

2004 级半导体器件物理期末试题 (A 卷)

(共 8 题, 满分 100 分, 考试时间: 150 分钟、可以使用简单计算器)

1 (10 分) 证明小注入情况下在 PN 结空间电荷区边界上有

$$\begin{aligned}n_p(-x_p) &= n_{p0} e^{V/V_T} \\ p_n(x_n) &= p_{n0} e^{V/V_T} \quad \text{成立。}\end{aligned}$$

2 (15 分) 共基极连接双极结型晶体管 (BJT):

(1) (5 分) 画出电流分量示意图。

(2) (5 分) 写出各个极电流表达式。

(3) (5 分) 写出各个极电流之间满足的关系式。

3 (15 分) 对于金属和 N 型半导体构成的肖特基势垒:

(1) (5 分) 画出热平衡能带图。根据能带图写出内建电势差 $q\psi_0$ 和肖特基势垒高度 $q\phi_b$ 。

(2) (7 分) 画出能带图说明肖特基势垒二极管的整流特性。

(3) (3 分) 为什么在加偏压的情况下肖特基势垒高度 $q\phi_b$ 可视为不变?

4 (15 分)

(1) (7 分) 写出加偏压的 N 沟增强型 MESFET 空间电荷区宽度的表达式并导出阈值电压 (对于耗尽型称为夹断电压, 增强型称为阈值电压, 二者符号相反) 和内夹断电压的表达式。

(2) (8 分) 一个 N 沟增强型 GaAs MESFET 在 $T=300\text{K}$ 时, 假设 $\phi_b = 0.89\text{V}$, 导带有效状态密度 $N_c = 4.7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, N 沟道掺杂浓度 $N_d = 2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, 阈值电压 $V_{TH} = 0.25\text{V}$ 。

计算沟道厚度 a 。(注: 电子电荷 $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} \text{F/cm}$, $G_a A_s : k_s = 13.1$)

5 (10 分) 写出实际 MOS 阈值电压表达式并说明式中各项的物理意义。

6 (15 分) 根据外量子效率公式

$$\eta_e = \eta_i \left(1 + \bar{\alpha} V / AT\right)^{-1} = \eta_i \left(1 + \bar{\alpha} x_j / T\right)^{-1}$$

(1) (8 分) 指出提高外量子效率的途径。

(2) (7 分) 说明光学窗口的作用。

7 (10 分) 说明半导体光电二极管的工作原理。

8 [10 分] 画出 PN 结二极管交流小信号等效电路图 (包括串联电阻、直流电导—扩散电阻的倒数、耗尽层电容和扩散电容), 分别给出它们的定义和主要的影响因素。

2004 级半导体器件物理期末试题（B 卷）

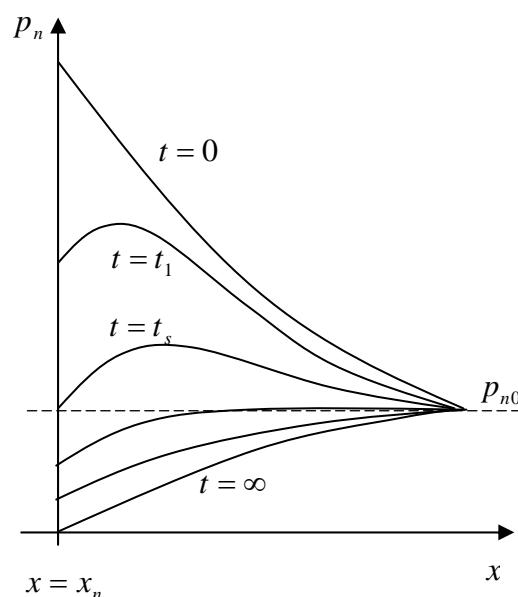
（共五题，满分 100 分，考试时间：150 分钟）2007.6

1 [30 分] 右图为 PN 结由正偏压变为反偏压的载流子分布示意图，可以看出：

- a. 从 $t=0$ 到 $t=t_s$ ：在 $P-N$ 结界面 $x=x_n$ 处注入的载流子浓度不断下降。
- b. 注入载流浓度的梯度 $dp_n/dx|_{x=x_n} =$ 常数且沿 X 轴的负方向。
- c. $t=t_s$ ： $p_n(x_n) = p_{n0}$ 。
- d. $t > t_s$ ： $p_n(x) < p_{n0}$ 。

