Неравновесное состояние

Скорости генерации и рекомбинации неодинаковы (происходит накопление или рассасывание носителей заряда) g-R :

$$\frac{dn}{dt} = g_n - r(np);$$
$$\frac{dp}{dt} = g_p - r(np).$$

Неравновесные концентрации электронов n и дырок p можно записать:

$$\left.\begin{array}{l} n = n_0 + \Delta n; \\ p = p_0 + \Delta p, \end{array}\right\}$$

Условие сохранения нейтральности:

$$\Delta n = \Delta p;$$
$$\frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt}.$$

Значит, $g_n = g_p$

Скорость генерации носителей заряда: $g = g_0 + \Delta g.$

Если $\Delta n \ll n_0 + p_0$

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = \Delta g - \frac{\Delta n}{\tau}.$$

Если $\Delta g = 0,$ ур-е рассасывания носителей:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau}.$$

$$\tau = \left(\frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_p}\right)^{-1} = \frac{\tau_n \tau_p}{\tau_n + \tau_p};$$

Если $\Delta g = \mathrm{const}$

$$\Delta n(t) = \Delta g\tau + [\Delta n(0) - \Delta g\tau] e^{-\frac{t}{\tau}},$$

$$\Delta n(t) = \Delta n(0) e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

$$\tau = -\frac{\Delta n}{dn/dt},$$

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{\Delta n(t_1)}{\Delta n(t_2)}}.$$

Рекомбинация на ловушках

Рекомбинацию на ловушках можно характеризовать “вероятностным методом”. Ловушки играют роль валентной зоны по отношению к зоне проводимости и роль зоны проводимости по отношению к валентной. Требуется оценить вероятность заполнения уровня ловушки носителем заряда:

$$F_t = \frac{1}{e^{\frac{\varphi_t - \varphi_F}{\varphi_T}} + 1}.$$

Концентрации электронов и дырок на уровнях ловушки:

$$\left.\begin{aligned} n_t &= N_c e^{-\frac{\varphi_c - \varphi_t}{\varphi_T}}; \\ p_t &= N_v e^{-\frac{\varphi_t - \varphi_v}{\varphi_T}}, \end{aligned}\right\}$$

$$n_t p_t = n_0 p_0 = n_i^2, \qquad \frac{n_t}{p_t} = \frac{N_c}{N_v} e^{-2(\varphi_E - \varphi_t)/\varphi_T},$$

Скорость рекомбинации на ловушках:

$$V = -\frac{np - n_0 p_0}{(n + n_t)\tau_{p0} + (p + p_t)\tau_{n0}}.$$

Тогда неравновесное время жизни:

$$\tau = \frac{\Delta n}{-V} = \frac{n_0 + n_t + \Delta n}{n_0 + p_0 + \Delta n}\tau_{p0} + \frac{p_0 + p_t + \Delta n}{n_0 + p_0 + \Delta n}\tau_{n0}.$$

1) При малых возмущениях $(\Delta n \to 0)$

$$\tau_0 = \frac{n_0 + n_t}{n_0 + p_0}\tau_{p0} + \frac{p_0 + p_t}{n_0 + p_0}\tau_{n0}.$$

2) При больших возмущениях $(\Delta n \to \infty)$

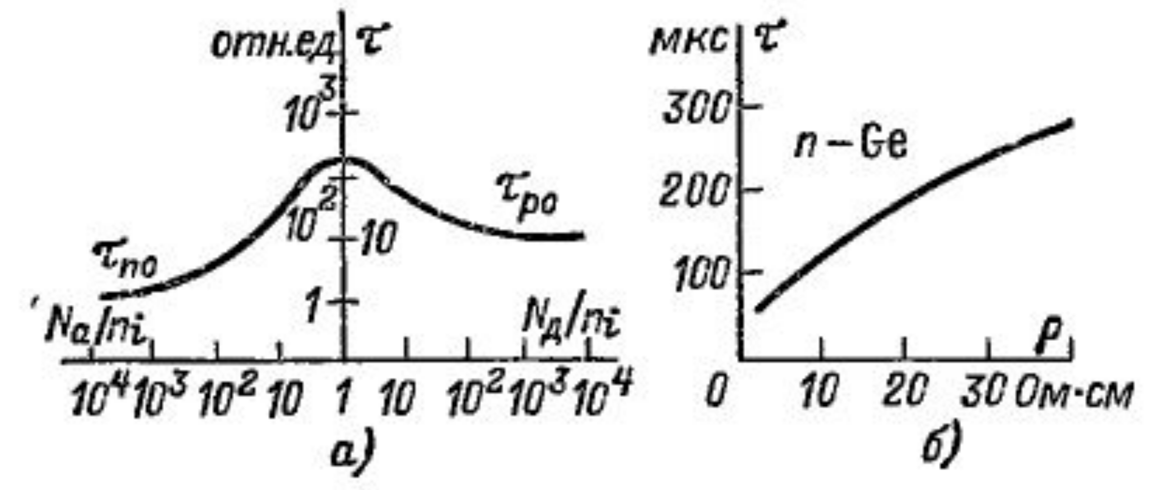
$$\tau_\infty = \tau_{n0} + \tau_{p0}.$$

