第一章 半导体中的电子状态

主要公式总结

电子有效质量 $m_n^* = \frac{\hbar^2}{\frac{d^2E}{dk^2}}$ $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

半导体中电子的速度与能量的关系 $v = \frac{1}{\hbar}\frac{dE}{dk}$

能带极值附近电子速度 $v = \frac{\hbar k}{m_n^*}$

第三章 半导体中载流子电子统计分布

主要公式总结

一、费米分布函数$f(E) = \frac{1}{1+\exp\left(\frac{E-E_F}{k_0T}\right)}$

电子的波耳兹曼分布函数 $f_B(E) = \exp\left(\frac{E_F}{k_0T}\right)\exp\left(-\frac{E}{k_0T}\right)$

二、导带中电子浓度 $n_0 = N_C\exp\left(-\frac{E_C-E_F}{k_0T}\right)$

导带有效状态密度

价带中空穴浓度 $p_0 = N_v\exp\left(\frac{E_v-E_F}{k_0T}\right)$

价带有效状态密度

$$n_0p_0 = n_i^2$$

三、杂质半导体电子载流子浓度

1、杂质能级上的电子和空穴

①施主能级上的电子浓度$n_D = N_Df_D(E) = \frac{N_D}{1+\frac{1}{g_D}\exp\left(\frac{E_D-E_F}{k_0T}\right)}$

②受主能级上的空穴浓度$p_A = N_Af_A(E) = \frac{N_A}{1+\frac{1}{g_A}\exp\left(\frac{E_F-E_A}{k_0T}\right)}$

③电离施主浓度$n_D^+ = N_D - n_D = \frac{N_D}{1+g_D\exp\left(-\frac{E_D-E_F}{k_0T}\right)}$

④电离受主浓度$P_A^- = N_A - P_A = \frac{N_A}{1+g_A\exp\left(-\frac{E_F-E_A}{k_0T}\right)}$

2、n 性半导体电子载流子浓度

①低温弱电离区

$$n_0 = \left(\frac{N_D N_C}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{E_C - E_D}{2k_0T}\right)$$

$$E_F = \frac{E_C + E_D}{2} + \left(\frac{k_0T}{2}\right) ln\left(\frac{N_D}{2N_C}\right)$$

②中间电离区

③强电离区

$$E_F = E_C + k_0Tln\left(\frac{N_D}{N_C}\right)$$

全部电离$n_0 = N_D$

④过渡区

$$n_0 = N_D + p_0$$

$$n_0 = n_i \exp\left(-\frac{E_i - E_F}{k_0T}\right)$$

$p_0 = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{k_0T}\right)$ $\qquad$ $E_F = E_i + k_0Tarcsin\left(\frac{N_D}{2n_i}\right)$

⑤高温本征激发区

$$p_0 = n_0 = n_i$$

3、简并化条件

$$\begin{cases} E_C - E_F > 2k_0T & \text{非简并} \\ 0 < E_C - E_F \le 2k_0T & \text{弱简并} \\ E_C - E_F \le 0 & \text{简并} \end{cases}$$

第四章　半导体的导电性

主要公式总结

电流密度$J = \sigma E = nq\mu E$

电导率$\sigma = nq\mu$

半导体电导率$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$

n 型半导体电导率$\sigma = nq\mu_n$

p 型半导体电导率$\sigma = pq\mu_p$

本征半导体电导率$\sigma_i = n_i q(\mu_n + \mu_p)$

平均自由时间$\tau = \frac{1}{P}$

电子迁移率$\mu_n = \frac{q\tau_n}{m_n^*}$

空穴迁移率$\mu_p = \frac{q\tau_p}{m_p^*}$

第五章 非平衡载流子

主要公式总结

一、准费米能级

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{F_n}}{k_0T}\right) = n_0 \exp\left(\frac{E_{F_n} - E_F}{k_0T}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_{F_n} - E_i}{k_0T}\right)$$

$$p = N_C \exp\left(-\frac{E_{F_p} - E_v}{k_0T}\right) = p_0 \exp\left(\frac{E_F - E_{F_p}}{k_0T}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_{F_p}}{k_0T}\right)$$

$$np = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{F_n} - E_{F_p}}{k_0T}\right)$$

