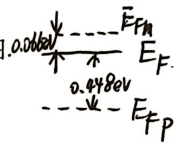
二、(7 分)

Z 同学自制了一块电阻率为 $2.5\,\Omega\cdot\mathrm{m}$ 的均匀掺杂的 n 型材料. 室温下，当材料均匀受到光照射时，在其材料体内均匀产生 $\Delta n = \Delta p = 2\times10^{14}\,\mathrm{cm^{-3}}$ 的非平衡载流子.

1. 给出热平衡状态的判据式.
2. 求光照下该材料电阻率的变化量 $\Delta\rho$.
3. 求受光照时该材料电子和空穴的准费米能级相对于原先其费米能级的位置，并做示意图.



1、 $np = n_i^2$

2. $\Delta\sigma = \Delta n q\mu_n + \Delta p q\mu_p \approx 0.0625\,\Omega^{-1}\cdot cm^{-1} = 6.25\,\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$

$\rho_0 = 2.5\,\Omega\cdot m \Rightarrow \sigma_0 = 0.4\,\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$　　$\therefore \sigma_1 = 6.65\,\Omega^{-1}\cdot m^{-1} \Rightarrow \rho_1 = 0.15\,\Omega\cdot m$

$|\Delta\rho| = 2.35\,\Omega\cdot m$

3. $\sigma_0 = n_0 q\mu_n \Rightarrow n_0 = 1.72\times10^{13}\,cm^{-3}$

$p_0 = n_i^2/n_0 = 6.05\times10^{6}\,cm^{-3}$

而 $\begin{cases} E_{Fn} - E_F = k_0T\ln\dfrac{n_0+\Delta n}{n_0} = 0.066eV \\ -(E_{Fp} - E_F) = k_0T\ln\dfrac{p_0+\Delta p}{p_0} = 0.448eV \end{cases}$

三、(7 分)

Z 同学取用施主浓度为 $4.0\times10^{15}\,\mathrm{cm^{-3}}$ 的 n 型硅与 Jack 提供的镍形成金属-半导体接触. 已知金属镍的功函数为 4.5 eV，硅的电子亲和能为 4.05 eV. 不考虑表面态的影响，环境温度为 30 °C.

1. 请做相关计算帮助 Z 同学判断理想状态下是否形成欧姆接触，并画出该金-半接触的能带图.
2. 求施加 0.4 V 反相偏压后的肖特基势垒，并接着问题 1 画出此时的能带图.

1. $+(E_F - E_c) = kT\ln\frac{n_0}{N_c} = kT\ln\frac{N_D}{N_c}$

$E_c - E_F = 0.23eV = E_n$

$\therefore W_s = \chi + E_c - E_F = 4.28eV < W_m = 4.5eV$

对于 n-Si，会形成阻挡层

2. Schottky 势垒不随偏压变化

$q\phi_{ns} = W_m - \chi = 0.45eV$

不偏压：$V_D = 0.45 - 0.23 = 0.22V$

偏压后，Si侧势垒 $V_D - (-0.4V) = 0.62V$

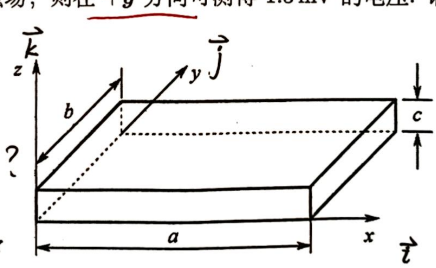
（不需掌握准费米能级）

四、(6 分)

Jack 有一半导体样品交由 Z 同学检测其导电类型，已知该材料主要由一种载流子导电. Z 同学截取了如图所示厚度 $c = 0.8\,\mathrm{mm}$ 的小片做实验. 室温下，Z 同学在 x 方向施加了 1.5 V 电压，并测得电流 12mA. 若同时在 z 方向施加 $0.1\,\mathrm{Wb/m^2}$ 的磁场，则在 $+y$ 方向可测得 1.3 mV 的电压. 请帮助 Z 同学分析：

表述不清

1. 材料是什么导电类型?
2. 载流子的浓度和迁移率是多少?



