

pn 结

一、简答题。

1、简述 pn 结空间电荷区的形成过程。

答：当一块 n 型半导体和一块 p 型半导体接触时，在 p 型区和 n 型区的界面附近形成 pn 结（冶金结）。在冶金结处，电子和空穴浓度都有一个很大的浓度梯度。pn 结两侧的载流子浓度不同，n 区多子电子向 p 区扩散，p 区多子空穴向 n 区扩散。若无外加电路，这种扩散过程不可能无限继续。

随着电子从 n 区向 p 区扩散，带正电的施主离子被留在 n 区；同样，随着空穴由 p 区向 n 区扩散，p 区由于存在带负电的受主离子而带负电。n 区与 p 区的净正电荷和净负电荷在冶金结附近感生一个内建电场，方向由 n 区指向 p 区。

在内建电场作用下，电子与空穴被扫出空间电荷区。由于空间电荷区内不存在任何可动的电荷，因此该区也称耗尽区。

在空间电荷区边缘处仍存在多子浓度的浓度梯度。由于浓度梯度的存在，多数载流子受到了一个“扩散力”。空间电荷区内的电场作用在电子和空穴上，产生与“扩散力”方向相反的力，称为“电场力”。热平衡条件下，每一种粒子（电子与空穴）所受的“扩散力”与“电场力”相互平衡。

2、什么是 pn 结的单向导电性（又称整流特性）？简述正偏、反偏时，pn 结的能级、内建电势差、势垒高度及空间电荷区宽度的变化情况。

答：（1）正偏压：势垒高度减少，有助于载流子扩散通过 pn 结，形成大的电流。给 pn 结造成了低阻的电流通路。反偏压：势垒高度增加，增高的势垒阻挡载流子的扩散，电流非常小，结的阻抗很高。以上分析说明：pn 结具有单向导电性，又称整流特性。

（2）正偏压 V 使热平衡费米能级分裂。

能级：n 区准费米能级 E_{Fn} 相对 p 区准费米能级 E_{Fp} 上移 qV 。相应地，n 区各个能级上移 qV 。

内建电势差：降低为 $\phi_0 - V$

势垒高度降至： $q(\phi_0 - V)$ 。

空间电荷区宽度：变窄。

(3) 能级：n 区接正电位，在远离 pn 结空间电荷区的中性区， E_{Fn} 及诸能级相对 p 区 E_{Fp} 下移 qV_R 。

内建电势差：增大为 $\phi_0 + V_R$

势垒高度：增加至 $q(\phi_0 + V_R)$

空间电荷区宽度：变宽。

3、什么是正偏复合电流？正偏复合电流的性质有哪些？

答：(1) 正偏压注入载流子穿越空间电荷区，使得空间电荷区载流子浓度可能超过平衡值，以至于 $np > n_i^2$ 。因而，在空间电荷层中会有非平衡载流子的复合，从而产生电流，这个电流称为空间电荷区正偏复合电流。

(2) 正偏复合电流的性质：

一、电压越低，空间电荷区复合电流越显著。随着正向电压的增加，扩散电流变得越来越主要。

二、半导体材料的禁带宽度越大，空间电荷区复合电流越大。硅 pn 结比锗 pn 结空间电荷区复合电流大。

三、pn 结轻掺杂区杂质浓度越大，将造成更多的复合中心，空间电荷区复合电流越大。

4、什么是隧道电流？隧道电流是如何产生的？

答：(1) 隧道电流：在 p 侧和 n 侧均为重掺杂的情况时，由于量子力学的隧道效应，有些载流子还可能隧道穿透（代替越过）势垒而产生额外的电流，即隧道电流。

(2) 隧道电流的产生条件：

在下列情况下可以产生隧道电流：

一、费米能级进入能带，即费米能级位于导带和价带的内部。

二、空间电荷区的宽度很窄，因而有高的隧道穿透概率。

三、在相同的能量水平上，在一侧的能带中有电子而在另一侧的能带中有空的状态。

当结的两边均为重掺杂，成为简并半导体时，满足条件一和二。外加偏压满足条件三。

5、什么是 pn 结的扩散电容？扩散电容具有哪些性质？

答：（1）扩散电容：正偏压的 pn 结注入并存储在扩散区的少数载流子电荷（存储电荷）随偏压变化所引起的电容。

（2）扩散电容的性质：

一、扩散电容在 pn 结正偏压情况下出现，偏压越高，扩散电容越大。反偏 pn 结存储电荷很少，因此，扩散电容可以忽略。

二、工作电流越大，扩散电容越大。

三、对于 $\omega\tau_p \gg 1$ 、 $\omega\tau_n \gg 1$ 的高频情形，存储电荷跟不上结电压的变化， C_D 很小；对于 $\omega\tau_p \ll 1$ 、 $\omega\tau_n \ll 1$ 的低频情况，扩散电容特别重要。