根据以上事实解释 PN 结反向瞬变现象：

- a. $t=0$ 到 $t=t_s$ ：扩散电流 I_r 为常量且沿 $-x$ 方向。
- b. $t=0$ 到 $t=t_s$ ：结电压 $v_d > 0$ ，但 V_d 在减小，
- c. $t=t_s$ ：结电压为零。
- d. $t > t_s$ ： $v_d < 0$ ，扩散电流 I_r 也愈来愈小。
- e. $t = \infty$ ： $V = -V_r$ ， $I = -I_0$



2 [20 分] 一个 $W-Si$ 肖特基势垒二极管， $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，热发射电子电流

$$J_0 = R^* T^2 e^{-\phi_b/V_T} = 6.5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2, \quad R^* = 110 \text{ A/K}^2 \cdot \text{cm}^2, \quad T = 300 \text{ K}.$$

(1) 计算势垒高度和耗尽层宽度。

(2.) 比较多数载流子电流和少数载流子电流，假设 $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$

3 [10 分] 写出双极结型晶体管少数载流子边界条件，画出四种工作模式的少数载流子分布示意图。

4 [20 分] 若 N 沟道增强型 MOS FET 的源和衬底接地，栅和漏极短路，推导出漏电流公式（假设 V_{TH} 为常数）。

5 [10 分] 画出理想太阳电池等效电路图并根据等效电路图写出 $I-V$ 关系。

6 [10 分] 画出能带图说明 PN 结 LED 工作原理：

2004 级半导体器件物理期末试题（A 卷）答案

（共七题，满分 100 分，考试时间：150 分钟，可以）

1（10 分）证明小注入情况下在 PN 结空间电荷区边界上有

$$n_p(-x_p) = n_{p0} e^{V/V_T}$$

$$p_n(x_n) = p_{n0} e^{V/V_T}$$

成立。

证明：由 $\psi_0 = V_T \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2}$

$$= V_T \ln \frac{p_{p0} n_{n0}}{n_i^2} = V_T \ln \frac{n_{n0}}{n_{p0}}$$

有

$$n_{n0} = n_{p0} e^{\psi_0/V_T} \quad (1)$$

$$n_{p0} = n_{n0} e^{-\psi_0/V_T}。$$

小注入情况下加偏压 V 之后上述关系仍然成立：

$$n_p(-x_p) = n_n e^{-(\psi_0 - V)/V_T} \quad (2) \text{（偏压加在空间电荷} \\ \text{区上）}$$