1.

$\vec{\mathcal{E}}_x$	$\vec{B}_z$	$\vec{\mathcal{E}}_y$	类型
$+\vec{i}$	$+\vec{k}$	$+\vec{j}$	p
$+\vec{i}$	$+\vec{k}$	$-\vec{j}$	n
$+\vec{i}$	$-\vec{k}$	$+\vec{j}$	n
$+\vec{i}$	$-\vec{k}$	$-\vec{j}$	p

对 $-\vec{i}$，上述相反

2. $\mathcal{E}_y = R_H J_x B_z$?

p: $\mathcal{E}_y = \frac{1}{pq}J_x B_z$

$J_x = \frac{I_x}{bc}$

$\therefore p = \frac{I_x}{\mathcal{E}_y\cdot b}\frac{B_z}{qc} = \frac{I_x B_z}{V_y qc} = 7.20\times10^{21}\ m^{-3}$

$= 7.20\times10^{15}\ cm^{-3}$

五、(12 分)

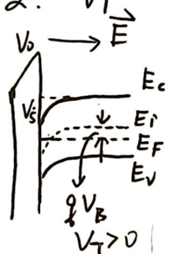
Jack 利用题目四中 Z 同学测定的样品制作得到一理想 MIS 结构，测定绝缘层的等效氧化硅厚度为 t_{ox}．在不同的外加电压 V_G 下，半导体表面状态分别出现积累、耗尽和反型 3 种类型．

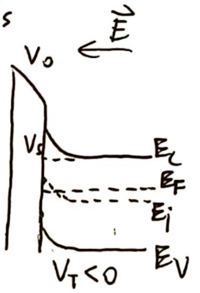
1. 分析当出现上述 3 种状态时所加的外加电压 V_G 的方向并画出相应的能带图．

2. 若室温 T 下，半导体本征载流子浓度为 n_i，相对介电常数为 ε_r，体内禁带中央与费米能级的差为 qV_B．尝试给出开启电压 V_T 的表达式，并画出 $V_G = V_T$ 时的能带图与电荷分布 $Q(x)$．

1. 略

2. $V_T = V_0 + V_s$





$V_s = 2V_B$　　$V_B = kT\ln\frac{N}{n_i}$

$V_0 = \frac{Q}{C_0} = \frac{Q\cdot t_{ox}}{\varepsilon_{r0}\cdot\varepsilon_0}$

Q主要为空间电荷

$D = \varepsilon_{rs}E_{rs} = \varepsilon_{r0}E_0$

$Q = qNx$

$V_s = \frac{qN}{2\varepsilon_r\varepsilon_0}x^2$ $\Rightarrow Q = \sqrt{4\varepsilon_r\varepsilon_0 qNV_B}$

六、(16 分)

Jack 有一个硅材料的理想 p^+n 突变结，两边杂质浓度分别为 $N_A = 10^{17}\,cm^{-3}$，$N_D = 2\times 10^{15}\,cm^{-3}$．假设材料处在室温 $T = 300\,K$ 下，空穴寿命 $\tau_p = 1\,\mu s$，电子寿命 $\tau_n = 2\,\mu s$．

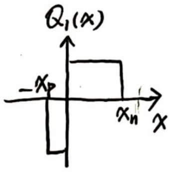
1. 平衡状态下，计算并绘制该 p^+n 结的内建电场分布 $\mathscr{E}_1(x)$ 与空间电荷分布 $Q_1(x)$，并画出的能带图．

2. 给该 p^+n 结外加正向偏压 $V = 0.5\,V$，计算此时的势垒宽度 X_D，并尝试给出 n 型扩散区少数载流子的连续性方程式（二阶常系数微分方程形式）与相应的边界条件．

