

## 第五章 半导体器件基础与二极管电路

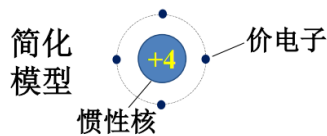
- 传感器：将非电信号转换为电信号

### 5.1.1 PN结及其单向导电性

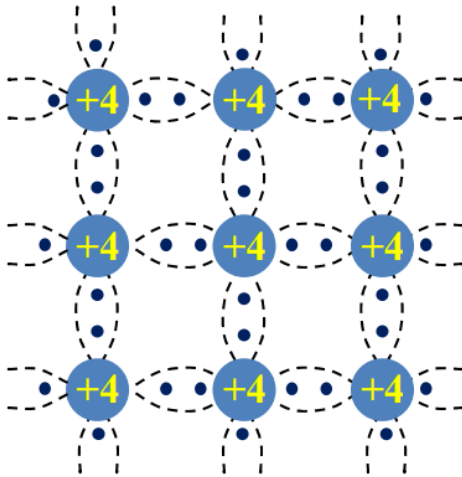
- 半导体：导电能力介于导体和绝缘体之间的物质
  - 例如硅、锗、砷化镓等材料
  - 具有独特的光敏、热敏和掺杂特性

#### 一、本征半导体

- **定义**：纯净、不含杂质、晶体结构完整的半导体称为本征半导体。
  - 硅/锗原子结构的简化模型：



- 硅/锗的共价键结构：



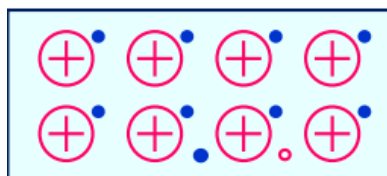
- **特性**
  - 本征激发：在光和热的作用下，本征半导体中产生电子-空穴对的现象。
  - 自由电子：脱离出共价键的电子。
  - 价电子：处于共价键中的电子。
    - 价电子移动形成电子电流。
  - 空穴：共价键中电子脱离后留下的空位。
    - 空穴移动形成空穴电流。
    - 空穴移动产生的电流实际上是价电子移动产生的电流。
  - **载流子**：能够导电的带电粒子，在半导体中有自由电子和空穴。
  - 复合：自由电子与空穴相遇，填补了空位，视为电子和空穴都消失

#### 二、杂质半导体

- 多数载流子，简称多子
- 少数载流子，简称少子

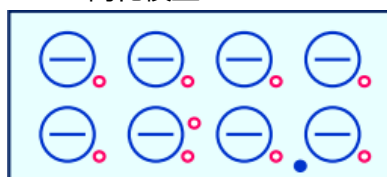
### 1. N型半导体

- 杂质：+5价元素，如磷
  - 电子为多子
  - 空穴为少子
  - 载流子数 $\approx$ 电子数
- 简化模型



### 2. P型半导体

- 杂质：+3价元素，如硼
  - 空穴为多子
  - 电子为少子
  - 载流子数 $\approx$ 空穴数
- 简化模型



## 三、PN结

- 扩散运动：由于浓度差异而形成的定向移动，主要是多子扩散
- 漂移运动：由于电场作用而形成的定向移动，主要是少子漂移

### 1. 形成

- 载流子的浓度差引起多子的扩散，两种载流子在交界面复合，使得交界面处只剩下杂质离子，形成了空间电荷区，即PN结，又称耗尽区
- 在空间电荷区中，由杂质离子产生的内电场的场强方向由N区指向P区，该场强会抑制扩散作用，加强漂移作用，最终扩散和漂移达到动态平衡

### 2. 单向导电性

- 正向偏置，简称正偏
  - P区接正极，N区接负极
  - 内外电场反向
  - 外电场使多子向PN结移动中和部分离子，使空间电荷区变窄
  - 扩散运动加强形成正向电流  $I = I_{\text{多子}} - I_{\text{少子}} \approx I_{\text{多子}}$
  - 内电场减弱 $\rightarrow$ 空间电荷区变窄 $\rightarrow$ 扩散电流 $I$ 变大 $\rightarrow$ 导通
- 反向偏置，简称反偏
  - N区接正极，p区接负极
  - 内外电场同向
  - 外电场使多子背离PN结移动，空间电荷区变宽