小注入情况下 $n_n = n_{n0}$ ，将（1）式代入（2）式，得到

$$n_p(-x_p) = n_{p0} e^{V/V_T} \quad (3)$$

与此类似，可以得到

$$p_n(x_n) = p_{n0} e^{V/V_T} \quad (4)$$

（3）、（4）两式即为所要证明的边界条件。

2（15 分）共基极连接双极结型晶体管（BJT）：

（1）（5 分）画出电流分量示意图。

（2）（5 分）写出各个极电流表达式。

（3）（5 分）写出各个极电流之间满足的关系式。

解：（a）电流分量示意图：

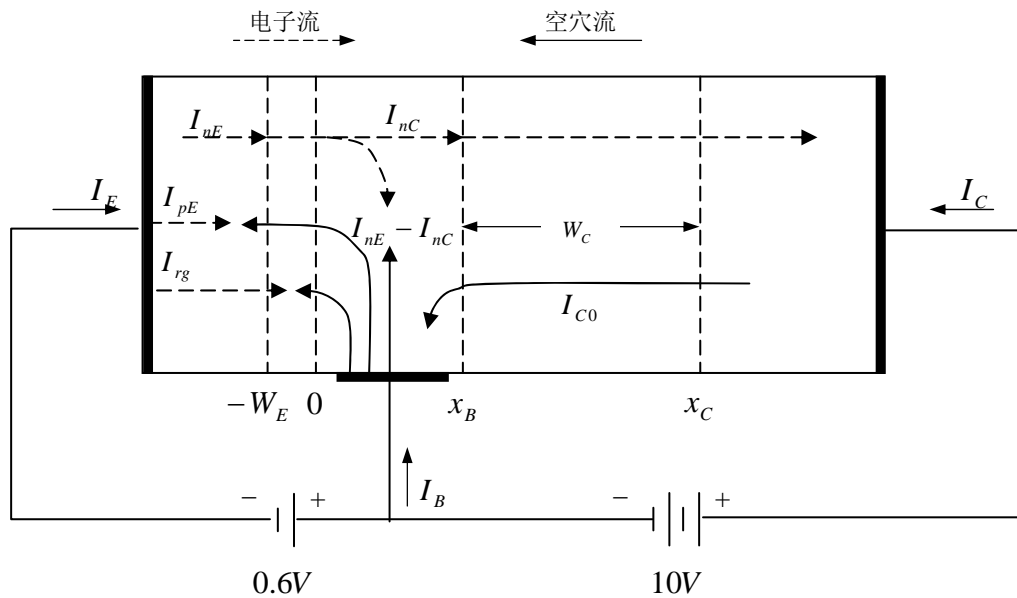


图 3-7 放大器工作时，*NPN* 晶体管内的工作电流分量

(b) 电流分量：

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

$$I_B = I_{pE} + I_{rg} + (I_{nE} - I_{nC}) - I_{C0}$$

$$I_C = I_{nC} + I_{C0}$$

(c) 各极电流关系：

$$I_E + I_C + I_B = 0$$

3 (15 分) 对于金属和 N 型半导体构成的肖特基势垒：

(1) (6 分) 画出热平衡能带图。根据能带图写出内建电势差 $q\psi_0$ 、肖特基势垒高度 $q\phi_b$ 和体电势 V_n 的表达式。

(2) (6 分) 画出能带图说明肖特基势垒二极管的整流特性。

(3) (3 分) 为什么在加偏压的情况下肖特基势垒高度 $q\phi_b$ 可视为不变？

答：(1) 图 4-1

$$q\psi_0 = q(\phi_m - \phi_s)$$

$$q\phi_b = q\phi_m - x_s$$

$$\phi_b = \psi_0 + V_n$$

$$V_n = (E_c - E_F)/q = V_T \ln \frac{N_c}{n} = V_T \ln \frac{N_c}{N_d}$$

(2) 图 4-2。

正偏压：在半导体上相对于金属加一负电压 V ，则半导体—金属之间的电势差减少为 $\psi_0 - V$ ，势垒高度则由 $q\psi_0$ 变成 $q(\psi_0 - V)$ ，而 ϕ_b 基本上保持不变（图 4-2b）。在半导体一边势垒的降低使得半导体中的电子更易于移向金属，这是正向偏压条件，能够流过大的电流。

反偏压：如果是正电压 V_R 加于半导体上， ϕ_b 仍然基本上保持不变而半导体—金属的势垒高度则由 $q\psi_0$ 被提高到 $q(\psi_0 + V_R)$ 以阻挡电流导通，因此肖特基势垒具有整流特性。

(3) 金属中具有大量的自由电子，空间电荷区宽度远远小于半导体的空间电荷区宽度，由电势的连续性，可以忽略 ϕ_b 随偏压的变化。

4 (15 分)

(1) (7 分) 写出加偏压的 N 沟增强型 MESFET 空间电荷区宽度的表达式并导出阈值电压（对于耗尽型称为夹断电压，增强型称为阈值电压，二者符号相反）和内夹断电压的表达式。（注：电子电荷 $q = 1.6 \times 10^{-19} C$ ， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} F/cm$ ， $G_a A_s : k_s = 13.1$ ）