四、减少少子寿命（硅材料中掺金）可以有效地减小扩散电容。

6、什么是 pn 结二极管的开关特性？什么是电荷存储？什么是 pn 结反向瞬变？反向瞬变的产生原因是什么？

答：（1）pn 结二极管的开关特性：pn 结二极管处于正向偏置时允许通过较大的电流，处于反向偏置时通过二极管的电流很小，因此，常把处于正向偏置时二极管的工作状态称为开态，而把处于反向偏置时的工作状态称为关态。可见，pn 结二极管能起到开关作用。

（2）电荷存储：当加一恒定的正向偏压时，载流子被注入并保持在 pn 结二极管中，这种现象称为电荷存储效应。

（3）pn 结反向瞬变：当正偏压突然转换至反偏压时，在稳态条件下所存储的载流子并不能立刻消除，由此导致 pn 结二极管的反向瞬变。

（4）反向瞬变产生的原因：反向瞬变现象起源于 pn 结的电荷存储效应。

7、pn 结结击穿的机制有哪些？详细解释这几种击穿机制。

答：（1）pn 结结击穿有两种机制，分别为齐纳击穿和雪崩击穿。

（2）齐纳击穿：在高电场下，重掺杂的 pn 结由于隧穿机制发生齐纳击穿。重掺杂 pn 结内，反偏条件下结两侧的导带与价带离得非常近，电子可以由 p 区

的价带直接隧穿到 n 区的导带。齐纳击穿发生在低电压情况下，比如硅 pn 结低于 4 V 情况下发生的击穿。

(3) 雪崩击穿：高电压击穿，由雪崩倍增效应所引起的击穿。例如，硅中大于 6 V 的击穿。对于大多数 pn 结，雪崩击穿占主导地位。雪崩倍增：当电子和（或）空穴穿越空间电荷区时，由于电场的作用，能量增加。当能量增大到一定程度，与耗尽区的电子发生碰撞，将产生新的电子—空穴对，新的电子和空穴撞击其他的电子，产生更多的电子—空穴对，于是发生了雪崩效应。

二、计算题

1、Si 突变 pn 结二极管的掺杂浓度分别为 $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 和 $N_a = 4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。计算室温下：(1) 内建电势；(2) 耗尽层宽度；(3) 零偏压下的最大电场 ($V_T = 0.026 \text{ V}$, $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 硅相对介电常数 $k = 11.9$, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)。

解：(1) 内建电势差：

$$\varphi_0 = V_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = 0.026 \ln \frac{4 \times 10^{20} \times 10^{15}}{(1.5 \times 10^{10})^2} = 0.913 \text{ V}$$

(2) 耗尽层宽度：

$$\begin{aligned} W = x_n &= \left(\frac{2\varepsilon\varphi_0}{qN_d} \right)^{1/2} = \left(\frac{2k\varepsilon_0\varphi_0}{qN_d} \right)^{1/2} = \left(\frac{2 \times 11.9 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 0.913}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{15}} \right)^{1/2} \\ &= 1.096 \times 10^{-4} \text{ cm} \end{aligned}$$

(3) 零偏压下的最大电场：

$$\begin{aligned} \varepsilon_m &= -\frac{qN_dx_n}{\varepsilon} = -\frac{qN_dx_n}{k\varepsilon_0} = -\frac{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{15} \times 1.096 \times 10^{-4}}{11.9 \times 8.85 \times 10^{-14}} \\ &= 1.67 \times 10^{-4} \text{ V/cm} \end{aligned}$$

负号表示电场方向。

2、把一个硅二极管用做变容二极管。在结的两边掺杂浓度分别为 $N_a = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 和 $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。二极管的面积为 100 mil^2 。(1) 求在 $V_R = 1 \text{ V}$ 和 5 V 时二极管的电容。(2) 计算用此变容二极管和 $L = 2 \text{ mH}$ 的储能电路的

共振频率。($n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 硅相对介电常数 $k = 11.9$, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)。

