

模拟电子技术基础

模拟电子技术基础

模拟电子技术基础

模拟电子技术基础

模拟电子技术基础

模拟电子技术基础

模拟电子技术基础

半导体基础

导体中自由移动的永远是电子
但电子依次填补空穴可以看作空穴移动。

故 载流子 $\begin{cases} \rightarrow \text{自由电子 } \ominus \\ \rightarrow \text{空穴 } \oplus \end{cases}$

本征半导体 \rightarrow 纯

\rightarrow 动态平衡

本征激发 \rightarrow 热激发 下产生 自由电子和空穴对

\downarrow
对于温度敏感

载流子浓度: $n_i = p_i = k_i T^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_{G0}}{2kT}}$

杂质半导体

N型半导体 (negative, 电子)

在硅中掺入五价元素, 自由电子浓度 \uparrow

此时, 自由电子为多数载流子, 称为多子.

空穴为少数载流子, 称为少子.

杂质原子 \rightarrow 施主原子 (提供电子)

P型半导体 (positive, 空穴)

在硅中掺入三价元素, 空穴浓度 \uparrow

☆ 多子与少子

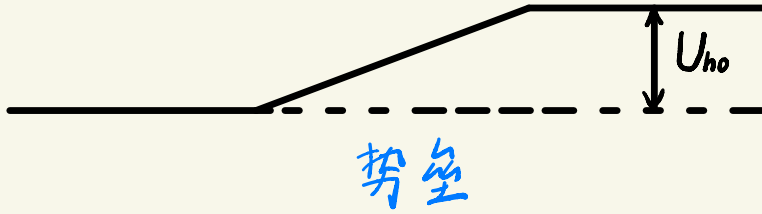
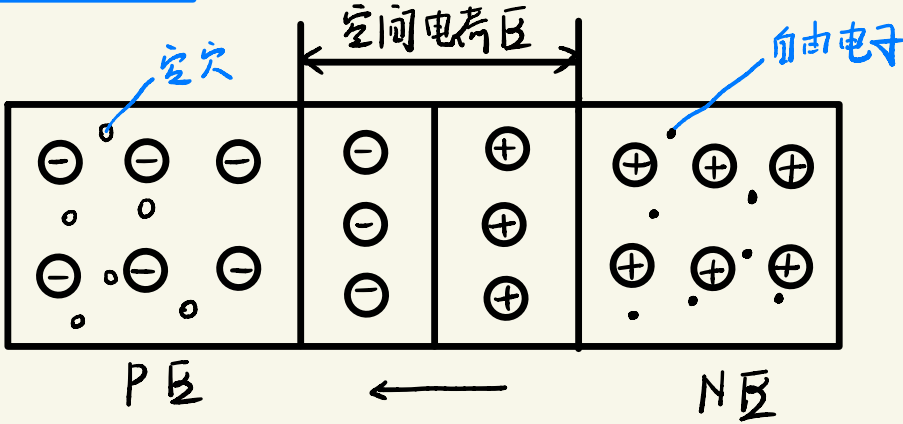
多子的浓度约等于掺杂原子的浓度

少子源于本征激发, 对温度敏感.

PN结

→ 具有单向导电性

PN结 $\begin{cases} \rightarrow \text{材料} \\ \rightarrow \text{不相同(掺杂不同)} \end{cases}$



扩散运动 → 由浓度差而产生的运动

漂移运动 → 在电场力作用下, 载流子的运动 (内电场)