(2) (8 分) 一个 N 沟增强型 GaAs MESFET 在 $T=300K$ 时，假设 $\phi_b = 0.89V$ ，导带有效状态密度 $N_C = 4.7 \times 10^{17} cm^{-3}$ 。N 沟道掺杂浓度 $N_d = 2 \times 10^{15} cm^{-3}$ ， $V_{TH} = 0.25V$ 。计算沟道厚度 a 。

解：(1) 空间电荷区宽度

$$W(x) = \left\{ \frac{2k\epsilon_0 [V(x) + \psi_0 - V_G]}{qN_d} \right\}^{1/2}$$

在夹断点，令 $W = a$ ，（沟道厚度）以及 $V_G - V = V_{TH}$ ，有：

$$\psi_0 - V_{TH} = \frac{qa^2 N_d}{2k\epsilon_0} = V_{p0}$$

其中 V_{TH} 为阈值电压。

(2)

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

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

$$V_{p0} = \psi_0 - V_{TH} = 0.749 - 0.25 = 0.499V$$

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

有
$$a = \left(\frac{0.499 \times 2 \times 13.1 \times 8.85 \times 10^{-14}}{1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{15}} \right)^{1/2} = 0.601 \mu m。$$

5 (10 分) 写出实际 MOS 阈值电压表达式并说明式中各项的物理意义。

解

$$V_{TH} = \phi'_{ms} - \frac{Q_0}{C_0} - \frac{Q_B}{C_0} + \psi_{Si}$$

式中第一项是为消除半导体和金属的功函数差的影响，所需要的平带电压；第二项是为了消除绝缘层中正电荷的影响，所需要的平带电压；第三项是当半导体表面开始出现强反型时，半导体空间电荷区中的电荷 Q_B 与金属电极的相应电荷在绝缘层上所产生的电压降，亦即支撑出现强反型时所需要的体电荷 Q_B 所需要的外加电压；第四项是，开始出现强反型层时，半导体表面所需的表面势，也就是跨在空间电荷区上的电压降。

6 (15 分) 根据外量子效率公式

$$\eta_e = \eta_i \left(1 + \bar{\alpha} V / A \bar{T} \right)^{-1} = \eta_i \left(1 + \bar{\alpha} x_j / \bar{T} \right)^{-1}$$

(1) (8 分) 指出提高外量子效率的途径。

(2) (7 分) 说明光学窗口的作用。

答：(1) 公式说明可以通过增加 η_i 减少 $\bar{\alpha}$ 、 x_j 或通过增加 \bar{T} 来提高外量子效率。但若把结深减小到距离表面不足一个扩散长度，会使更多的少数载流子引到表面使表面复合中心俘获注入载流子的一大部分，这样会减小内量子效率。

产生 $h\nu < Eg$ 的发光可以使 $\bar{\alpha}$ 减小，由于发射的光子具有低于 Eg 的能量，因而得到了高效率。

另一种方法是采用一光学窗口。

(2) 光学窗口的作用：以 $AlGaAs / GaAs$ 结构为例：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地低于没有 $AlGaAs$ 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。

7 (10 分) 说明半导体光电二极管的工作原理。

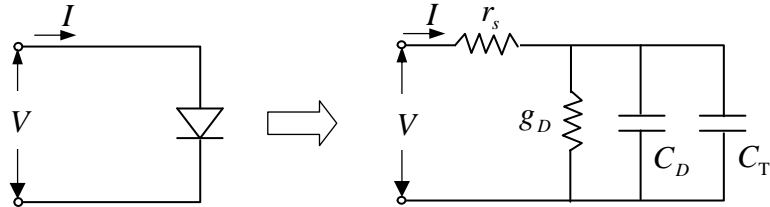
答：(1) 半导体吸收入射光子产生光生载流子；

(2) 光生载流子被反偏压 PN 结（或 M-S 结、异质结等）漂移产生电流。光电二极管的电信号受到入射光信号的调制即电信号反映了光信号的强度、频率等信息，达到检

