

# 模拟电子技术基础 Fundamentals of Analog Electronic

主讲教师: 张静秋

# 第1章 常用半导体器件

- 1.1 半导体基础知识
  - 1.2 PN结及其特性
    - 1.3 半导体二极管
      - 1.4 BJT三极管
        - 1.5 FET三极管
          - 1.6 仿真案例

# 1.1.1 奉征任导体

#### 自然界的物质按其导电能力的大小可分为:

导体: 电阻率 $\rho$ <10<sup>-4</sup> $\Omega$ ·cm

绝缘体:  $\rho$ >  $10^{12}\Omega$ ·cm

半导体:  $10^{-3}\Omega \cdot \text{cm} < \rho < 10^{9}\Omega \cdot \text{cm}$ ,

导电性能介于导体与绝缘体之间。

在近代大规模集成电路 (LSI) 和超大规模集成电路 (VLSI) 中主要使用硅 (Si)、锗 (Ge) 和砷化镓 (GaAs) 材料。



半导体: Semiconductor

集成电路: Integrated circuit

### 1、本征半导体的晶体结构

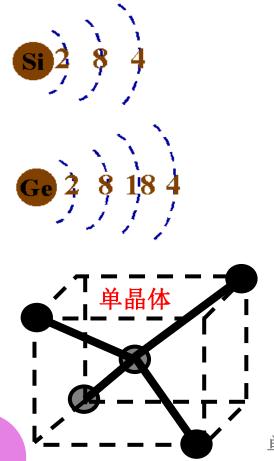
本征半导体即纯净的半导体,净度可达九个9以上。

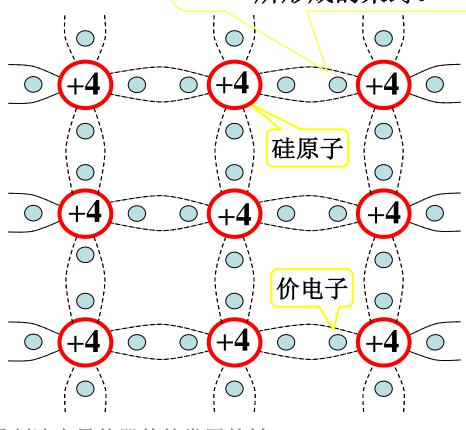
在热力学温度零度和没有外界激发时:

本征半导体不导电。

#### —共价键—

相邻原子共有价电子所形成的束缚。





单晶硅,是制造半导体器件的常用基材。

### 2、本征半导体的热敏性

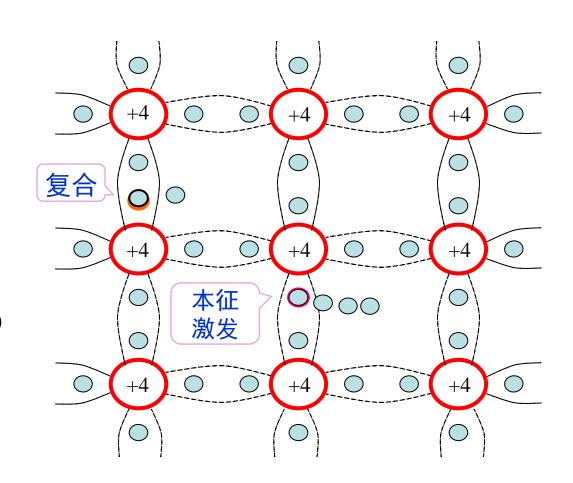
#### 本征激发:

电子-空穴成对出现。

#### 复合:

电子-空穴成对消失。

- ▶ 在常温下 两种载流子 (自由电子和空穴) 成对出现
- 载流子的数量 与温度有关



# ● 本征半导体总结

两种载流子:

自由电子

空穴

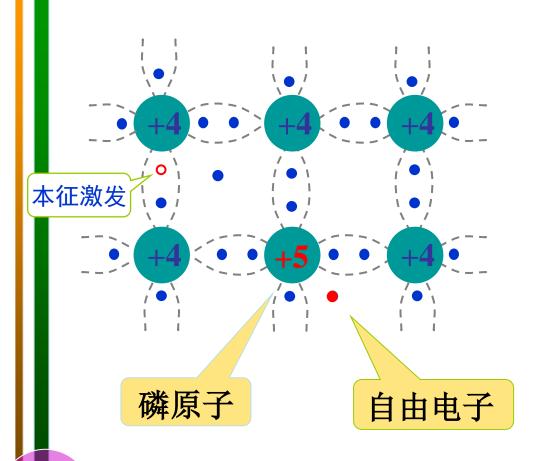
两种载流子的运动:

自由电子(在共价键以外)的运动空穴(在共价键以内)的运动

- 1. 本征半导体中电子空穴成对出现,数量极少;
- 2. 半导体中有电子和空穴两种载流子参与导电;
- 3. 本征半导体导电能力弱,并与温度有关。

# 1.1.2 杂质半导体

# 1、N型半导体(常温下)



自由电子为多数载流子

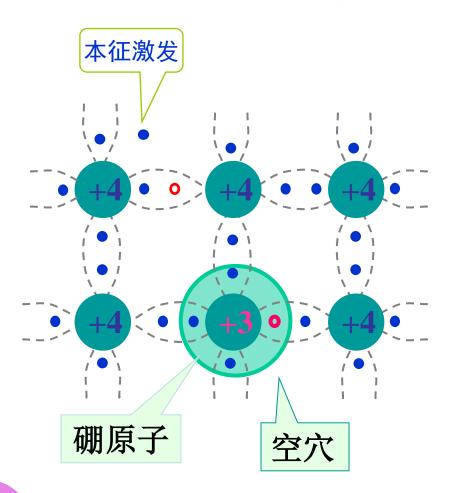
空穴为少数载流子

自由电子数=正离子数+空穴数

载流子数 ≈ 电子数

# 1.1.2 杂质半导体

# 2、P型半导体(常温下)



空穴 — 多子自由电子 — 少子

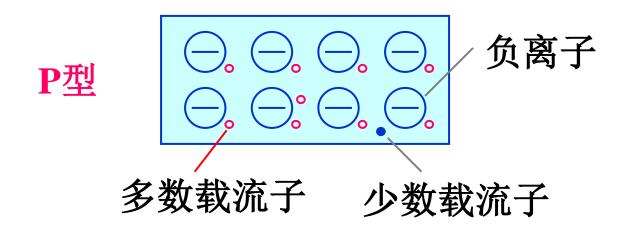
空穴数=负离子数+自由电子数

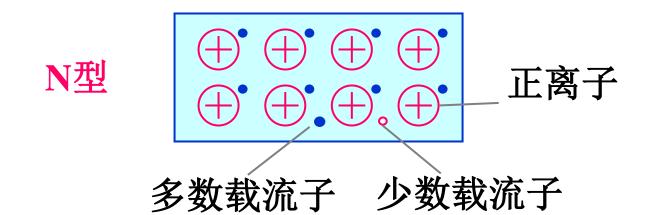
载流子数 ≈ 空穴数

#### 常温下:

Si原子浓度为 5\*10<sup>22</sup>/cm<sup>3</sup> 掺杂离子浓度5\*10<sup>16</sup>/cm<sup>3</sup> 本征激发浓度5\*10<sup>10</sup>/cm<sup>3</sup>

