

ПОЛУПРОВОДНИЦИ

Основни постулати и равенки:

Означување:

Концентрација на електрони во полупроводникот:

$$n \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

Концентрација на празнини во полупроводникот:

$$p \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

Концентрација на носители во чист полупроводник:

$$n_i \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

Концентрација на донорски примеси:

$$N_D \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

Концентрација на акцепторски примеси:

$$N_A \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

Подвижност на електроните и празнините:

$$\mu_n, \mu_p \text{ [m}^2\text{/Vs]}$$

Дифузни константи на електроните и празнините:

$$D_n, D_p \text{ [m}^2\text{/s]}$$

Закон за термодинамичка рамнотежа:

$$p \cdot n = n_i^2$$

Закон за електрична неутралност:

$$N_D + p = N_A + n$$

Специфична проводливост σ :

$$\sigma = q_e (n\mu_n + p\mu_p) = \underbrace{q_e n \mu_n}_{\text{n-тип}} = \underbrace{q_e p \mu_p}_{\text{p-тип}} = \underbrace{q_e n_i (\mu_n + \mu_p)}_{\text{чист}}$$

Напонски еквивалент на температурата:

$$V_T = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q_e} \text{ [V]} \quad \{k: \text{Болцманова константа; } T: \text{апсолутна температура}\}$$

Контактен потенцијал на бариерата:

$$V_K = V_T \ln \frac{n_i^2}{N_A N_D}$$

1. Полупроводник има концентрација на донорски примеси $N_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ и концентрација на акцепторски примеси $N_A = 7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Да се одреди густината на струјата, ако се примени електростатско поле со јачина $K = 2 \text{ V/cm}$. Специфичната отпорност на интринсичен (чист) полупроводник изнесува $\rho_i = 60 \Omega\text{cm}$.

$$\mu_n = 3900 \text{ cm}^2/\text{Vs}; \quad \mu_p = 1900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

Решение:

Комбинирајќи ги законот за електрична неутралност и законот за термодинамичка рамнотежа, се добива зависноста на концентрацијата на електроните во полупроводникот од концентрациите на примесите:

$$\left. \begin{array}{l} N_D + p = N_A + n \\ p \cdot n = n_i^2 \end{array} \right\} \Rightarrow n = \frac{N_D - N_A \pm \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}}{2}$$

Добиената равенка има две решенија, од кои едното е невозможно. За да се добијат решенијата, прво треба да се одреди интринсичната концентрација на носители користејќи го податокот за специфичната отпорност:

$$\sigma_i = q_e n_i (\mu_n + \mu_p) = \frac{1}{\rho_i} \Rightarrow \rho_i = \frac{1}{q_e n_i (\mu_n + \mu_p)} = 60 \Omega\text{cm}$$

$$n_i = \frac{1}{q_e \rho_i (\mu_n + \mu_p)} = 1,8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

Од тука:

$$n' = 3,84 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$n'' = -8,4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$$

n'' е негативно и невозможно, па затоа $n = 3,84 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

Од законот за термодинамичка рамнотежа се добива и концентрацијата на празнините:

$$p = \frac{n_i^2}{n} = 0,84 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

На крај се добива и густината на струјата:

$$J = \sigma \cdot K = q_e (n\mu_n + p\mu_p) K = 53 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$$

2. Да се определи колку пати специфичната отпорност на чист Германиум е поголема од специфичната отпорност на чист Силициум при собна температура. Што се случува со односот на специфичните отпорности ако и во двата полупроводници се додадат донорски примеси со концентрација $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Познато е:

$$\text{За Ge: } n_{iGe} = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} \quad \mu_{nGe} = 3900 \text{ cm}^2/\text{Vs}; \quad \mu_{pGe} = 1900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$\text{За Si: } n_{iSi} = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3} \quad \mu_{nSi} = 1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}; \quad \mu_{pSi} = 500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

Решение:

Кај чистите полупроводници ќе важи:

$$\frac{\sigma_{iGe}}{\sigma_{iSi}} = \frac{q_e n_{iGe} (\mu_{nGe} + \mu_{pGe})}{q_e n_{iSi} (\mu_{nSi} + \mu_{pSi})} = 5225,2 = \frac{\rho_{iSi}}{\rho_{iGe}} \Rightarrow \frac{\rho_{iGe}}{\rho_{iSi}} = 0,00019$$