测光信号的目的。

8 [10 分] 画出 PN 结二极管交流小信号等效电路图（包括串联电阻、直流电导—扩散电阻的倒数、耗尽层电容和扩散电容），分别给出它们的定义和主要的影响因素。

解：P-N 结小信号交流等效电路图如下。



耗尽层电容 C_T ：

定义：PN 结空间电荷随偏压变化所引起的电容。

主要的影响因素：偏压。

扩散电容 C_D ：

定义：PN 结正向注入的贮存电荷随偏压变化而引起的电容。

主要的影响因素：. 频率的影响—高频时可以忽略，低频时变大；

偏压的影响—随正偏压增大而增大。

直流电导 g_D ：

定义：扩散电阻（PN 结的直流电阻）的倒数。

主要的影响因素：扩散电流。与扩散电流（高的正偏压）成正比。反偏压 g_D 很小。

串联电阻 r_s ：

定义：半导体电中性区和接触上的电压降引起的电阻。

主要的影响因素：半导体电中性区电阻和欧姆接触电阻；

电流的影响，大电流（高的正偏压）下 r_s 的作用显著。

2004 级半导体器件物理期末试题 (B 卷) 答案

(共五题, 满分 100 分, 考试时间: 150 分钟)

1 [30 分] 右图为 PN 结由正偏压变为反偏压的载流子分布示意图, 可以看出:

A. 从 $t=0$ 到 $t=t_s$: 在 $P-N$ 结界面 $x=x_n$ 处注入的载流子浓度不断下降。

B. 注入载流浓度的梯度 $dp_n/dx|_{x=x_n}$ = 常数且沿 X 轴的负方向。

C. $t=t_s$: $p_n(x_n) = p_{n0}$ 。

D. $t>t_s$: $p_n(x) < p_{n0}$ 。

根据以上事实解释 PN 结反向瞬变现象:

a. $t=0$ 到 $t=t_s$: 扩散电流 I_r 为常量且沿 $-x$ 方向。

b. $t=0$ 到 $t=t_s$: 结电压 $v_d > 0$, 但 V_d 在减小,

c. $t=t_s$: 结电压为零。

d. $t>t_s$: $v_d < 0$, 扩散电流 I_r 也愈来愈小。

e. $t=\infty$: $V = -V_r$, $I = -I_0$

答: a. 根据 B

b. 根据 A 在 $t=0$ 到 $t=t_s$ 阶段, 由于在 $x=x_n$ 面上 $p_n(x_n)$ 仍然大于 p_{n0} , 根据 $p_n(x_n) = p_{n0}e^{v_d/V_T}$ 因此 $P-N$ 结两端的电压 $v_d > 0$, 在这一段时间内, 由于 $p_n(x_n)$ 在减小, 因此 V_d 也在减小,

c. 根据 C, 当 $t=t_s$ 时, $p_n(x_n) = p_{n0}$, 于是结电压为零。

d. 根据 D

e. 达到反偏压稳定状态。

2 [20 分] 一个 $W-Si$ 肖特基势垒二极管, $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 热发射电子电流

$$J_0 = R^* T^2 e^{-\phi_b/V_T} = 6.5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2, \quad R^* = 110 \text{ A/K}^2 \cdot \text{cm}^2, \quad T = 300 \text{ K}.$$

(1) 计算势垒高度和耗尽层宽度。

(2.) 比较多数载流子电流和少数载流子电流, 假设 $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $D_p = 36 \text{ cm}^2/\text{s}$

$$\text{解: } \phi_b = V_T \ln \frac{R^* T^2}{J_0} = 0.026 \ln \frac{110 \times 300^2}{6.5 \times 10^{-5}} = 0.67 \text{ V}$$

$$V_n = V_T \ln \frac{N_C}{N_d} = 0.17V \quad \text{于是}$$

$$\psi_0 = \phi_b - V_n = 0.67 - 0.17 = 0.50V$$

$$V_R = 0 \text{ 时, 耗尽层宽度为 } W = \sqrt{\frac{2k\varepsilon_0\psi_0}{qN_d}} = 2.6 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

$$\text{设 } (N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ 时}), \text{ 则 } L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 6 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

$$\text{因此, } J_{p0} = \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_d} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 36 \times (1.5 \times 10^{10})^2}{6 \times 10^{-3} \times 10^{16}} = 2 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$$

$$\frac{J_0}{J_{p0}} = \frac{6.5 \times 10^{-5}}{2 \times 10^{-11}} = 3.2 \times 10^6$$