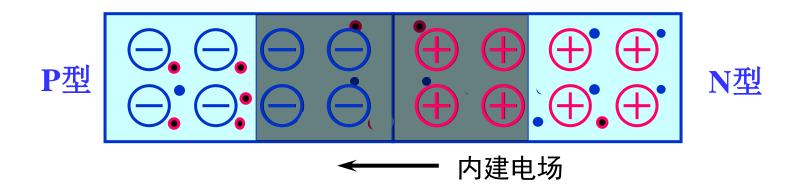
### 3、P型与N 型半导体的简化示意图





### 1.2.1 PN结的形成

1、载流子的浓度差引起多子的扩散



2、复合使交界面形成空间电荷区 (耗尽层)

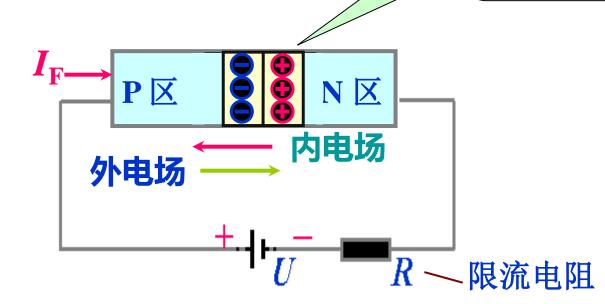
空间电荷区特点: 无载流子, 阻止扩散进行, 利于少子的漂移。

3、扩散和漂移达到动态平衡 扩散电流 等于漂移电流。 总电流 I=0

# 1.2.2 PR结的单向导电性

1、外加正向电压(PN结正向偏置)

外电场使多子 向PN结移动, 中和部分离子 空间电荷区变窄

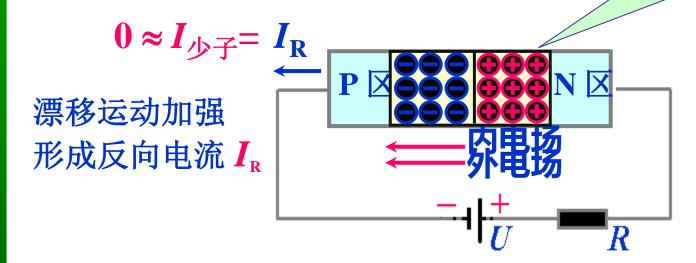


扩散运动加强形成正向电流  $I_{\mathrm{F}} = I_{\mathrm{3-}} - I_{\mathrm{0-}} \approx I_{\mathrm{3-}}$ 

# 1.2.2 PN结的单向导电性

2、外加反向电压 (PN结反向偏置)

外电场使少子 背离 PN 结移动, 空间电荷区变宽



● PN 结的单向导电性:

正偏导通,呈小电阻,电流较大; 反偏截止,电阻很大,电流近似为零。

□ 电阻R的作用? 为什么二极管会先损坏?

# • 杂质半导体总结

- ▶ N/P型半导体:在本征半导体中分别掺入百万分之一的五价/三价元素形成;N型半导体中,自由电子(多子)≈载流子P型半导体中,空穴(多子)≈载流子
- 多子数量主要由掺杂决定;少子数量由温度决定;
- ➤ PN结具有单向导电性(即开关特性): 正偏导通钳位(相当于开关闭合); 反偏饱和截止(相当于开关断开):

### 1.2.3 PN结的反向击穿特性

#### 反向击穿类型:

电击穿 — PN 结未损坏, 断电即恢复。

热击穿 — PN 结烧毁。

#### 反向击穿原因:

齐纳击穿: 掺杂较高, 耗尽层薄, 反向电场足够强, 将电子强行

(Zener) 拉出共价键。 (击穿电压 < 6 V, 负温度系数)

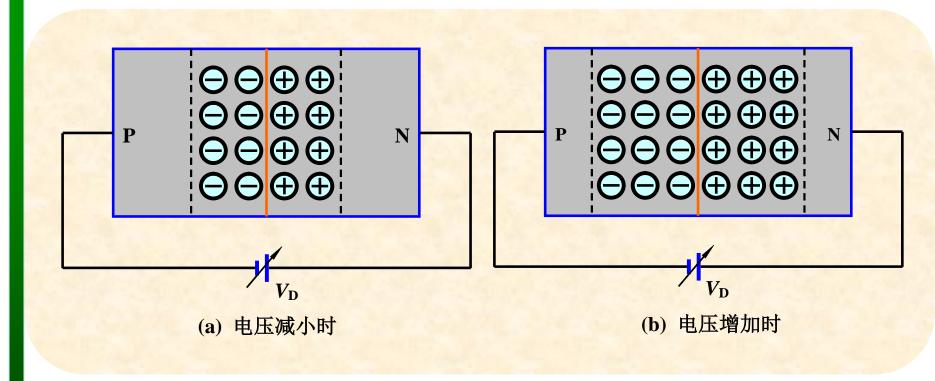
雪崩击穿: 反向电场使电子加速动能增大,撞击使自由电子数突增。

(击穿电压 > 6 V, 正温度系数)