Ако се додадат донорски примеси, комбинирајќи ги законот за електрична неутралност и законот за термодинамичка рамнотежа:

$$\left. \begin{array}{l} N_D + p = N_A + n \\ N_A = 0 \\ p \ll n \end{array} \right\} \Rightarrow n = N_D \Rightarrow \begin{array}{l} p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_D} \\ \sigma = q_e \cdot n \cdot \mu_n \end{array}$$

$$\text{Бараниот однос е: } \frac{\sigma_{Ge}}{\sigma_{Si}} = \frac{q_e n_{Ge} \mu_{nGe}}{q_e n_{Si} \mu_{nSi}} = \frac{\mu_{nGe}}{\mu_{nSi}} = 2,889 \Rightarrow \frac{\rho_{Ge}}{\rho_{Si}} = 0,346$$

3. Со мерење е утврдено дека на собна температура специфичната отпорност на р страната на некој силициумски рп – спој е 10 пати помала од специфичната отпорност на п страната. Измерен е и контактниот потенцијал на бариерата, и тој изнесува $V_K = -0,75 \text{ V}$. Да се одредат концентрациите на примеси N_A (на р страната) и N_D (на п страната).

Познато е:

$$n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3} \quad \mu_n = 1300 \text{ cm}^2/\text{Vs}; \quad \mu_{pSi} = 450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

Решение:

Од податокот за односот помеѓу специфичните отпорности, го добиваме и односот помеѓу концентрациите на примеси:

$$\frac{\rho_n}{\rho_p} = 10 \Rightarrow \frac{\sigma_p}{\sigma_n} = 10 = \frac{q_e \mu_p p}{q_e \mu_n n} = \left\{ \begin{array}{l} n = N_D \\ p = N_A \end{array} \right\} = \frac{\mu_p N_A}{\mu_n N_D} \Rightarrow \frac{N_A}{N_D} = 10 \frac{\mu_n}{\mu_p} \quad (1)$$

Изразот за контактниот потенцијал на бариерата може да понуди уште една зависност помеѓу концентрациите на примеси:

$$V_K = V_T \ln \frac{n_i^2}{N_A N_D} \Rightarrow N_A N_D = n_i^2 \cdot e^{\frac{-V_K}{V_T}} \quad (2)$$

Равенките (1) и (2) претставуваат систем од две равенки со две променливи (N_A и N_D), чии што решенија се:

$$N_A = 14,8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \quad N_D = 5,12 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

4. Да се определи при која концентрација на електрони проводливоста на некој полупроводник е најмала и колку изнесува таа проводливост.

Решение:

Тргувајќи од изразот за специфична проводливост и законот за термодинамичка рамнотежа, произлегува

$$\sigma = q_e (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) = \left\{ p = \frac{n_i^2}{n} \right\} = q_e \left(n \cdot \mu_n + \frac{n_i^2}{n} \cdot \mu_p \right)$$

Минимумот на оваа функција настанува при:

$$\frac{d\sigma}{dn} = q_e \left(\mu_n - \frac{n_i^2}{n^2} \cdot \mu_p \right) = 0 \Rightarrow \mu_n = \frac{n_i^2}{n^2} \cdot \mu_p \Rightarrow n = n_i \sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n}}$$

Ако оваа вредност се замени во изразот за специфичната проводливост:

$$\sigma_{\min} = q_e \left(n \cdot \mu_n + \frac{n_i^2}{n} \cdot \mu_p \right) = q_e \left(n_i \sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n}} \cdot \mu_n + \frac{n_i^2}{n_i \sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n}}} \cdot \mu_p \right)$$

$$\sigma_{\min} = q_e (n_i \sqrt{\mu_p \cdot \mu_n} + n_i \sqrt{\mu_n \cdot \mu_p})$$

$$\sigma_{\min} = 2q_e \cdot n_i \sqrt{\mu_p \cdot \mu_n}$$

Име и презиме _____

Индекс _____

Насока / модул _____

Бодови _____

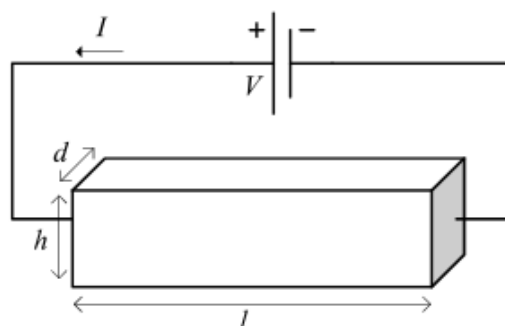
1. На едно парче од силициумски полупроводник е поврзан извор на константен напон V како на сликата. Да се пресмета вредноста на означената струја I , во два случаи.