耗尽层

→ 电源作用 → 正向电流

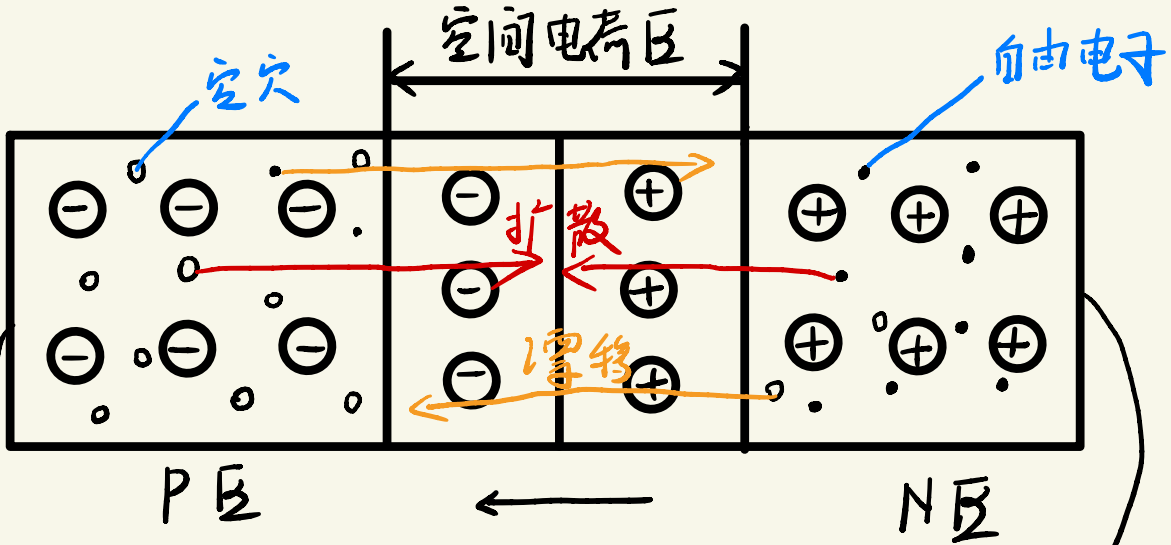
正向偏置: 扩散加剧, 漂移减弱

反向偏置: 阻扩散, 加漂移

→ 少子 → 小电流

深入理解机理

→ pH 理论 + 电离水解.



多子扩散, 少子漂移

正偏

结缩小

反偏

结扩大

PN结的电流方程

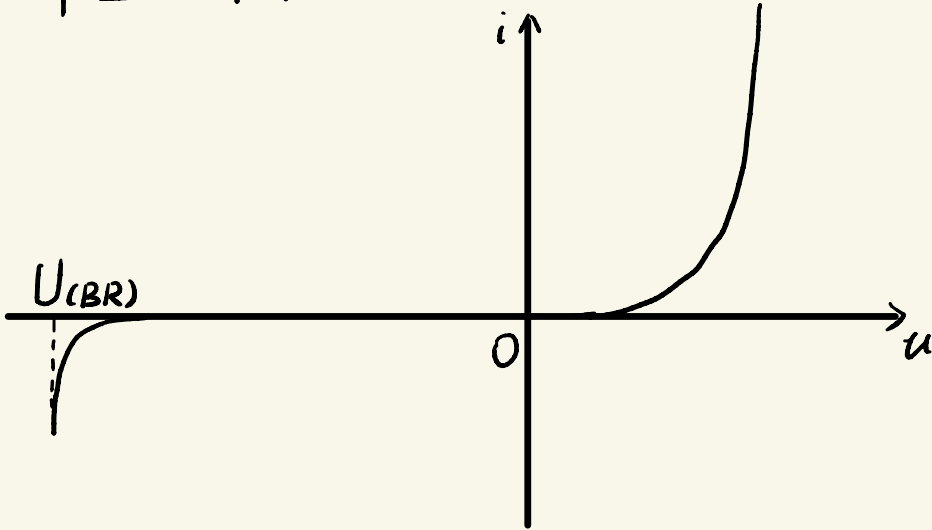
$$i = I_s (e^{\frac{qu}{KT}} - 1)$$

→ I_s 为反向饱和电流

$$i = I_s (e^{\frac{u}{U_T}} - 1)$$

U_T 表示温度的电压当量。

常温下, 即 $T = 300K$ 时, $U_T \approx 26mV$



反向时, 由于本征激发产生的电子发生漂移运动, 会存在一个温度敏感的微小电流 I_s

压降: Ge: $0.2V \sim 0.3V$

Si: $0.6V \sim 0.7V$

反向击穿

齐纳击穿 → 高掺杂, 击穿电压较低

↓
耗尽层宽度窄 → 电场强度大

本质上类似于电离.

