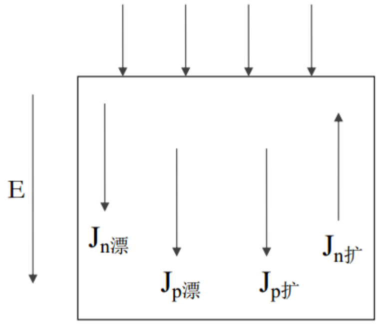
第五章

Q1：如图所示的半导体同时处在均匀光照和外加电场作用下。

（1）在图中分别标出所产生的各种电流及其方向。

（2）试写出半导体中产生的总电流密度详细表达式，并分别说明式中各项的物理意义。

解：



（1）　如右图

（2）

$$J=J_{漂}+J_{扩}$$

$$=J_{n漂}+J_{p漂}-J_{n扩}+J_{p扩}$$

$$=(nq\mu_n+pq\mu_p)E+qD_n\frac{d\Delta n}{dx}-qD_p\frac{d\Delta p}{dx}$$

$J_{n漂}$：电子漂移电流密度；　$J_{p漂}$：空穴漂移电流密度

$J_{n扩}$：电子扩散电流密度；　$J_{p扩}$：空穴扩散电流密度

Q3：证明非简并的非均匀 n 型半导体中的电子电流形式为 $J=n\mu_n\frac{dE_F}{dx}$。

证明：

$$j=(j_n)_{扩}+(j_n)_{漂}=nq\mu_nE+qD_n\frac{dn}{dx}$$

由于

$$n=N_c\cdot e^{-\frac{[E_c(0)-qV(x)]-E_F{}^n}{k_0T}}$$

则

$$\frac{dn}{dx}=n\cdot\frac{q\frac{dV}{dx}+\frac{dE_F{}^n}{dx}}{k_0T}$$

同时利用非简并半导体的爱因斯坦关系，所以

$$j = nq\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$= nq\mu_n(-\frac{dV}{dx}) + q\left(\mu_n \cdot \frac{k_0 T}{q}\right)\left(n \cdot \frac{q\frac{dV}{dx} + \frac{dE_F{}^n}{dx}}{k_0 T}\right)$$

$$= n\mu_n \cdot \frac{dE_F{}^n}{dx}$$

Q4：假设 Si 中空穴浓度是线性分布，在 2μm 内的浓度差为$1\times10^{16}cm^{-3}$，试计算空穴的扩散电流密度。

解：

已知：$\mu_p=500cm^2/(V\cdot s), k_0T=0.026eV, q=1.6\times10^{-19}C$

由题意可知：$\frac{d\Delta p(x)}{dx}=-\frac{1\times10^{16}cm^{-3}}{2\times10^{-4}cm}=-5\times10^{19}cm^{-4}$

又由爱因斯坦关系$\frac{D_p}{\mu_p}=\frac{k_0T}{q}$得$D_p=\mu_p\frac{k_0T}{q}$

所以空穴的扩散电流密度方程为

$$J_p=-qD_p\frac{d\Delta p(x)}{dx}=-q\cdot\frac{k_0T}{q}\mu_p\cdot\frac{d\Delta p(x)}{dx}$$

$$=-0.026\times1.6\times10^{-19}\times480\times(-5\times10^{19})=100A/cm^2$$

Q6：有一半导体样品，它的空穴浓度分布如图所示。

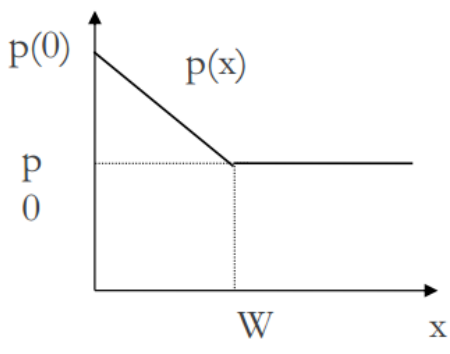
(1)求无外加电场时的空穴电流密度 $J_P(x)$ 表达式，并画出曲线；

(2)设空穴浓度分布保持不变，若使净空穴电流为零，计算所需自建电场的表达式；

(3)若 $p(0)/p_0=1\times10^3$，求 x=0 和 x=W 间的电势差。

解：

（1） 从图中可以看出空穴浓度 p(x)的表达式为：

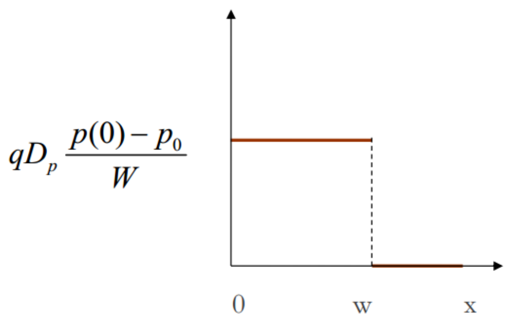


$$p(x)=\begin{cases}\dfrac{p_0-p(0)}{W}\cdot x+p(0),0<x<W\\ p_0,x\ge W\end{cases}$$

