

# 《模拟电子技术基础笔记》

死抠

版本: 2.10

更新: May 29, 2019



## 1 常用半导体器件

### 1.1 基本概念

**定义 1.1 (本征半导体)** 纯净的具有晶体结构的半导体称为本征半导体。

**注** 本征半导体具有掺杂、热激活特性，即人为地掺入特定的杂质元素或在光照的条件下，其导电性会有明显的变化。

**定义 1.2 (载流子)** 运载电荷的粒子称为载流子。

**注** 本征半导体的载流子为自由电子和空穴，半导体在热激发下产生自由电子和空穴称为本征激发，逆过程称为复合。由于本征激发与复合是互逆过程，因此一定温度下的载流子浓度是一定的，并且载流子浓度与热力学温度近似成指数关系。多数载流子简称多子，少数载流子简称少子。

**定义 1.3 (N(P)型半导体)** 在纯净的硅晶体中掺入五(三)价元素(如磷(硼))，使之取代晶格中硅原子的位置，就形成了N(P)型半导体。

**注** 由于磷(硼)在掺入硅晶体后会产生自由电子(空穴)，因此称其原子为施主(受主)原子。

$N$ : 自由电子数(多子)=正离子数(掺杂)+空穴数(热激发)。

$P$ : 空穴数(多子)=负离子数(掺杂)+自由电子数(热激发)。

**定义 1.4 (扩散运动, 漂移运动)** 由于浓度差而产生的运动称为扩散运动。在电场力作用

下，载流子的运动称为漂移运动。

**注** 多子的扩散运动会使空间电荷区变厚，少子的漂移运动会使空间电荷区变薄。

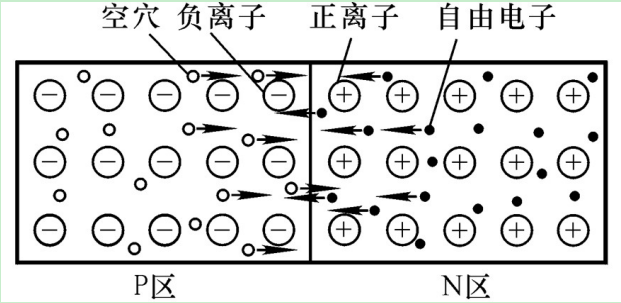


图 1: 扩散示意图

**定义 1.5 (PN 结)** 将 P 型半导体与 N 型半导体制作在同一块硅片上，其交界处会形成 PN 结。

**注** 由于多子的扩散运动，硅片的交界处会有大量的载流子复合，交界处的载流子浓度下降，称此区域为空间电荷区(也称为耗尽区)。其电场性质主要受施主、受主原子影响，因此会产生内电场(由  $N \rightarrow P$ )，阻碍多子的扩散运动(P 区的空穴  $\rightarrow N$ ，N 区的自由电子  $\rightarrow P$ )，促进少子的漂移运动(N 区的空穴  $\rightarrow P$ ，P 区的自由电子  $\rightarrow N$ )，从而最终达到稳态，形成 PN 结。

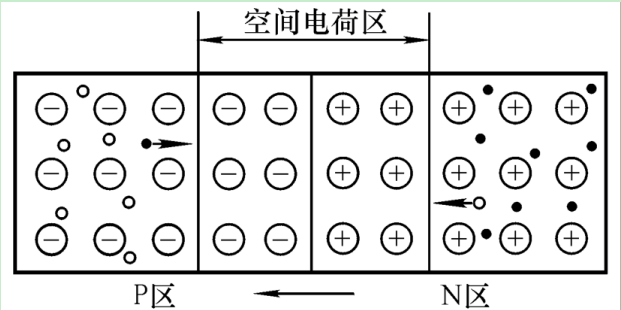


图 2: PN 结示意图

**定义 1.6 (PN 结的正反接)** 将电源的正极接到 PN 结的 P 端，负极接到 N 端，则称此为正向接法(正向偏置)。反向接法则与之相反。

**性质 1.1 (PN 结的单向导电性)** 下面讨论在没有击穿<sup>2</sup>的情况下正反接的情况

- 在正向接法中，由于空间电荷区等效的电源与外加电源方向相反
  - 若外加电压大于内部电压，将会使空间电荷区消失，即 PN 结导通。
  - 若外加电压小于内部电压，空间电荷区会变薄，仍不导电(近似)。
- 在反向接法中，由于空间电荷区等效的电源与外加电源方向同向，使空间电荷区变厚，内电场增强，形成漂移电流<sup>3</sup>。由于少子的数量极少，因此认为 PN 结反接时为截止状态且反向电流饱和。

