

2005 级半导体器件物理期末试题 (A 卷)

(吉林大学电子科学与工程学院)

一. [30 分, 每小题 6 分]回答下列问题

1. 解释 GaP:N, GaP:Zn-O 中的等电子陷阱复合及其对发光所起的作用。
2. 说明 AlGaAs/P-GaAs /N-GaAs LED 中 AlGaAs 层的作用。
3. PN 结耗尽层电容和扩散电容是如何引起的? 二者的主要区别是什么?
4. 画出集成结构示意图和电路图说明肖特基势垒钳位晶体管的工作原理。
5. 解释 BJT 的穿通击穿现象。

二[20 分]长 PN 结二极管处于反偏压状态, 求:

- (1) 解扩散方程求少子分布 $n_p(x)$ 和 $p_n(x)$, 并画出它们的分布示意图。
- (2) 计算扩散区内少子贮存电荷 Q_p 和 Q_n 。
- (3) 证明反向电流 $I = -I_0$ 为 PN 结扩散区内的载流子产生电流。

三[10 分]双极结型晶体管 E-M 方程为:

$$I_E = -I_{F0}(e^{V_E/V_T} - 1) + \alpha_R I_{R0}(e^{V_C/V_T} - 1)$$

$$I_C = \alpha_F I_{F0}(e^{V_E/V_T} - 1) - I_{R0}(e^{V_C/V_T} - 1)$$

根据以上公式给出 BJT 四种模式下 E-M 方程的具体形式。

四 [10 分]一个 N 沟 MOSFET:

1. 线性区漏电流 $I_D = \frac{Z\mu_n C_o}{L} (V_G - V_{TH}) V_D$,

$Z = 15\mu m, L = 2\mu m, C_0 = 6.9 \times 10^{-8} F/cm^2$. 在线性区, 固定 $V_D = 0.10V$ 不变, 实验测得:

$V_G = 1.5V$ 时, $I_D = 35\mu A$; $V_G = 2.5V$ 时, $I_D = 75\mu A$ 。根据以上实验求沟道内载流子迁移率和阈值电压。

2. 可否使用饱和区漏电流公式 $I_D = \frac{Z\mu_n C_0}{2L} (V_G - V_{TH})^2$ 进行上述计算? 如果可以请给出计算步骤。

五[15 分]一 N 沟 GaAs MESFET, $\phi_b = 0.9V, N_d = 2 \times 10^{15} cm^{-3}, a = 0.6\mu m$,

$$N_C = 4.7 \times 10^{17} cm^{-3}。$$

1. 计算 ψ_0 和 $V_{p0} = \frac{qa^2 N_d}{2k\epsilon_0}$

2. 计算阈值电压或夹断电压。

3. 试问这是增强型器件还是耗尽型器件?

注: $q = 1.6 \times 10^{-19} C$ $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$, GaAs $k_s = 13.1$

六[15 分] 假设 P^+N 二极管受到一个光源的均匀照射，所引起的电子-空穴产生速率为 G_L 。

1.解二极管的扩散方程证明

$$\Delta P_n = (P_{n0}(e^{V/V_T} - 1) - G_L \frac{L_p^2}{D_p})e^{-x/L_p} + \frac{G_L L_p^2}{D_p}$$

2.推导光电流的表达式并证明

$$I_L = qG_L(L_n + L_p)A。$$

2005 级半导体器件物理期末试题（A 卷）答案

（吉林大学电子科学与工程学院）

一[30 分，每小题 6 分]回答下列问题

1. 解释 GaP:N, GaP:Zn-O 中的等电子陷阱复合及其对发光所起的作用。
2. 说明 AlGaAs/P-GaAs /N-GaAs LED 中 AlGaAs 层的作用。
3. PN 结耗尽层电容和扩散电容是如何引起的？二者的主要区别是什么？
4. 画出电路图说明肖特基势垒钳位晶体管的工作原理。
5. 解释 BJT 的穿通击穿现象。

