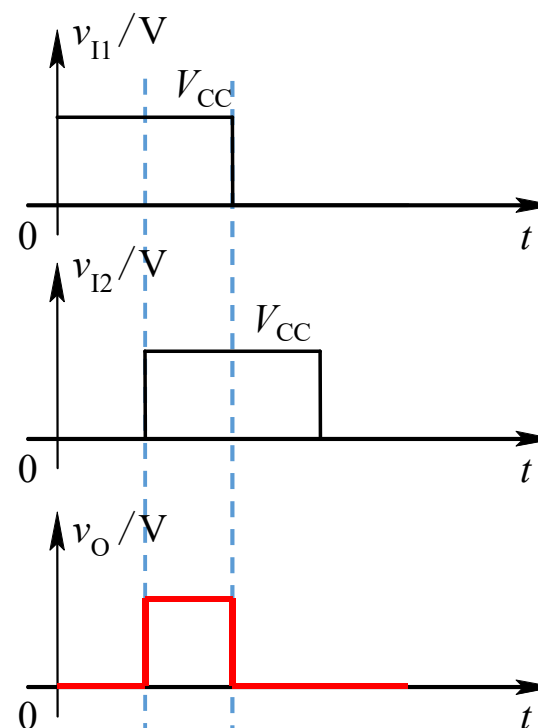
3.4.3 基本应用电路

(3) 二极管开关电路

在开关电路中，利用二极管的单向导电性来接通或断开电路，这在数字电路中得到广泛的应用。



理想模型： $v_O = \min(v_I, V_{CC})$



3.5 特殊二极管

- 3.5.1 稳压二极管
- 3.5.2 变容二极管
- 3.5.3 光电二极管
- 3.5.4 发光二极管

3.5 特殊二极管

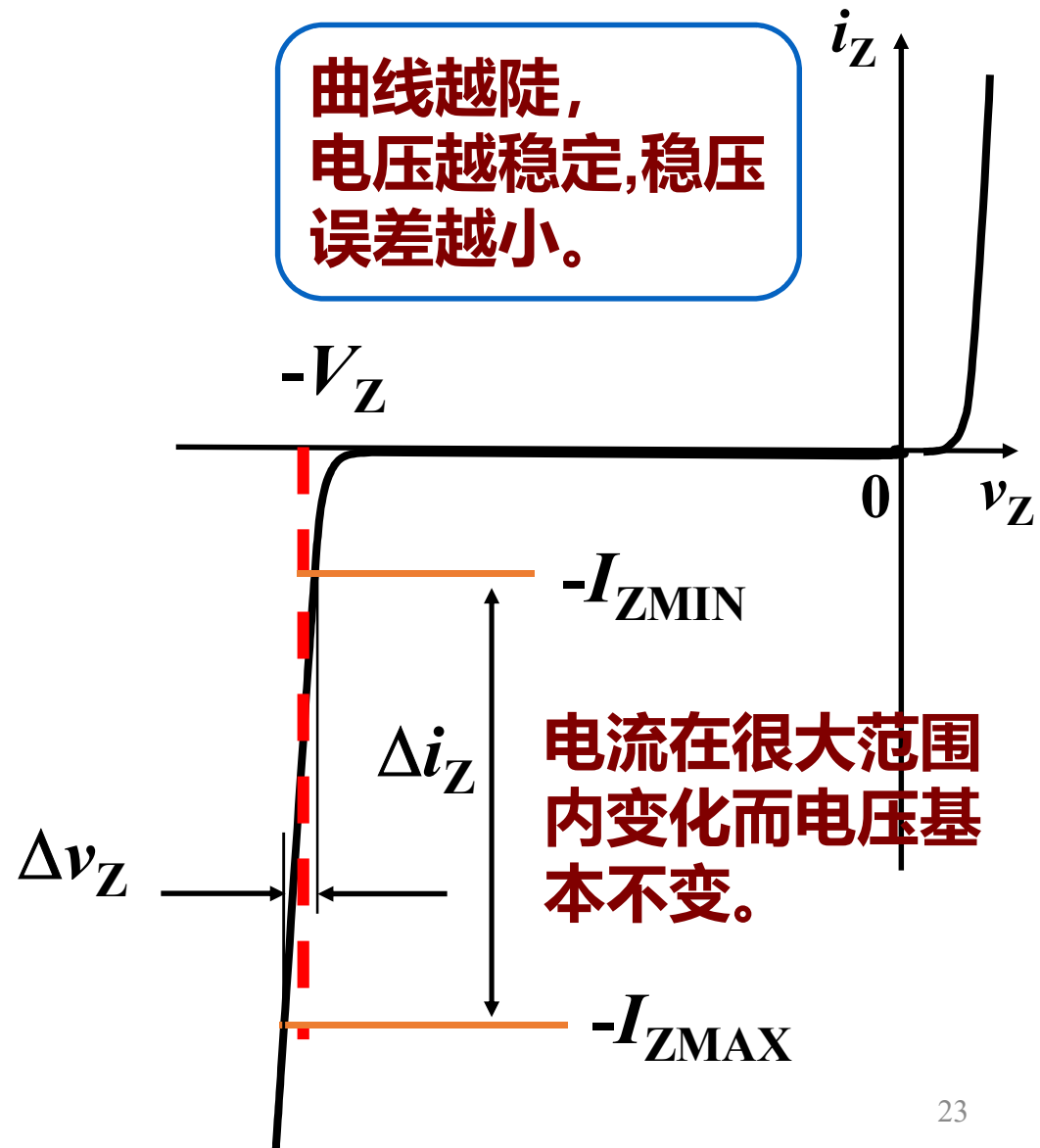
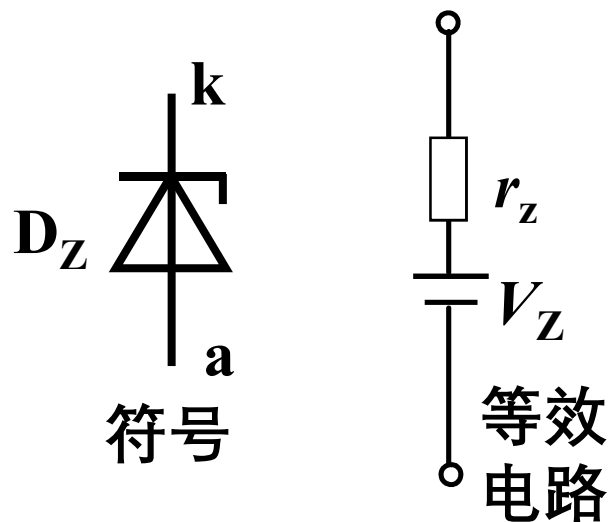
3.5.1 稳压二极管 Zener Diode