击穿电压在 6V 左右时,温度系数趋近零。

### 1.2.4 PN结的结电容

1、势垒电容  $C_b$  —外加反向电压时 $C_b$ 占主导。



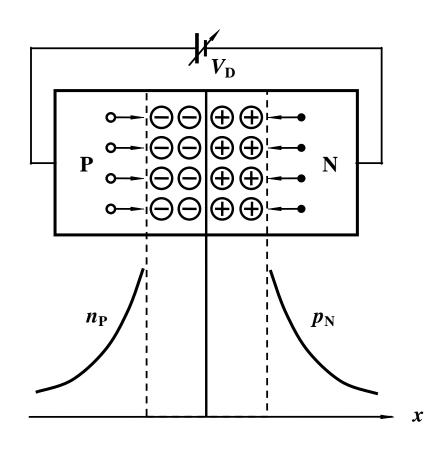
外加电压变化─→ 离子层厚薄变化─→ 等效于电容充放电

# 2、扩散电容 $C_d$ —外加正向电压时 $C_d$ 占主导。

### 外加电压变化:

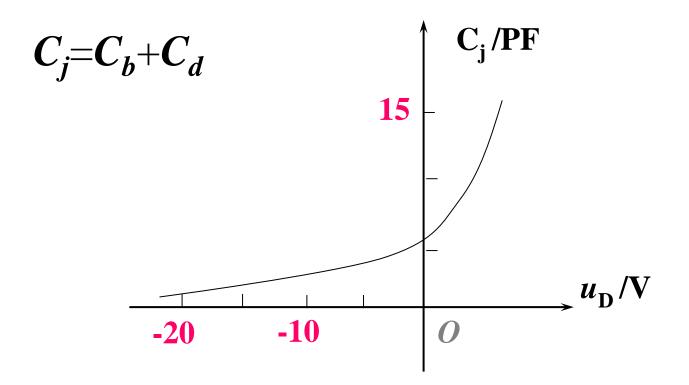
扩散到对方区域 在靠近PN结附近 累积的载流子浓 度发生变化

**等效于电容充放电** 



扩散电容示意图

### 3、二极管容压特性曲线



作为可变电抗二极管(即变容二极管)使用时,通常工作在反偏。因为正偏虽然容量更大,但是漏电流的影响较大。

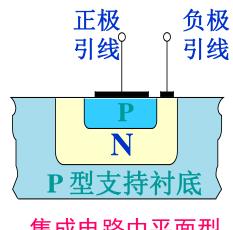
# 1.3.1 二极管的结构和类型

构成: PN 结 + 引线 + 管壳 → 二极管(Diode)

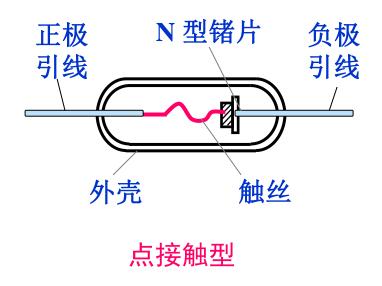
符号: (anode) A C(cathode)

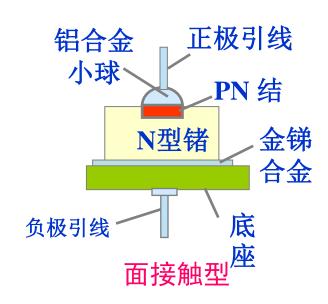
# 1.3.1 二极管的结构和类型

### 1、二极管的结构



集成电路中平面型





### 2、二极管的类型

### 1) 普通二极管

常用于高频检波、鉴频限幅没、小电流整流等。



常用于实现不同功率的整流。

#### 3) 开关二极管

常用于电子计算机、脉冲控制和开关电路中。

#### 4) 稳压二极管

常用于电路中起稳压作用

### 5) 发光二极管

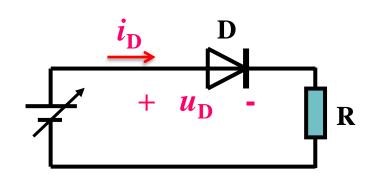
常用于信号指示、数字和字符显示等。

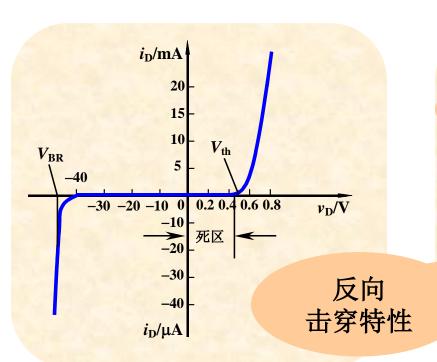


### 1.3.2 二极管的伏安特性

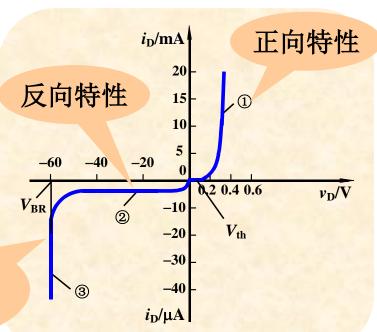
### 1、二极管伏安特性方程

$$i_{\mathrm{D}} = I_{\mathrm{S}}(\mathrm{e}^{v_{\mathrm{D}}/V_{\mathrm{T}}} - 1)$$





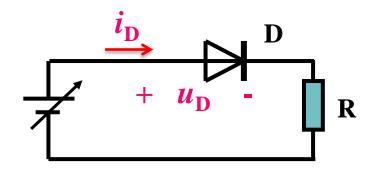
硅二极管2CP10的/-V特性



锗二极管2AP15的/-V特性

#### 1.3.2 二极管的伏安特性

### 1、二极管伏安特性方程 (同PN结)



$$i_{\mathbf{D}} = I_{\mathbf{S}}(\mathbf{e}^{u_{\mathbf{D}}/U_{T}} - 1)$$

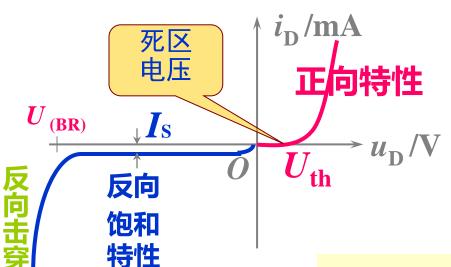
反向 饱和电流 温度的 电压当量

$$\overline{w}$$
尔兹曼常数 
$$U_T = \frac{kT}{q}$$
 电子电量

当 
$$T = 300 (27$$
°C):  $U_T = 26 \text{ mV}$ 

当
$$|u|\gg U_T$$
时, $\begin{cases} ipprox I_Se^{u/U_T} & u>0\ ipprox -I_S & u<0 \end{cases}$ 