答：1. 当 GaP 中掺入氮时，氮可能取代晶格上的磷原子。氮和磷都是 V 族元素，它们的价电子数相同，因此称 N 为等电子杂质。它可以俘获电子。形成电子的束缚状态——等电子陷阱。氮俘获电子以后，又因库仑作用而俘获空穴俘获的电子和空穴形成激子。这种激子通过辐射复合消失时，在室温下发射波长 $\lambda = 570 \text{ nm}$ 绿光。

当 GaP 掺入锌和氧后，Zn 原子一般占据晶格中 Ga 的位置，而 O 则占据 P 的位置。由 GaP 的晶格结构可以看出，GaP 处于相邻位置。Zn, O 取代后必然处于相邻的位置。于是形成了 Zn-O 对等电子陷阱。由于氧原子是电子亲合力强的原子，即使处于阳性原子 Zn 的最近邻位置也能俘获电子。俘获电子后 Zn-O 对便带负电，由于库仑力又去俘获空穴，从而形成激子。激子复合便发出红色辐射。

2. 在这种器件中，在 GaAs 二极管的顶面上生长一附加的 AlGaAs 层，因为 AlGaAs 材料的禁带宽度大于 GaAs 的禁带宽度，所以发射的光子不会被附加层所吸收。与此同时，在 AlGaAs-GaAs 界面上的复合中心密度显著的低于没有 AlGaAs 层的 GaAs 表面的复合中心密度。因而，距离界面的结深可以做得很小。从而有效地提高了量子效率。

3. 耗尽层电容是由 PN 结空间电荷随 PN 结外加偏压变化而引起的。扩散电容是 PN 结贮存电荷引起的。在 PN 结反偏情况下前者起主要作用，后者可以忽略。在 PN 结正偏情况下后者起主要作用，而前者可以忽略。

4. 由于肖特基势垒具有快速开关响应，因而可以把它和 NPN 晶体管的集电极-基极结并联连接，如图 4-13a 所示，以减小晶体管的贮存时间。当晶体管饱和时，集电结被正向偏置约达 0.5V。若在肖特基二极管上的正向压降（一般为 0.3V）低于晶体管基极-集电极的开态电压，则大部分过量基极电流流过二极管，该二极管没有少数载流子贮存效应。因此，与单独的晶体管相比较，合成器件的贮存时间得到显著的降低。测得的贮存时间可以低于 1ns。

5. 在基极开路情况下，随着 V_{CE} 的增加，集电结的空间电荷区将展宽。很可能在发生雪崩击穿之前集电结的空间电荷区就已经扩展到了发射结。这种现象叫做基区穿通。基区穿通时晶体管击穿。常称这种击穿为穿通击穿。

以 N^+PN 晶体管为例。基区穿通时发射区和集电区被连接成好象一个连续的空间电荷区。基区穿通时发射结处的势垒被集电结电压降低了 ΔV 。结果是，使得大的发射极电流得以在晶体管当中流过并发生击穿。

二[20 分]长 PN 结二极管处于反偏压状态，求：

1 解扩散方程求少子分布 $n_p(x)$ 和 $p_n(x)$ ，并画出它们的分布示意图。

2 计算扩散区内少子贮存电荷 Q_p 和 Q_n 。

3 证明反向电流 $I = -I_0$ 为 PN 结扩散区内的载流子产生电流。

解：1. $x_n \leq x \leq w_n$

$$D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} = 0$$

其解为

$$p_n - p_{n0} = K_1 e^{-x/L_p} + K_2 e^{x/L_p} \quad (1)$$

边界条件：

$$\begin{cases} x = x_n, & p_n = 0 \\ x = w_n, & p_n - p_{n0} = 0 \end{cases}$$

$$\text{有 } p_n - p_{n0} = K_1 e^{-x/L_p} \quad (K_2 = 0)$$

$$-p_{n0} = K_1 e^{-x_n/L_p}$$

将 $K_1 = -p_{n0} e^{x_n/L_p}$ 代入 (1)：

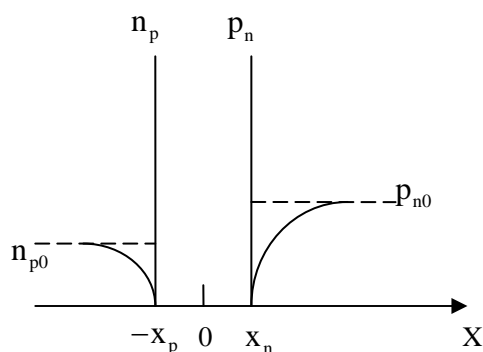
$$p_n - p_{n0} = -p_{n0} e^{-(x-x_n)/L_p} \quad (2)$$