稳压：反向击穿 $v_Z \approx V_Z$

动态电阻：

$$r_z = \frac{\Delta v_Z}{\Delta i_Z} = \frac{1}{di_Z/dv_Z}$$

r_z 越小，稳压性能越好。



3.5 特殊二极管

3.5.1 稳压二极管 Zener Diode

稳压二极管的主要参数:

半导体器件参数
分散性较大

(1) 稳定电压 V_Z

(2) 动态电阻 $r_z = \frac{\Delta v_Z}{\Delta i_Z}$

(3) 稳定电流 I_Z 、最大、最小稳定电流 I_{ZMAX} 、 I_{ZMIN} 。

(4) 最大允许功耗: $P_{ZM} = V_Z I_{ZMAX}$

(5) 电压温度系数 α_V ($\%/^{\circ}\text{C}$)

稳压值受温度变化影响的系数。

3.5.1 稳压二极管 应用举例

设计要求：已知输入电压的正常值15 V，并且常常有 $\pm 20\%$ 波动。要求负载电压恒定在10V，波动小于 $\pm 1\%$ 。

并联稳压管： $V_Z = 10\text{ V}$

串联电阻 R 限流、分压。

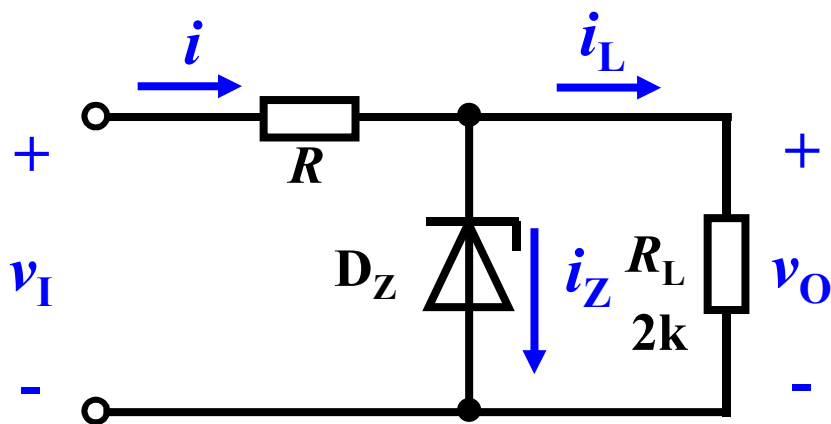
稳压管选型？电阻 R 的阻值？

假设现有稳压管： $V_Z = 10\text{ V}$ ，

$I_{Z\text{MAX}} = 20\text{ mA}$ (@10.1V)， $I_{Z\text{MIN}} = 5\text{ mA}$ (@9.9V)。