### 2、二极管的伏安特性曲线



$$0 < U < U_{\rm th} \qquad i_{\rm D} = 0$$

$$U > U_{\rm th}$$

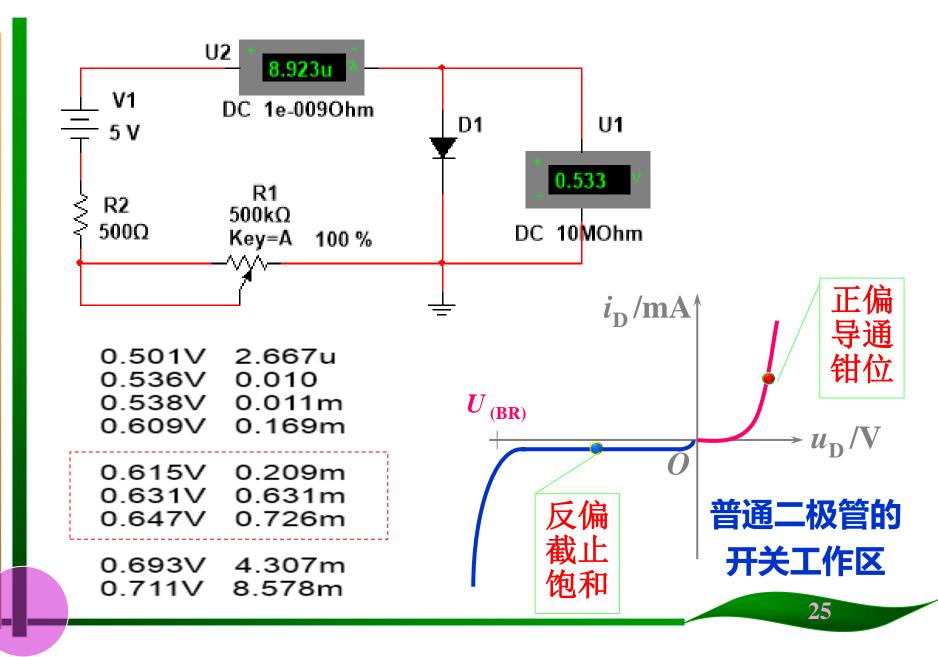
in急剧上升

$$|U_{(BR)}| > |U| > 0$$
  $i_D = I_S < 0.1 \,\mu\text{A}$  (硅) 几十  $\mu\text{A}$  (锗)

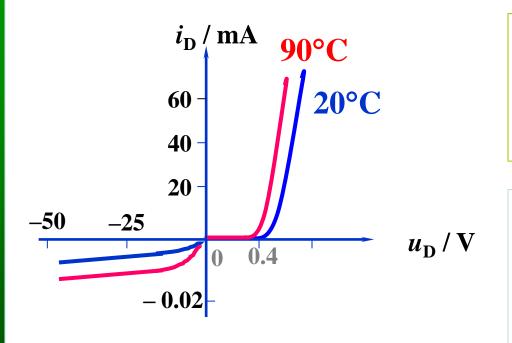
$$\mid U \mid > \mid U_{(BR)} \mid$$

 $|U| > |U_{\text{(BR)}}|$  反向电流急剧增大(反向击穿)

### \*二极管伏安特性测试



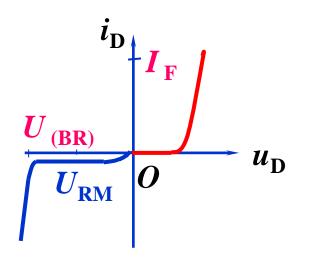
### 3、温度对二极管的伏安特性的影响



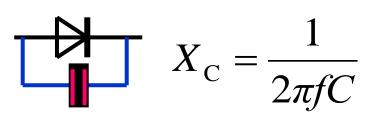
 $U_{
m D(on)}$ 具有负温度特性: 温度每上升 1°C, 约下降(2 ~ 2.5) mV

 $I_{\rm S}$ 具有正温度特性: Si管温度每上升  $8^{\circ}$ C,Ge管温度每上升  $12^{\circ}$ C, $I_{\rm S}$ 约增加一倍

# 1.2.3 二极管的主要参数



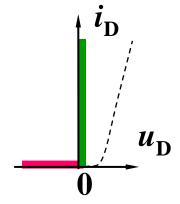
#### PN结的电容效应



- 1)  $I_{\rm F}$  最大整流电流(最大正向平均值)
- 2)  $U_{\rm RM}$  最高反向工作电压(最大瞬时值),为  $U_{\rm (BR)}/2$
- 3)  $I_R$  反向电流(越小单向导电性越好)
- 4)  $f_{\rm M}$  最高工作频率(超过时单向导电性变差)
  - 1) 低频时,因结电容很小,对PN结的影响很小。 高频时,因容抗减小,导致单向导电性变差。
  - 2) 结面积小时结电容小,工作频率高。

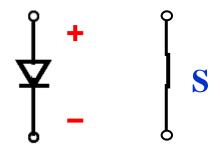
# 1.2.4二极管常用电路模型

- 1、理想二极管模型
- 1) 特性

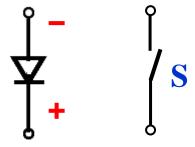


。 大信号 模型1

#### 2) 符号及等效模型



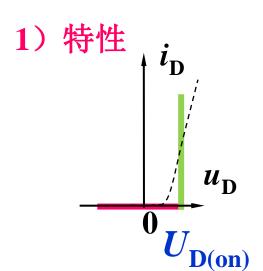
正偏则导通,  $u_D = 0$ ;  $i_D$ 由外电路决定



反偏则截止:  $i_{\rm D}=0$ ,  $U_{\rm (BR)}$ 由外电路决定

# 2、二极管的恒压降模型

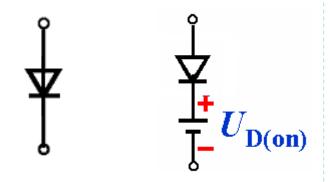




阳极电位比阴极高 $U_{\mathrm{D}}(\mathrm{on})$  时,二极管导通; 管压降钳制在:

$$u_{\mathbf{D}} = U_{\mathbf{D}(\mathbf{on})} \left\{ \begin{array}{l} 0.7 \, \mathbf{V} \, (\mathbf{Si}) \\ 0.3 \, \mathbf{V} \, (\mathbf{Ge}) \end{array} \right.$$

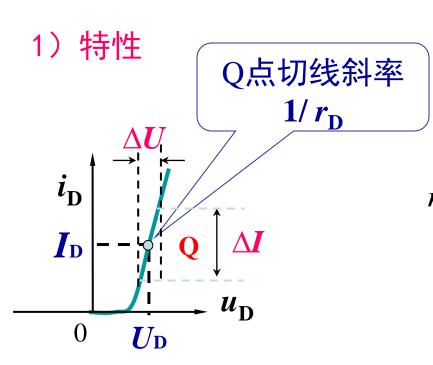
#### 2) 符号及等效模型



当二极管截止时:

$$oldsymbol{i}_{\mathrm{D}}=\mathbf{0}$$
 ,  $U_{\mathrm{(BR)}}$ 由外电路决定

# 3、二极管低频小信号模型



在Q点附近小范围内, 将二极管近似看成线性器件

#### 2) 直流电阻:

$$R_D = \frac{U_D}{I_D}$$

#### 3) 二极管动态电阻:

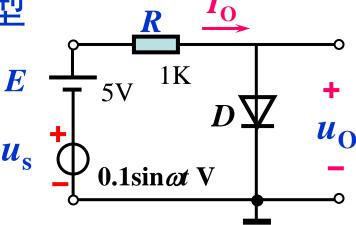
$$r_d = \left(\frac{du_D}{di_D}\right)_Q = \left[\frac{d}{du_D}\left(I_S e^{u_D/U_T}\right)\right]_Q^{-1}$$

$$r_d = \frac{U_{\rm T}}{I_{\rm D}} = \frac{26\text{mV}}{I_{\rm D}\text{mA}}(\Omega)$$

