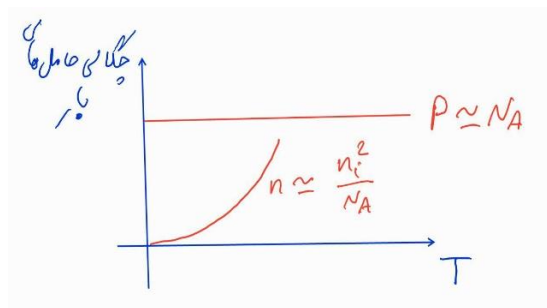




۱. در نیمه‌هادی نوع P، مقادیر چگالی الکترون‌های آزاد (n) و چگالی حفره‌ها (p) چگونه با افزایش دما تغییر می‌کنند؟



پاسخ: در نیمه‌هادی نوع P داریم:

$$p \approx N_A$$

$$n \approx \frac{n_i^2}{p} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

۲. در یک آزمایش نیاز داریم جریان هدایتی ناشی از الکترون‌ها و حفره‌ها برابر باشد. برای رسیدن به هدف خود، چگالی حامل‌ها در بلور سیلیکون چگونه باید انتخاب شوند؟ اگر بخواهیم جریان هدایتی ناشی از الکترون‌های آزاد، دو برابر جریان هدایتی حفره‌ها باشد، چطور؟

$$(\mu_n = 1350 \text{ (cm}^2 / \text{v.s)}, \mu_p = 480 \text{ (cm}^2 / \text{v.s)})$$

پاسخ: بدیهی است برای آنکه جریان هدایتی ناشی از الکترون‌های آزاد و حفره‌ها برابر باشند، داریم:

$$J_n = J_p \Rightarrow n\mu_n q = p\mu_p q \Rightarrow n\mu_n = p\mu_p \Rightarrow \frac{n}{p} = \frac{\mu_p}{\mu_n}$$

از طرف دیگر می‌دانیم: $np = n_i^2$ ، در نتیجه

$$n = \sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n}} n_i, \quad p = \sqrt{\frac{\mu_n}{\mu_p}} n_i$$

همچنین برای سیلیکون داریم:

$$\mu_n = 1350 \text{ (cm}^2 / \text{v.s)}, \quad \mu_p = 480 \text{ (cm}^2 / \text{v.s)} \Rightarrow \frac{\mu_n}{\mu_p} = 2.81$$

و در نهایت:

$$\begin{cases} p = 1.68n_i = 1.68 \times 1.08 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} = 1.8144 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \\ n = 0.596n_i = 0.596 \times 1.08 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} = 0.644 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \end{cases}$$

اگر بخواهیم جریان هدایتی ناشی از الکترون‌های آزاد، دو برابر جریان هدایتی حفره‌ها باشد،

$$n = \sqrt{\frac{2\mu_p}{\mu_n}} n_i, \quad p = \sqrt{\frac{\mu_n}{2\mu_p}} n_i \Rightarrow \begin{cases} p = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 1.68n_i = 1.283 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \\ n = \sqrt{2} \times 0.596n_i = 0.911 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \end{cases}$$

۳. به خاطر مشکلات در تولید، سمت نیمه‌هادی نوع P یک پیوند PN ناخالص‌سازی نشده است. اگر $N_D = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ باشد، اختلاف پتانسیل سطح تماس را در دمای اتاق ($T = 300 \text{ K}$) محاسبه کنید.

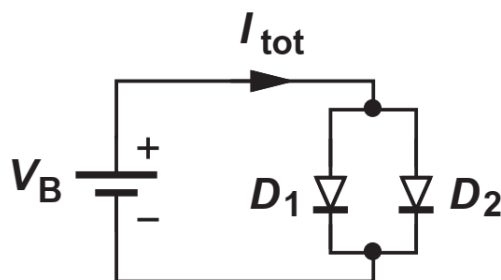
پاسخ: اگر سمت نیمه‌هادی نوع P ناخالص‌سازی نشده باشد، بدین معناست که چگالی حفره‌ها در

