

① در یک پیوند پله Si از جنس P-n با میزان ناخالصی  $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  در سمت P و  $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  در

سمت n در دما 300 K موجود است :

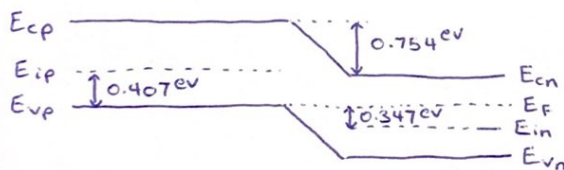
a) ترازهای نمری را مناسب لایه و سانتی رنوار انرژی را در حالت تعادلی رسم کنید و مقدار  $V_{bi}$  را از روی نمودار مناسب کنید.

b) با استفاده از رابطه مقابل مقدار  $V_{bi}$  را حساب کنید و بافت a مقایسه کنید  $V_{bi} = \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$

$$a) E_{ip} - E_F = k_B T \ln \frac{p_p}{n_i} = 0.025 \ln \frac{10^{17}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.407 \text{ eV}$$

$$E_F - E_{in} = k_B T \ln \frac{n_n}{n_i} = 0.025 \ln \frac{10^{16}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.347 \text{ eV}$$

$$q \cdot V_o = 0.407 \text{ eV} + 0.347 \text{ eV} = 0.754 \text{ eV}$$



$$b) q \cdot V_o = k_B T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = 0.0259 \ln \frac{10^{17} \times 10^{16}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.754 \text{ eV}$$

② با استفاده از روش گانت یون یک نمونه Si با  $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ناخالصی نرود ایم به طور سه پیوند پله با سطح مقطع  $A = 2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$  ایجاد شده است. فرض کنید چنانچه اسم های ناخالصی سمت P به میزان  $N_a = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  باشد. مقادیر  $V_{bi}$ ،  $x_{no}$ ،  $x_{po}$ ،  $Q^+$ ،  $E_{max}$  را در 300 K در حالت تعادلی محاسبه کنید و سپس نمودار میدان الکتریکی - مکان و چنانچه بار - مکان را رسم کنید.

$$V_o = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} = 0.0259 \ln \frac{4 \times 10^{18} \times 10^{16}}{(1.5 \times 10^{10})^2} = 0.849 \text{ V}$$

$$W = \sqrt{\frac{2 \epsilon_{Si} V_o}{q} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)} = 0.334 \text{ } \mu\text{m}, \quad x_{no} = \frac{W}{1 + \frac{N_d}{N_a}} = 0.333 \text{ } \mu\text{m}$$

$$x_{po} = \frac{W}{1 + \frac{N_a}{N_d}} = 0.83 \text{ nm}, \quad Q^+ = -Q^- = q A x_{no} N_d = 0.107 \text{ nC}$$

$$\epsilon_o = \frac{-q N_d x_{no}}{\epsilon_{Si}} = -5.1 \times 10^{14} \text{ V/cm}$$

③ در یک پیوند  $p^+ - n$  است  $n$  به میزان  $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ناخالص شده است. چنانچه  $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  ،  $D_p = 50 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$  ،  $D_n = 50 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$  ،  $\tau_p = 50 \text{ ns}$  ،  $\tau_n = 100 \text{ ns}$  و طول عمر الکترون و حفره به ترتیب  $\tau_p = 50 \text{ ns}$  ،  $\tau_n = 100 \text{ ns}$  باشد. مقدار جریان نفوذی حفره را در بایاس  $V_a = 0.6 \text{ V}$  در فاصله  $2 \mu\text{m}$  از لبه ناحیه تطبیق در سمت  $n$  را محاسبه کنید. چنانچه آرایش  $p^+$  دو برابر شود، این جریان حفره خواهد شد؟

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} = \sqrt{20 \times 50 \times 10^{-9}} = 10^{-3} \text{ cm} = 10 \mu\text{m}$$

$$S_p = \frac{n_i^2}{N_d} \cdot \left[ e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right] \cdot e^{-\frac{x}{L_p}} \Rightarrow \frac{dS_p}{dx} = -\frac{1}{L_p} \times \frac{n_i^2}{N_d} \cdot \left[ e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right] \cdot e^{-\frac{x}{L_p}} =$$

$$= \frac{-1}{10^{-3}} \times \frac{(10^{10})^2}{10^{16}} \times \left[ e^{\frac{0.6}{0.026}} - 1 \right] \cdot e^{-\frac{2 \mu\text{m}}{10 \mu\text{m}}} = -8.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-4}$$

$$J_{p, \text{diff}} = -q \cdot D_p \cdot \frac{dS_p}{dx} = 1.609 \times 10^{-19} \times 20 \times 8.6 \times 10^{16} = 0.277 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$$