<sup>1</sup>见定义 1.5

<sup>2</sup>见性质 1.3

<sup>3</sup>少子的漂移运动产生的电流

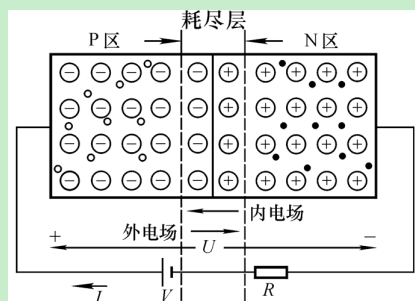


图 3: 正接示意图

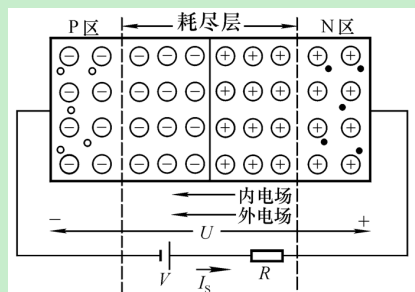


图 4: 反接示意图

**定理 1.2 (PN结的电流方程)** 由理论分析可知,  $PN$ 结所加端电压 $u$ 与流过它的电流 $i$ 的关系为

$$i = I_S \left( e^{\frac{qu}{kT}} - 1 \right)$$

式中 $I_S$ 为反向饱和电流,  $q$ 为电子的电量,  $k$ 为玻尔兹曼常量,  $T$ 为热力学温度。作换元 $U_T = \frac{kT}{q}$ 得

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

常温下( $T=300K$ ),  $U_T \approx 26mV$

**性质 1.3 (击穿电压)** 当外加电压过大时,  $PN$ 结会被击穿, 其中击穿又分可逆击穿与不可逆击穿。

- 可逆击穿(电流加以限制的情况下), 称产生可逆击穿时的电压为击穿电压 $U_{BR}$ 
  - 齐纳击穿<sup>4</sup>
  - 雪崩击穿<sup>5</sup>
- 不可逆击穿——热击穿: 不论是正接还是反接, 当 $PN$ 结消耗功率( $UI$ )过大时, 会产生大量的热量, 致使元件烧坏。

**定义 1.7 (PN结等效的电容)** 具体内容跳转到第四章

<sup>4</sup>在高掺杂的情况下, 因耗尽层宽度很窄, 不大的反向电压就可在耗尽层形成很强的电场, 而直接破坏共价键, 使价电子脱离共价键束缚, 产生电子-空穴对, 致使电流急剧增大。

<sup>5</sup>在掺杂浓度较低, 耗尽层宽度较宽的情况下, 当反向电压增加到较大数值时, 耗尽层的电场使少子加快漂移速度, 从而与共价键中的价电子相碰撞, 把价电子撞出共价键, 产生电子-空穴对。新产生的电子与空穴被电场加速后又撞出其它价电子, 载流子雪崩式地倍增, 致使电流急剧增加。

**定义 1.8 (半导体二极管)** 将PN结用外壳封装起来，并加上电极引线就构成了半导体二极管，简称二极管。

**案例 1** 二极管几种常见的结构

- 点接触型二极管(图(a))，适用于高频电路和小功率整流。
- 面接触型二极管(图(b))，适用于工频<sup>6</sup>大电流整流电路。
- 平面型二极管(图(c))，结面积较大的可用于大功率整流，结面积小的可作为脉冲数字电路中的开关管。

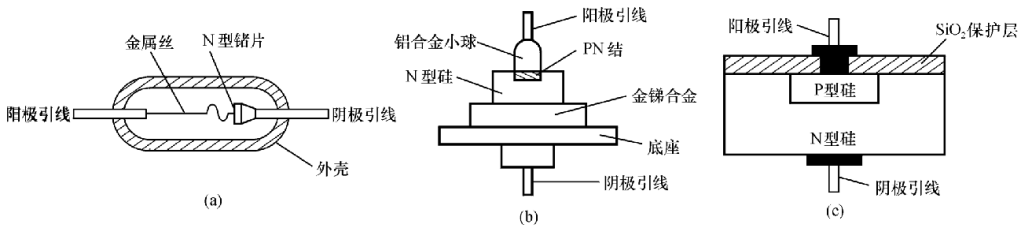


图 5: 二极管常见类型

**性质 1.4 (二极管的伏安特性)** 下面给出二极管的几个性质

- 二极管与PN结伏安特性的异同
  - 异
    - 二极管导通后认为 $U$ 近似不变(恒压)
    - 二极管具有导通压降<sup>7</sup>(通常硅管取 $0.7V$ ，锗管取 $0.2V$ )
  - 同：都具有死区电压<sup>8</sup>(通常硅管取 $0.5V$ ，锗管取 $0.1V$ )
- 二极管的伏安特性曲线如下,其中 $U_{(BR)}$ 是击穿电压， $I_S$ 是反向饱和电流， $U_{on}$ 是死区电压