آن سمت برابر چگالی حفره‌های نیمه‌هادی خالص است. بنابراین $N_A = n_i$. در نتیجه

$$V_0 = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{n_i \times N_D}{n_i^2} \right) = \frac{KT}{q} \times \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) = 26 \text{ mV} \times \ln \left(\frac{3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}}{1.08 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}} \right)$$

$$= 26 \text{ mV} \times \ln (2.778 \times 10^6) = 26 \text{ mV} \times 14.837 = 385.762 \text{ mV}$$

۴. در شکل زیر دو دیود با جریان‌های اشباع معکوس I_{s1} و I_{s2} با همدیگر موازی شده‌اند.



الف) اثبات کنید که مشخصه جریان-ولتاژ المان حاصل از موازی کردن دو دیود، همچنان از رابطه‌ی پیروی می‌کند.

پاسخ:

$$I_{tot} = I_{D1} + I_{D2} = I_{s1} \left(e^{\frac{V_B}{V_T}} - 1 \right) + I_{s2} \left(e^{\frac{V_B}{V_T}} - 1 \right) = (I_{s1} + I_{s2}) \left(e^{\frac{V_B}{V_T}} - 1 \right)$$

بنابراین ترکیب موازی دیودها به صورت یک المان نمایشی با جریان اشباع معکوس مجموع تک تک دیودها ($I_{s1} + I_{s2}$) است.

ب) اگر جریان کل مدار برابر I_{tot} باشد، جریان هر کدام از دیودها (I_{D1} و I_{D2}) را محاسبه کنید.

پاسخ: ولتاژ دو سر دیودها برابر است. بنابراین

$$V_{D1} = V_{D2} \Rightarrow V_T \ln \left(\frac{I_{D1}}{I_{s1}} \right) = V_T \ln \left(\frac{I_{D2}}{I_{s2}} \right)$$

از طرف دیگر طبق قانون جریان کیرشهف (KCL)، جریان کل (I_{tot}) برابر مجموع جریان‌های دیودهاست.

$$I_{tot} = I_{D1} + I_{D2} \Rightarrow I_{D2} = I_{tot} - I_{D1}$$

در نتیجه داریم:

$$V_T \ln\left(\frac{I_{D_1}}{I_{S_1}}\right) = V_T \ln\left(\frac{I_{tot} - I_{D_1}}{I_{S_2}}\right) \Rightarrow \frac{I_{D_1}}{I_{S_1}} = \frac{I_{tot} - I_{D_1}}{I_{S_2}} \Rightarrow I_{D_1} = I_{S_1} \frac{I_{tot} - I_{D_1}}{I_{S_2}}$$

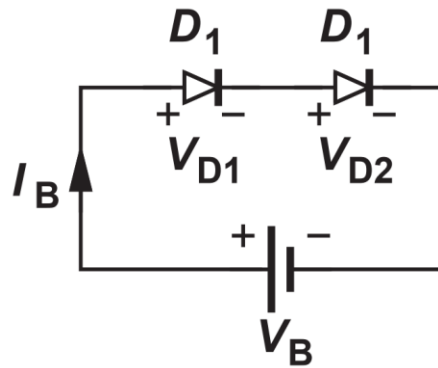
$$\Rightarrow I_{D_1} = \frac{I_{S_1}}{I_{S_2}} I_{tot} - \frac{I_{S_1}}{I_{S_2}} I_{D_1} \Rightarrow \left(1 + \frac{I_{S_1}}{I_{S_2}}\right) I_{D_1} = \frac{I_{S_1}}{I_{S_2}} I_{tot} \Rightarrow I_{D_1} = \frac{\frac{I_{S_1}}{I_{S_2}}}{\left(1 + \frac{I_{S_1}}{I_{S_2}}\right)} I_{tot} = \left(\frac{I_{S_1}}{I_{S_1} + I_{S_2}}\right) I_{tot}$$

در نهایت به طور مشابه جریان دیود D_2 نیز محاسبه می‌شود:

$$I_{D_1} = I_{tot} \left(\frac{I_{S_1}}{I_{S_1} + I_{S_2}}\right), I_{D_2} = I_{tot} \left(\frac{I_{S_2}}{I_{S_1} + I_{S_2}}\right)$$

۵. در شکل زیر دو دیود با جریان‌های اشباع معکوس I_{S_1} و I_{S_2} به صورت سری به همدیگر متصل شده‌اند.

