半导体物理

课后作业06 参考解答

主讲人：蒋玉龙

微电子学楼312室，65643768

Email: yljiang@fudan.edu.cn

http://10.14.3.121

课后作业06

1、某P型半导体掺杂浓度N_A=1E16/cm^3，少子寿命τ_n=10μs，在均匀光的照射下产生非平衡载流子，其产生率g=1E18/cm^3•s。计算室温时光照情况下的费米能级并和原来无光照时的费米能级以能带图的形式进行比较。设本征载流子浓度n_i=1E10/cm^3.

[解]：没有光照时，平衡载流子空穴浓度为：

$$p_0 = N_A = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}}$$

$$\Rightarrow E_F = E_i - kT\ln\frac{N_A}{n_i} = E_i - 0.026\times\ln\frac{1\times10^{16}}{10^{10}} = E_i - 0.35(eV)$$

即费米能级在禁带中线下面0.35eV处。当在均匀光照下，产生的非平衡载流子为：

$$\Delta n = \Delta p = g\tau_n = 10^{18}\times10\times10^{-6} = 10^{13}/cm^3$$

$$n = n_0 + \Delta n = \frac{n_i^2}{N_D} + \Delta n = 10^4 + 10^{13} \approx 10^{13}/cm^3$$

课后作业06

$$n = n_i e^{\frac{E_F^n - E_i}{kT}}$$

$$\Rightarrow E_F^n - E_i = kT\ln\frac{n}{n_i} = 0.026 \times \ln\frac{10^{13}}{10^{10}} = 0.18eV$$

$$p = p_0 + \triangle p = (10^{16} + 10^{13})/cm^3 \approx 10^{16}/cm^3$$

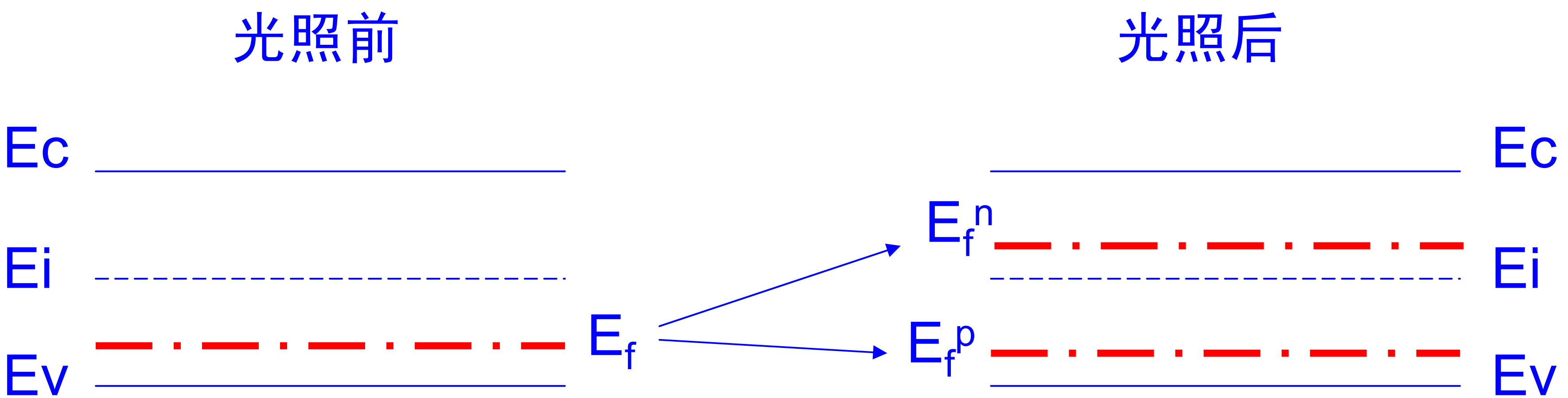
$$p = n_i e^{\frac{E_i - E_F^p}{kT}}$$

$$\Rightarrow E_i - E_F^p = kT\ln\frac{p}{n_i} = 0.026 \times \ln\frac{10^{16}}{10^{10}} = 0.36eV$$