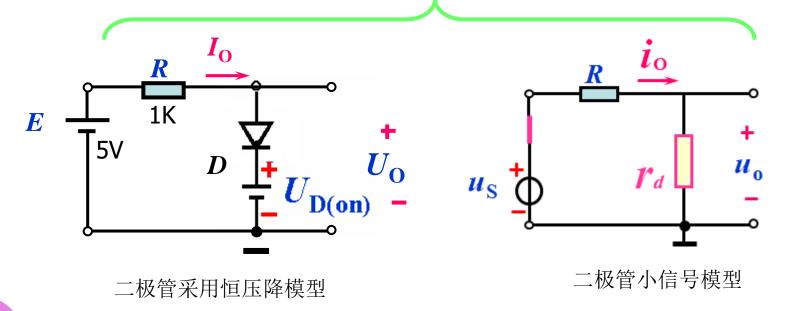
₹a 值与Q点的位置有关;

# 3、二极管低频小信号模型





#### 直流等效电路+交流等效电路



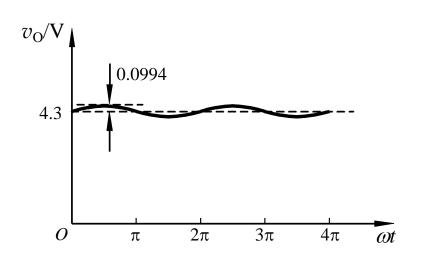
# 3、二极管低频小信号模型

$$I_D = \frac{E - 0.7}{R} = 4.3 \text{mA}$$

$$r_d = \frac{U_T}{I_D} = \frac{26mV}{4.3mA} = 6\Omega$$

$$U_{om} = \frac{U_{sm}}{R+r_d} \cdot r_d = 0.12 \text{mV}$$

$$u_0 = (700 + 0.12 \sin \omega t) \text{mV}$$



### 注意低频小信号模型使用条件

- ▶ 该模型仅限于用来计算叠加在工作点上微小电压或电流变化时的响应。
- ▶ 当工作频率很高时,还要考虑PN结的结电容。

# ● 二极管总结

➤ 二极管的基本特性—单向导电性(即开关特性) 普通二极管和LED有两个工作区:

正偏导通钳位于 $U_{\rm on}$ ; (硅/锗管约0.7V/0.3V)

反偏饱和截止于  $I_R \approx 0$ ; (取 $U_{RM} = 1/2U_{BR}$ )

稳压管正常工作于第三区—反向击穿稳压区:

反向击穿稳压于 $U_z$ ; (取  $I_z = I_{Zmin} \sim I_{Zmax}$ )

- 二极管的工作频率和环境温度影响其单向导电性 单向导电性变坏时,二极管就失效了;
- 二极管有两类模型: 表征开关状态的大信号模型:理想二极管、恒压降模型; 在导通区传输小信号时的模型:低/高频小信号模型

### 4、二极管大信号模型应用举例

### 1) 含二极管电路的基本分析方法:

根据外电路情况:  $V_{DD}$  大,采用 $\mathcal{A}$ 想

 $V_{
m DD}$  小,采用恒压降模型

断开二极管所在支路,分别判断阳极和阴极电位,

> 采用理想模型时:

阳极电位高于阴极则导通;

导通后,二极管两端压降为0,电流由外电路决定;

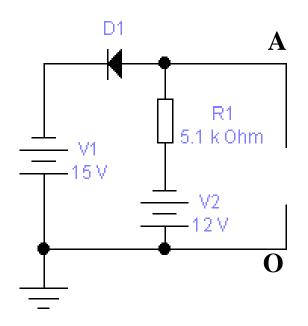
> 采用恒压降模型时:

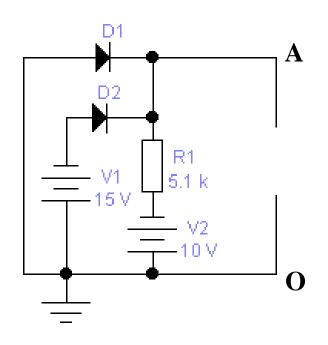
阳极电位比阴极高0.7V则导通;

导通后,二极管两端压降为0.7V,电流由外电路决定;

截止时,流过二极管的电流为0,管压降由外电路决定;

例1: R=5.1k $\Omega$ ,试判断各电路中的二极管是导通还是截止, 并求出A、O两点间的电压 $V_{AO}$ 值。

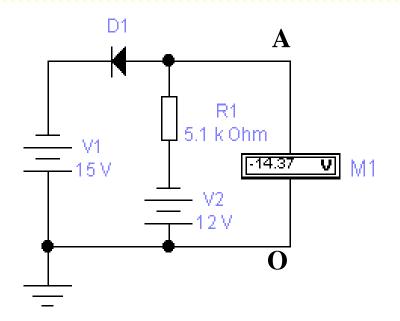


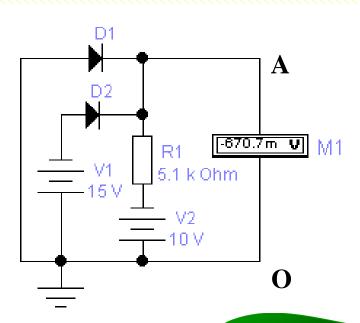


设图示电路中各二极管性能理想,导通时的正向电压降为零、反向截止时的反向电流为零;

#### 例1分析:

- 1)由于二极管的特性为非线性,通常用比较二极管2个电极的电位高低来确定其工作状态。
- 2) 只含一个二极管时,先将其断开,求断开处的电压,然后来确定其工作状态。
- 3) 含二个二极管时,先设一个为截止,按2) 判断另一个;然后求被设为截止的二极管两端电压,若大于零,则说明所设错误。





### 4、二极管大信号模型应用举例

2) 二极管共阴或共阳接法时的分析方法:

根据外电路情况: 人, 天用理想模型

V<sub>DD</sub> 小,采用恒压降模型

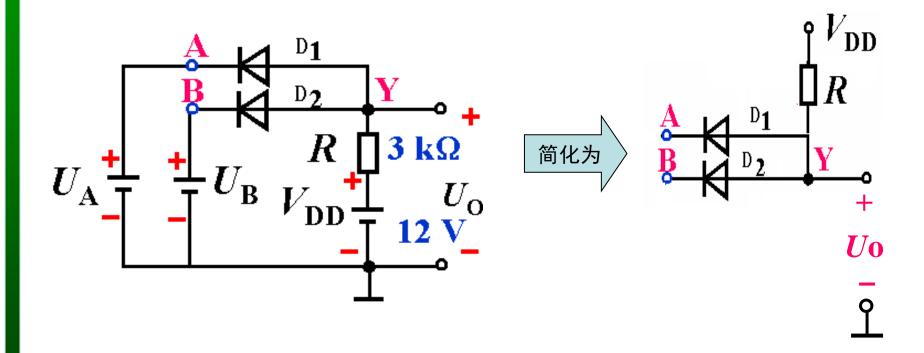
先利用理想模型或恒压降模型分别判断二极管是否 满足导通条件,在同时满足导通条件的情况下,