此即少子空穴分布。

类似地求得

$$n_p - n_{p0} = -n_{p0} e^{(x+x_p)/L_n}$$

2. 少子贮存电荷



$$\begin{aligned}
Q_p &= qA \int_{x_n}^{w_n} (p_n - p_{n0}) dx \\
&= qA \int_{x_n}^{w_n} -p_{n0} e^{-(x-x_n)/L_p} dx \\
&= -qAL_p p_{n0}
\end{aligned}$$

这是 N 区少子空穴扩散区内的贮存电荷， $Q_p < 0$ 说明贮存电荷是负的，这是反向 PN 结少子抽取的现象。

同理可求得

$Q_n = qAL_n n_{p0}$ 。 $Q_n > 0$ 说明贮存电荷是正的（电子被抽取，出现正的电离施主）。

3. 假设贮存电荷均匀分布在长为 L_n, L_p 的扩散区内，则

$$\Delta p_n = \frac{Q_p}{L_p A} = -p_{n0}, \Delta n_p = -\frac{Q_n}{L_n A} = -n_{p0}$$

$$\text{在空穴扩散区，复合率 } U = \frac{\Delta p_n}{\tau_p} = -\frac{p_{n0}}{\tau_p}$$

$$\text{在电子扩散区，复合率 } U = \frac{\Delta n_p}{\tau_n} = -\frac{n_{p0}}{\tau_n}$$

$U < 0$ ，可见 $G = -U > 0$ ，则空穴扩散区内少子产生率为 $\frac{p_{n0}}{\tau_p}$ ，

电子扩散区内少子产生率为 $\frac{n_{p0}}{\tau_n}$ 。与反向电流对比：

$$I = -I_0 = -qA \left(\frac{p_{n0}}{\tau_p} L_p + \frac{n_{p0}}{\tau_n} L_n \right)$$

可见，PN 结反向电流来源于扩散区内产生的非平衡载流子。

三[10 分]双极结型晶体管 E-M 方程为：

$$I_E = -I_{F0} (e^{V_E/V_T} - 1) + \alpha_R I_{R0} (e^{V_C/V_T} - 1)$$

$$I_C = \alpha_F I_{F0} (e^{V_E/V_T} - 1) - I_{R0} (e^{V_C/V_T} - 1)$$

根据以上公式给出 BJT 四种模式下 E-M 方程的具体形式。

解：正向有源模式

$$I_E = -I_{F0} (e^{V_E/V_T} - 1) - \alpha_R I_{R0}, \quad I_C = \alpha_F I_{F0} (e^{V_E/V_T} - 1) + I_{R0}.$$

反向有源模式

$$I_E = +I_{F0} + \alpha_R I_{R0} (e^{V_C/V_T} - 1) \quad I_C = -\alpha_F I_{F0} - I_{R0} (e^{V_C/V_T} - 1).$$

饱和模式

$$I_E = -I_{F0} (e^{V_E/V_T} - 1) + \alpha_R I_{R0} (e^{V_C/V_T} - 1) \quad I_C = \alpha_F I_{F0} (e^{V_E/V_T} - 1) - I_{R0} (e^{V_C/V_T} - 1).$$

截止模式 $I_E = +I_{F0} - \alpha_R I_{R0}, I_C = -\alpha_F I_{F0} + I_{R0}.$

四. [10分] 一个 N 沟 MOSFET:

1. 线性区漏电流 $I_D = \frac{Z\mu_n C_0}{L} (V_G - V_{TH}) V_D,$

$Z = 15\mu m, L = 2\mu m, C_0 = 6.9 \times 10^{-8} F/cm^2.$ 在线性区, 固定 $V_D = 0.10V$ 不变, 实验测得:

$V_G = 1.5V$ 时, $I_D = 35\mu A$; $V_G = 2.5V$ 时, $I_D = 75\mu A$ 。根据以上实验求沟道内载流子迁移率和阈值电压。

2. 可否使用饱和区漏电流公式 $I_D = \frac{Z\mu_n C_0}{2L} (V_G - V_{TH})^2$ 进行上述计算?