مقادیر I_B و V_{D_1} و V_{D_2} را برحسب پارامترهای V_B و I_{S_1} و I_{S_2} به دست آورید.



پاسخ: با استفاده از قانون ولتاژ کیرشهف (KVL)، داریم:

$$V_B = V_{D_1} + V_{D_2} = V_T \ln\left(\frac{I_B}{I_{S_1}}\right) + V_T \ln\left(\frac{I_B}{I_{S_2}}\right)$$

$$\Rightarrow V_B = V_T \ln\left(\frac{I_B^2}{I_{S_1} I_{S_2}}\right) \Rightarrow I_B = \sqrt{I_{S_1} I_{S_2} \exp\left(\frac{V_B}{V_T}\right)} = \sqrt{I_{S_1} I_{S_2}} \exp\left(\frac{V_B}{2V_T}\right)$$

پس از اینکه جریان مدار (I_B) محاسبه شد، حال به راحتی می‌توان ولتاژ دو سر هر یک از دیودها را محاسبه کرد:

$$V_{D_1} = V_T \ln\left(\frac{I_B}{I_{S_1}}\right) = V_T \ln\left(\frac{\sqrt{I_{S_1} I_{S_2}} \exp\left(\frac{V_B}{2V_T}\right)}{I_{S_1}}\right) = V_T \ln\left(\sqrt{\frac{I_{S_2}}{I_{S_1}}}\right) + \frac{V_B}{2}$$

$$V_{D_2} = V_T \ln\left(\frac{I_B}{I_{S_2}}\right) = V_T \ln\left(\frac{\sqrt{I_{S_1} I_{S_2}} \exp\left(\frac{V_B}{2V_T}\right)}{I_{S_2}}\right) = V_T \ln\left(\sqrt{\frac{I_{S_1}}{I_{S_2}}}\right) + \frac{V_B}{2}$$

۶. در مدار سوال قبلی اگر بخواهیم جریان I_B ، ۱۰ برابر افزایش یابد، مقدار ولتاژ V_B را چقدر باید افزایش

دهیم؟

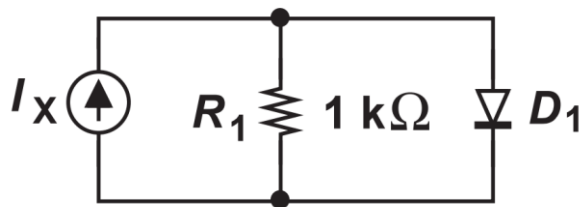
پاسخ: فرض می‌کنیم $I_{B,new} = 10I_B$ آنگاه با توجه به پاسخ سوال قبل:

$$V_B = V_T \ln \left(\frac{I_B^2}{I_{S_1} I_{S_2}} \right), \quad V_{B,new} = V_T \ln \left(\frac{I_{B,new}^2}{I_{S_1} I_{S_2}} \right)$$

$$\Rightarrow V_{B,new} = V_T \ln \left(\frac{(10I_B)^2}{I_{S_1} I_{S_2}} \right) = V_T \ln \left(\frac{100I_B^2}{I_{S_1} I_{S_2}} \right) = V_T \ln \left(\frac{I_B^2}{I_{S_1} I_{S_2}} \right) + V_T \ln 100 = V_B + 120\text{mV}$$

بنابراین با افزایش مقدار ۱۲۰ میلی‌ولت در ولتاژ V_B (مجموع ولتاژ دو سر دیودها)، جریان مدار ۱۰ برابر افزایش خواهد یافت.

۷. شکل زیر ترکیب موازی دیود و مقاومت را نشان می‌دهد. اگر جریان اشباع معکوس دیود برابر $I_s = 3 \times 10^{-16} \text{ A}$ باشد، ولتاژ دو سر دیود (V_{D_1}) را برای مقادیر مختلف منبع جریان $I_x = 1\text{mA}$ و $I_x = 2\text{mA}$ محاسبه کنید.