а) Кога во полупроводникот нема додадено никакви примеси.

б) Кога во полупроводникот се додадени донорски примеси N_D , и акцепторски примеси N_A .

Познато е:

$$\begin{array}{llll} V = 100 \text{ V}; & d = h = 1 \text{ cm}; & l = 20 \text{ cm}; & N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \\ n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3} & \mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}; & \mu_p = 500 \text{ cm}^2/\text{Vs} & N_A = 10^{12} \text{ cm}^{-3} \\ & & & q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C (Vs}/\Omega) \end{array}$$



Решение:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{\rho \frac{l}{S}} = \frac{V \sigma d h}{l} = \frac{100 \text{ V} \cdot 1 \text{ cm}^2}{20 \text{ cm}} \sigma = 5 \text{ V cm} \cdot \sigma$$

$$\sigma = q_e (n \mu_n + p \mu_p) \left\{ \frac{\text{C cm}^2}{\text{cm}^3 \text{ Vs}} \rightarrow \frac{\text{As}}{\text{cm Vs}} \rightarrow \frac{\text{A}}{\text{cm V}} \right\}$$

$$I = 5 \text{ V cm} \cdot \sigma = 5 \text{ V cm} \cdot q_e (n \mu_n + p \mu_p) \frac{\text{A}}{\text{cm V}}$$

$$I = 5 \cdot q_e (n \mu_n + p \mu_p) \text{ A}$$

а)

$$n = p = n_i$$

$$I = 5 \cdot q_e \cdot n_i (\mu_n + \mu_p) \text{ A} = 22,2 \text{ } \mu\text{A}$$

б)

$$N_D \gg N_A \rightarrow n = N_D \rightarrow p = \frac{n_i^2}{N_D} \ll n$$

$$I = 5 \cdot q_e \cdot N_D \cdot \mu_n \text{ A} = 1,08 \text{ A}$$

pn СПОЈ

Основни постулати и равенки:

Означување:

Широчина на бариерата: d_B [m]

Широчина на бариерата на р страната: d_{Bp} [m]

Широчина на бариерата на п страната: d_{Bn} [m]

Приклучен напон однадвор: V [V]

Инверзна струја на заситување: I_S [A]

Површина на pn спојот: S [m²]

Дифузни должини на електроните и празнините: L_n, L_p [m]

Времиња на живот на електроните и празнините: τ_n, τ_p [s]

Широчина на бариерата во рамнотежа:

$$d_B = d_{Bp} + d_{Bn} = \sqrt{\frac{2\varepsilon|V_{TOT}|N_D}{q_e N_A (N_A + N_D)}} + \sqrt{\frac{2\varepsilon|V_{TOT}|N_A}{q_e N_D (N_A + N_D)}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon|V_{TOT}|(N_A + N_D)}{q_e N_A N_D}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d_{Bp}}{d_{Bn}} = \frac{N_D}{N_A} \\ V_{TOT} = V_K - V \end{array} \right\} \quad V_K: \text{Контактен потенцијал на бариерата}$$

Бариерна капацитивност:

$$C_B = \varepsilon \frac{S}{d_B} = \frac{S}{\sqrt{|V_{TOT}|}} \sqrt{\frac{q_e \varepsilon}{2} \frac{N_A N_D}{(N_A + N_D)}}$$

Инверзна струја на заситување:

$$I_S = q_e S n_i^2 \left(\frac{D_p}{N_D L_p} + \frac{D_n}{N_A L_n} \right)$$

Струја низ диода (Равенка на Шокли):

$$I = I_S (e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$$

1. Бариерната капацитивност на еден рп спој се користи како променлив кондензатор. Кога нема приклучен напон, капацитивноста изнесува $C_1 = 10\text{pF}$. Колкав напон треба да се доведе на спојот, за да неговата капацитивност изнесува $C_2 = 5\text{pF}$? Концентрациите на примеси изнесуваат $N_D = 4N_A = 3 \cdot 10^{17}\text{cm}^{-3}$.