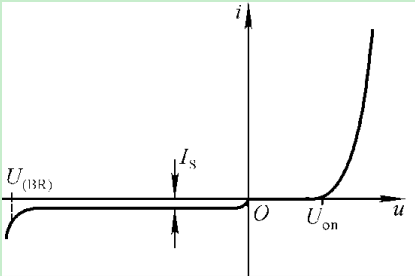


图 6: 二极管伏安特性曲线

- 温度对二极管伏安特性的影响：当温度升高时，二极管的正向特性曲线向左移(更容易导通)，反向特性曲线向下移(少子增多，反向饱和电流变大)
- 二极管的主要参数

<sup>6</sup>工频就是一般的市电(工业用电)频率，在我们国家是50赫兹。工频是很低的频率。我国通常叫的工频，就是指50HZ的交流电。

<sup>7</sup>即达到该电压后二极管彻底导通，电压不再变化

<sup>8</sup>死区电压，指的是即使加正向电压，也必须达到一定大小才开始导通，这个阈值叫死区电压

- 最大整流电流 $I_F$ :  $I_F$ 是二极管长期运行时所允许的最大正向平均电流, 若超过 $I_F$ 二极管可能被热击穿。
- 最大反向工作电压 $U_R$ :  $U_R$ 是二极管工作时所允许外加的最大反向电压, 若超过 $U_R$ 二极管可能因反向击穿而损坏。 $U_R$ 通常取击穿电压 $U_{(BR)}$ 的一半。
- 反向电流 $I_R$ :  $I_R$ 是二极管未击穿时的反向电流。 $I_R$ 越小说明二极管的单向导电性越好。 $I_R$ 对温度非常敏感。
- 最大工作频率 $f_M$ : 当电流频率超过 $f_M$ , 二极管将不能很好的体现单向导电性<sup>9</sup>。

**推论 (二极管的等效电路)** 二极管的等效电路可以概括为三直一交

- 理想模型: 导通时正向压降为0, 截止时反向电流为0。
- 恒压降模型: 只是将理想模型的导通点向右移了一个 $U_{on}$ 。(最常用)
- 折线模型: 在恒压降模型的基础上增加了一个 $r_0$ 直流电阻。(科研论文)
- 交流等效模型: 在静态工作点附近加一微变量, 其变化量用静态工作点的导数近似估计。

## 2 基本放大电路

## 3 集成运算放大电路

## 4 放大电路的频率响应

**定理 4.1** 定理theorem

**引理 4.2** 引理lemma

**性质 4.3** 性质proposition

**推论** 推论corollary

**定义 4.1** 定义definition

**猜想 4.1** 猜想conjecture

**例 4.1** 例example

**评论** 评论remark

**注** 注note

**案例 2** 案例case

---

<sup>9</sup>见定义1.7

# 5 放大电路中的反馈

## 5.1 反馈

**定义 5.1** 反馈：将输出量的一部分作用到输入回路，用来影响输入量。

**注** 反馈又有正负反馈、直交流反馈和本级级间反馈之分，这是显然的。

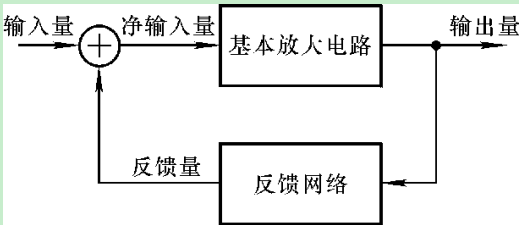


图 7: 反馈电路示意图

**注** 判断反馈类型的经验方法：

在输出端采样，一般为电压采样，在输出端上下方采样，一般为电流采样。

反馈点与输入端不同端为串联反馈，同端为并联反馈。

$\oplus - \oplus$ <sup>10</sup>常为串联， $\oplus + \ominus$ 常为并联

这是容易记忆的，只需判断是什么采样，是串联<sup>11</sup>或者并联反馈，再判断是正负反馈和交直流反馈，就可以组成名词：直流电压并联负反馈。

**性质 5.1 (关于负反馈)** 关于负反馈，它会使输出电阻产生变化，进而达到更好的产品要求。

- 电压负反馈：减小输出电阻  $\rightarrow$  增强带负载能力。
- 电流负反馈：增强输出电阻  $\rightarrow$  减小带负载能力。

## 5.2 方块图

下面我们来分析一下负反馈电路的一般情况，即方块图。

通过电路知识，我们容易得到以下几个等式

$$\dot{X}_i' = \dot{X}_i - \dot{X}_f$$

**定义 5.2 (基本放大电路的放大倍数)**

$$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i'} \tag{1}$$

**定义 5.3 (反馈系数)**

$$\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} \tag{2}$$

<sup>10</sup>这里的 $\oplus, \ominus$ 应理解为前者是输入量，后者是反馈量， $\oplus$ 是正的， $\ominus$ 是负的