- 漂移运动加强形成反向电流  $I_R = I_{\text{少子}} \approx 0$
- 内电场加强→空间电荷区变宽→少子漂移电流  $I_R \approx 0 \rightarrow$  截止
- 总结
  - 正偏导通，呈小电阻，电流较大
  - 反向截止，电阻很大，电流近似为零

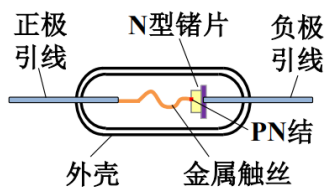
## 5.1.2 二极管的结构、伏安特性及参数

- 电路符号

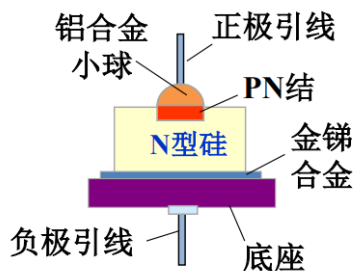


### 一、结构

- 点接触型



- 多为锗管，PN结面积小，不能通过大电流
- PN结两侧积累的正负电荷少，相当于C比较小的电容，即结电容小，能通过高频交流电
- 面接触型

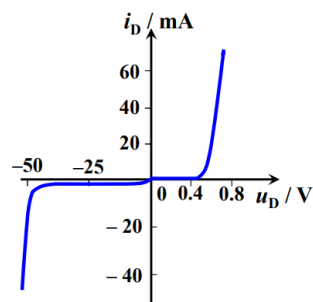


- 多为硅管，PN结面积大，能通过大电流，一般用于整流
- PN结两侧积累的正负电荷多，相当于C比较大的电容，即结电容大，只能通过低频的交流电

### 二、伏安特性

二极管是非线性元件。

- 图例

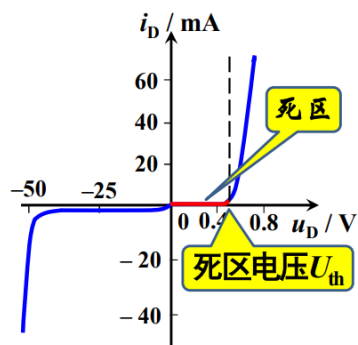


硅二极管2CP10的伏安特性

1. 正向特性

- 死区：当外加正向电压很低时，由于外电场还不能克服PN结内电场对多数载流子扩散运动的阻力，故正向电流很小几乎为零。

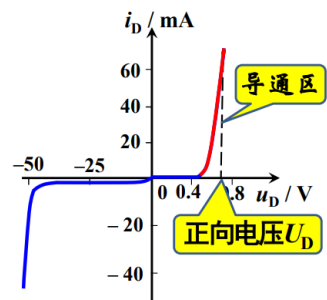
材料	死区电压 $U_{th}$
硅	约0.5V
锗	约0.2V



- 正向电压/导通电压/管压降：当外加正向电压超过死区电压时正向电流迅速增长，二极管进入**正向导通区**，电压再继续增加时，电流迅速增大，而二极管端电压却几乎不变，此时二极管端电压称为**正向电压**。

材料	正向电压
硅	0.6~0.7V ( <b>0.7V</b> )
锗	0.1~0.3V ( <b>0.3V</b> )

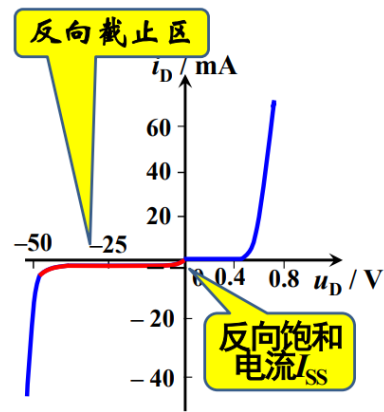
- 硅稳定性好,受温度影响小



2. 反向特性

- 反向饱和电流：在二极管两端加反向电压时，将有很小的、由少子漂移运动形成的反向饱和电流 ( $I_{SS}$ ) 通过二极管。
  - 随温度的上升增长很快
  - 在反向电压不超过某一范围时，反向电流的大小基本恒定