由题意可以看出空穴电流密度是由于存在浓度梯度导致
空穴扩散电流引起的。

又知道空穴扩散电流密度表达式为：$J_{\mathrm{p}}(\mathrm{x})=-qD_p\dfrac{\mathrm{d}p(\mathrm{x})}{\mathrm{dx}}$

所以得：$J_{\mathrm{p}}(\mathrm{x})=\begin{cases}qD_p\cdot\dfrac{p(0)-p_0}{W},0<x<W\\ 0,x\ge W\end{cases}$ 如下图。



（2） 外加电场后空穴电流密度有两部分组成：一部分是由于空穴存在浓度梯度扩散引起的扩散电流，另一部分是电场作用下的漂移电流。

此时：$J_p(\mathrm{x})=p(\mathrm{x})q\mu_{\mathrm{p}}E-qD_{\mathrm{p}}\dfrac{\mathrm{d}p(\mathrm{x})}{\mathrm{dx}}=0,$

$$\text{所以}E(x)=\frac{qD_p\dfrac{\mathrm{d}p(\mathrm{x})}{\mathrm{dx}}}{p(\mathrm{x})q\mu_{\mathrm{p}}}=\begin{cases}\dfrac{D_p}{p(\mathrm{x})\mu_{\mathrm{p}}}\cdot\dfrac{p_0-p(0)}{W}=\dfrac{D_p}{(\dfrac{\mathrm{p}_0-p(0)}{W}\cdot x+p(0))\cdot\mu_{\mathrm{p}}}\cdot\dfrac{\mathrm{p}_0-p(0)}{W},0<x<W\\ 0,x\ge W\end{cases}$$

（3） x=0 到 x=W 之间的电位差为：

$$V=\int_0^W -Edx=-\int_0^W\frac{D_p}{(\dfrac{\mathrm{p}_0-p(0)}{W}\cdot x+p(0))\cdot\mu_{\mathrm{p}}}\cdot\frac{\mathrm{p}_0-p(0)}{W}dx$$

$$=-\frac{D_p}{\mu_{\mathrm{p}}}\cdot\ln\left[\frac{\mu_{\mathrm{p}}}{D_p}\cdot(\frac{\mathrm{p}_0-p(0)}{W}\cdot x+p(0))\right]\Bigg|_0^W$$

$$=-\frac{D_p}{\mu_{\mathrm{p}}}\cdot\ln(\frac{\mathrm{p}_0}{p(0)})=0.026\times\ln(1\times10^3)\cong179.6\,\mathrm{mV}$$

Q8：光均匀照在电阻率为 6Ω•cm 的 n 型 Si 样品上，电子-空穴对的产生率为$1\times10^{20}cm^{-3}\cdot s^{-1}$，

样品寿命为 6μs。试计算光照前后样品的电导率。
解：

光照前：$\sigma_0=\dfrac{1}{\rho_0}=\dfrac{1}{6}\approx 0.167(\Omega^{-1}\cdot \mathrm{cm}^{-1})$；

光照后：$\Delta \mathrm{n}=\Delta \mathrm{p}=\mathrm{G}\tau=(1\times 10^{20})\times(6\times 10^{-6})=6\times 10^{14} cm^{-3}$

则$\sigma=\sigma_0+\Delta\sigma=\sigma_0+\Delta \mathrm{nq}\mu_n+\Delta pq\mu_p$

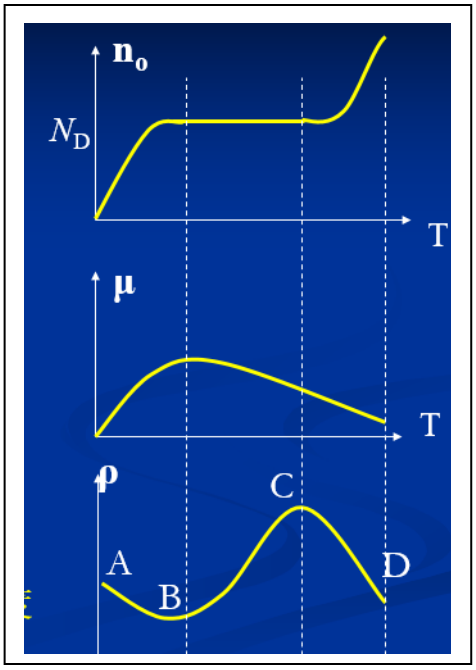
$=0.167+6\times 10^{14}\times 1.6\times 10^{-19}\times 1350+6\times 10^{14}\times 1.6\times 10^{-19}\times 480$