雪崩击穿 → 低掺杂, 击穿电压较大

↓
类似加速器加速自由电子 → 核裂变或破坏共价键

本质上类似于核裂变

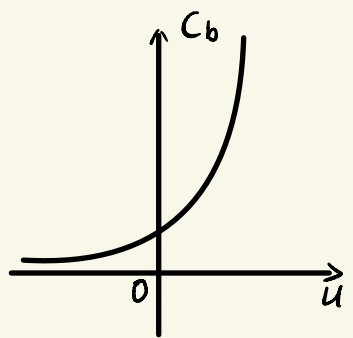
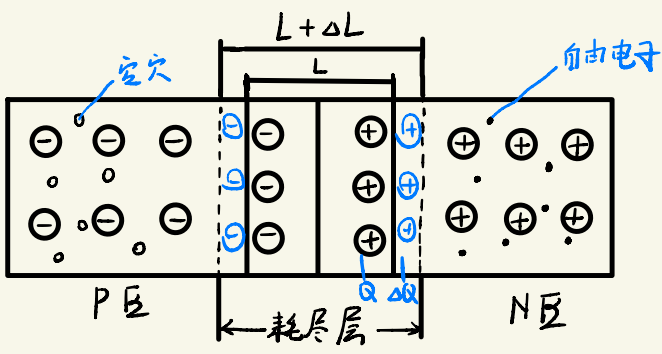
△ 击穿并不会直接损坏PN结, 而是大电流带来的热效应会使PN结损坏

↑ 齐纳击穿 $U \downarrow$ 雪崩击穿 $U \uparrow$

↳ 原子核强烈振动会中断加速, 故需更大电压.

PN结的电容效应 \rightarrow 广义电容, 即 U 影响 Q .

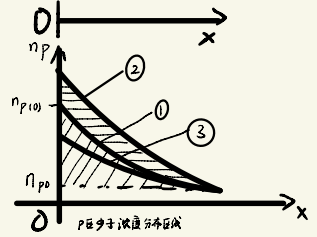
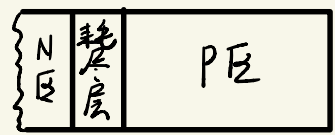
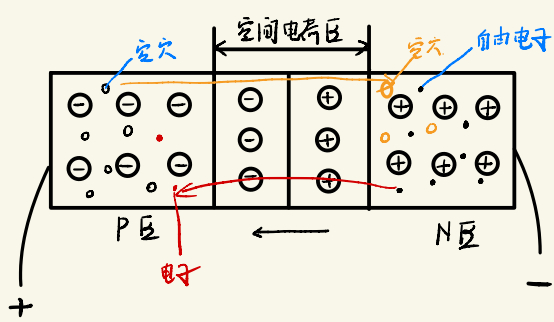
势垒电容 C_b \rightarrow 反向电压



非线性

耗尽层 宽度变化所等效的电容称为 势垒电容

扩散电容 C_d \rightarrow 正向电压



PN结正向偏置, 平衡态 扩散形成 非平衡态, 由耗尽层边界向外浓度由高到低衰减, 形成梯度差, 从而形成 扩散电流

扩散区内, 电荷的积累与释放过程与电容类似, 从而这种电容效应称为 扩散电容 \rightarrow 非线性

PN结的结电容

$$C_j = C_b + C_d$$

→ 一般很小, 以 pF 为单位

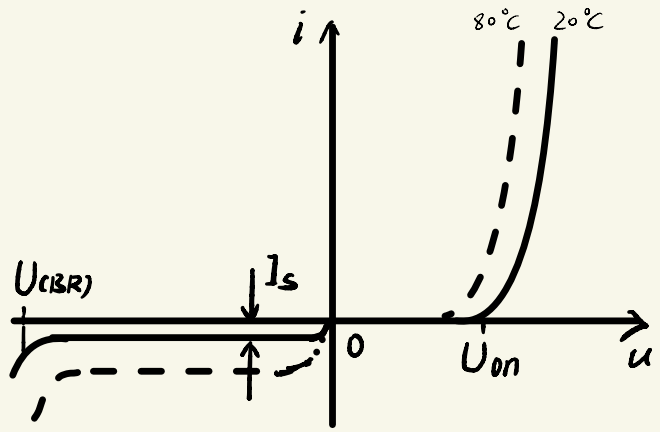
→ 只有在高频中考虑结电容的作用

半导体二极管

二极管的伏安特性

由于二极管存在半导体电阻和引线电阻, 以及表面漏电流,

正向偏置时, 端电压大于PN结压降, 电流小于PN结电流;
反向偏置时, 反向电流增大



在环境温度升高时, 二极管正向曲线左移, 反向曲线下移

主要参数:

最大整流电流 I_F

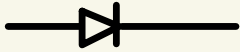
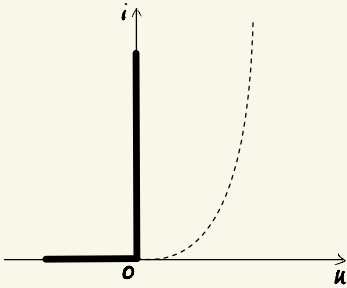
最高反向工作电压 U_R