材料	反向饱和电流
硅	1μA一下
锗	几十μA

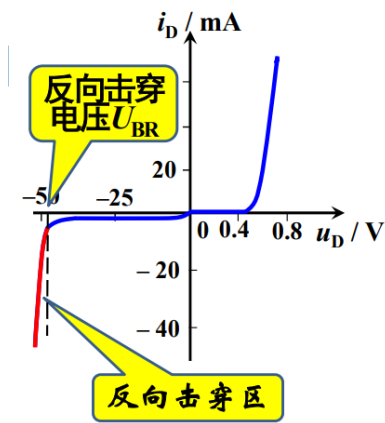


3. 电流方程

- $i_D = I_{SS}(e^{u_D/U_T}-1)$
- 温度电压当量  $U_T = kT/q$ 
  - 常温  $t=27^{\circ}C, U_T=26mV$
- 正向偏置:  $i_D \approx I_{SS}e^{u_D/U_T}$
- 反向偏置:  $i_D \approx -I_{SS}$
- 温度上升→电压不变时电流增大→正向特性曲线左移
- 温度上升→反向饱和电流增加→反向特性曲线下移
- 温度影响电流的实质是加快了载流子的运动,反向特性受温度影响更大

4. 击穿特性

- 反向击穿：外加反向电压超过**反向击穿电压**  $U_{BR}$ 时，反向电流突然增大，二极管失去单向导电性，进入**反向击穿区**。
  - 电击穿(可逆)
    - 雪崩击穿：掺杂浓度低,空间电荷区宽;反向电压大时,载流子获得大动能撞击价电子,产生了更多的自由电子-空穴对
    - 齐纳击穿：掺杂浓度高,空间电荷区窄,不大的反向电压就能拉出价电子形成载流子
  - 热击穿
    - 电流过大或温度过高,性能不能恢复



三、二极管的主要参数

- 最大整流电流 $I_{FM}$ 
  - 二极管长期使用时，允许流过的最大正向平均电流。
- 反向峰值电压 $U_{RWM}$ 
  - 是保证二极管不被击穿而规定的最大反向工作电压，一般是 $U_{BR}$ 的一半或三分之二。
- 反向电流 $I_R$ 
  - 指二极管外加规定工作电压时的反向电流。
- 最高工作频率 $f_M$ 
  - 决定于PN结结电容的大小，超过时单向导电性能变得较差。

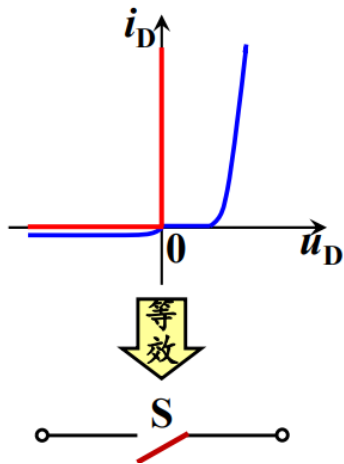
5.1.3二极管电路模型及电路分析

一、二极管的电路模型

- 将指数模型 $i_D = I_{SS}(e^{u_D/U_T}-1)$ 分段线性化，得到二极管伏安特性的等效模型。

1. 理想模型

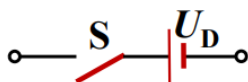
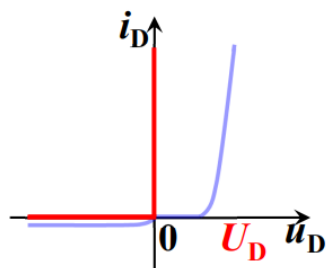
- 正向：管压降为0，电阻为0
- 反向：电阻为无穷大，电流为0