3 [10 分] 写出双极结型晶体管少数载流子边界条件, 画出四种工作模式的少数载流子分布示意图。

解:

正向有源工作模式: $V_E > 0, V_C < 0$

基区少子满足的边界条件为 $n_p(0) = n_{p0} e^{V_E/V_T}$, $n_p(x_B) = 0$ 。

反向有源工作模式: $V_E < 0, V_C > 0$

相应的边界条件为 $n_p(0) = 0$, $n_p(x_B) = n_{p0} e^{V_C/V_T}$ 。

饱和工作模式: $V_E > 0, V_C > 0$

相应的边界条件为 $n_p(0) = n_{p0} e^{V_E/V_T}$, $n_p(x_B) = n_{p0} e^{V_C/V_T}$ 。

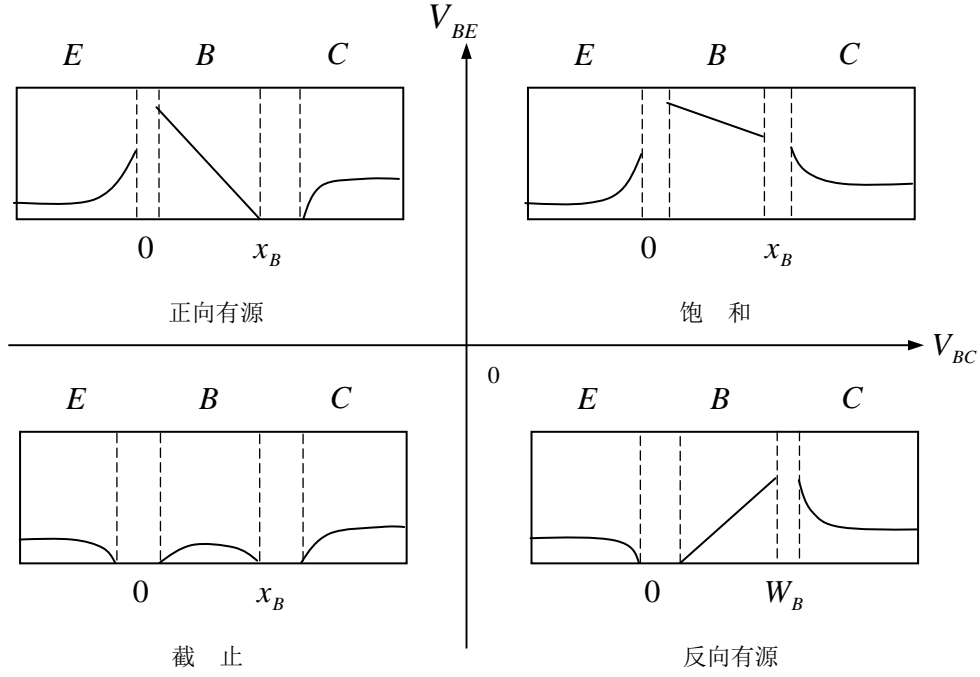
截止工作模式: $V_E < 0, V_C < 0$

相应的边界条件为 $n_p(0) = n_p(x_B) = 0$

此外, $p_E(-x_E) = p_{E0}$, $P_E(-W_E) = P_{E0} e^{V_E/V_T}$, $p_C(\infty) = p_{C0}$ 。