解: (1)

$$\varphi_0 = V_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = 0.026 \ln \frac{10^{19} \times 10^{15}}{(1.5 \times 10^{10})^2} = 0.817 \text{ V}$$

由于 $N_a \gg N_d$, 所以:

$$C \equiv A \left[\frac{q \varepsilon N_d}{2(\varphi_0 + V_R)} \right]^{1/2}$$

当 $V_R = 1 \text{ V}$ 时,

$$\begin{aligned} C &\equiv A \left[\frac{q \varepsilon N_d}{2(\varphi_0 + V_R)} \right]^{1/2} \\ &= 6.45 \times 10^{-10} \times 100 \\ &\times \left[\frac{1.6 \times 10^{-19} \times 11.9 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 10^{15}}{2 \times (0.817 + 1)} \right]^{1/2} = 4.39 \times 10^{-16} \text{ F} \end{aligned}$$

当 $V_R = 5 \text{ V}$ 时,

$$\begin{aligned} C &\equiv A \left[\frac{q \varepsilon N_d}{2(\varphi_0 + V_R)} \right]^{1/2} \\ &= 6.45 \times 10^{-10} \times 100 \\ &\times \left[\frac{1.6 \times 10^{-19} \times 11.9 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 10^{15}}{2 \times (0.817 + 5)} \right]^{1/2} = 2.45 \times 10^{-16} \text{ F} \end{aligned}$$

(2) 当谐振频率和控制电压有线性关系时:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

当 $V_R = 1 \text{ V}$ 时,

$$\omega_{r1} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{2 \times 10^{-3} \times 4.39 \times 10^{-16}}} = 1.07 \times 10^9 \text{ rad/s}$$

当 $V_R = 5 \text{ V}$ 时,

$$\omega_{r2} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{2 \times 10^{-3} \times 2.45 \times 10^{-17}}} = 1.43 \times 10^9 \text{ rad/s}$$

3、一个硅二极管工作在 0.5 V 的正向电压下, 当温度从 25°C 升高至 150°C 时,

计算电流增加的倍数。假设 $I \approx I_0 e^{V/(2V_T)}$, I_0 每 10°C 增加一倍。

解: 25°C 时,

$$I_1 \approx I_0 e^{V/(2V_T)} = I_0 e^{qV/[2(273+25)]} = I_0 e^{qV/596}$$

150°C 时,

$$I_2 = 2^{\frac{150-25}{10}} I_0 e^{V/(2V_T)} = I_0 e^{qV/[2(273+150)]} = 2^{12.5} I_0 e^{qV/846}$$

所以:

$$\frac{I_2}{I_1} = 2^{12.5} e^{0.5q/[2K(\frac{1}{423}-\frac{1}{298})]} = 5792.62 e^{\left[\frac{0.5 \times 1.6 \times 10^{-19}}{2 \times 1.38 \times 10^{-23}} \left(\frac{1}{423}-\frac{1}{298}\right)\right]} = 327$$

电流增加的倍数:

$$327 - 1 = 326 \text{ 倍}$$

4、在硅中当最大电场接近 10^6 V/cm 时生击穿。假设在 p 侧, $N_a = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 为得到 2 V 的击穿电压, 采用单边突变近似, 求 n 侧的施主浓度。(硅相对介电常数 $k = 11.9$, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)。

解: 在 p 区, 解泊松方程, 求得:

$$\epsilon_m = \frac{qN_a x_p}{\epsilon}$$
$$x_p = \frac{\epsilon \epsilon_m}{qN_a}$$

在 n 区, 解泊松方程, 求得:

$$\epsilon_m = -\frac{qN_d x_n}{\epsilon}$$

于是:

$$N_d = \frac{\epsilon \epsilon_m}{q x_n}$$

由电中性:

$$N_a x_p = N_d x_n$$

取:

$$x_n = \frac{V}{\epsilon_m}$$

于是:

$$\begin{aligned}
 N_d &= \frac{N_a x_p}{x_n} = \frac{\varepsilon \varepsilon_m}{q N_a} N_a \frac{\varepsilon_m}{V} = \frac{11.9 \times 8.85 \times 10^{-14} (F/cm) \times 10^{12} (V^2/cm^2)}{1.6 \times 10^{-19} \times 2 V} \\
 &= 3.29 \times 10^{18} F \cdot V / (cm^3 \cdot C) = 3.29 \times 10^{18} (cm^{-3})
 \end{aligned}$$

即：

$$N_d = 3.29 \times 10^{18} (cm^{-3})$$