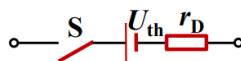
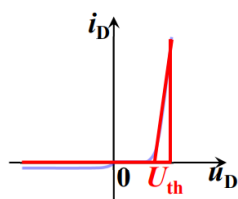
2. 恒压降模型

- $u_D > U_D$ ：二极管导通,电阻为0

- $u_D < U_D$ : 二极管截止, 电流为0



### 3. 折线模型



## 二、二极管的电路分析

- 先定性后定量
- 定性分析; 判断二极管的工作状态 (导通/截止)
- 一般分析方法和步骤
  - 定性分析
    1. 将二极管断开
    2. 分析二极管阴阳两极接入点的点位大小或表达式
    3. 根据所选择的电路模型确定二极管的状态
  - 定量分析
    - 由二极管的状态求解输出电压或电流

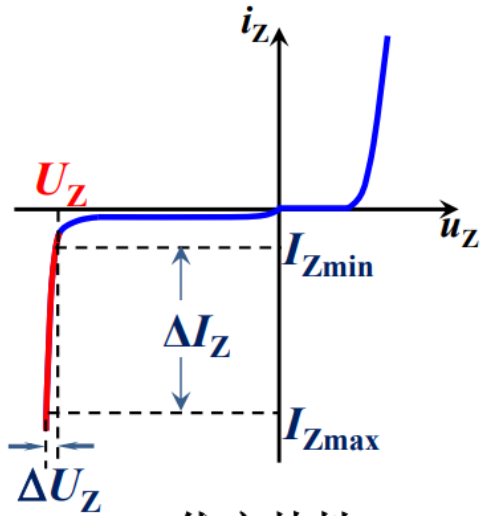
### 5.1.4 稳压二极管

#### 一、特性和符号

- 稳压二极管一般为硅材料面接触型
- 符号



- 伏安特性

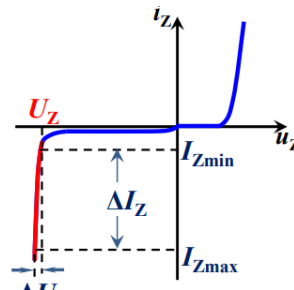
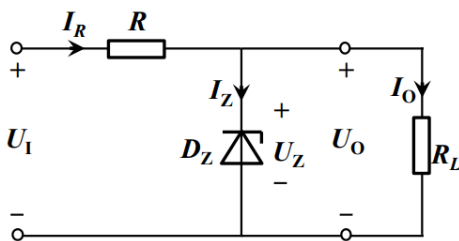


## 二、主要参数

1. 稳定电压 $U_Z$ ：稳压管正常工作（反向击穿）时，稳压管两端的电压。
2. 稳定电流 $I_Z(I_{Zmin} \sim I_{Zmax})$ ：稳压管正常工作时的参考电流。
3. 最大允许耗散功率 $P_{ZM}$ ：稳压管不发生热击穿的最大功率损耗
4. 动态电阻 $r_Z$ ： $r_Z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$ ，越小稳压效果越好。
5. 温度系数 $\alpha_Z$ ：反应稳压电压值受温度影响的参数。

## 三、应用电路分析

- 稳压管的动态稳压分析



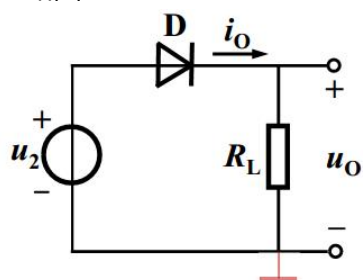
- 若 $U_1$ 波动， $R_L$ 不变：
  - $U_1$ 升高，于是 $U_O(U_Z)$ 升高，导致 $I_Z$ 增大， $I_R$ 也增大， $U_R$ 就会升高，导致了 $U_O$ 下降
- 若 $R_L$ 减小， $U_1$ 不变：
  - $R_L$ 减小造成 $U_O(U_Z)$ 降低，于是 $I_Z$ 减小， $I_R$ 也减小， $U_R$ 就会降低，导致了 $U_O$ 升高
- 多个稳压管的串并联分析
  - 两稳压管同向串联且都截止时，输出电压为两稳压值之和
  - 两稳压管异向串联且一个导通一个截止时，输出电压为两稳压值之差
  - 两稳压管同向并联截止时，输出电压为两稳压值中较小的一个
  - 两稳压管异向异向并联且一个导通一个截止时，输出电压为导通电压0.7V

