

南京大学 电子科学与工程学院 全日制统招本科生

《半导体物理与器件》期末考试试卷 【参考答案】

任课教师姓名: 刘斌, 叶建东

考试日期: 2021 年 1 月 14 日 考试时长: 2 小时 0 分钟

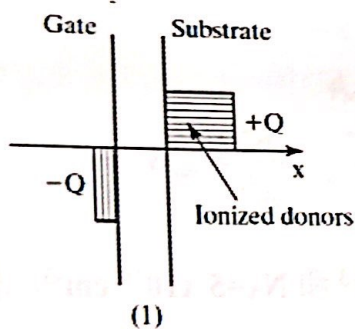
一、(12 分) 解释名词

- 1、态密度 2、平均自由时间 3、雪崩击穿
4、肖特基接触 5、光伏电池

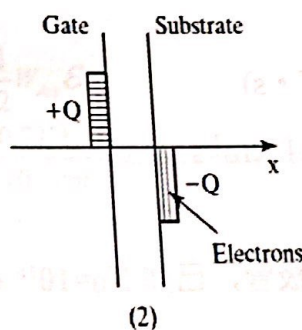
本题得分

6. MOS 电容衬底为 N 型, 请在下图中(1)-(5)分别标出 (a)平带状态、(b)积累区、(c)耗尽区、(d)阈值状态和(e)反型状态

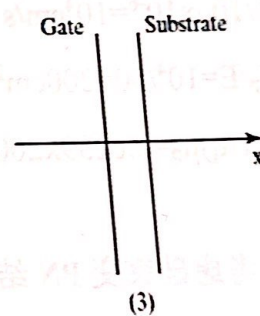
1. 态密度: 在单位体积的半导体内, 能量范围在 $E-E+dE$ 之间的能态数
2. 平均自由时间: 载流子两次碰撞间的平均时间
3. 雪崩击穿: PN 结反向偏压的情况下, 载流子浓度与反向电流急剧增大, 最终形成反向击穿的现象
4. 肖特基接触: 金属与半导体接触, 在界面处半导体的能带弯曲, 形成肖特基势垒的一类接触
5. 光伏电池: 与 PN 结的结构类似, 能够将太阳能转化为电能, 又称太阳能电池。



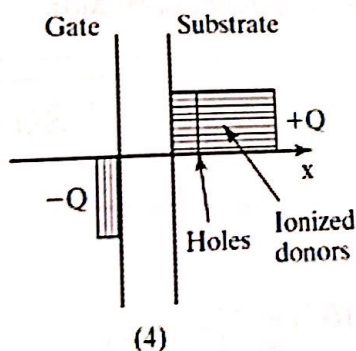
(1) 耗尽区



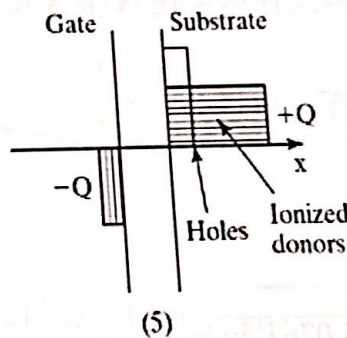
(2) 积累区



(3) 平带状态



(4) 阈值状态



(5) 反型状态

二、(12 分) 一硅晶掺入每立方厘米 10^{16} 个砷原子, 求室温下 300K 的载流子浓度, 并将计算的结果描绘在能带图中, 标出 E_c , E_v , E_F , E_i 的相对位置

$$n_i = 9.65 \times 10^9 / \text{cm}^3$$

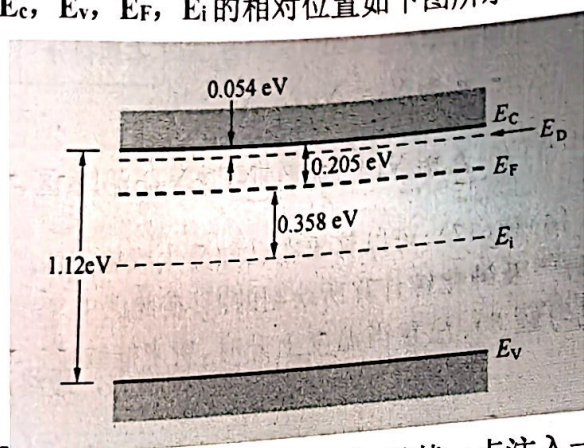
求解: $n = N_d = 10^{16} \text{cm}^{-3}$

$$p = n_i^2 / N_D = (9.65 \times 10^9)^2 / 10^{16} \text{cm}^{-3} = 9.3 \times 10^3 \text{cm}^{-3}$$