二、载流子的扩散

空穴的扩散电流密度

$$(J_p)_{扩} = -qD_p \frac{d \triangle p(x)}{dx}$$

电子的扩散电流密度

$$(J_n)_{扩} = qD_n \frac{d \triangle n(x)}{dx}$$

空穴的漂移电流密度

$$(J_p)_{漂} = qp\mu_p E$$

电子的漂移电流密度

$$(J_n)_{漂} = qn\mu_n E$$

电子的电流密度

$$J_n = (J_n)_{漂} + (J_n)_{扩}$$

空穴的电流密度

$$J_p = (J_p)_{漂} + (J_p)_{扩}$$

爱因斯坦关系

$$\frac{D_n}{\mu_n}=\frac{k_0T}{q}$$

$$\frac{D_p}{\mu_p}=\frac{k_0T}{q}$$

由以上可推出

非均匀半导体中同时存在扩散，漂移运动时电流密度

$$J=q\mu_p\left(pE-\frac{k_0T}{q}\frac{dp}{dx}\right)+q\mu_n\left(nE+\frac{k_0T}{q}\frac{dn}{dx}\right)$$

连续性方程（扩散、漂移、复合产生）

$$\frac{\partial p}{\partial t}=D_p\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}-\mu_pE\frac{\partial p}{\partial x}-\mu_p p\frac{\partial E}{\partial x}-\frac{\triangle p}{\tau}+g_p$$

第六章　pn 结

主要公式总结

1、费米能级随位置的变化和电流密度的关系

$$J_n=n\mu_n\frac{dE_F}{dx}\qquad J_p=p\mu_p\frac{dE_F}{dx}$$

上两式表示，电流密度一定时，载流子浓度大的地方，E_F随位置变化小，反之亦然。

2、pn 结接触电势差（证）

$$V_D=\frac{k_0T}{q}\ln\left(\frac{N_DN_A}{n_i^2}\right)$$

3、$x=x_n$处空穴扩散电流密度

$$J_p=\frac{qD_pp_{n0}}{L_p}\left[\exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right)-1\right]$$

$x=-x_p$处电子扩散电流密度

$$J_n=\frac{qD_nn_{p_0}}{L_n}\left[\exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right)-1\right]$$

通过 pn 结总电流

$$J=J_n+J_p=\left(\frac{qD_nn_{p_0}}{L_n}+\frac{qD_pp_{n_0}}{L_p}\right)\left[\exp\left(\frac{qN}{k_0T}\right)-1\right]$$

令$J_S=\frac{qD_nn_{p0}}{L_n}+\frac{qD_pp_{n0}}{L_p}$

则$J=J_s\left[\exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right)-1\right]$肖克莱方程式

4、①平衡突变性势垒区中电场强度是 x 的线性函数，沿 x 负方向，n 区指向 P 区，在 x=0 处电场最大

p^+n结：$\varepsilon_m=\frac{-qD_Dx_n}{\varepsilon_r\varepsilon_0}$

n^+p结：$\varepsilon_m=-\frac{qN_Ax_p}{\varepsilon_r\varepsilon_0}$

②突变结势垒宽度x_D

一般突变结：$X_D=\sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0}{q}(\frac{N_A+N_D}{N_AN_D}V_D)}$

$$X_n=\sqrt{2\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0}{q}\frac{N_A}{N_D(N_A+N_D)}V_D}$$

$$X_p=\sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0}{q}\frac{N_D}{N_A(N_A+N_D)}V_D}$$

p^+n结：$X_D=\sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0V_D}{qN_D}}=x_n$，$x_p\approx 0$

n^+p结：$X_D=\sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0V_D}{qN_A}}=x_p$，$x_n\approx 0$

注：当 pn 结上加有外加电压 V 时，将V_D变为V_D-V即可

③突变性势垒电容

单位面积势垒电容$C'_T=\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0}{X_D}$

第七章　金半接触

主要公式总结

1.金属和半导体的功函数。

$$W_m=E_0-(E_F)_m$$

$$W_S=E_0-(E_F)_S=E_0-E_C+E_C-(E_F)_S=\chi+E_n$$

2.接触电势差.