$P(-W_E) = P_{E0} e^{V_E/V_T}$

四种工作模式及相应的少子分布示于图 3-14 中。



正向有源工作模式： $V_E > 0$ ， $V_C < 0$

基区少子满足的边界条件为 $n_p(0) = n_{p0} e^{V_E/V_T}$ ， $n_p(x_B) = 0$ 。

反向有源工作模式： $V_E < 0$ ， $V_C > 0$

相应的边界条件为 $n_p(0) = 0$ ， $n_p(x_B) = n_{p0} e^{V_C/V_T}$ 。

饱和工作模式： $V_E > 0$ ， $V_C > 0$

相应的边界条件为 $n_p(0) = n_{p0} e^{V_E/V_T}$ ， $n_p(x_B) = n_{p0} e^{V_C/V_T}$ 。

截止工作模式： $V_E < 0$ ， $V_C < 0$

相应的边界条件为 $n_p(0) = n_p(x_B) = 0$

此外， $p_E(-x_E) = p_{E0}$ ， $p_E(-W_E) = p_{E0} e^{V_E/V_T}$ ， $p_C(\infty) = p_{C0}$ 。

V_{BE}

四种工作模式及相应的少数分布示于图 3-14 中。

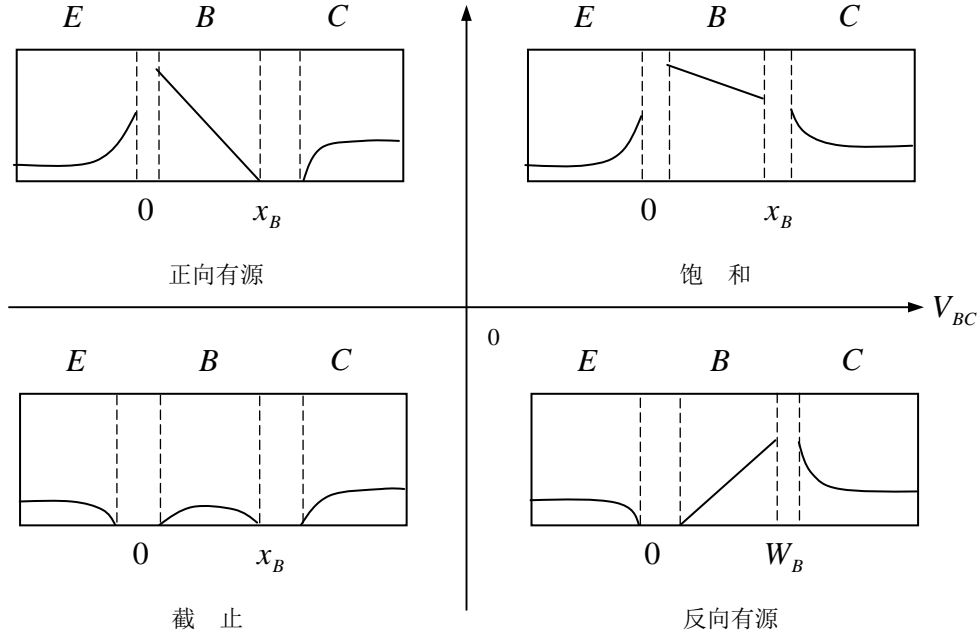


图 3-14 晶体管四种不同工作模式对应的少数载流子分布

或： $p_E(-x_E) = p_{E0}$, $P_E(-W_E) = P_{E0}e^{V_E/V_T}$, $n_p(0) = n_{p0}e^{V_E/V_T}$, $n_p(x_B) = n_{p0}e^{V_C/V_T}$
 $p_c(x_c) = p_{c0}e^{V_C/V_T}$, $p_c(\infty) = p_{C0}$ 亦可。

4 [20 分] 若 N 沟道增强型 MOS FET 的源和衬底接地，栅和漏极短路，推导出漏电流公式（假设 V_{TH} 为常数）。

解： 栅-漏极短路，即 $V_G = V_D$ ，此时沟道夹断。

$$Q_I = -C_0(V_G - V_{TH})$$

$$I_{DS} = -A\sigma_n\epsilon_y = -Zx_I\bar{n}_I q\mu_n\epsilon_y = -Zx_I \frac{1}{x_I} \int_0^{x_I} n(x)dx q\mu_n\epsilon_y = ZQ_I\mu_n\epsilon_y$$

$$= -Z\mu_n C_0(V_G - V_{TH})\left(-\frac{dV}{dx}\right) = Z\mu_n C_0(V_G - V_{TH})\frac{dV}{dy}$$