共阴接法时: 阳极电位高的二极管优先导通;

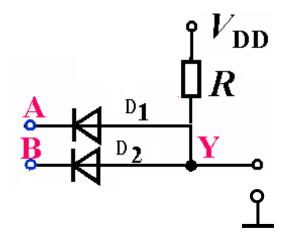
共阳接法时: 阴极电位低的二极管优先导通;

例2: 二极管逻辑门电路。

设  $\mathbf{D_1}$ 、 $\mathbf{D_2}$ 均为理想二极管,当输入电压  $U_{\mathrm{A}}$ 、 $U_{\mathrm{B}}$ 为低电平 0 V 和高电平 5 V 的不同组合时,求输出电压  $U_{\mathrm{O}}$  的值。



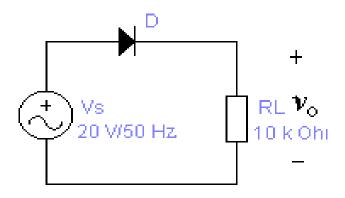
例2: [解]



输入电压		理想二极管		输出
<b>U</b> <sub>A</sub>	<b>U</b> B	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	电压
0 V	<b>0 V</b>	正偏 导通	正偏 导通	0 V
0 V	5 V	正偏 导通	反偏 截止	0 V
5 V	0 V	反偏 截止	正偏 导通	0 V
5 V	5 V	正偏 导通	正偏 导通	5 V

真值表				
A	В	Y		
0	0	0		
0	1	0		
1	0	0		
1	1	1		

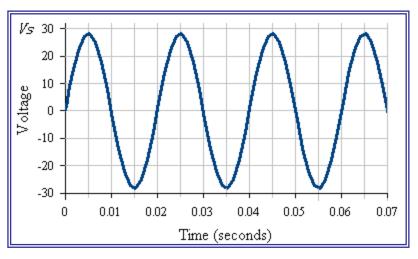
#### 例3:二极管整流电路。

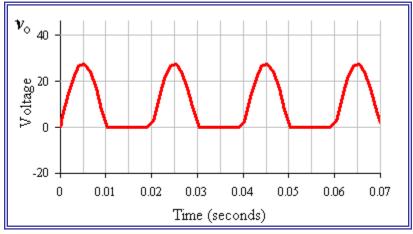


解:因为 $u_i$ 较大, 宜采用理想模型分析。

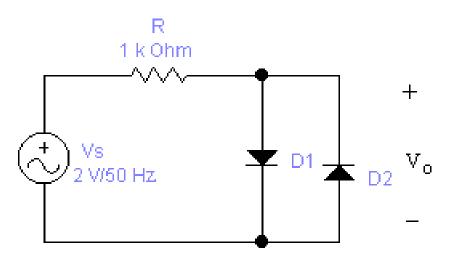
当 $v_s$ >0, D导通,  $v_o$ = $v_s$ ; 当 $v_s$ <0, D截止,  $v_o$ =0.

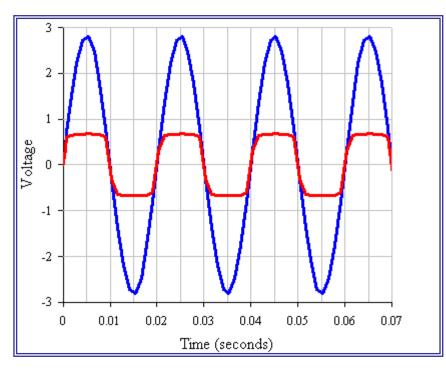
——单向整流电路





### 例4: 二极管限幅电路。

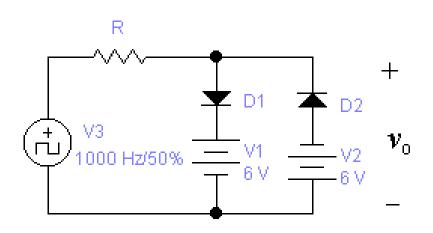




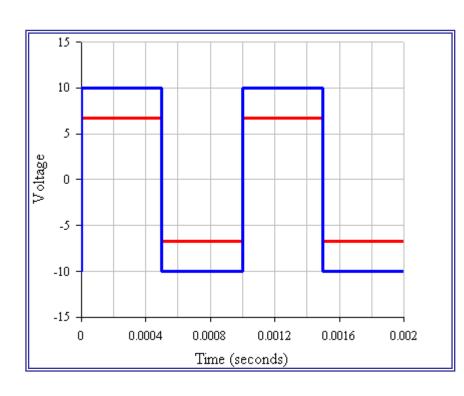
解: 因为 $u_i$  较小, 宜采用恒压降模型分析。

- $\triangleright u_i \ge 0.7 \text{ V}$ , $D_1$  导通  $D_2$ 截止  $u_O = 0.7 \text{ V}$
- $\triangleright u_i \le -0.7 \text{ V}$ , $D_2$  导通  $D_1$  截止  $u_O = -0.7 \text{ V}$
- $\triangleright$  -0.7 V <  $u_i$  < 0.7 V,  $D_1$ 、 $D_2$  均截止  $u_O = u_i$

### 例5: 二极管钳位电路

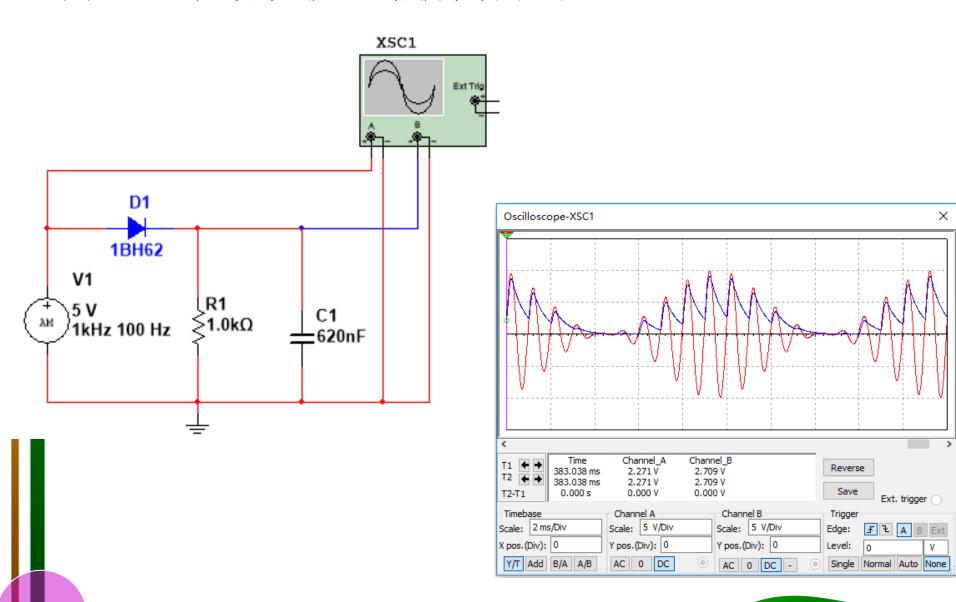


解:  $u_i$  为10Vp的方波,可以采用理想模型分析。



- $\triangleright$  D<sub>1</sub>的作用是使顶部电压钳位于V<sub>max</sub>=6V;
- ➤ D<sub>2</sub>的作用是使底部电压钳位于Vmin=-6V。