设输入电压达到上限时，流过稳压管的电流为 $I_{Z\text{MAX}}$ 。

$$\left. \begin{aligned} i_{\text{MAX}} &= I_{Z\text{MAX}} + \frac{V_{Z\text{MAX}}}{R_L} \approx 20 + \frac{10}{2} = 25\text{mA} \\ v_{\text{IMAX}} &= i_{\text{MAX}} R + V_{Z\text{MAX}} \approx i_{\text{MAX}} R + V_Z \end{aligned} \right\} \begin{aligned} 15 \times 1.2 &= 25R + 10 \\ \Rightarrow R &= 0.32\text{k}\Omega \end{aligned}$$



3.5.1 稳压二极管 应用举例

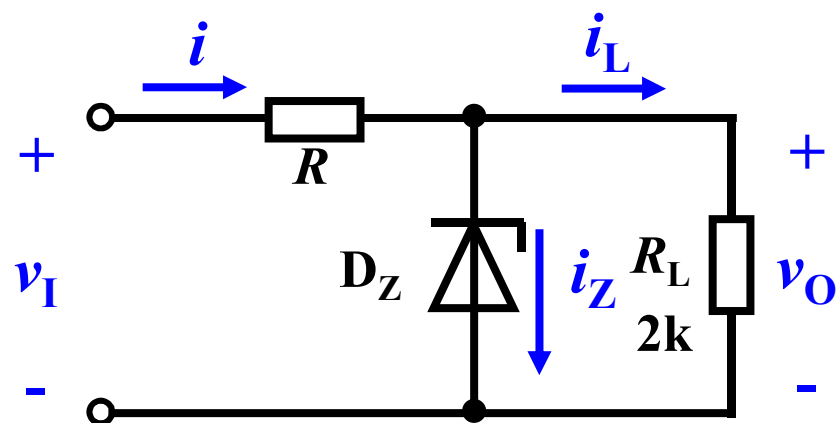
设计要求：已知输入电压的正常值15 V，并且常常有 $\pm 20\%$ 波动。要求负载电压恒定在10V，波动小于 $\pm 1\%$ 。

假设现有稳压管： $V_Z = 10\text{ V}$,

$I_{Z\text{MAX}} = 20\text{ mA}$ (@10.1V),

$I_{Z\text{MIN}} = 5\text{ mA}$ (@9.9V)。

$R = ?$



根据波动上限要求， $R_1 = 0.32\text{ kohm}$

根据波动下限要求， $R_2 = 0.2\text{ kohm}$

$$i_{\text{MIN}} = I_{Z\text{MIN}} + \frac{V_{Z\text{MIN}}}{R_L} \approx 5 + \frac{10}{2} = 10\text{ mA}$$

$$v_{\text{IMIN}} = i_{\text{MIN}} R + V_{Z\text{MIN}} \approx i_{\text{MIN}} R + V_Z$$