反向电流 I_R

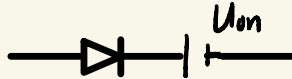
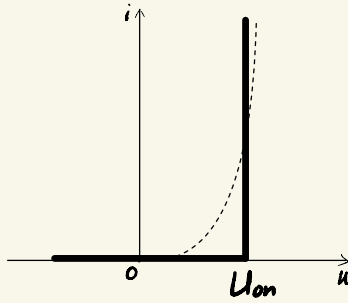
最高工作频率 f_M

二极管的等效电路

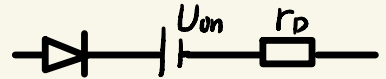
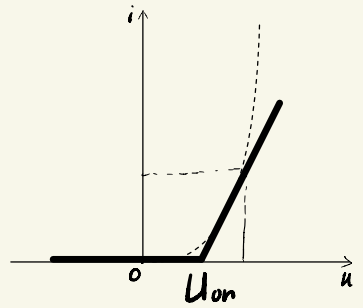
伏安特性折成化



理想二极管



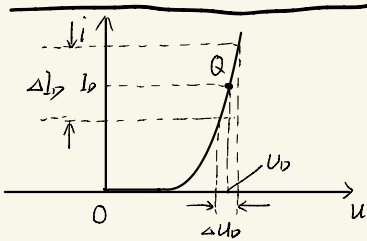
正向导通电压为常量



线性关系

微变等效电路 → 交流等效模型

$$r_D = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$



核心思想：将二极管等效成动态电阻 r_d

以直代曲

$$r_d = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D}$$

$$\frac{1}{r_d} = \frac{\Delta i_D}{\Delta u_D} \approx \frac{di_D}{du_D} = \frac{d[I_S(e^{\frac{u}{U_T}} - 1)]}{du} \approx \frac{I_S}{U_T} \cdot e^{\frac{u}{U_T}} \approx \frac{I_D}{U_T}$$

$$r_d \approx \frac{U_T}{I_D}$$

小信号分析法 \rightarrow 微变等效流程

1. 确定静态工作点的电流

$$I_D = \frac{U - U_{on}}{R}$$

2. 微变等效, 以直代曲.

$$r_d = \frac{U_T}{I_D}$$

3. 去直流, 算微变电流

$$i_d = \frac{U_i}{r_d + R}$$

4. 合并

$$i_D = i_d + I_D$$

晶体管

→ 双极型晶体管 (BJT)

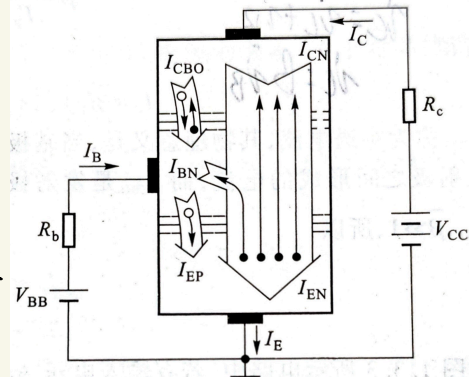
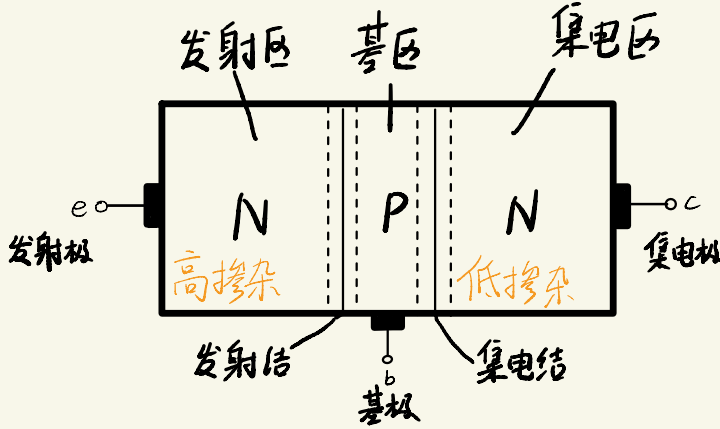
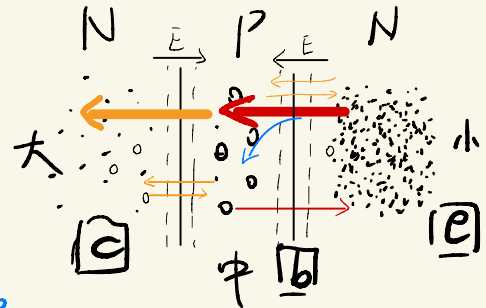