从上面的计算可以看出，$E_F{}^n$在Ei之上， $E_f{}^p$在Ei之下。光照情况下空穴的准费米能级和光照前的费米能级几乎重合，但是电子的就差远了，这是由于是P型半导体中空穴是多数载流子，非平衡空穴相对于平衡空穴的数目来说可以忽略，而对电子来说非平衡电子数量的影响就相当显著了。

课后作业06

从能带图上看，费米能级的变化情况更加直观



课后作业06

2、在一块p型半导体中，有一种间接复合中心，小注入时被这些中心俘获的电子发射回导带的过程和它与空穴复合的过程有相同的几率。计算这种复合中心的能级位置，并说明它能否成为有效的复合中心。（假设电子俘获系数和空穴俘获系数相等）

[解]：电子产生率$=s_-\bullet n_t$，$s_-=r_n n_1$ 为电子激发几率。其中$n_1=N_c e^{-\frac{E_c-E_t}{kT}}$

Et为复合中心能级。该中心空穴俘获率为$r_p p n_t$

俘获的电子发射回导带的过程和它与空穴复合的过程有相同的几率意味着：$r_p p=r_n n_1$　　已知$r_p=r_n \rightarrow p=n_1$

在小注入条件下,由 $n_1=p=p_0+\Delta p$　　可得：$n_1\approx p_0$　　即：

$$N_c e^{\frac{E_t-E_c}{kT}}=N_v e^{\frac{E_v-E_F}{kT}} \Rightarrow E_t=E_c+E_v-E_F-kT\ln\frac{N_c}{N_v}$$

$$\because E_i=\frac{1}{2}(E_c+E_v-kT\ln\frac{N_c}{N_v}) \Rightarrow E_t=2E_i-E_F$$