$=0.342(\Omega^{-1}\cdot \mathrm{cm}^{-1})$

Q9：分析中等掺杂的 Si 的电阻率 ρ 随温度 T 的变化关系。

答：$\mu_i=\dfrac{q}{m^*}\tau_i=\dfrac{A_i q}{m^*}N_i^{-1}T^{3/2}$ $\quad \mu_s=\dfrac{q\tau_s}{m^*}=\dfrac{A_s q}{m^*}T^{-3/2}$

设半导体为 n 型，有$\rho=\dfrac{1}{\mathrm{nq}\mu_\mathrm{n}}$，则 ρ 随温度 T 的变化关系曲线如右图：



AB：弱电离区：本征激发可忽略。温度升高，载流子浓度增加，杂质电离杂质散射起主导，$\mu_i=\dfrac{q}{m^*}\tau_i=\dfrac{A_i q}{m^*}N_i^{-1}T^{3/2}$故电阻率 ρ 随温度 T 升高下降；

BC：杂质全电离，以晶格振动散射为主。温度升高，载流子浓度基本不变。晶格振动散射起主导，$\mu_s=\dfrac{q\tau_s}{m^*}=\dfrac{A_s q}{m^*}T^{-3/2}$随温度升高迁移率下降，故电阻率 ρ 随温度 T 升高上升；

CD：本征激发为主。晶格振动散射导致迁移率下降，但载流子浓度升高更快，故电阻率 ρ 随温度 T 升高而下降。

Q10：对于电阻率为 1Ω•cm 的 P 型 Si 样品，少子寿命 τ_n=10μs，室温下光均匀照射，电子-空穴对的产生率是 $10^{20}\ \mathrm{cm}^{-3}\mathrm{s}^{-1}$。已知，

$\mu_p=417 cm^2/(\mathrm{V}\cdot \mathrm{s}), n_i=1.5\times 10^{10} cm^{-3}$。计算

(1)样品的电子浓度和空穴浓度；

(2)电子和空穴准费米能级 E_F^n、E_F^p 与平衡费米能级 E_F 的距离。

解：

(1）非平衡载流子浓度$\Delta n=\Delta p=g\tau=1\times10^{20}\times10\times10^{-6}=10^{15}cm^{-3}$

$\because \rho_0=\dfrac{1}{p_0 q\mu_p}\Rightarrow p_0=\dfrac{1}{q\mu_p\rho}=\dfrac{1}{1.6\times10^{-19}\times417\times1}\approx1.5\times10^{16}cm^{-3}$

$\therefore$ 空穴浓度$p=p_0+\Delta p\approx10^{15}+1.5\times10^{16}=1.6\times10^{16}\text{cm}^{-3}$;

电子浓度为$n=n_0+\Delta n=\dfrac{n_i^2}{p_0}+\Delta n=\dfrac{(1.5\times10^{10})^2}{1.5\times10^{16}}+10^{15}\approx10^{15}cm^{-3}$

（2）

$n=n_0\exp\left[(E_F^n-E_F)/k_0T\right]$

$\Rightarrow E_F^n-E_F=k_0T\cdot\ln(\dfrac{n}{n_0})=0.026\times\ln(\dfrac{10^{15}}{1.5\times10^4})\approx0.648eV;$

$p=p_0\exp\left[(E_F-E_F^p)/k_0T\right]$

$\Rightarrow E_F-E_F^p=k_0T\cdot\ln(\dfrac{p}{p_0})=0.026\times\ln(\dfrac{1.6\times10^{16}}{1.5\times10^{16}})\approx0.0017eV$

Q11：在某半导体材料中掺入施主的浓度为$N_D=10^{14}\text{cm}^{-3}$，受主的浓度为$N_A=7\times10^{13}cm^{-3}$；设室温下本征半导体的电阻率为60Ω•cm，电子和空穴的迁移率分别为$\mu_n=3800cm^2/(\text{V}\cdot\text{s}),\mu_p=1800cm^2/(\text{V}\cdot\text{s})$，若施加 2 V/cm 的电场强度，求流过样品的电流密度。

解：

由$n_i=\dfrac{1}{\rho q(\mu_n+\mu_p)}=\dfrac{1}{60\times1.6\times10^{-19}\times(3800+1800)}=1.86\times10^{13}cm^{-3},$