图 1.3.4 晶体管内部载流子运动示意图

核心特性：电流放大作用

机理分析：

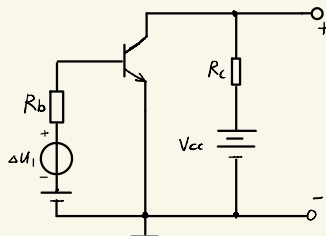
1. 发射结正偏，扩散形成 I_E
2. 扩散的基区中电子复合形成 I_B
3. 集电结反偏，漂移形成 I_C



$$I_E = I_B + I_C$$

I_C 与 I_B 成比例的原因在于

部分复合是 I_B 的来源，而未复合的部分是 I_C 来源，



→ 共射放大电路

共射电流放大系数

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CN}}{I_{BN}} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \approx \frac{I_C}{I_B} \quad (\text{直流})$$

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (\text{交流}) \quad \beta \approx \bar{\beta}$$

$I_{CEO} \rightarrow$ 穿透电流 $\rightarrow I_B = 0$ 时

$$\therefore I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$$

共基电流放大系数

$$\bar{\alpha} = \frac{I_{CN}}{I_E} = \frac{\bar{\beta}}{1 + \bar{\beta}}$$

$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

\rightarrow 通常 $\beta \gg 1$, 故 $\alpha \approx 1$

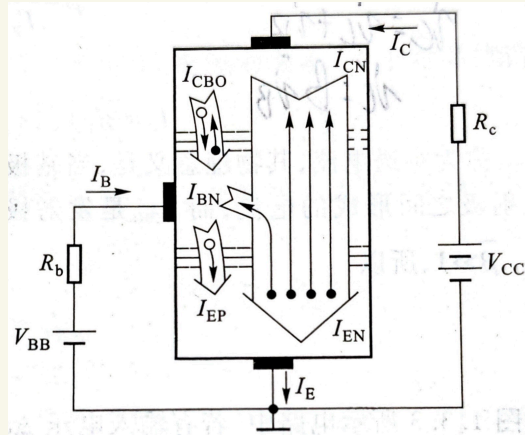


图 1.3.4

晶体管内部载流子运动示意图

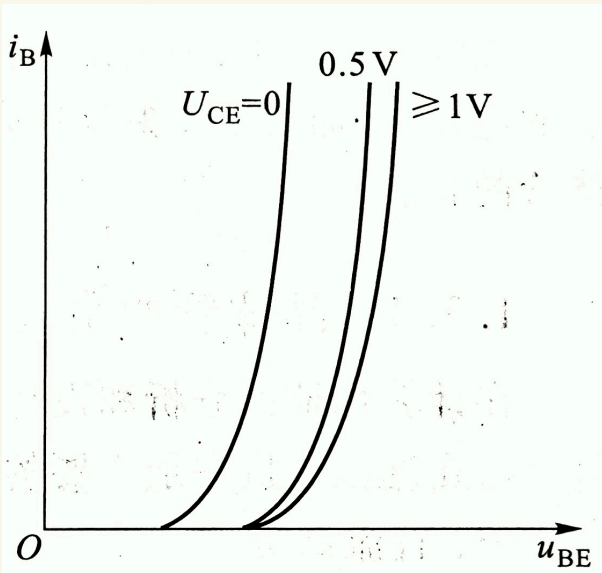
BJT 共射特性曲线

输入特性曲线

$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{U_{CE} = \text{常数}}$$

$U_{CE} = 0$ 的, 二极管曲线.

$U_{CE} \uparrow$ $i_C \uparrow$ 复合 \downarrow 若 i_C 不变, $u_{BE} \uparrow$



输出特性曲线

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{I_B = \text{常数}}$$

$U_{CE} \uparrow$ 集电极电场 \uparrow $i_C \uparrow$ 饱和 \rightarrow 放大

饱和: i_C 几乎不受 i_B 调控



主要靠浓度梯度驱动电子, I_B 可以不断增大, 但 I_C 几乎不变.