0.32kohm
? $R > \max\{R_1, R_2\}$ 限流

$R < (V_{\text{IMIN}} - V_Z) R_L / V_Z$ 稳压

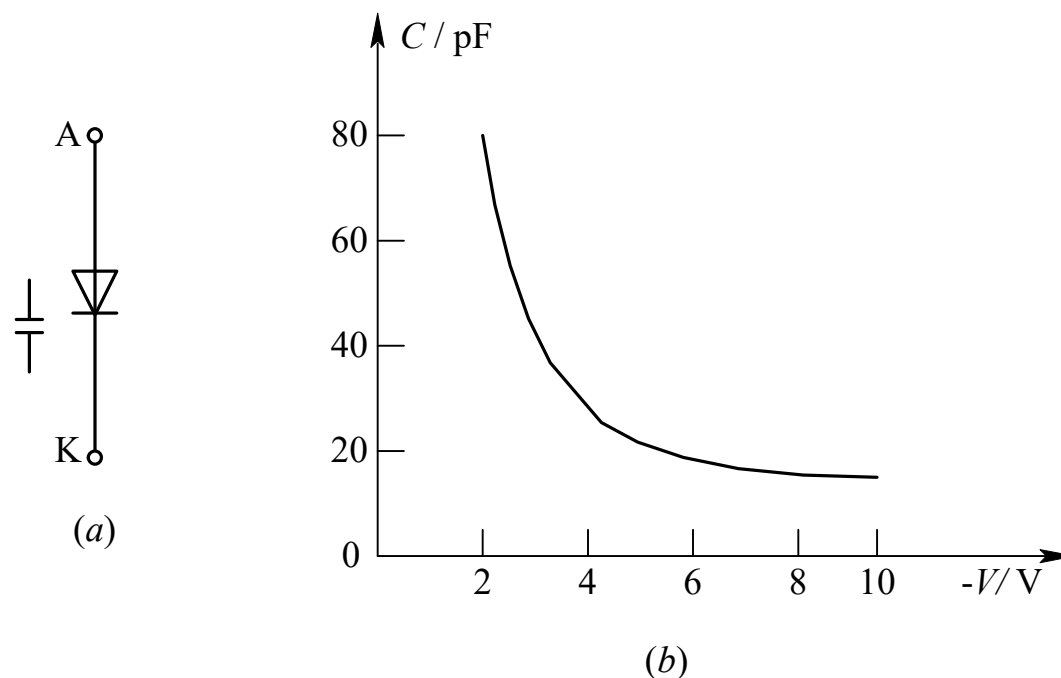
0.4kohm

$$15 \times 0.8 = 10R + 10$$

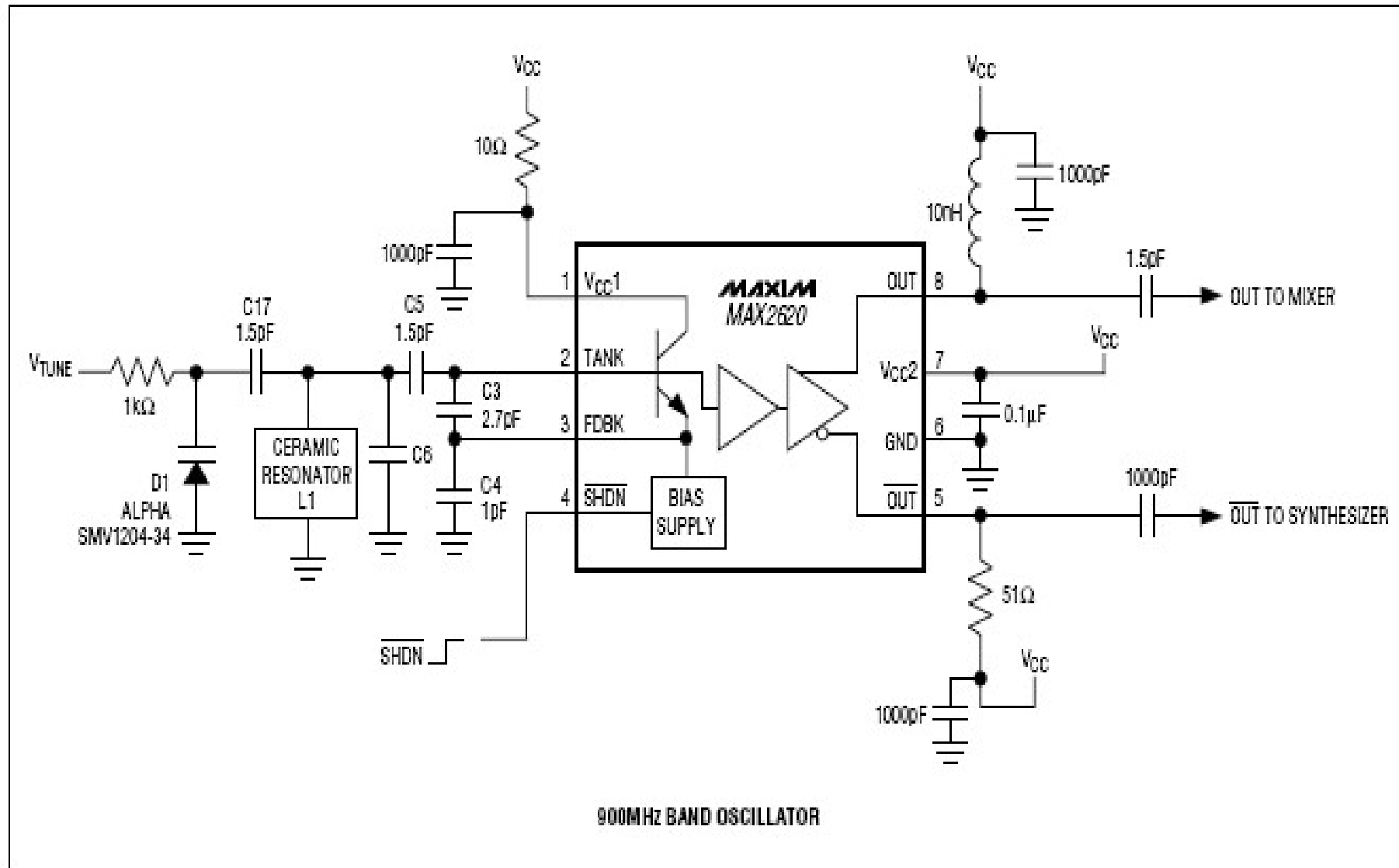
$$\Rightarrow R = 0.2\text{ kohm}$$

3.5.2 变容二极管

利用PN结的势垒电容随外加反向电压的变化而变化的特性可制成变容二极管，其符号及特性如图所示。变容二极管的容量很小，为皮法数量级，所以主要用于高频场合下，例如电调谐、调频信号的产生等。