$$E_c - E_F = kT \ln(N_C / N_D) = 0.0259 \ln(2.86 \times 10^{19} / 10^{16}) \text{eV} = 0.205 \text{eV}$$

$$E_F - E_i = kT \ln(n / n_i) = kT \ln(N_D / n_i) = 0.0259 \ln(10^{16} / 9.65 \times 10^9) \text{eV} = 0.358 \text{eV}$$

E_c , E_v , E_F , E_i 的相对位置如下图所示



三、(12 分) 少数载流子(空穴)于某一点注入一个均匀的 n 型半导体中, 施加一个 50V/cm 的电场于其样品上, 且电场在 100μs 内将这些少数载流子移动了 1cm, 求少数载流子的漂移速率及扩散系数。

求解: $V_p = 1 / 100 \times 10^{-6} = 10^4 \text{cm/s}$

$$\mu_p = V_p / E = 10^4 / 50 = 200 \text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$$

$$D_p = (kT/q) \mu_p = 0.0259 \times 200 = 5.18 \text{cm}^2/\text{s}$$

四、(14 分) 考虑硅突变 PN 结二极管, 已知 $N_D = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 和 $N_A = 5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, 假设温度 $T = 300\text{K}$,

1、计算内建电势 ϕ_{bi} ;

2、计算耗尽层宽度(W_{dep})以及耗尽层在 N 型区和 P 型区的宽度(x_n 和 x_p);

3、计算最大电场强度;

4、画出能带图、电势分布图、电场分布图。

求解:

$$\phi_{bi} = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = (0.026 \text{V}) \times \ln \left(\frac{(10^{16} \text{cm}^{-3}) \times (5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3})}{(10^{10} \text{cm}^{-3})^2} \right) = 0.7 \text{V}$$

1:

2:

1. 本实验: 第一能级

2. 平均自由时间

3. 雪崩击穿

4. 肖特基势垒

5. 光伏电

$$\begin{aligned}
 W_{dep} &= \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \phi_n}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)} \\
 &= \sqrt{\frac{2 \times 12 \times (8.85 \times 10^{-14}) \times 0.7}{1.6 \times 10^{-19}} \times \left(\frac{1}{10^{16}} + \frac{1}{5 \times 10^{15}} \right)} \\
 &= 5.28 \times 10^{-5} \text{ cm} \\
 &= 0.528 \mu\text{m} \\
 &= 528 \text{ nm}
 \end{aligned}$$

$$x_n = W_{dep} - x_p = W_{dep} - \frac{N_d}{N_a} x_n$$

$$\therefore x_n = \left(\frac{N_a}{N_a + N_d} \right) W_{dep} = \left(\frac{5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}}{(5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}) + (10^{16} \text{ cm}^{-3})} \right) \times (0.528 \mu\text{m}) = 0.176 \mu\text{m}$$

$$x_p = \left(\frac{N_d}{N_a + N_d} \right) W_{dep} = \left(\frac{10^{16} \text{ cm}^{-3}}{(5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}) + (10^{16} \text{ cm}^{-3})} \right) \times (0.528 \mu\text{m}) = 0.352 \mu\text{m}$$

3:

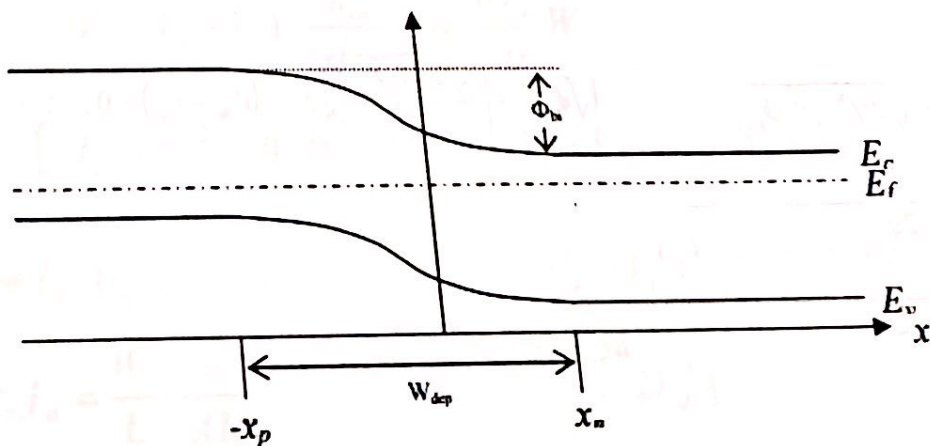
$$\mathcal{E}_{max} = \frac{qN_d x_n}{\varepsilon_s} = \frac{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (10^{16} \text{ cm}^{-3}) \times (1.76 \times 10^{-5} \text{ cm})}{12 \times (8.85 \times 10^{-14} \text{ F/cm})} = 2.652 \times 10^4 \text{ V/cm}$$

或

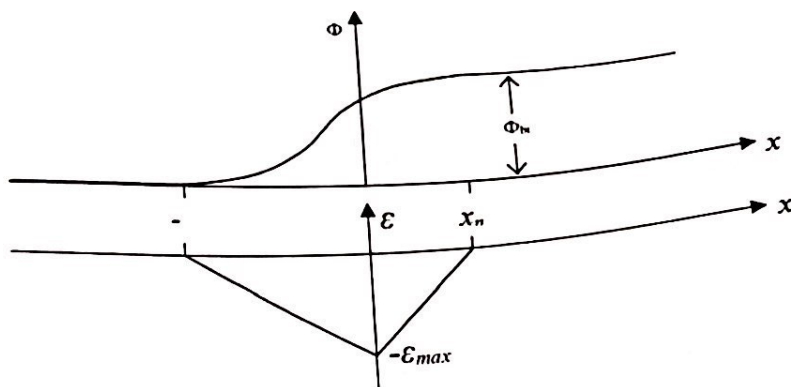
$$\begin{aligned}
 \phi_{bi} &= \frac{1}{2} W_{dep} \mathcal{E}_{max} \\
 \therefore \mathcal{E}_{max} &= \frac{2\phi_{bi}}{W_{dep}} = \frac{2 \times (0.7 \text{ V})}{5.28 \times 10^{-5} \text{ cm}} = 2.652 \times 10^4 \text{ V/cm}
 \end{aligned}$$

4:

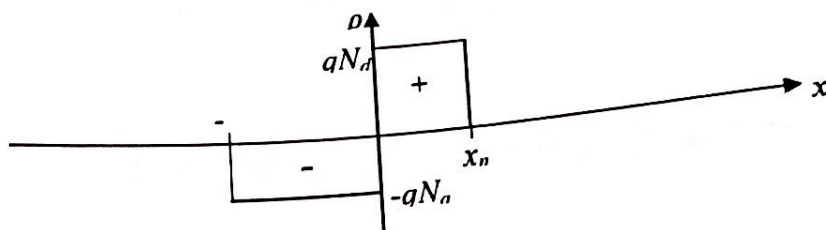
(1) 能带图



(2) 电势分布图



(3) 电场分布图



五、(12 分) 当 MOS 电容栅压 $V_g > V_{fb}$, 半导体表面会出现耗尽, 其耗尽层宽度为

氧化层两侧压降可表示为 $V_{ox} = -\frac{Q_{sub}}{C_{ox}} = -\frac{Q_{dep}}{C_{ox}} = \frac{qN_a W_{dep}}{C_{ox}} = \frac{\sqrt{qN_a 2\epsilon_s \phi_s}}{C_{ox}}$, 其中

$$\phi_s = \frac{qN_a W_{dep}^2}{2\epsilon_s}.$$

本题得分

- 请将 ϕ_s 写成 V_g 的函数表达式;
- 推导 V_{ox} 作为 V_g 的函数表达式;
- 将 W_{dep} 写成 V_g 的函数表达式。

求解: (a)