## 5.2~5.4 常见的二极管应用电路

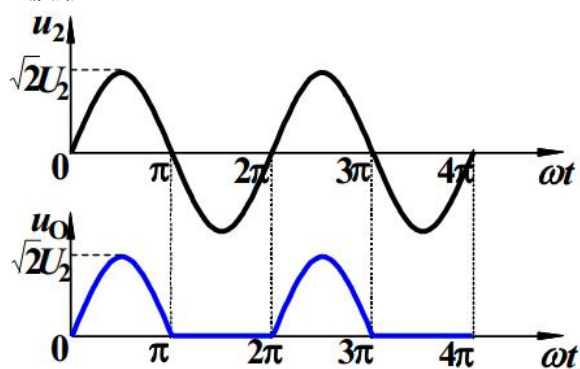
### 1. 半波整流电路



- 电路图



- 输出波形

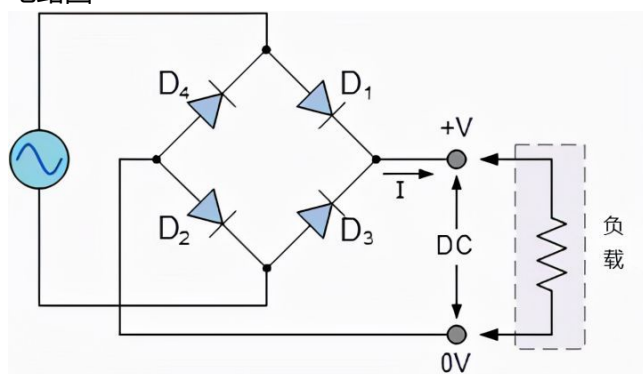


- 输出电压平均值

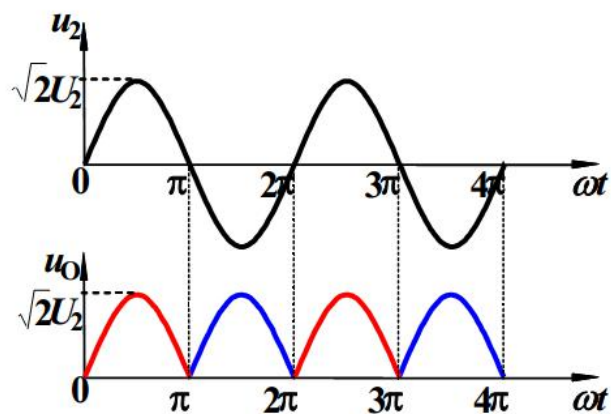
$$U_O = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0.45U_2$$

## 2. 桥式整流

- 电路图



- 输出波形



- 输出电压平均值

$$U_O = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) \approx 0.9U_2$$

- 二极管的整流电流

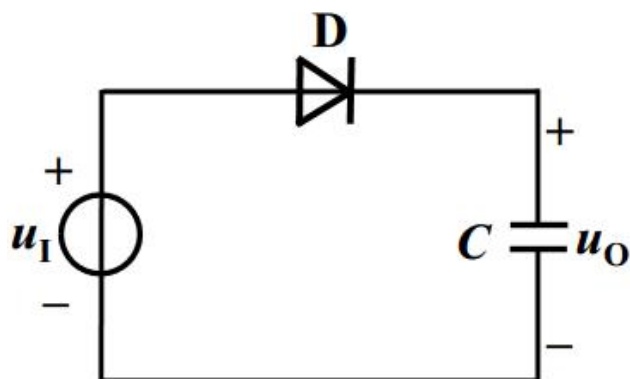
$$I_{D1} = \frac{1}{2} I_O \approx \frac{0.45U_2}{R_L}$$