$$\left.\begin{aligned} \tau_{n0} &= \frac{1}{r_n N_t}; \\ \tau_{p0} &= \frac{1}{r_p N_t}. \end{aligned}\right\}$$

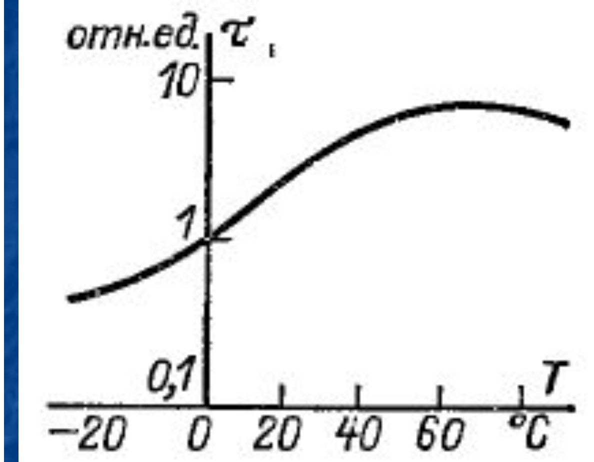
Для электронного п/п $\quad n_0 \gg p_0 \qquad \tau_0 \approx \tau_{p0}.$

Для дырочного п/п $\quad n_0 \ll p_0 \qquad \tau_0 \approx \tau_{n0}.$

Зависимость времени жизни от концентрации примеси и температуры



Зависимость времени жизни от концентраций донорных и акцепторных примесей (*а*) и удельного сопротивления (*б*).



Зависимость времени жизни от температуры.

Поверхностная рекомбинация

Скорость накопления носителей (на единицу площади):

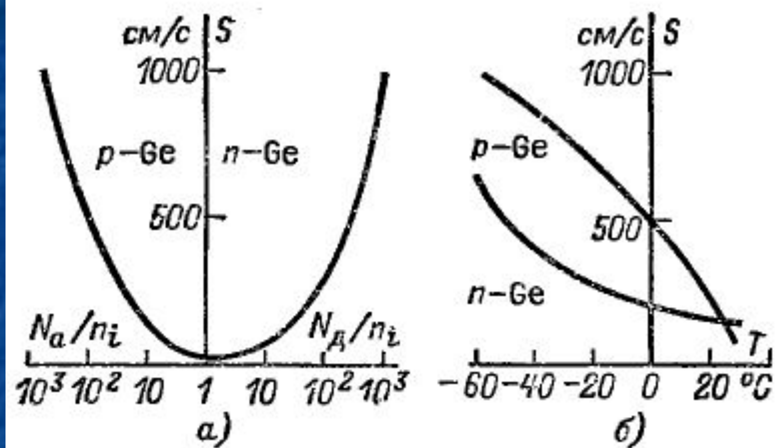
$$V = -\frac{C_n C_p (pn - p_0 n_0)}{C_n (n_{s0} + n_t) + C_p (p_{s0} + p_t)},$$

Скорость поверхностной рекомбинации:

$$S = \frac{-V}{\Delta n} = C_n \frac{C_p (n_0 + p_0 + \Delta n)}{C_n (n_{s0} + n_t) + C_p (p_{s0} + p_t)},$$

Ток, обусловленный носителями к поверхности:

$$I_s = qA\,|V| = qAS\,\Delta n,$$



Зависимость скорости поверхностной рекомбинации от концентрации донорных и акцепторных примесей (*а*) и от температуры (*б*).