<sup>11</sup>以电压方式相叠加，反之亦然

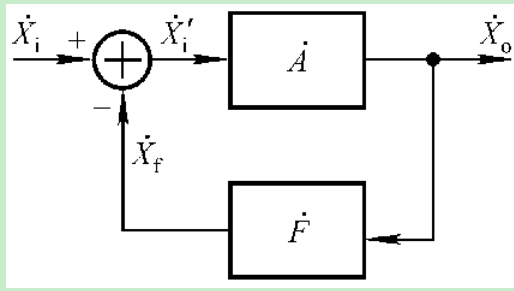


图 8: 方块图示例

定义 5.4 (负反馈放大电路的放大倍数(闭环放大倍数))

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} \quad (3)$$

定义 5.5 (电路的环路放大倍数)

$$\dot{A}\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_i'} \quad (4)$$

根据公式 (1)、(2)、(3)、(4)可得

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \quad (5)$$

在中频带, 公式 (1)、(2)、(3)、(4)、(5)均为实数分析 (5)可得

$AF > 0$	负反馈
$AF < 0, AF \neq -1$	正反馈
$AF = -1$	自激振荡
$A + F \gg 1$	深度负反馈

### 5.3 深度负反馈

根据深度负反馈定义, 我们可以得出这几个结论:

1. 深度负反馈在分析中忽略净输入量, 即  $\dot{X}_i = \dot{X}_f$ 。当为串联负反馈时, 忽略  $\dot{U}_i'$ , 即  $\dot{U}_i = \dot{U}_f$ 。当为并联负反馈时, 忽略  $\dot{I}_i'$ , 即  $\dot{I}_i = \dot{I}_f$ 。

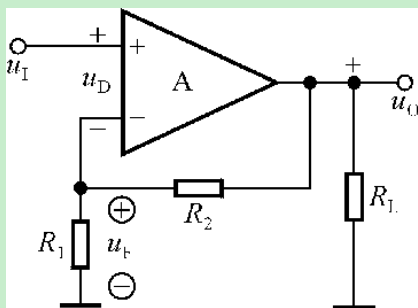
2. 下面分析四种负反馈的反馈系数

(a). 电压串联负反馈电路见图 9a, 容易得到

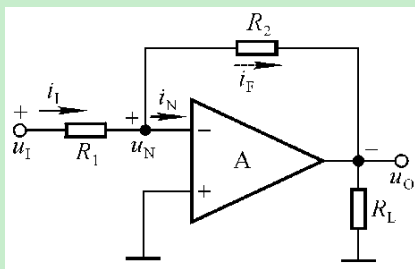
$$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

(b). 电压并联负反馈电路见图 9b, 容易得到

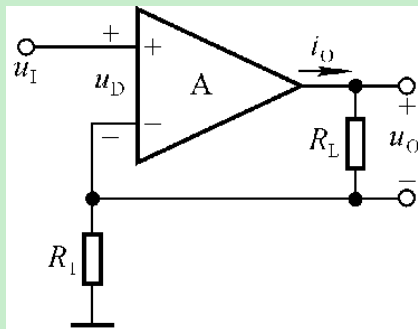
$$\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o} = -\frac{1}{R_2}$$



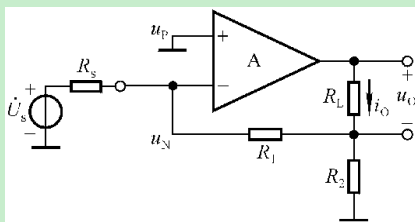
(a) 电压串联负反馈电路



(b) 电压并联负反馈电路



(c) 电流串联负反馈电路



(d) 电流并联负反馈电路

(c). 电流串联负反馈电路见图 9c，容易得到

$$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o} = R_1$$

(d). 电流并联负反馈电路见图 9d，注意到电流的分流跟电阻成反比，容易得到

$$\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o} = -\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

3. 下面分析四种负反馈的放大倍数，注意到反复使用了 1.

(a). 电压串联负反馈电路的放大倍数

$$\dot{A}_{uuf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_f} = \frac{1}{\dot{F}_{uu}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

(b). 电压并联负反馈电路的放大倍数

1

## 6 信号的运算与处理

## 7 波形的发生和信号的转换



## 8 功率放大电路

## 9 直流电源