پاسخ: با استفاده از KCL داریم:

$$I_x = \frac{V_{D_1}}{R_1} + I_{D_1} = \frac{V_T}{R_1} \ln \left(\frac{I_{D_1}}{I_s} \right) + I_{D_1}$$

همان‌طور که در کلاس اشاره شد، روابط مشابه فوق که جواب فرم بسته‌ای ندارند را می‌توان با یک حدس اولیه (نقطه شروع) و با تکرار به دست آورد. در نتیجه

الف) برای $I_x = 1\text{mA}$ تکرار اول:

$$V_{D_1} = 0.7\text{V} \Rightarrow I_{D_1} = I_x - \frac{V_{D_1}}{R_1} = 1\text{mA} - \frac{0.7}{1\text{k}\Omega} = 0.3\text{mA}$$

$$\Rightarrow V_{D_1} = V_T \ln \left(\frac{I_{D_1}}{I_s} \right) = 26\text{mV} \times \ln \left(\frac{0.3\text{mA}}{3 \times 10^{-16} \text{A}} \right) \approx 0.718\text{V}$$

تکرار دوم:

$$V_{D_1} = 0.718\text{V} \Rightarrow I_{D_1} = I_x - \frac{V_{D_1}}{R_1} = 1\text{mA} - \frac{0.718}{1\text{k}\Omega} = 0.28\text{mA}$$

$$\Rightarrow V_{D_1} = V_T \ln \left(\frac{I_{D_1}}{I_s} \right) = 26\text{mV} \times \ln \left(\frac{0.28\text{mA}}{3 \times 10^{-16} \text{A}} \right) \approx 0.717\text{V}$$

تکرار سوم:

$$V_{D_1} = 0.717v \Rightarrow I_{D_1} = I_X - \frac{V_{D_1}}{R_1} = 1mA - \frac{0.717}{1^k\Omega} = 0.28mA$$

$$\Rightarrow V_{D_1} = V_T \ln\left(\frac{I_{D_1}}{I_s}\right) = 26mv \times \ln\left(\frac{0.28mA}{3 \times 10^{-16} A}\right) \approx 0.717v$$

بدیهی است که تکرار بیشتر از این لازم نیست. چرا که از این تکرار به بعد تغییرات ولتاژ قابل توجه نیست.

ب) برای $I_X = 2mA$ تکرار اول:

$$V_{D_1} = 0.7v \Rightarrow I_{D_1} = I_X - \frac{V_{D_1}}{R_1} = 2mA - \frac{0.7}{1^k\Omega} = 1.3mA$$

$$\Rightarrow V_{D_1} = V_T \ln\left(\frac{I_{D_1}}{I_s}\right) = 26mv \times \ln\left(\frac{1.3mA}{3 \times 10^{-16} A}\right) \approx 0.757v$$

تکرار دوم:

$$V_{D_1} = 0.757v \Rightarrow I_{D_1} = I_X - \frac{V_{D_1}}{R_1} = 2mA - \frac{0.757}{1^k\Omega} = 1.243mA$$

$$\Rightarrow V_{D_1} = V_T \ln\left(\frac{I_{D_1}}{I_s}\right) = 26mv \times \ln\left(\frac{1.243mA}{3 \times 10^{-16} A}\right) \approx 0.755v$$

تکرار سوم:

$$V_{D_1} = 0.755v \Rightarrow I_{D_1} = I_X - \frac{V_{D_1}}{R_1} = 2mA - \frac{0.755}{1^k\Omega} = 1.245mA$$

$$\Rightarrow V_{D_1} = V_T \ln\left(\frac{I_{D_1}}{I_s}\right) = 26mv \times \ln\left(\frac{1.245mA}{3 \times 10^{-16} A}\right) \approx 0.755v$$

بدیهی است که تکرار بیشتر از این لازم نیست. چرا که از این تکرار به بعد تغییرات ولتاژ قابل توجه نیست.

موفق باشید

صفوی