Результирующая скорость накопления (рассасывания) носителей в объеме и на поверхности:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = \left(\frac{d(\Delta n)}{dt}\right)_v + \left(\frac{d(\Delta n)}{dt}\right)_s, \qquad \frac{\Delta n}{\tau} = \frac{\Delta n}{\tau_v} + \frac{\Delta n}{\tau_s},$$

Законы движения носителей заряда в полупроводниках

-Дрейф – направленное движение носителей заряда под действием электрического поля;

-Диффузия – движение носителей заряда под действием их градиента концентрации.

Полная плотность тока – сумма дрейфовых и диффузионных составляющих полупроводников n и p типа:

$$j = (j_p)_{\text{диф}} + (j_p)_{\text{др}} + (j_n)_{\text{диф}} + (j_n)_{\text{др}},$$

В одномерном случае дрейфовая плотность тока для п/п n и p типа:

$$(j_p)_{\text{др}} = -qp\mu_p \frac{\partial\varphi}{\partial x} = qp\mu_p E;$$

$$(j_n)_{\text{др}} = -qn\mu_n \frac{\partial\varphi}{\partial x} = qn\mu_n E.$$

Плотности диффузионного тока связаны с градиентами химических потенциалов. В одномерном случае:

$$(j_p)_{\text{диф}} = -qp\mu_p \frac{d\chi_p}{dx} = -qD_p \frac{dp}{dx};$$

$$(j_n)_{\text{диф}} = qn\mu_n \frac{d\chi_n}{dx} = qD_n \frac{dn}{dx}.$$

$D = \varphi_T \mu.$ - Соотношение Эйнштейна

$D = D_0 \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/2}$

$D = D_0 \left(\frac{N_0}{N}\right)^{1/3}$

- Зависимость коэффициента диффузии от температуры и концентрации.

Законы движения носителей заряда в полупроводниках

Полная плотность тока: $$j = -qD_p\frac{\partial p}{\partial x} + qp\mu_p E + qD_n\frac{\partial n}{\partial x} + qn\mu_n E.$$

Уравнения непрерывности потока:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \Delta g_p - \frac{p-p_0}{\tau_p} - \frac{1}{q}\operatorname{div}(j_p);$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \Delta g_n - \frac{n-n_0}{\tau_n} + \frac{1}{q}\operatorname{div}(j_n),$$

где $p - p_0 = \Delta p$ и $n - n_0 = \Delta n$

- Избыточные концентрации

Δg_p и Δg_n - Скорости генерации под действием внешних факторов.

Дивергенция вектора в одномерном случае: $$\operatorname{div}\frac{j}{q} = \frac{1}{q}\frac{\partial}{\partial x}[(j)_{\text{диф}} + (j)_{\text{др}}].$$

Уравнения непрерывности принимают следующую форму:

$$\frac{1}{q}\operatorname{div}(j_p) = -D_p\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \mu_p E\frac{\partial p}{\partial x} + p\mu_p\frac{\partial E}{\partial x};$$

$$\frac{1}{q}\operatorname{div}(j_n) = D_n\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n E\frac{\partial n}{\partial x} + n\mu_n\frac{\partial E}{\partial x}.$$

При отсутствии внешних факторов:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p-p_0}{\tau_p} + D_p\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p E\frac{\partial p}{\partial x} - p\mu_p\frac{\partial E}{\partial x};$$

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{n-n_0}{\tau_n} + D_n\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n E\frac{\partial n}{\partial x} + n\mu_n\frac{\partial E}{\partial x}.$$

Законы движения носителей заряда в полупроводниках

Если E=0, то уравнения непрерывности сводятся к уравнениям диффузии:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_0}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2};$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n - n_0}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}.$$

Если меняется напряженность электрического поля E вдоль координаты x и появляется существенный объемный заряд, то дополнительно требуется использовать уравнение Пуассона. Для одномерного случая:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\lambda}{\varepsilon_0 \varepsilon},$$

В общем случае конечный объем п/п нейтрален, что можно обосновать уравнением электронейтральности: $\lambda = q\,(p + N_{\text{д}}^* - n - N_{\text{a}}^*).$

Если степень ионизации примесей неизменна, то: $\lambda = q\,(\Delta p - \Delta n).$