D 远大于原子间距

$$V_{ms}=\frac{W_s-W_m}{q}$$

接触电势差

D 减小直到可与原子间距比较 $V_{ms}+V_s=\frac{W_s-W_m}{q}$

表面势:半导体表面和内部的电势差

可可忽略的极限情形$V_S=\frac{W_S-W_m}{q}$

半导体一边的势垒高度

$$qV_D=-qV_S=W_m-W_s$$

金属一边的势垒高度

$$q\phi_{ns}=qV_D+E_n=-qV_s+E_n=W_m-W_s+E_n=W_m-\chi$$

第八章 半导体表面与 MIS 结构

主要公式总结

1、表面空间电荷层（P 型半导体）

①多子堆积状态（金属接负）

表面电场强度$E_S=\frac{-\sqrt{2}k_0T}{qL_D}\exp\left(\frac{-qV_S}{2k_0T}\right)$

表面电荷密度$Q_S=\frac{\sqrt{2}\varepsilon_r\varepsilon_0k_0T}{qL_D}\exp\left(-\frac{qV_S}{2k_0T}\right)$

空间电荷电容$C_S=\frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{\sqrt{2}L_D}\exp\left(-\frac{qV_S}{2k_0T}\right)$

②平带状态（外加电压$V_G=0, V_S=0$）

$$E_S=0$$

$$Q_S=0$$

$$C_{FBS}=\frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{L_D}$$

③多子耗尽状态（金属接正）

$$E_S=\frac{\sqrt{2}}{L_D}\left(\frac{k_0T}{q}\right)^{\frac{1}{2}}(V_S)^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_S=\frac{-\sqrt{2}\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{L_D}\left(\frac{k_0T}{q}\right)^{\frac{1}{2}}(V_S)^{\frac{1}{2}}=-qN_Ax_d$$

$$C_S = \left(\frac{N_A q \varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{2V_S}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{x_d}$$

④反型状态（金属接正且E_i下降到E_F以下）

$$qV_B = E_i - E_F$$

$V_S \geq 2V_B$为强反型的条件，当$V_S = 2V_B$时，$V_G = V_T$

$$V_B = \frac{k_0 T}{q} ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

临界强反型时

$$E_S = \frac{\sqrt{2}k_0 T}{qL_D}\left(\frac{qV_S}{k_0 T}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_S = -(4\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 q N_A V_B)^{\frac{1}{2}}$$

V_S比$2V_B$大很多时

$$E_S = \left(n_s \frac{2k_0 T}{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_S = -(2k_0 T \varepsilon_{rs}\varepsilon_0 n_s)^{\frac{1}{2}}$$

$$C_S = \frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{\sqrt{2}L_D}\left(\frac{n_s}{P_{p_0}}\right)^{\frac{1}{2}}$$

耗尽层宽度极大值$x_{dm} = \left(\frac{4\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 V_B}{qN_A}\right)^{\frac{1}{2}}$

2、MIS 结构的 C-V 特性.

外加电压$V_G = -\frac{Q_S}{C_0} + V_S$其中$C_0 = \frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{d_0}$为绝缘层的单位面积电容

MIS 结构电容$C = \frac{1}{\frac{1}{C_0}+\frac{1}{C_S}}$（相当于绝缘层电容与半导体空间电荷层电容的串联）

平带时$(V_G = 0)$，对理想 MIS，$V_S = 0$

$$\frac{(C)_{V_{S=0}}}{C_0} = \frac{C_{FB}}{C_0} = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_{r0}}{\varepsilon_{rs}}\left(\frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 k_0 T}{q^2 N_A d_0^2}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

3、①金属与半导体功函数对 MIS 结构$C - V$特效的影响

使 C-V 特性曲线沿电压轴平移，平移量

$$V_{ms} = \frac{W_S - W_m}{q}$$

为恢复平带状态所需加平带电压$V_{FB} = -V_{ms} = \frac{W_m - W_S}{q}$

②绝缘层中电荷对 MIS 结构 C-V 特性影响

同样使曲线平移

为抵消影响所需平带电压$V_{FB} = -\frac{1}{C_0}\int_0^{d_0} \frac{x\rho(x)}{d_0} dx$