- 二极管承受的最高反向电压

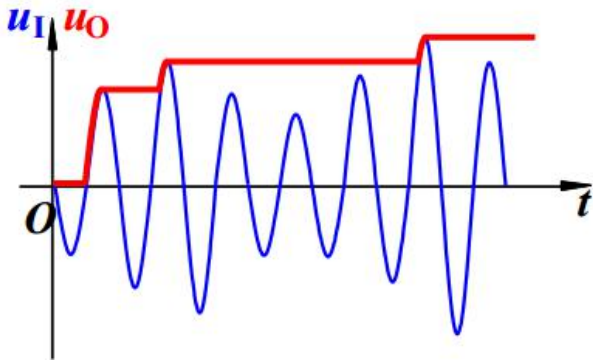
$$\sqrt{2}U_2$$

### 3. 二极管峰值采样电路

- 电路图



- 输出波形



- 原理解释
  - 每当输入电压出现新的峰值，二极管正向导通，输入电压通过导通的二极管向电容器充电，使之捕捉到输入电压的峰值，将峰值电压储存在电容器中输出。

#### 4. 二极管检波电路

- 不做要求

## 第六章 晶体管放大电路基础

- 在本章中使用的  $\dot{U}$  和  $\dot{I}$  多为相量

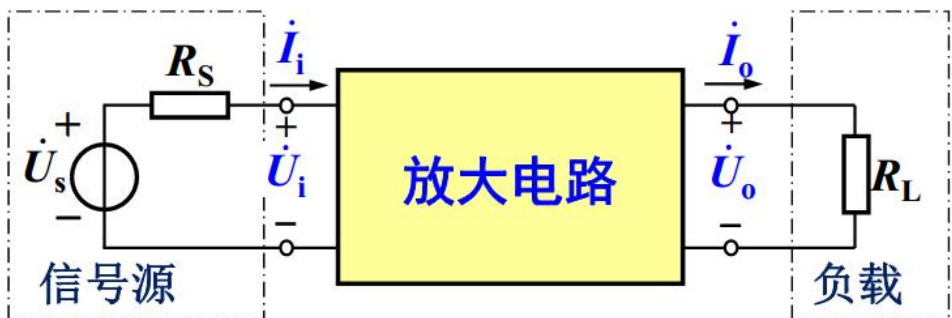
### 6.1 放大电路的基本概念

#### 一、放大的概念

- 放大电路实际上是一种功能模块电路，通过输入端口接收需要放大的信号，通过输出端口将放大后的信号送往负载
  - 把微弱的电信号放大到负载需要的值
- 放大的对象：变化量
- 放大的基本要求：不失真
- 放大的本质：将直流电源能量转换为信号能量输出，实现能量的控制和转换。

#### 二、放大电路的主要性能指标

- 电路图



##### 1. 放大倍数/增益 A

- 用于衡量放大电路的放大能力

- 电压增益

$$A_u = \dot{U}_o / \dot{U}_i \quad \text{or} \quad A_u = 20 \lg |\dot{U}_o / \dot{U}_i| \quad (\text{dB})$$