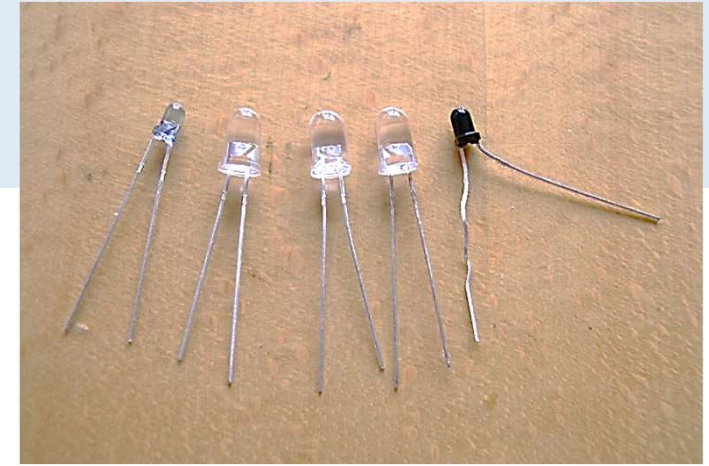


Typical Operating Circuit



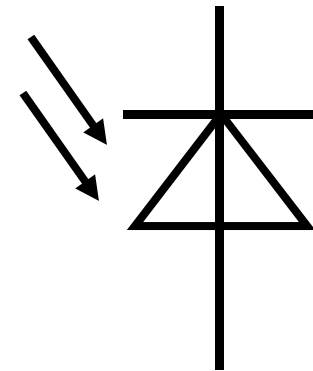
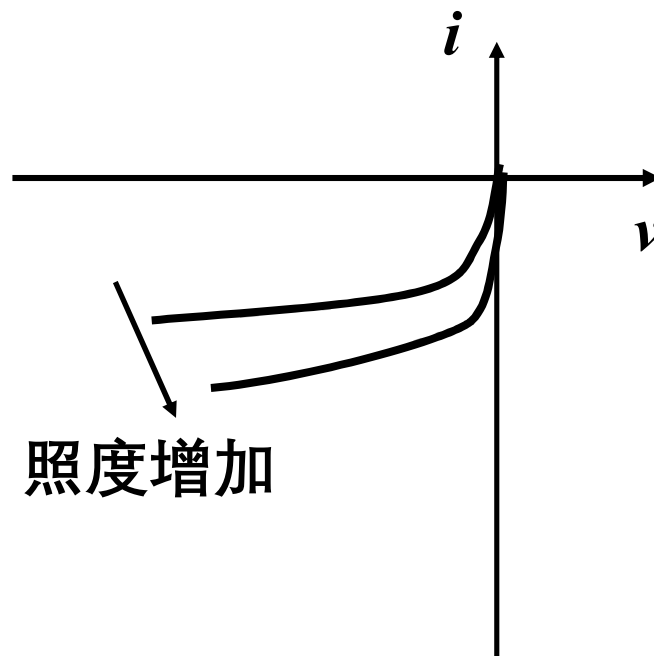
压控振荡器

