

ГЕНЕРАЦІЯ НОСІЇВ СТРУМУ ПРИ УТВОРЕННІ ГЕТЕРОКОНТАКТУ ВЛАСНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Показано, що при створенні контакту двох власних напівпровідників при встановленні термодинамічної рівноваги й утворенні області просторового заряду відбувається генерація електронно-діркових пар.

It is shown, that if we create the contact of two intrinsic semiconductors, then by formation thermodynamic equilibrium and creation area of space charges, arise generation of electron-holes pair.

При контакті двох напівпровідників з різними роботами виходу поблизу контакту утворюється область просторового заряду. Аналогічна ситуація має місце і при контакті власних напівпровідників. У роботі [1] розрахований розподіл носіїв поблизу контакту двох безмежних напівпровідників при умові $e|\varphi_k|/kT \gg 1$ (e – абсолютне значення заряду електрона, k – постійна Больцмана, T – температура, φ_k – контактна різниця потенціалів, $\varphi_k < 0$). В [2] ця задача розв'язана при довільних значеннях $e|\varphi_k|/kT$. Розподіл потенціалу внутрішнього поля визначається співвідношеннями (початок координат знаходиться на границі двох напівпровідників)

$$\varphi_1(x) = \varphi_k + \frac{2kT}{e} \ln \frac{1+u \exp(x/l_1)}{1-u \exp(x/l_1)}, \quad x \leq 0, \quad (1)$$

$$\varphi_2(x) = \frac{2kT}{e} \ln \frac{1-v \exp(-x/l_2)}{1+v \exp(-x/l_2)}, \quad x \geq 0, \quad (2)$$

де $l_i = \left(\frac{\varepsilon_i \varepsilon_0 kT}{2e^2 n_{0i}} \right)^{1/2}$ довжина екранування Дебая

напівпровідників $i=1,2$, ε_0 – електрична постійна, ε_i – діелектрична проникливість, $n_{0i}=p_{0i}$ – концентрації електронів і дірок далеко від контакту, де внутрішнє поле відсутнє,

$$u = \frac{1+b^2+2bs}{1-b^2} - \left(\frac{(1+b^2+2bs)^2}{(1-b^2)^2} - 1 \right)^{1/2},$$

$$v = \frac{1-b-u(1+b)}{1+b-u(1-b)}, \quad b = \exp\left(\frac{e\varphi_k}{2kT}\right), \quad s = \frac{\varepsilon_1 l_2}{\varepsilon_2 l_1}.$$

Виявляється, що при гетероконтакті власних напівпровідників при формуванні просторового

заряду відбувається не тільки перехід носіїв з одного напівпровідника в інший, але і їх генерація. Дійсно, концентрації носіїв у напівпровідниках 1 та 2 визначаються формулами [2]:

$$n_1(x) = n_{01} \exp\left(\frac{e[\varphi_1(x) - \varphi_k]}{kT}\right),$$

$$p_1(x) = p_{01} \exp\left(-\frac{e[\varphi_1(x) - \varphi_k]}{kT}\right),$$

$$n_2(x) = n_{02} \exp\left(\frac{e\varphi_2(x)}{kT}\right),$$

$$p_2(x) = p_{02} \exp\left(-\frac{e\varphi_2(x)}{kT}\right).$$

Якщо врахувати (1), (2), то одержимо

$$n_1(x) = n_{01} \left(\frac{1+u \exp(x/l_1)}{1-u \exp(x/l_1)} \right)^2,$$

$$p_1(x) = n_{01} \left(\frac{1-u \exp(x/l_1)}{1+u \exp(x/l_1)} \right)^2,$$

$$n_2(x) = n_{02} \left(\frac{1-v \exp(-x/l_2)}{1+v \exp(-x/l_2)} \right)^2,$$

$$p_2(x) = p_{02} \left(\frac{1+v \exp(-x/l_2)}{1-v \exp(-x/l_2)} \right)^2.$$

Виділимо в гетероконтакті область $-L_1 \leq x \leq L_2$. Повне число електронів в цій області дорівнює (вважаємо, що площа поперечного перерізу напівпровідника дорівнює 1)

$$N_n = \int_{-L_1}^0 n_1(x) dx + \int_0^{L_2} n_2(x) dx.$$

Елементарне інтегрування дає

$$N_n = n_{01} \left[L_1 + 4l_1 \left(\frac{1}{1-u} - \frac{1}{1-u \exp(-L_1/l_1)} \right) \right] + n_{02} \left[L_2 - 4l_2 \left(\frac{1}{1+v \exp(-L_2/l_2)} - \frac{1}{1+v} \right) \right]$$