解: 1. 线性区

$$I_D = \frac{Z\mu_n C_0}{L} (V_G - V_{TH}) V_D \quad (\times)$$

$$\text{则} \quad I_{D2} - I_{D1} = \frac{Z\mu_n C_0}{L} (V_{G2} - V_{G1}) V_D$$

代入数据:

$$75 \times 10^{-6} - 35 \times 10^{-6} = \frac{15}{2} \mu_n (6.9 \times 10^{-8}) (2.5 - 1.5) (0.10)$$

解出

$$\mu_n = 773 cm^2 / V.S$$

代入 (×) 式, 解出

$$V_{TH} = 0.625V.$$

2. 可以。例如: 测出 $(V_{G1}, I_{D1}), (V_{G2}, I_{D2})$ 两个点, 由

$$I_{D1} = \frac{Z\mu_n C_0}{2L} (V_{G1} - V_{TH})^2 \quad (1),$$

$$I_{D2} = \frac{Z\mu_n C_0}{2L} (V_{G2} - V_{TH})^2 \quad (2)$$

得:

$$\frac{(V_{G1} - V_{TH})^2}{(V_{G2} - V_{TH})^2} = \frac{I_{D2}}{I_{D1}}$$

就可由上式算出 V_{TH} ，再代人 (1) 或 (2) 就可求出 μ_n 。

五[15 分]—N 沟 $GaAs$ MESFET, $\phi_b = 0.9V, N_d = 2 \times 10^{15} cm^{-3}, a = 0.6\mu m, L = 1\mu m,$

$$Z = 10\mu m, N_C = 4.7 \times 10^{17} cm^{-3}。$$

1. 计算 ψ_0 和 $V_{p0} = \frac{qa^2 N_d}{2k\epsilon_0}$

2. 计算阈值电压或夹断电压。

3. 试问这是增强型器件还是耗尽型器件?

注: $q = 1.6 \times 10^{-19} C, \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m, GaAs k_s = 13.1$

解: 1.

$$V_n = V_T \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) = 0.0259 \ln\left(\frac{4.7 \times 10^{17}}{2 \times 10^{15}}\right) = 0.141V$$

$$\psi_0 = 0.89 - 0.141 = 0.749V$$

$$V_{p0} = \frac{qa^2 N_d}{2k\epsilon_0} = 0.499V$$

$$2. \psi_0 + V_p = V_{p0}, V_p = -0.499V - 0.749V = -0.25V, V_{TH} = 0.25V$$

3. 根据 $V_{TH} = 0.25V > 0$, 判断该 MESFET 是增强型。

六[15 分] 假设 P^+N 二极管受到一个光源的均匀照射, 所引起的电子-空穴产生速率为 G_L

1. 解二极管的扩散方程证明

$$\Delta P_n = (P_{n0}(e^{V/V_T} - 1) - G_L \frac{L_p^2}{D_p})e^{-x/L_p} + \frac{G_L L_p^2}{D_p}$$

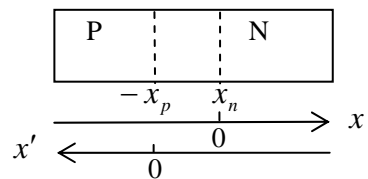
2. 推导光电流的表达式并证明

$$I_L = qG_L(L_n + L_p)A$$

解: 1. $\because I_p = I_0(e^{V/V_T} - 1)$, V 加到 pn 结上,

$$\text{当 } x > 0 \text{ 时, } D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + G_L = 0$$

$$\therefore \frac{d^2 (p_n - p_{n0} - G_L \tau_p)}{dx^2} = \frac{p_n - p_{n0} - G_L \tau_p}{L_p^2}$$



其中, $L_p = D_p \tau_p$

$$\therefore p_n - p_{n0} = K_1 e^{-x/L_p} + K_2 e^{x/L_p} + G_L \tau_p \quad (*)$$