3.5.3 光电二极管

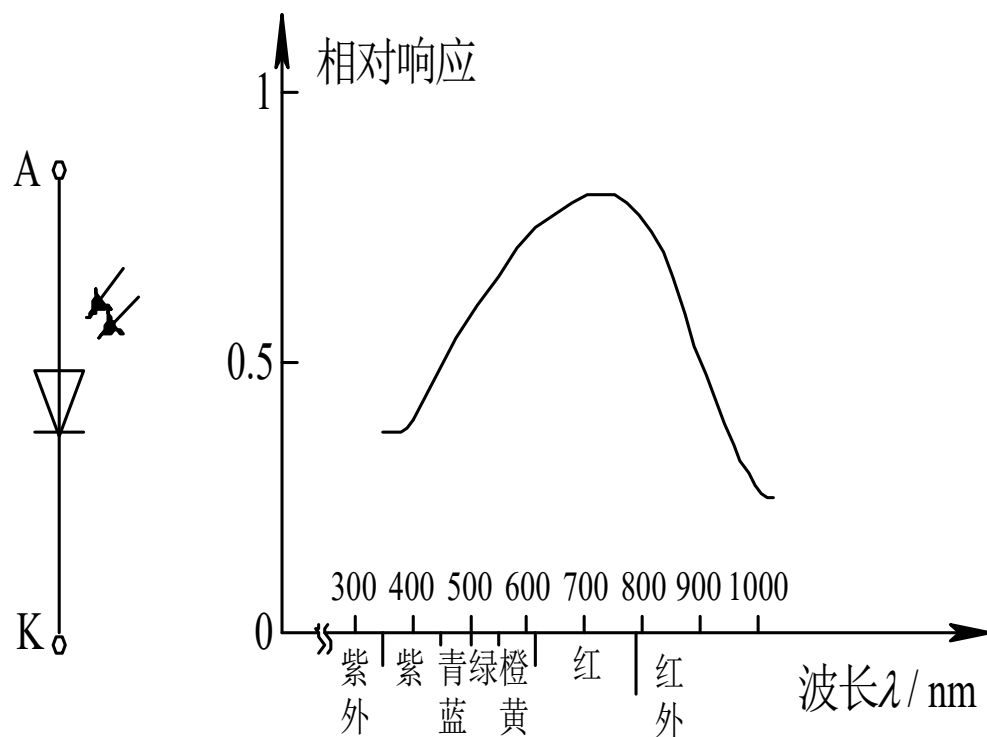


工作在反偏状态。

反向电流随光照强度的增加而上升。

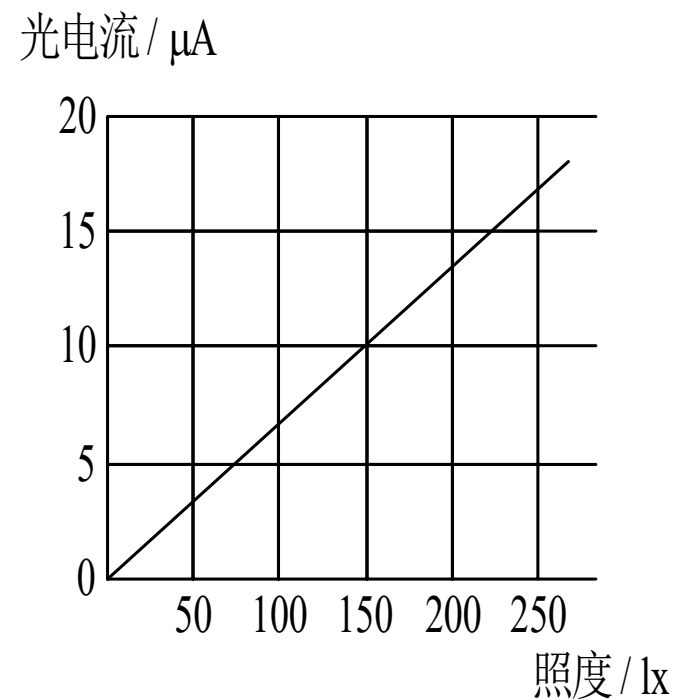


3.5.3 光电二极管



(a)

(b)



(c)