杂质浓度不高，所以可认为杂质全部电离并补偿，

则$N_{eff}=N_D-N_A=10^{14}-7\times10^{13}=3\times10^{13}cm^{-3};$为过渡区

$n_0=N_{eff}+p_0$

$n_0p_0=n_i^2$

$\Rightarrow p_0=0.89\times10^{13}cm^{-3}$

$n_0=\dfrac{n_i^2}{p_0}=\dfrac{(1.86\times10^{13})^2}{0.89\times10^{13}cm^{-3}}=3.89\times10^{13}cm^{-3};$

则电导率$\sigma=n_0q\mu_n+p_0q\mu_p=1.6\times10^{-19}\times(3.89\times10^{13}\times3800+0.89\times10^{13}\times1800)=0.026(\Omega\cdot\text{cm})^{-1}$

所以$J=\sigma\cdot E=0.026\times2=0.052A\cdot\text{cm}^{-2}$

测试题 1.

1） 300K时，补偿后

$$N_A^* = 5.2\times 10^{15} - 4.6\times 10^{15} = 6\times 10^{14} cm^{-3}$$

$$p_0 = N_A^* = 6\times 10^{14} cm^{-3}$$

忽略少子

$$\sigma = p_0 q\mu_p = 6\times 10^{14}\times 1.6\times 10^{-19}\times 500 = 0.048\text{西门子 / 厘米}$$

500K时，N_A^*与n_i可以比拟，为过渡区

$$N_A^* + n_0 = p_0$$

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

$$\Rightarrow n_0 = 2\times 10^{14} cm^{-3} \qquad p_0 = 8\times 10^{14} cm^{-3}$$

$$\mu_n(\mu_p) \propto T^{-3/2} \quad \mu_n(500K) = \mu_n(300K)\left(\frac{500}{300}\right)^{-3/2} = 557.8 cm^2/V\cdot s; \ \mu_p(500K) = \mu_p(300K)\left(\frac{500}{300}\right)^{-3/2} = 23$$

$$\sigma = n_0 q\mu_n + p_0 q\mu_p$$

$$= 2\times 10^{14}\times 1.6\times 10^{-19}\times 557.8 + 8\times 10^{14}\times 1.6\times 10^{-19}\times 232.4 = 0.0476\text{西门子 / 厘米}$$

(2)、$D_P = \frac{k_0 T}{q}\mu_p$

$$L_p = \sqrt{D_P\tau_p} = \sqrt{\frac{k_0 T}{q}\mu_p\tau_p}$$

$$J_p = -qD_P\frac{d\Delta p(x)}{dx}$$

$$\Delta p(x) = (\Delta p)_0\exp(-x/L_p)$$

$$\therefore J_p = -qD_P(\Delta p)_0[-1/L_p]\exp(-x/L_p) = \frac{qD_P(\Delta p)_0}{L_p}\exp(-x/L_p)$$

$x = 0$时，$J_{p0} = \frac{qD_P(\Delta p)_0}{L_p} = \frac{q\frac{k_0 T}{q}\mu_p(\Delta p)_0}{\sqrt{\frac{k_0 T}{q}\mu_p\tau_p}} = (\Delta p)_0\sqrt{qk_0 T\mu_p/\tau_p} = 1.05\times 10^{-3} A/cm^2$

4、热平衡状态下，无净电流 J=0

$$J = J_{漂} + J_{扩}$$
$$= J_{n漂} + J_{p漂} - J_{n扩} + J_{p扩}$$
$$= (nq\mu_n + pq\mu_p)E + qD_n \frac{d\Delta n}{dx} - qD_p \frac{d\Delta p}{dx}$$

$J_{n漂}$：电子漂移电流密度； $J_{p漂}$：空穴漂移电流密度

$J_{n扩}$：电子扩散电流密度； $J_{p扩}$：空穴扩散电流密度

无电场，所以漂移电流 J 漂=0

$$\therefore J_{扩} = qD_n \frac{dn(x)}{dx} - qD_p \frac{dp(x)}{dx} = 0$$

$$n(x) = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F(x)}{k_0T}\right) \qquad p(x) = N_v \exp\left(-\frac{E_F(x) - E_v}{k_0T}\right)$$

$$J_{扩} = qD_n \frac{dn(x)}{dx} - qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$
$$\therefore = qD_n n(x) \frac{1}{k_0T} \frac{dE_F(x)}{dx} + qD_p p(x) \frac{1}{k_0T} \frac{dE_F(x)}{dx} = 0$$

只能 $\frac{dE_F(x)}{dx} = 0$