④ یک پیوند  $n^+ - p$  با سطح مقطع  $A = 2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$  در دمای  $300 \text{ K}$  دارای ضخامت زیر است. در بایاس معکوس  $100 \text{ V}$  مقدار بیشینه میدان الکتریکی، چنان پیوند، کل بار ذخیره شده در سمت  $p$  و میدان الکتریکی در فاصله زیاد از ناحیه تطبیق را حساب کنید.

n-side	p-side
$N_d = \text{very high}$	$N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
$\tau_p = 10 \mu\text{s}$	$\tau_n = 0.1 \mu\text{s}$
$\mu_n = 100 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$	$\mu_n = 700 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$
$\mu_p = 450 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$	$\mu_p = 200 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$

$$V_{\text{Total}} = V_r + V_o \approx V_r = 100 \text{ V}$$

$$W = \sqrt{\frac{2 \epsilon_{\text{Si}} V_{\text{Total}}}{q} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)} \xrightarrow{\frac{1}{N_d} \ll 1} W \approx \sqrt{\frac{2 \epsilon_{\text{Si}} V_{\text{Total}}}{q \cdot N_a}} = \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 100}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{17}}} = 1.14 \mu\text{m}$$

$$C_j = \frac{C_{\text{Si}} A}{W} = \frac{11.8 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 10^{-4}}{1.14 \times 10^{-4}} = 0.916 \text{ PF}$$

$$I = 20 \times 10^{-3} \text{ A} = \frac{Q_n}{\tau_n} , Q_n = 20 \times 10^{-3} \times 0.1 \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-9}$$

⑤ بازدهی تریپل الکترن در یک پیوند تدریجاً رابطه  $\frac{I_n}{I}$  در  $\alpha_p = 0$  تقریب می شود.

(a) با فرض آنکه پیوند تدریجاً رابطه دیود توصیف شود، بازدهی تریپل الکترن را به ریب ثابت نفوذ طول نفوذ و چگالی بارهای اقلیت در حالت تقادلی محاسبه کنید.

(b) نشان دهید که بازدهی تریپل الکترن را می توان به صورت رابطه زیر نوشت که در آن اندیس های بالایی نشان دهنده نواحی  $p$  و  $n$  هستند. بهر آرایش بازدهی تأثیر یک پیوند به راهکار وجود دارد؟

$$\frac{I_n}{I} = \left( 1 + \frac{L_p^p \mu_p^n}{L_p^n \mu_n^p} \right)^{-1}$$



$$\frac{I_n}{I} = \frac{q \cdot A \cdot \frac{D_n}{L_n} \cdot n_p (e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1)}{q \cdot A \left( \frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) \cdot (e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1)} = \frac{1}{1 + \frac{D_p L_n}{D_n L_p} \cdot \frac{p_n}{n_p}}$$

$$b) \frac{D_p^n}{D_n^p} = \frac{\mu_p^n}{\mu_n^p} \quad \& \quad \frac{p_n}{n_p} = \frac{p_p}{n_n} \Rightarrow \frac{D_p^n p_n}{D_n^p n_p} = \frac{\mu_p^n p_p}{\mu_n^p n_n}$$

$$\Rightarrow \frac{I_n}{I} = \frac{1}{1 + \frac{L_n^p \mu_p^n \cdot p_p}{L_p^n \mu_n^p \cdot n_n}} \quad n_n \gg p_p$$

6) یک پیوند P-n با سطح مقطع  $A = 0.001 \text{ cm}^2$  با  $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  و  $N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  را در نظر بگیرید. (a) مقدار  $V_{bi}$  را حساب کنید. (b) عرض ناحیه تخلیه را حساب کنید. (c) جریان را در بایاس مستقیم  $V_a = 0.5 \text{ V}$  با فرض آنکه جریان غالب تقوین است و  $\mu_n = 1500 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$  و  $\mu_p = 450 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$  و  $\tau_n = \tau_p = 2.5 \text{ ns}$  محاسبه کنید. جریان غالب توسط کدام نوع باربر ایجاد شده است؟ آنترون یا حفره و چرا؟ اگر بخواهیم جریان دو برابر شود چه راهکار وجود دارد؟