### 例\*: 二极管检波电路仿真测试。



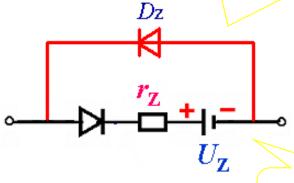
- 1、稳压二极管
- 1) 符号



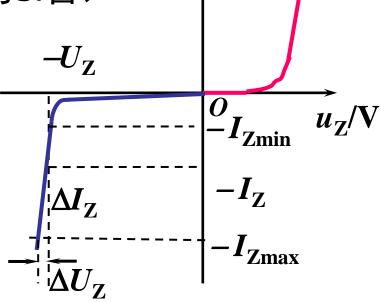
(特殊工艺的Si管)

2) 等效模型

正偏和反偏截止时 与普通Si管相同



反向击穿时 起稳压作用



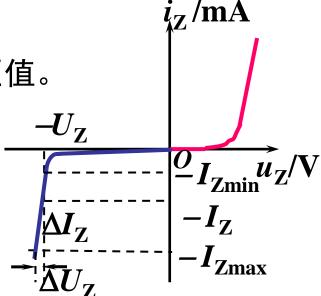
 $i_{\rm Z}/{\rm mA}$ 

工作条件: 反向击穿

### 1、稳压二极管

### 3) 主要参数

- ① 稳定电压  $U_{\rm Z}$  流过规定电流时稳压管两端的反向电压值。
- ② 稳定电流  $I_{\mathbf{Z}}$  越大稳压效果越好,小于  $I_{\min}$  时不稳压。
- ③ 最大工作电流  $I_{ZM}$  最大耗散功率  $P_{ZM} = U_Z I_{ZM}$



- ④ 动态电阻  $r_{\mathrm{Z}}=\Delta U_{\mathrm{Z}}/\Delta I_{\mathrm{Z}}$  越小稳压效果越好。
  - 一般小功率管几 $\Omega$ ,大功率管几十 $\Omega$ 。

### 1、稳压二极管

### 3) 主要参数

⑤ 电压温度系数: 当稳压管中的电流等于稳定电流  $I_Z$  时,环境温度改变  $1^{\circ}$ C,稳定电压  $U_Z$  变化的百分比。

$$\alpha = \Delta U_Z / \Delta T$$

#### 一般:

 $U_{\rm Z}$  < 4 V, $C_{\rm T}$  < 0 (为齐纳击穿) 具有负温度系数;

$$U_Z > 7 \text{ V}$$
, $C_T > 0$  (为雪崩击穿)具有正温度系数;

$$4 \text{ V} < U_{\text{Z}} < 7 \text{ V}$$
, $\alpha$  很小

### 1、稳压二极管

#### 4) 基本稳压电路

KCL方程:  $I_R = I_Z + I_L$ 

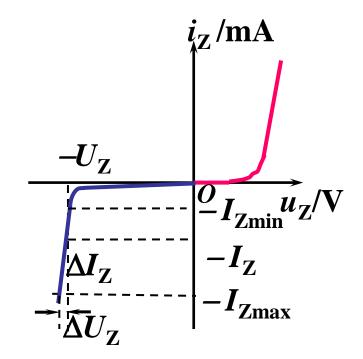
KVL方程:  $U_O = U_I - I_R R$ 

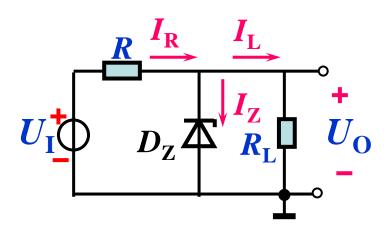
稳压原理:

假定当 $R_L$ 不变 $U_I$ 变时,

$$U_{\mathbf{I}}\uparrow \longrightarrow U_{\mathbf{o}}\uparrow \uparrow \longrightarrow I_{\mathbf{z}}\uparrow \uparrow \longrightarrow U_{\mathbf{R}}\uparrow \longrightarrow U_{\mathbf{o}}\downarrow$$

R的作用: 限流与分压。



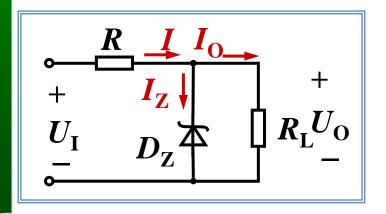


结论: 在基本稳压电路中,不论是电网电压波动引起的 $U_{\rm L}$ 变化,还是由于负载 $R_{\rm L}$ 发生变化,输出电压都将保持稳定。

M6: 未经稳压的直流输入电压 $U_{\rm I}$ =18V, R=1k $\Omega$ ,  $R_{\rm L}$ =2k $\Omega$ , defined by the definition of the definit

反向电流均可忽略。

- (a) 试求 $U_0$ 、 $I_0$ 、I和 $I_Z$ 的值;
- (b)试求 $R_L$ 值降低到多大时, 电路的输出电压将不再稳定。



### 解(a)

$$U_{\rm I} \cdot \frac{R_{\rm L}}{R + R_{\rm L}} = 18 \times \frac{2}{1 + 2} = 12 \text{V} > U_{\rm Z}$$

Dz被反向击穿,使输出电压稳定,故

$$U_{\rm O} = U_{\rm Z} = 10 \rm V$$

$$I_{\rm O} = \frac{U_{\rm O}}{R_{\rm L}} = \frac{10}{2} = 5 \text{mA}$$

$$I = \frac{U_I - U_O}{R} = \frac{18 - 10}{1} = 8\text{mA}$$

$$I_z = I - I_0 = 8 - 5 = 3$$
mA

 $\mathbf{6}$  (b)试求 $R_{L}$ 值降低到多大时,电路的输出电压将不再稳定。

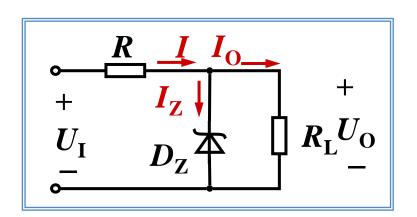
分析: 稳压管稳压时, 管子必须反向击穿, 条件是管子两端 所接结点, 在管子断开时的电压应大于其稳定电压。