即

$$I_{DS}dy = Z\mu_n C_0(V_G - V_{TH})dV$$

不考虑沟道的调制效应，由 $0 \rightarrow L$ 积分，边界条件为：

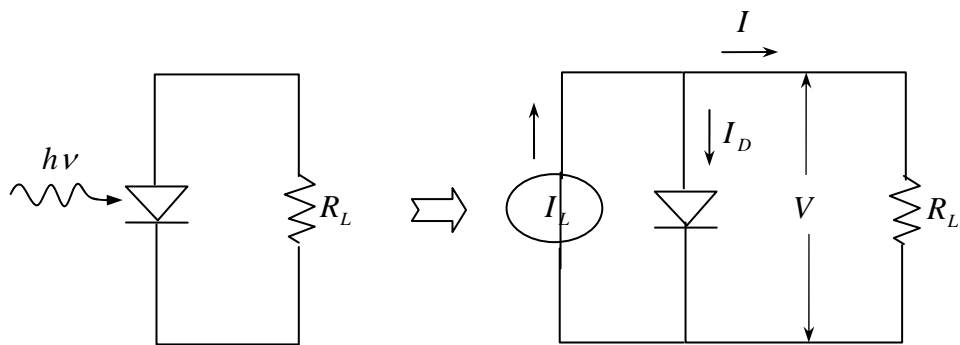
$$\begin{cases} V(0) = 0 \\ V(L) = V_G - V_{TH} \end{cases}$$

$$\text{则 } I_{DS} = \frac{Z\mu_n C_0}{L} \int_0^{V_G - V_{TH}} (V_G - V_{TH}) dV = \frac{Z\mu_n C_0}{L} (V_G - V_{TH})^2$$

上式即为 V_{TH} 为常数时，漏电流公式。

5 [10 分] 画出理想太阳电池等效电路图并根据等效电路图写出 I-V 关系。

解：等效电路图

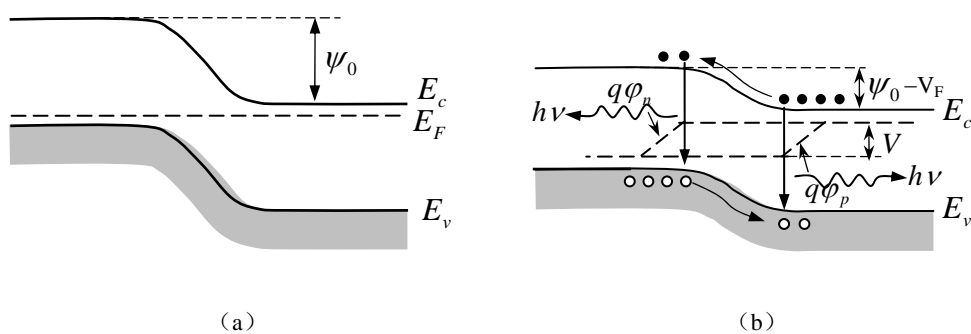


I-V 关系：

$$\begin{aligned} I &= I_L - I_D \\ &= I_L + I_0 \left(1 - e^{V/V_T} \right) \end{aligned}$$

6 [10 分] 画出能带图说明 PN 结 LED 工作原理：

解：能带图



工作原理：当正向偏压加于 P-N 结的两端时，载流子注入，使得少数载流子浓度超过热平衡值，形成过量载流子。过量载流子复合，能量可能以光（光子）的形式释放。在光子发射过程中，我们从偏压的电能量得到光能量。这种现象称为注入式电致发光。在 P 侧，注入的非平衡少数载流子电子从导带向下跃迁与价带中的空穴复合，发射能量为 $h\nu$ 的光子。在 P-N 结的 N 侧，注入的非平衡少数载流子空穴与导带电子复合，同样发出能量为 $h\nu$ 的光子。