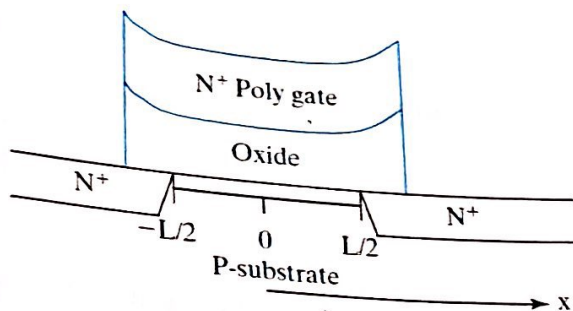
$$V_g = V_{fb} + \phi_s + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2qN_a \epsilon_s \phi_s}$$

$$(\sqrt{\phi_s})^2 + \left(\frac{\sqrt{2qN_a \epsilon_s}}{C_{ox}} \right) \sqrt{\phi_s} + (V_{fb} - V_g) = 0.$$

$$\sqrt{\phi_s} = \frac{-\frac{\sqrt{2qN_a \epsilon_s}}{C_{ox}} \pm \sqrt{\frac{2qN_a \epsilon_s}{C_{ox}^2} - 4(V_{fb} - V_g)}}{2}.$$

取正根

$$\sqrt{\phi_s} = \frac{-\sqrt{2qN_a\epsilon_s}}{2C_{ox}} + \sqrt{\frac{2qN_a\epsilon_s}{4C_{ox}^2} - (V_{fb} - V_g)} = \frac{\gamma}{2} + \sqrt{\frac{\gamma^2}{4} - (V_{fb} - V_g)} \quad \text{其中,} \quad \gamma = \frac{\sqrt{2qN_a\epsilon_s}}{C_{ox}}$$



故 $\phi_s = \left[\frac{\gamma}{2} + \sqrt{\frac{\gamma^2}{4} - (V_{fb} - V_g)} \right]^2$

(b)

$$V_{ox} = \frac{\sqrt{2qN_a\epsilon_s}}{C_{ox}} \sqrt{\phi_s} = \gamma \left[\frac{\gamma}{2} + \sqrt{\frac{\gamma^2}{4} - (V_{fb} - V_g)} \right]$$

(c)

$$W_{dep} = \frac{\sqrt{2q\epsilon_s}}{C_{ox}} \sqrt{\phi_s} = \frac{\sqrt{2q\epsilon_s}}{C_{ox}} \left[\frac{\gamma}{2} + \sqrt{\frac{\gamma^2}{4} - (V_{fb} - V_g)} \right]$$

六、(12 分) 一个 NMOSFET 的 T_{ox} 在沟道中心更薄, 而在源漏处较厚, 参见下图。其厚度的分布可以近似表示为 $T_{ox} = Ax^2 + B$ 。假定阈值电压 V_t 与 x 无关, 且 $m=1$ (不考虑速度饱和)。

(a) 推导出源漏电流 I_d 的表达式;

(b) 推导出饱和漏极电压 V_{dsat} 的表达式;

本题得分	
------	--

求解: (a)

$$\begin{aligned} I_d &= -Q_n \mu_n \frac{dV_c}{dx} W = (V_g - V_t - V_c) C_{ox}(x) \mu_n \frac{dV_c}{dx} W \\ &= (V_g - V_t - V_c) \frac{\epsilon_{ox}}{Ax^2 + B} \mu_n \frac{dV_c}{dx} W \\ \therefore \int_{-L/2}^{L/2} I_d \cdot (Ax^2 + B) dx &= \int_0^{V_{ds}} (V_g - V_t - V_c) \epsilon_{ox} \mu_n W dV_c \\ \rightarrow I_d \cdot \left[\frac{A}{3} x^3 + Bx \right]_{-L/2}^{L/2} &= \epsilon_{ox} \mu_n W [(V_g - V_t) V_c - 1/2 V_c^2]_0^{V_{ds}} \\ \therefore I_d &= \frac{W}{L} \cdot \frac{\epsilon_{ox} \mu_n}{\frac{AL^2}{12} + B} \cdot [(V_g - V_t) V_{ds} - 1/2 V_{ds}^2] \end{aligned}$$

(b)

当 $\frac{\partial I_d}{\partial V_{ds}}|_{V_g} = 0$ 时, 有 $V_{dsat} = V_{ds}$, 故 $V_{dsat} = V_g - V_t$,

七、(12 分) 假设 N^+ 多晶硅栅和 P 型衬底之间的栅氧化层厚度为 1.1 nm, 且 $N_a = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 。

本题得分

(a) 求出器件的阈值电压值;

(b) 求出器件的亚阈值摆幅;

(c) 假设 $V_g = V_t$ 时, $I_{ds} = 100 \text{ W/L (nA)}$, 当 $W = 1 \mu\text{m}$, $L = 18 \text{ nm}$, 最大漏电流是多少?