光电二极管的符号及特性

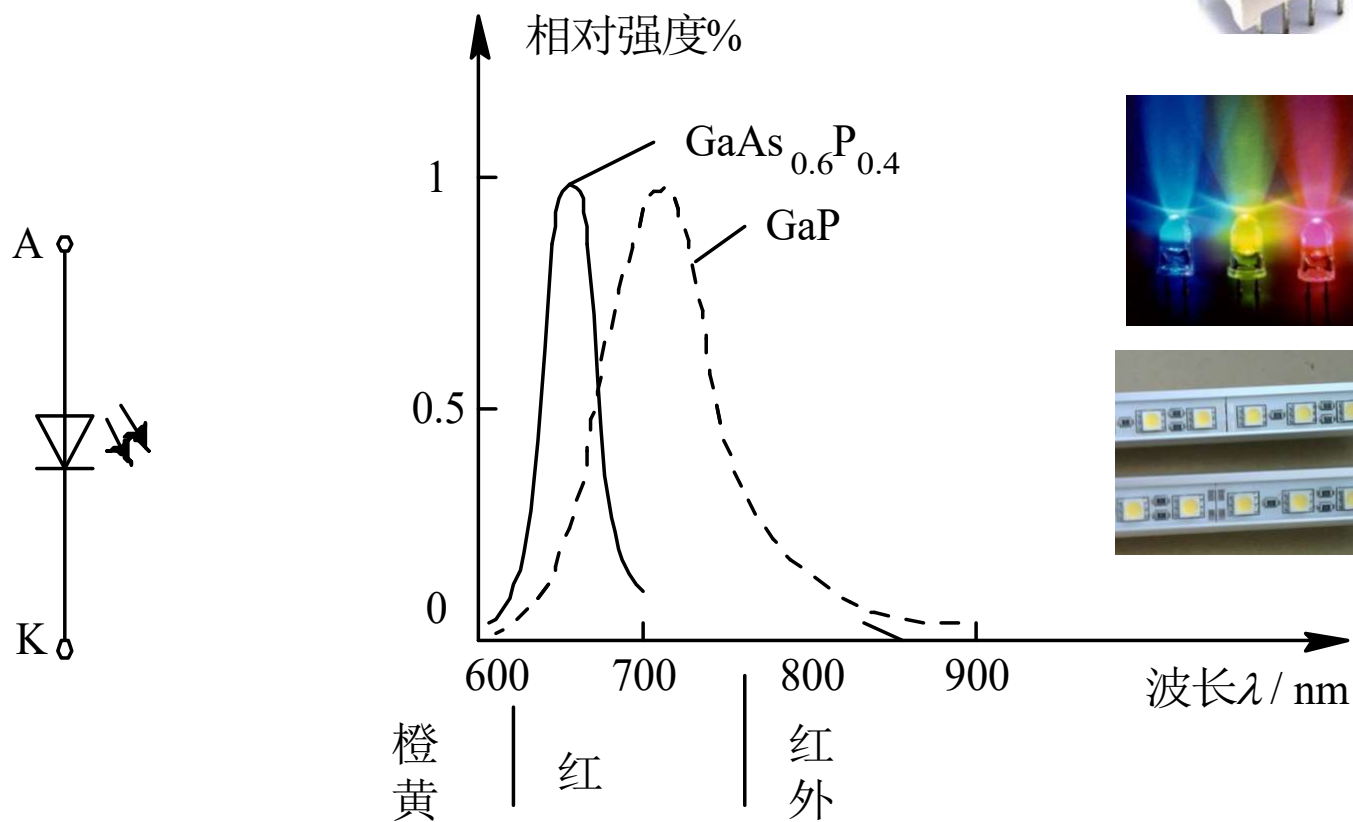
(a)符号; (b)光谱特性; (c)光照特性

3.5.3 发光二极管

LED, Light Emitting Diode

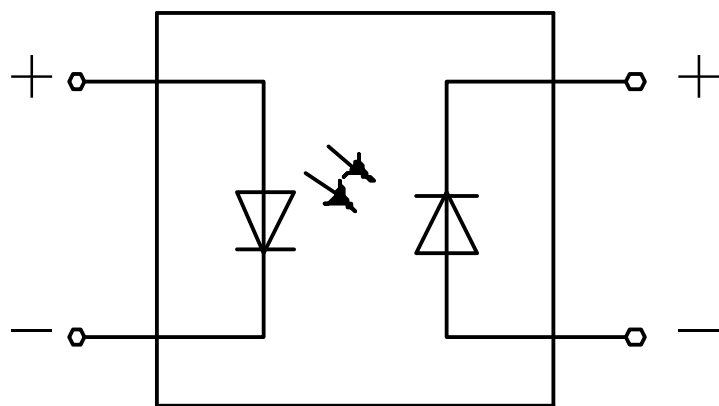
工作在正向导通状态。

有正向电流流过时，发出一定波长范围的光。

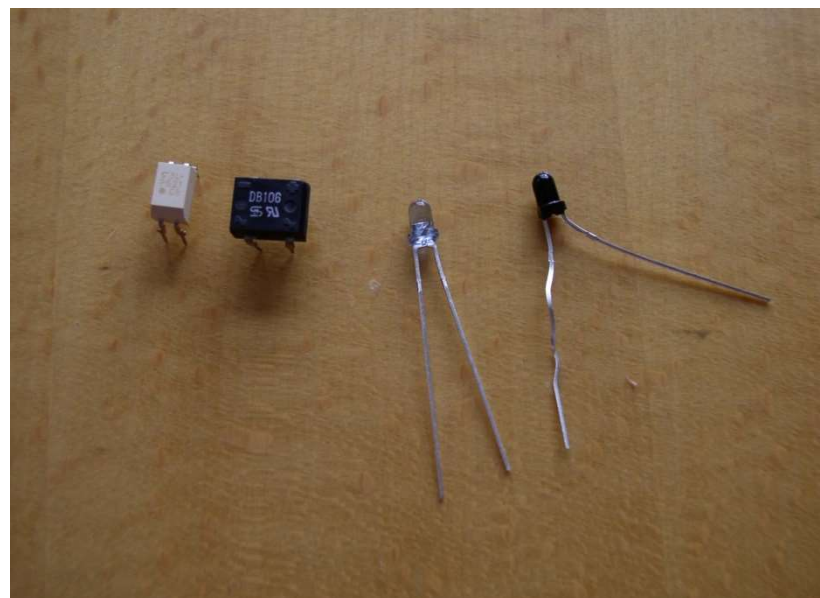


(a) 符号

(b) 光谱特性



二极管型光电耦合器
发光二极管+光电二极管



3 二极管及其基本电路

本章小结

掌握：二极管的工作原理与伏安特性

掌握：二极管的基本应用电路（判断通、断）

掌握：稳压二极管的应用

预习：双极结型三极管及放大电路

作业

P97： 3.4.5 3.4.7 3.4.9 3.5.1

问题？



思考

- 如何控制半导体的导电性？

本征半导体 + 设定掺杂浓度

- **PN结伏安特性？**

正偏时，外电压大于内建电场后导通： $i_D \approx I_S e^{v_D/V_T}$

反偏时，截止，微弱的反向饱和电流： $i_D \approx -I_S$

- **为什么半导体器件温度稳定性差？**

温度升高，本征载流子浓度增加，少子浓度成倍增大，PN结反向饱和电流成倍增大。

思考

- 二极管的工作状态?