- 电流增益

$$A_i = \dot{I}_o / \dot{I}_i$$

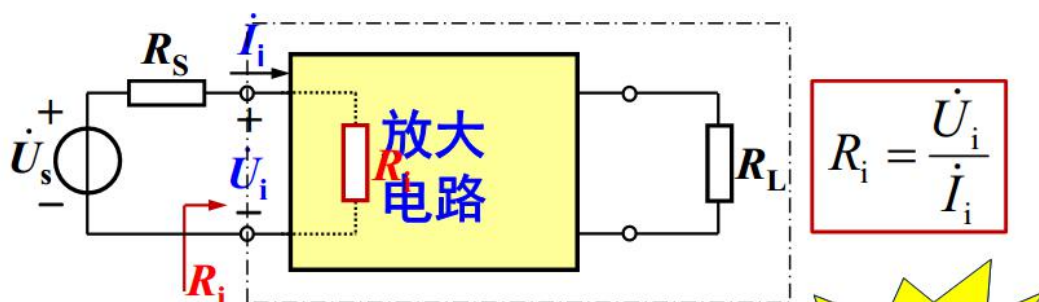
- 互阻增益

$$A_r = \dot{U}_o / \dot{I}_i$$

- 互导增益

$$A_g = \dot{I}_o / \dot{U}_i$$

## 2. 输入电阻 $R_i$

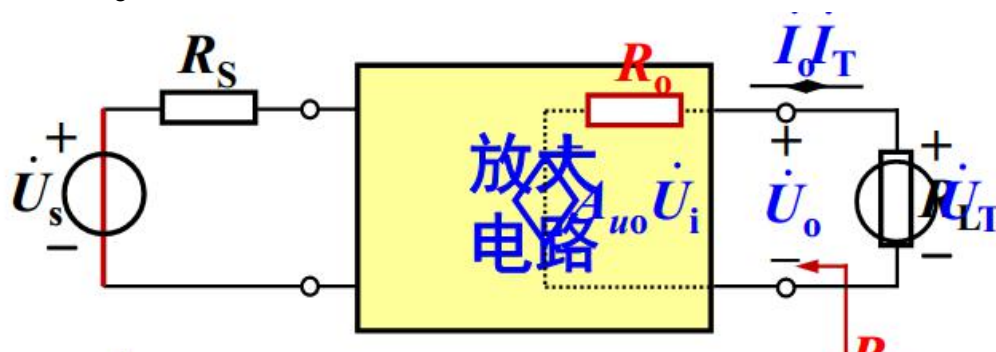


- 衡量放大电路从信号源获取信号的能力

- **信号拾取能力**

- 一般来说，电压放大时， $R_i$ 越大越好
  - $R_i$ 越大， $I_i$ 就越小，从信号源索取的电流就越小
  - 当信号源有内阻时， $R_i$ 越大， $U_i$ 就越接近  $U_s$

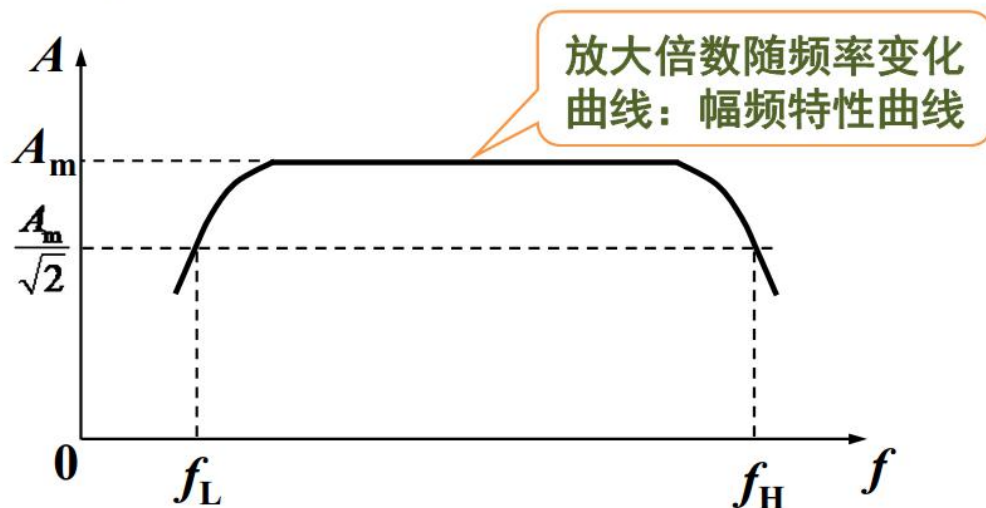
## 3. 输出电阻 $R_o$



$$R_o = \frac{\dot{U}_T}{\dot{I}_T} \Big|_{\dot{U}_s=0}$$

- 通常使用戴维南加压法求得 $R_o$
- 衡量放大电路带负载的能力
- **带负载能力**
- 一般来说，电压放大时， $R_o$ 越小越好
  - $R_o$ 越小，输出电压 $U_o$ 越大，负载获取信号的比值越高

### 1. 通带频 $f_{BW}$



- 通带频 $f_{BW}=f_H-f_L$