解: 若 
$$U_{\rm I} \cdot \frac{R_{\rm L}}{R+R_{\rm L}} < U_{\rm Z}$$
  $D_{\rm Z}$ 不能被击穿,则输出电压不能稳定。

代入 $U_{\rm I}$ 、R及 $U_{\rm Z}$ 可求得电路不再稳压时的 $R_{\rm L}$ ,

$$18 \times \frac{R_{\rm L}}{1 + R_{\rm L}} < 10$$

$$R_{\rm L}$$
 < 1.25 k $\Omega$ 



## \*半导体二极管的型号

国家标准对半导体器件型号的命名举例如下:

#### 2 A P 9

用数字代表同类型器件的不同型号用字母代表器件的类型,P代表普通管用字母代表器件的材料:A代表N型GeB代表P型Ge,C代表N型Si,D代表P型Si

2代表二极管,3代表三极管

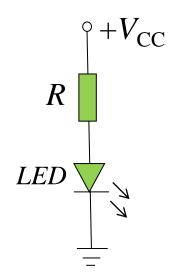
# 2、发光二极管

( Light Emitting Diodes )

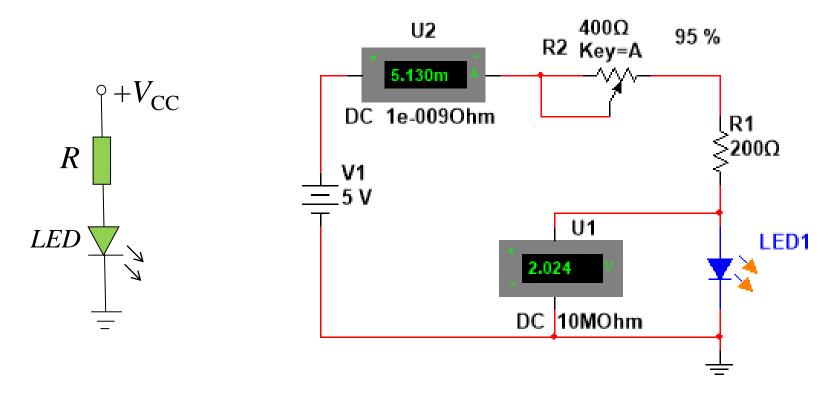


- ▶ 当电流流过时,LED将发出光来,光的颜色由二极管材料 (如砷化镓、磷化镓)决定。
- ▶ LED通常用作显示器件,工作电流一般在几mA至几十mA之间。
- ➤ 另一重要作用: 将电信号变为光信号, 通过光缆传输,然后用 光电二极管接收, 再现电信号。

◆ LED基本 应用电路



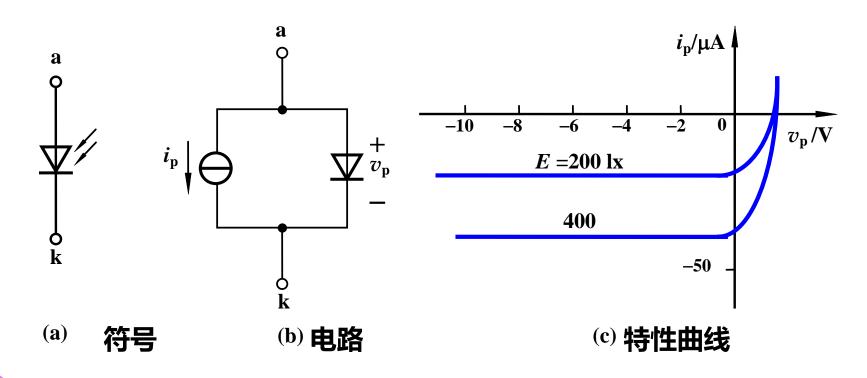
### 例7: 发光二极管仿真分析



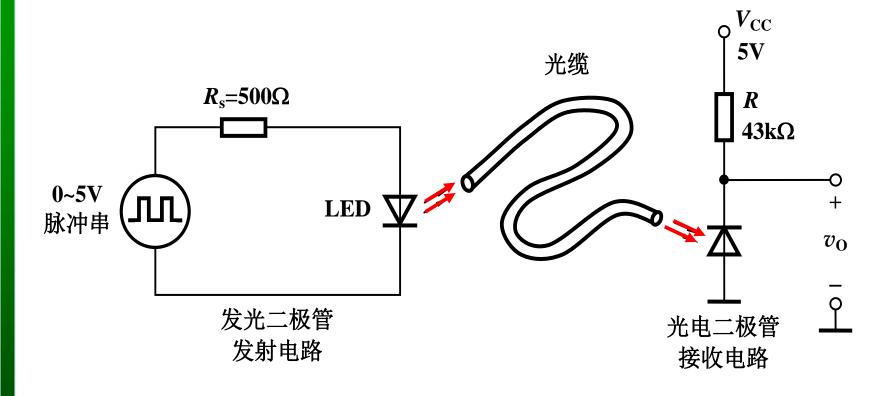
普通的发光二极管,工作电流一般为 5~15mA; 正偏压降不同颜色LED有差别,一般 (红色为1.6V、黄色为1.4V左右、蓝白为至少2.5V)。

# 3、光电二极管 (Photo-Diode)

PD和普通二极管一样,具有一个PN结,有单向导电性, 在电路中一般作为传感器将光信号转变为点信号。



◆发光/光电二极管基本应用电路



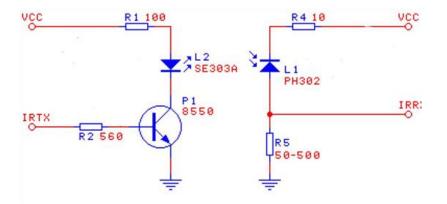
光电传输系统

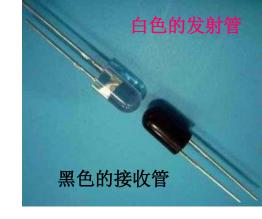
### 4、红外发射与接收对管

**红外对管**是红外线发射管与光敏接收管, 或者红外线接收管,或者红外线接收头 配合在一起使用时候的总称。

红外发射管在LED封装行业中主要有三个常用波段:

- 1) 850nm波段: 主要用于红外线监控设备;
- 2) 875nm波段: 主要用于医疗设备;
- 3)940nm波段:主要用于遥控器、光电开关、光电记数等。
- ◆红外发射/接收管基本应用电路





◆ 仿真研讨课参考论文索引:

附件1-二极管及其典型应用电路仿真测试"

《电子制作》 2016年19期 ISSN: 1006-5059