3. 给该 p^+n 结外加反向偏压 $V = -0.3\,V$，测得反向电流 $I_3 = 10\,pA$．请接着问题 1 画出此时的能带图与空间电荷分布 $Q_3(x)$，并计算问题 2 中正向电流 I_2 的大小．

1. $V_{bi} = \frac{1}{q}(E_F^n - E_F^p)$

$= \frac{kT}{q}\ln\frac{N_cN_v}{n_i^2} = 0.732\,V$

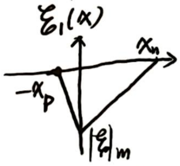


$X_D \approx x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0 V_{bi}}{qN_D}} = 7.0\times10^{-5}\,cm$

(70 nm)

$x_nN_D = x_pN_A$

$\Rightarrow x_p \approx 1.4\times10^{-6}\,cm$　(1.4 nm)



$|\mathscr{E}|_m = \frac{qN_Ax_p}{\varepsilon_r\varepsilon_0} = \frac{qN_Dx_n}{\varepsilon_r\varepsilon_0} = 2.21\times10^4\,V/cm$

$\mathscr{E}(x)$表达式略

2. $X_D \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0(V_{bi}-V)}{qN_D}} = 3.9\times10^{-5}\,cm$

n型空穴扩散：$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q}\frac{\partial}{\partial x}J_p - \frac{\Delta p}{\tau_p} = 0$ $\Big\}\Rightarrow D_p\frac{d^2}{dx^2}P_n - \frac{P_n - P_{n0}}{\tau_p} = 0$

而 $J_p = qS_p = q(-D_p\frac{\partial p}{\partial x})$　　其中 $\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}$

边界条件：对 $P_n(x)$

$P_n(+\infty) = P_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D} = 5.2\times10^4\,cm^{-3}$

$P_n(x_n) = P_{n0}\exp(\frac{qV}{kT})$　$V = 0.5V$

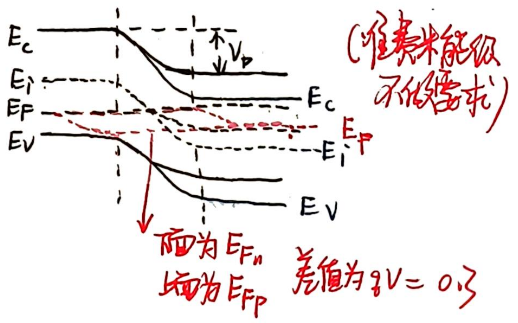
$= 1.31\times10^{13}\,cm^{-3}$

3. $I = I_s(\exp(\frac{qV}{kT}) - 1)$

$I_s = 10pA = I_3 \Rightarrow I_2 = I_3(\exp(\frac{0.5}{0.026}) - 1)$

$\approx 2.5\,mA$

空间电荷分布略



七、(12 分)

对于一杂质浓度为 $N_A = 2.5\times10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ 的 p 型硅，制作形成一金属-SiO_2-Si 的 MOS 结构．设处在室温环境下，氧化层厚度 $d_0 = 0.2\mu\mathrm{m}$，金属功函数与硅相同，不考虑界面态影响．

1. 求半导体表面恰出现反型层时，空间电荷层中单位面积的电量．
2. Z 同学测量发现，开启电压数值小于理想模型计算结果．若差值 $|\Delta V_T| = 1.5\,\mathrm{V}$，请分析氧化层中电荷情况．

表述不清

3. Z 同学利用离子注入技术在二氧化硅层中的特定位置注入固定离子，注入离子电荷浓度分布 $\rho(x) = kx^{-1}e^{-x/d_0}\sin(\pi x/d_0)$，使得该 MOS 结构平带电压恰为零 ($x\in[0,d_0]$，$x=0$ 对应金属-氧化层界面)．试计算常数 $|k|$，单位 $\mathrm{C\cdot cm^{-2}}$．

1、根据题五 但取 $V_S = V_B$

$Q=\sqrt{2\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 q N_A V_B}$

$V_B=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_A}{n_i}=0.32V$

$\therefore Q=1.64\times10^{-8}\,C/cm^2$

2. 开启电压 V_T 对于 P型，小于零

若 $V_{T测}<V_{T算}$，则氧化层中存在正电荷

(即 绝对值更大)