由边界条件, $\begin{cases} x=0, p_n = p_{n0} e^{V/V_T} \\ x=\infty, \Delta p_n = G_L \tau_p \end{cases}$,

代入到 (*) 式中, 得

$$\begin{cases} K_1 = p_{n0} (e^{V/V_T} - 1) - G_L \tau_p \\ K_2 = 0 \end{cases}$$

$$\therefore \Delta p_n = p_n - p_{n0} = \left[p_{n0} (e^{V/V_T} - 1) - G_L \frac{L_p^2}{D_p} \right] e^{-x/L_p} + \frac{G_L L_p^2}{D_p}$$

2. 同理, N 区注入电子,

$$\begin{aligned} \Delta n_p = n_p - n_{p0} &= \left[n_{p0} (e^{V/V_T} - 1) - G_L \frac{L_n^2}{D_n} \right] e^{-x/L_p} + \frac{G_L L_n^2}{D_n} \\ &= \left[n_{p0} (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) - G_L \tau_n \right] e^{x/L_p} + G_L \tau_n \end{aligned}$$

电流分布为:

$$I_p(x) = -qAD_p \frac{dp_n}{dx} = \frac{qAD_p}{L_p} \left[p_{n0} (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) - G_L \tau_p \right] e^{-x/L_p}$$

$$I_n(x) = qAD_n \frac{dn_p}{dx} = \frac{qAD_n}{L_n} \left[n_{p0} (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) - G_L \tau_n \right] e^{x/L_p}$$

总电流为:

$$I = I_p(0) + I_n(0) = qA \left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right) (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) - qAG_L (L_n + L_p)$$

$$\therefore I = I_0 (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) + I_L, \quad I_0 = qA \left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right)$$

$$\therefore I_L = qG_L (L_n + L_p) A$$

试卷分析报告

(2007-2008 学年第 2 学期)

课程名称：半导体器件物理 课程代码：aa07151022 课程性质：必修课 学分：3.5

任课教师：孟庆巨			教学班代号：(2007-2008-2)-aa07151022-102633-1			
考试形式:闭卷			考试日期：2008. 6. 26		人数：128	
试卷成绩	成绩等级	90—100 (优秀)	80—89 (良好)	70—79 (中等)	60—69 (及格)	<60 (不及格)
	人数	40 人	35 人	28 人	19 人	6 人
	所占比例	31. 25%	27. 34%	21. 88%	14. 84%	4. 69%
	平均值	80. 51		标准差	14. 09	
试卷情况分析	<p>本次考试试题涉及到 PN 结、双极结型晶体管、金属-半导体器件、结型场效应晶体管、mos 场效应晶体管、太阳电池与光电二极管和发光管等章节。试题有解答题（第一题）、画图题（1. 4 题、第二题）、理论推导题（第二、第三、第六题）、计算题（第五题）和实际设计型题（第四题）等类型。试题涉及知识面积大，知识点多。试题类型活泼，既有基础知识又相当的难度和深度。本次考试旨在考察学生对半导体器件物理课总体知识（面）掌握的情况、基本理论的理解和运用能力以及实际的分析问题和解决问题的能力。</p> <p>考试成绩是令人满意的。各部分、各种问题均有 80%以上的学生给出了正确答案。优秀率达到 31. 25%，不及格率仅 4. 69%。上述考试成绩说明本次教学是成功的。</p> <p>本次考试成绩优良的占 58. 59%，中等和及格的占 36. 72%，不及格的占 4. 69%. 这一数据说明了更多的中等生进入了优良生行列，更多的不及格生摆脱了不及格的状态，反映了学生的成长和进步，这是老师十分高兴看到的。</p>					
改进措施	<p>1. 半导体器件物理课知识面广，知识点多，所需数学、物理等知识深厚，需要记忆的内容也较多。建议增加考试前的复习时间。</p> <p>2. 加强对落后学生的关心和帮助。帮助他们树立信心，提高学习的积极性。使更多的学生脱离不及格行列，进入到中等乃至优良行列。</p>					
教研室主任（签字）：				系(部)主任(签字)：		

备注：此表连同试卷装订存放。