求解:

$$(a) \quad C_{ox} = 3.45 \times 10^{-13} / 1.1 \times 10^{-7} = 3.138 \mu\text{F/cm}^2$$

$$V_t = -1.04 + 0.95 + Q_{dep}/C_{ox} = -1.04 + 0.95 + 0.18 = 0.109 \text{ V}$$

$$(b) \quad S = 60(1 + C_{dep}/C_{ox}) = 60(1 + 2.953 \times 10^{-7} / 3.138 \times 10^{-6}) = 65.64 \text{ mV/dec}$$

$$(c) \quad 1/S = [\log(W/L \times 100 \text{ nA}) - \log(I_{leakage})] / V_t$$

$$I_{leakage} = 121 \text{ nA}$$

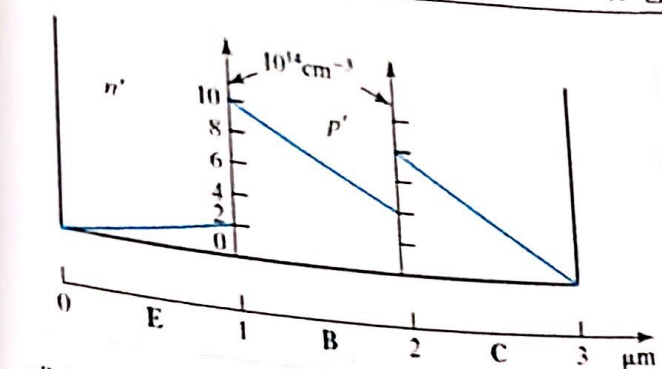
八、(14 分) 考虑如下图所示的 PNP BJT 的过剩载流子分布 (图中耗尽区已省略, 显示中性区中的少子分布)。假设产生-复合电流成分都可忽略, 且每个区域均为均匀掺杂。已知扩散系数 $D_n = 30 \text{ cm}^2/\text{s}$ 和 $D_p = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$, 且器件的横截面积为 10^{-5} cm^2 , 发射区杂质浓度为 $N_E = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

(a) 求出集电区掺杂浓度 N_C ;

(b) 该 BJT 工作在什么状态?

(c) 计算基区存储的过剩载流子电荷总量 Q ;(d) 求出发射极电流 I_E ;(e) 当 $V_{EB} > 0.7 \text{ V}$, $V_{CE} > 0.3 \text{ V}$, 且不考虑基区宽度的调制效应, 计算 BJT 工作在非饱和区的共发射极电流增益 β_F

本题得分



求解: (a) $N_B/N_C = n'/p'$, $N_E/N_B = p'/n'$ 故 $N_E/N_C = 10$, $N_C = 0.1 N_E = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

(b) 由于 BE, BC 结正偏, 该 BJT 处于饱和态。

(c)

$$Q = \frac{Aq}{2} [p'(x=1\mu\text{m}) + p'(x=2\mu\text{m})] W_B =$$

$$= 10^{-5} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.5 \times 14 \times 10^{14} \times 10^{-4} = 1.12 \times 10^{-13} \text{ coul.}$$

(d)

$$I_E = I_{nE} + I_{pE} =$$

$$= Aq \left[D_n \frac{n'(x=1\mu\text{m}) - n'(x=0\mu\text{m})}{W_E} + D_p \frac{p'(x=1\mu\text{m}) - p'(x=2\mu\text{m})}{W_B} \right] =$$

$$= 10^{-5} \times 1.6 \times 10^{-19} \times \left[30 \left(\frac{2 \times 10^{14}}{1 \times 10^{-4}} \right) + 10 \left(\frac{6 \times 10^{14}}{1 \times 10^{-4}} \right) \right] \text{ mA} = 0.192 \text{ mA}.$$

(e)

$$\beta = \frac{D_B W_E N_E}{D_E W_B N_B} = \frac{10 \times 10^{-4} \times N_E}{30 \times 10^{-4} \times N_B} = \frac{1}{3} \times 1 \times 5 = \frac{5}{3} = 1.7$$