$$\begin{cases} N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \\ N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \end{cases} \Rightarrow V_{bi} = \varphi_{FP} + \varphi_{FN} = \frac{k_B T}{q} \cdot \left[ \ln \frac{N_a}{n_i} + \ln \frac{N_d}{n_i} \right]$$

$$= 0.026 \left[ \ln \frac{10^{15}}{1.5 \times 10^{16}} + \ln \frac{10^{17}}{1.5 \times 10^{16}} \right] = 0.026 (11.1 + 15.7) = 0.70 \text{ V}$$

$$b) W = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s}{q} \cdot \left( \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \cdot V_{bi}} = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s}{q \cdot N_a} \cdot \left( \frac{N_a + N_d}{N_d} \right) \cdot V_{bi}} = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s}{q \cdot N_a} \left( 1 + \frac{N_a}{N_d} \right) \cdot V_{bi}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 (8.85 \times 10^{-14} \times 11.8)}{1.6 \times 10^{-19}} \times \frac{1}{10^{15}} \left( 1 + \frac{10^{15}}{10^{17}} \right) \times 0.70} = \sqrt{1.3 \times 10^{-8} \cdot (1 + 0.01) \times 0.70} = 9.6 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

$$= 0.96 \text{ microns}$$

$$c) \mu_n = 1500 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}, \mu_p = 450 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}, \tau = 2.5 \times 10^{-3} \text{ s}, n_i = 1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$D_n = \mu_n \left[ \frac{k_B T}{q} \right] = 1500 \times 0.026 = 38.9 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$D_p = \mu_p \left[ \frac{k_B T}{q} \right] = 450 \times 0.026 = 11.7 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau} = 0.31, \quad L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau} = 0.17 \text{ cm}$$

$$J_0 = (q \cdot n_i^2) \cdot \left[ \frac{D_p}{N_d \cdot L_p} + \frac{D_n}{N_a \cdot L_n} \right] = (1.6 \times 10^{-19}) \cdot (1.5 \times 10^{16}) \cdot (6.88 \times 10^{-18} + 1.25 \times 10^{-15})$$

$$= 4.5 \times 10^{-12}$$

$$I = A \cdot J_0 \left[ e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right] = (0.001) \cdot (4.5 \times 10^{-12}) \cdot \left[ e^{\frac{0.7}{0.026}} - 1 \right] = 2.2 \times 10^{-3} \text{ A}$$

⑦ در یک پیوند  $P-n$  میزان تسامعین  $N_d$  را دو برابر کرده ایم و سایر پارامترها ثابت است، توضیح مقادیر زیر هر کدام افزایش می یابد یا کاهش: (a) خانج پیوند (b) ولتاژ داخل پیوند (c) ولتاژ شکست (d) افت توان اجمعی

\* میزان پیوند افزایش می یابد  
\* افت توان اجمعی کاهش می یابد  
\* ولتاژ داخل پیوند افزایش می یابد  
\* ولتاژ شکست کاهش می یابد

⑧ مقدار خانج پیوند را در دیود  $n^+ - P$  با مشخصات  $N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  و  $A = 0.001 \text{ cm}^2$  در بایاس معکوس  $V_a = -1.5 \text{ V}$  و  $V_a = -10 \text{ V}$  محاسبه کنید. نمودار  $\frac{1}{C^2}$  بر حسب  $V_a$  رسم کنید. نشان دهید شیب نمودار برابر است با  $N_a$ . محاسبات فوق را مجدداً با  $N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  تکرار کنید و نتیجه به این نتیجه آرایش است  $n^+$  داده شده است تقریب مناسبی را ارائه کنید.

$$C = \frac{\epsilon_s}{\omega} \cdot A = A \cdot \sqrt{\frac{q \cdot N_a \cdot \epsilon_s}{2(V_0 + V_R)}} \xrightarrow{V_0 = V_{bi}} V_{bi} = 0.55 \text{ eV} + 0.259 \text{ eV} \cdot \ln \frac{N_a}{n_i}$$

$$\frac{1}{C^2} = \frac{1}{A^2} \times \frac{V_0 + V_R}{q \cdot N_a \cdot \frac{\epsilon_s}{2}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{for } N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}, V_{bi} = 0.84 \text{ eV} \rightarrow \frac{1}{C^2} = 1.197 \times 10^{22} \cdot (0.84 \text{ eV} + V_R) \\ \text{for } N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}, V_{bi} = 0.94 \text{ eV} \rightarrow \frac{1}{C^2} = 1.197 \times 10^{22} \cdot (0.94 \text{ eV} + V_R) \end{array} \right.$$