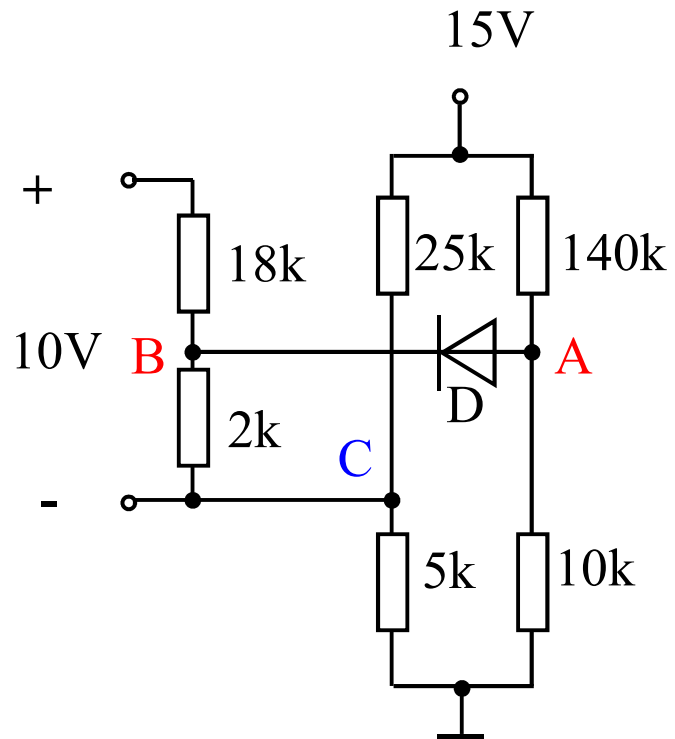
普通二极管:

稳压二极管:

光电二极管:

发光二极管:

练习：判断图中二极管的状态 ♥



$$V_A = 1V$$

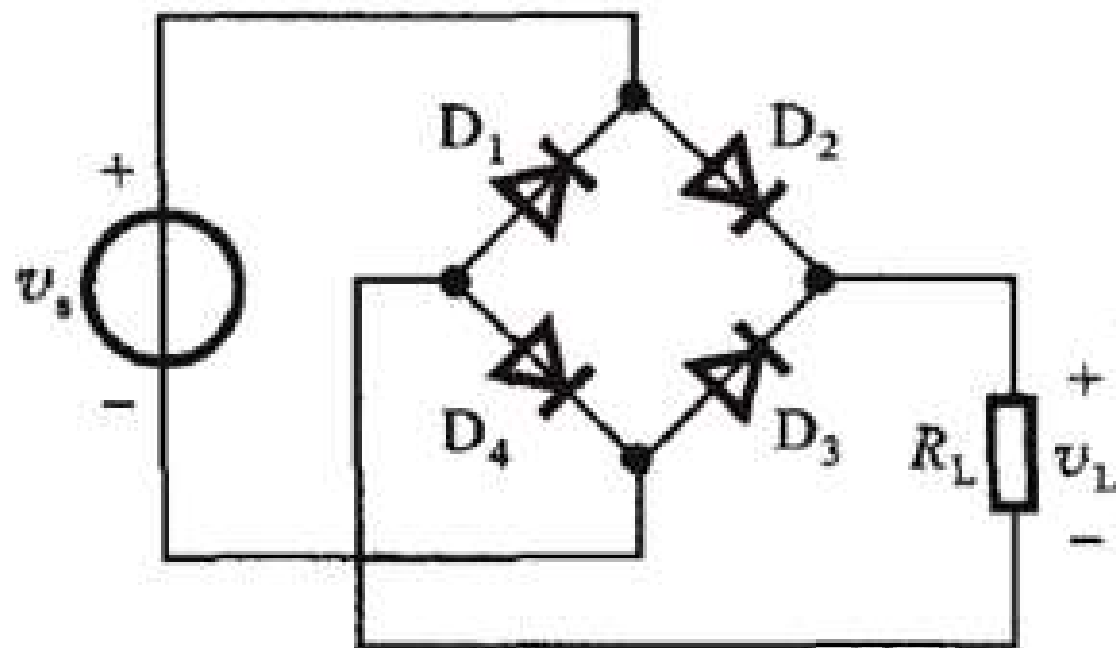
$$V_C = 2.5V$$

$$V_B = V_C + 1V = 3.5V$$

$$V_A < V_B$$

D截止

分析电路



电源输出正弦波电压信号，假设二极管是理想的。
请绘出 v_L 电压波形。