

《模拟电子技术基础笔记》

死抠

版本: 2.10

更新: May 7, 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¹变厚，少子的漂移运动会使空间电荷区变薄。

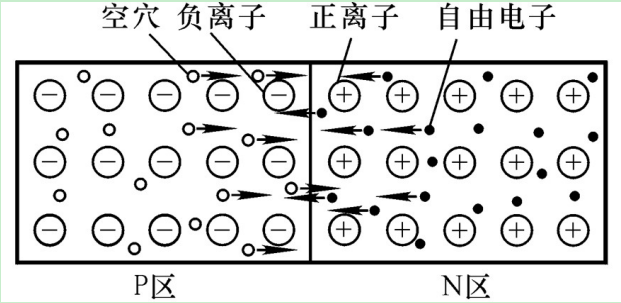


图 1: 扩散示意图

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。

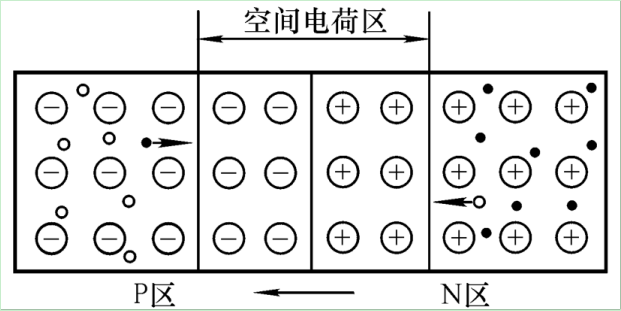


图 2: PN 结示意图

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²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³。由于少子的数量极少，因此认为 PN 结反接时为

¹见定义1.5

²见性质1.3

³少子的漂移运动产生的电流

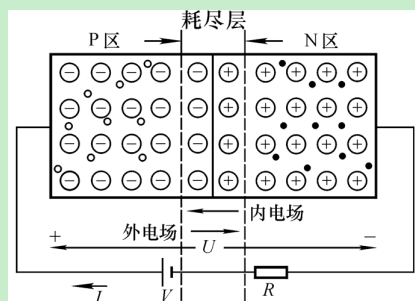


图 3: 正接示意图

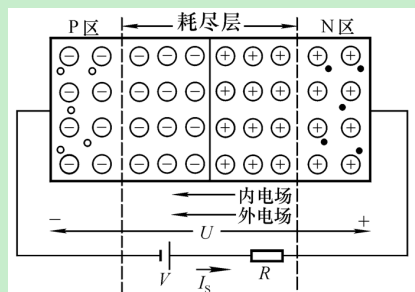


图 4: 反接示意图

截止状态且反向电流饱和。

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⁴
 - 雪崩击穿⁵
- 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

⁴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。

⁵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⁶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。

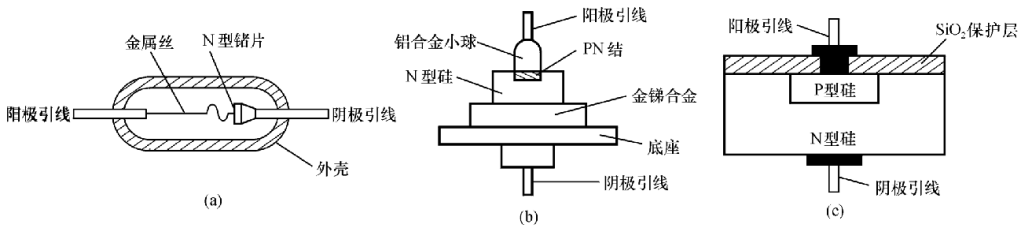


图 5: 二极管常见类型

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⁷ (通常硅管取 $0.7V$ ，锗管取 $0.2V$)
 - 同：都具有死区电压⁸ (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

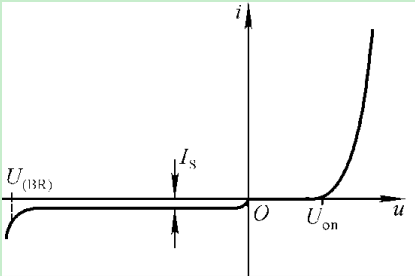


图 6: 二极管伏安特性曲线

- 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

⁶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。

⁷即达到该电压后二极管彻底导通，电压不再变化

⁸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⁹。

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*

5 放大电路中的反馈

⁹见定义1.7

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。

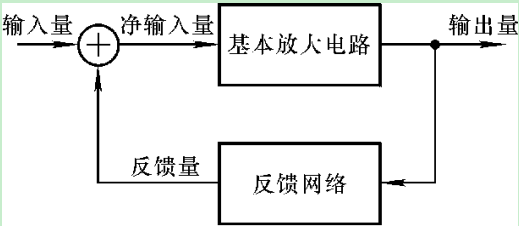


图 7: 反馈电路示意图

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。

$\oplus - \oplus$ ¹⁰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¹¹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。

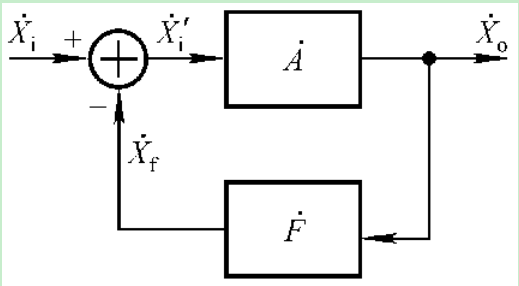


图 8: 方块图示例

通过电路知识，我们容易得到以下几个等式

$$X_i' = X_i - X_f$$

¹⁰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

¹¹以电压方式相叠加，反之亦然

定义 5.2 (基本放大电路的放大倍数)

$$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i'} \quad (1)$$

定义 5.3 (反馈系数)

$$\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} \quad (2)$$

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

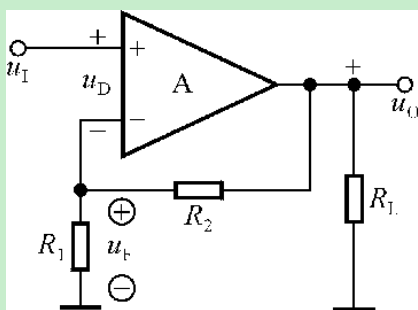
$$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

- (b). 电压并联负反馈电路见图 9b, 容易得到

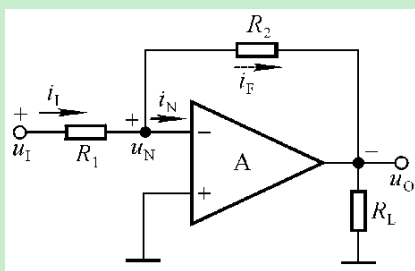
$$\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o} = -\frac{1}{R_2}$$

- (c). 电流串联负反馈电路见图 9c, 容易得到

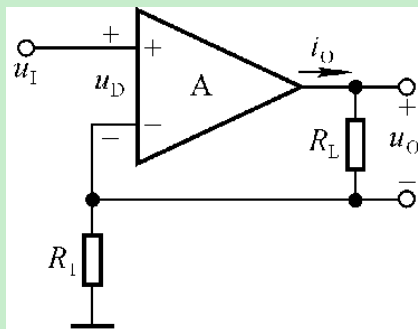
$$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o} = R_1$$



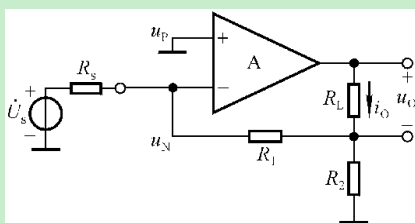
(a) 电压串联负反馈电路



(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

(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