Повне число дірок в цій області

$$N_p = \int_{-L_1}^0 p_1(x) dx + \int_0^{L_2} p_2(x) dx$$

або, після обчислення інтегралів

$$N_p = n_{01} \left[L_1 + 4l_1 \left(\frac{1}{1+u} - \frac{1}{1+u \exp(-L_1/l_1)} \right) \right] + n_{02} \left[L_2 - 4l_2 \left(\frac{1}{1-v \exp(-L_2/l_2)} - \frac{1}{1-v} \right) \right]$$

Оскільки $N_{n0} = n_{01}L_1 + n_{02}L_2$ є кількістю електронів у напівпровідниках довжиною L_1 та L_2 відповідно при відсутності контакту, то величина

$$\Delta N_n = 4l_1 n_{01} \left(\frac{1}{1-u} - \frac{1}{1-u \exp(-L_1/l_1)} \right) - 4l_2 n_{02} \left(\frac{1}{1+v \exp(-L_2/l_2)} - \frac{1}{1+v} \right)$$

визначає кількість електронів, генерованих при встановленні термодинамічної рівноваги після створення контакту.

Аналогічна величина для дірок

$$\Delta N_p = 4l_2 n_{02} \left(\frac{1}{1-v} - \frac{1}{1-v \exp(-L_2/l_2)} \right) - 4l_1 n_{01} \left(\frac{1}{1+u \exp(-L_1/l_1)} - \frac{1}{1+u} \right)$$

Для простоти аналізу цих співвідношень об'явимо випадком гетероконтакту однакових напівпровідників з єдиною відмінністю – вони мають різну роботу виходу. В цьому випадку $n_{01} = n_{02} = n_0$, $l_1 = l_2 = l$, $s = 1$, а

$$v = u = \frac{1 - \sqrt{b}}{1 + \sqrt{b}} \quad (3)$$

Тоді одержимо

$$\Delta N_n = 8n_0 l \left(\frac{1}{1-u^2} - \frac{1}{1-u^2 \exp(-2L/l)} \right) \quad (4)$$

Легко переконатись, $\Delta N_p = \Delta N_n$, що очевидно в силу електронейтральності напівпровідників.

Оскільки $u < 1$, то $\Delta N_n > 0$ при всіх довжинах L , що і доказує наше твердження про генерацію

носіїв при створенні контакту.

Оскільки область просторового заряду зосереджена в основному поблизу контакту, тобто при $|x| \leq l$, то, поклавши в (4) $L=l$, ми одержимо число генерованих пар носіїв у цій області

$$\Delta N = 8n_0 l \left[\frac{1}{1-u^2} - \frac{1}{1-u^2 \exp(-1)} \right]$$

або, враховуючи (3)

$$\Delta N = 2n_0 l \frac{(1 + \sqrt{b})^2}{\sqrt{b}} \times$$

$$\times \left[1 - \frac{4\sqrt{b}}{(1+b)(1 - \exp(-1)) + 2\sqrt{b}(1 + \exp(-1))} \right]$$

Відношення числа генерованих пар носіїв в області $|x| \leq l$ до їх числа до встановлення контакту між напівпровідниками

$$\eta = \frac{\Delta N}{2n_0 l} = \frac{(1 + \sqrt{b})^2}{\sqrt{b}} \times$$

$$\times \left[1 - \frac{4\sqrt{b}}{(1+b)(1 - \exp(-1)) + 2\sqrt{b}(1 + \exp(-1))} \right]$$

Якщо $e|\phi_k|/kT \gg 1$, то $b \ll 1$ і $\eta = 1/\sqrt{b}$ тобто кількість генерованих пар носіїв може набагато перевищувати їх число до встановлення контакту.

Якщо створити гетероконтакт двох напівпровідників скінчених розмірів, то, як показують розрахунки (в цьому випадку їх можна провести тільки чисельно), і в цьому випадку має місце подібне явище, причому кількість генерованих пар носіїв залежить від різниці потенціалів, прикладених до напівпровідників. Тому, на наш погляд, у такій системі можна створити інверсійну заселеність електронами та дірками станів у зонах, якщо, наприклад, змінити знак прикладеної напруги. При відповідному підборі параметрів напівпровідників анігіляція пар електрон-дірка може супроводжуватись випромінюванням, у тому числі, при певних умовах, і когерентним.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gurevich Yu.G., Koshkin V.M., Volovichev I.N. The heterocontact of two intrinsic semiconductors and radiation stable electronics // Solid State Electr. -1995. - **38**, No. 1. - P.235-242.
2. Раренко І.М., Королюк С.Л., Кошкін В.М., Москалюк С.С. Гетероконтакт власних напівпровідників // Науковий вісник ЧДУ. Вип. 29: Фізика. - Чернівці: ЧДУ, 1998. - С.45-49.