$$\varepsilon = 1,07 \cdot 10^{-12} \text{ F/cm}; \quad n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}; \quad V_T = 26\text{mV};$$

Решение:

Кога нема приклучен напон, $V = 0$, па

$$C_1 = \varepsilon \frac{S}{d_{B1}} = \frac{S}{\sqrt{|V_K - 0|}} \sqrt{\frac{q_e \varepsilon}{2} \frac{N_A N_D}{(N_A + N_D)}} = 10 \text{ pF}$$

Со приклучен напон V ,

$$C_2 = \varepsilon \frac{S}{d_{B2}} = \frac{S}{\sqrt{|V_K - V|}} \sqrt{\frac{q_e \varepsilon}{2} \frac{N_A N_D}{(N_A + N_D)}} = 5 \text{ pF}$$

Следува

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\sqrt{|V_K - V|}}{\sqrt{|V_K|}} = \sqrt{1 - \frac{V}{V_K}} = 2 \Rightarrow V = -3V_K$$

Треба уште да се пресмета контактниот потенцијал на бариерата V_K :

$$V_K = V_T \ln \frac{n_i^2}{N_A N_D} = V_T \ln \frac{n_i^2}{4N_A^2} = -0,838 \text{ V} \Rightarrow V_K = 3V_K = -2,514 \text{ V} \approx -2,5 \text{ V}$$

Значи, на рп спојот треба да се доведе инверзен напон од 2,5 V.

3. Да се пресмета контактниот потенцијал за даден рп спој чии технолошки карактеристики се дадени подолу. Да се одреди широчината на бариерата, и колку таа се протега на р и на п страната, во следните случаи:

- а) $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; без приклучен напон ($V = 0 \text{ V}$)
 б) $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; приклучен инверзен напон $V = -5 \text{ V}$
 в) $N_D = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; приклучен инверзен напон $V = -5 \text{ V}$

Познато е уште:

$$S = 100 \mu\text{m}^2; \quad n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}; \quad V_T = 26 \text{ mV}; \quad \varepsilon = 1,07 \cdot 10^{-12} \text{ F/cm};$$

Решение:

а) $N_D = N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $V = 0 \text{ V}$

$$V_K = V_T \ln \frac{n_i^2}{N_A N_D} = V_T \ln \frac{n_i^2}{N_A^2} = -0,718 \text{ V}$$

$$V_{TOT} = V_K - V = V_K = -0,718 \text{ V}$$

$$d_B = \sqrt{\frac{2\varepsilon |V_{TOT}| (N_A + N_D)}{q_e N_A N_D}} = 0,44 \mu\text{m}$$

$$\frac{d_{Bp}}{d_{Bn}} = \frac{N_D}{N_A} = 1 \Rightarrow d_{Bp} = d_{Bn} = \frac{d_B}{2} = 0,22 \mu\text{m}$$

б) $N_D = N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $V = -5 \text{ V}$

$$V_K = -0,718 \text{ V} \quad V_{TOT} = V_K - V = -5,718 \text{ V}$$

$$d_B = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{TOT} (N_A + N_D)}{q_e N_A N_D}} = 1,24 \mu\text{m}$$

$$\frac{d_{Bp}}{d_{Bn}} = \frac{N_D}{N_A} = 1 \Rightarrow d_{Bp} = d_{Bn} = \frac{d_B}{2} = 0,62 \mu\text{m}$$

в) $N_D = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $V = -5 \text{ V}$

$$V_K = -0,958 \text{ V} \quad V_{TOT} = V_K - V = -5,958 \text{ V}$$

$$d_B = 0,89 \mu\text{m}$$

$$\frac{d_{Bp}}{d_{Bn}} = \frac{N_D}{N_A} = 10^4 \Rightarrow d_{Bp} \gg d_{Bn} \Rightarrow d_{Bp} \approx d_B = 0,89 \mu\text{m}$$

Во случајот кога има драстична разлика помеѓу концентрациите на примеси на двете страни на рп спојот, бариерата скоро целосно се простира во подрачјето со помала концентрација.