否则、存在负电荷

3、$V_{FB}=\Delta V_T=-\frac{1}{C_0}\int_0^{d_0}\frac{x\rho(x)}{d_0}dx$

$\therefore |V_{FB}|=|\Delta V_T|=1.5V$

$|V_{FB}|=\frac{|k|}{C_0}\int_0^{d_0}e^{-\frac{x}{d_0}}\sin(\frac{\pi x}{d_0})dx$

$\therefore 1.5V=\frac{|k|}{C_0}\cdot d_0\int_0^1 e^{-t}\sin(\pi t)dt$　计算器

令 $I=\int_0^1 e^{-t}\sin\pi t\,dt$

$I=-\int_0^1\sin\pi t\,de^{-t}$

$=-(e^{-t}\sin\pi t|_0^1-\int_0^1 e^{-t}d\sin\pi t)$

$=\pi\int_0^1 e^{-t}\cos\pi t\,dt$

$=-\pi\int_0^1\cos\pi t\,de^{-t}$

$=-\pi(e^{-t}\cos\pi t|_0^1-\int_0^1 e^{-t}d\cos\pi t)$

$=\pi(\frac{e+1}{e}-\pi I)$

$\therefore I=\frac{\pi(e+1)}{e(\pi^2+1)}=0.40$

而 $C_0=\frac{\varepsilon_{r0}\varepsilon_0}{d_0}$

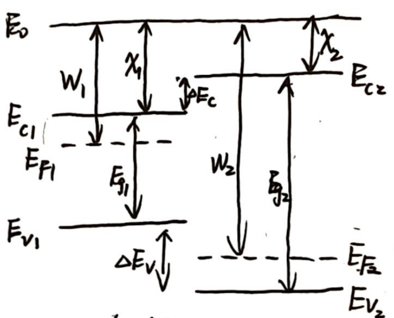
$\therefore |k|=\frac{|V_{FB}|\varepsilon_{r0}\varepsilon_0}{Id_0^2}$

$=3.28\times10^{5}\,C/cm^2$

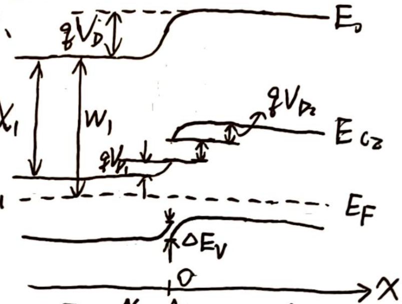
八、(10 分)

以真空能级 E_0 为基准，一 n 型锗材料其禁带宽度 $E_{g1}=0.67\,\mathrm{eV}$、功函数 $W_1=4.31\,\mathrm{eV}$、电子亲和能 $X_1=4.13\,\mathrm{eV}$，又有一 p 型砷化镓材料其禁带宽度 $E_{g2}=1.42\,\mathrm{eV}$、功函数 $W_2=5.32\,\mathrm{eV}$、电子亲和能 $X_2=4.07\,\mathrm{eV}$．现 Z 同学被要求用两材料接触制作一理想 pn 突变结．

1. 画出该 pn 结不施加电压时的能带图，并标注出上述相关能带结构参数．
2. 计算导带阶与价带阶的值并在问题 1 所作图中做标注．
3. 计算该 pn 结的内建电势 V_D，并在问题 1 所作图中标注出交界面两侧材料各自的内建电势．
4. 已知介电常数 $\varepsilon_{Ge}>\varepsilon_{GaAs}$，试定性画出该 pn 结内建电场分布 $\mathscr{E}(x)$．



结合前

1、


2. $\Delta E_c=\chi_1-\chi_2=0.06eV$

$\Delta E_V=E_{g2}-E_{g1}-\Delta E_c=0.69eV$

3. $qV_D=W_2-W_1=1.01eV$

4.