课后作业06

又可以写成： $E_t - E_i = E_i - E_F$

一般室温下P型半导体的E_F远在E_i之下，故E_t远在E_F之上；有效复合中心必须是深能级，所以Et不是有效的复合中心。

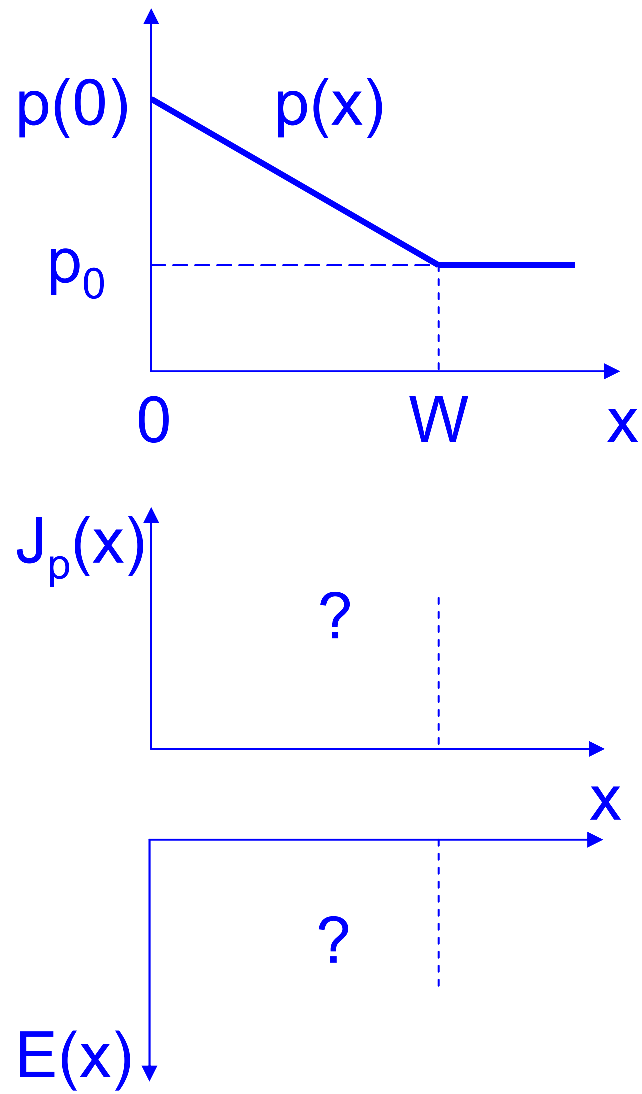
课后作业06

3、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，并画出曲线；

（3）若$p(0)/p_0$=1E3，求x=0和x=W间的电势差。



课后作业06

[解]（1）从图中我们可以得出空穴浓度p(x)的表达式：

当0<x<W时 $p(x) = -\dfrac{p(0)-p_0}{W}x + p(0)$

当x ≧ W时 $p(x) = p_0$

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引起的。

又知道空穴扩散电流密度表达式为 ：

$$J_p(x) = -qD_p\frac{dp}{dx}$$

$$\Rightarrow J_p(x) = qD_p\frac{p(0)-p_0}{W} \qquad 0<x<W$$

$$J_p(x) = 0 \qquad x \geq W$$

课后作业06

（2）外加电场后空穴电流密度有两部分组成：
一是电场下的漂移电流，另一部分是由于空穴存在浓度梯度扩散引起的。此时：

$$J_p(x) = \mathrm{p(x)q}\mu_{\mathrm{p}}\mathrm{E} - qD_p\frac{dp}{dx}$$

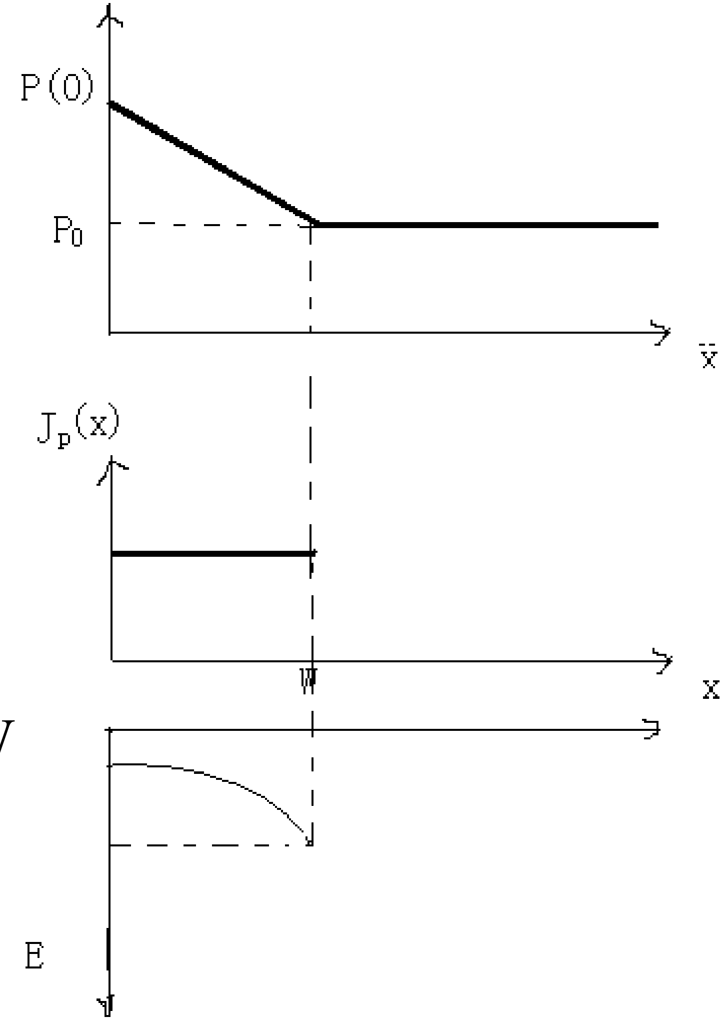
要使经空穴电流为0则：

$$J_p(x) = 0 \;\Rightarrow\; \mathrm{E}(x) = \frac{qD_p\dfrac{dp}{dx}}{\mathrm{p(x)q}\mu_{\mathrm{p}}}$$

$$\therefore \qquad \mathrm{E}(x) = \frac{1}{\mathrm{p(x)}}\frac{D_p}{\mu_{\mathrm{p}}}\frac{p_0 - p(0)}{W} \qquad 0<x<W$$

$$\mathrm{E}(x) = 0 \qquad x>W$$

曲线如图所示。



课后作业06

（3）x=0到 x=W之间的电位差为：

$$V=\varphi_W-\varphi_0$$

又知道： $\mathrm{E}=-\dfrac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{dx}}$

所以： $$\mathrm{V}=\int_0^{\mathrm{w}}-\mathrm{Edx}=-\int_0^{\mathrm{w}}\frac{1}{\mathrm{p(x)}}\frac{D_p}{\mu_\mathrm{p}}\frac{p_0-p(0)}{W}\mathrm{dx}$$

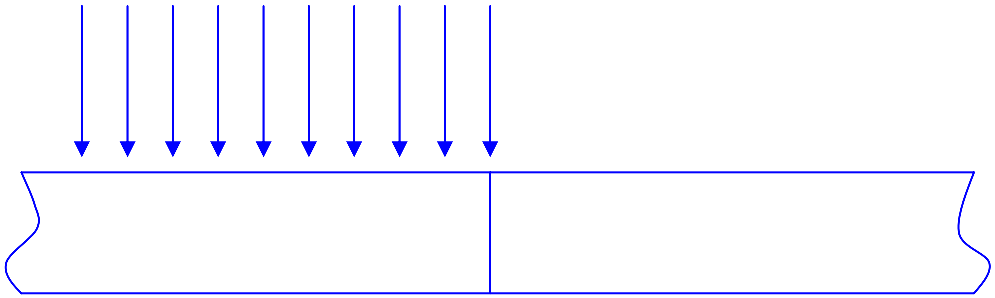
$$=-\frac{D_p}{\mu_\mathrm{p}}\ln\left[\frac{p_0-p(0)}{W}\mathrm{x}+p(0)\right]\Big|_0^{\mathrm{w}}$$

$$=-0.026\times\ln\frac{p_0}{p(0)}$$

又 $\dfrac{p(0)}{p_0}=10^3\Rightarrow \mathrm{V}\approx 179\mathrm{mV}$

课后作业06

4、设一均匀n型Si样品，在左半部用一稳定的光照射（如图所示），均匀产生电子—空穴对，产生率为g_0。若样品足够长，计算稳态时样品两边的空穴浓度分布，并画出分布图。



课后作业06

[解]：由题意连续性方程可写为：

$$\frac{\partial p}{\partial t}=D_p\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}-\frac{\triangle p}{\tau_p}+g_0 \qquad （x\le 0)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t}=D_p\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}-\frac{\triangle p}{\tau_p} \qquad （x\ge 0)$$

此处假设有光照和没有光照的左右两半部分的分界处为x=0.

稳态时 $\frac{\partial p}{\partial t}$ =0，故有：

$$D_p\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}-\frac{\triangle p}{\tau_p}+g_0=0 \qquad （x\le 0)$$

$$D_p\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}-\frac{\triangle p}{\tau_p}=0 \qquad （x\ge 0)$$

解上面的式子可得 ：

$$\mathrm{p(x)=p_0}+g_0\tau_p+Ae^{-\frac{x}{L_p}}+Be^{\frac{x}{L_p}} \qquad （x\le 0)$$

$$\mathrm{p(x)=p_0}+A'e^{-\frac{x}{L_p}}+B'e^{\frac{x}{L_p}} \qquad （x\ge 0) \qquad (L_p=\sqrt{\tau_p D_p})$$

课后作业06

在x→∞时p(x)不能无穷大所以：

在x≤0区域中　　　　A=0

在x＞0区域中　　　　B’=0

又知道p(x)为连续函数，故 $p(0-)=p(0+)$　$\left(\frac{dp}{dx}\right)_{x=0-} = \left(\frac{dp}{dx}\right)_{x=0+}$

根据上面的条件可得：

$$\frac{B}{L_p} = -\frac{A'}{L_p} \Rightarrow B=-A'$$

$$p(0-)=p(0+) \Rightarrow A'=g_0\tau_p + B=g_0\tau_p - A'$$

$$A'=\frac{1}{2}g_0\tau_p,\quad B=-\frac{1}{2}g_0\tau_p$$

$$p(x)=p_0+g_0\tau_p-\frac{1}{2}g_0\tau_p e^{\frac{x}{L_p}} \quad (x \le 0)$$

$$p(x)=p_0+\frac{1}{2}g_0\tau_p e^{-\frac{x}{L_p}} \quad (x \ge 0)$$