

Механизмы межзонной рекомбинации в узкозонных твердых растворах HgCdTe

Семинар аспирантов и студентов

Румянцев Владимир

ИФМ РАН

18 апреля 2013

Неравновесные носители в полупроводниках. Уравнение непрерывности.

Равновесные носители

Для невырожденного полупроводника $n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right)$, $p_0 = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_f}{kT}\right)$

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

Неравновесные носители

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g - r + g_E + \nabla j_n / e$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = g' - r' + g'_E - \nabla j_p / e$$

Упрощения 1) $g - r = -\Delta n / \tau_n$, 2) пространственная однородность:

$$\frac{d\Delta n}{dt} = g_E - \frac{\Delta n}{\tau_n}$$

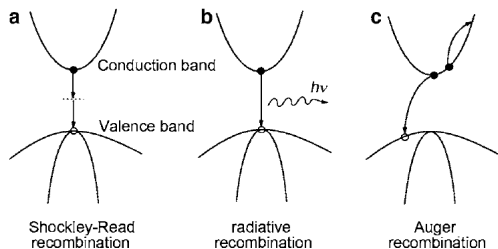
$$\frac{d\Delta p}{dt} = g_E - \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

Типы процессов межзонной рекомбинации

Излучательная рекомбинация

Оже-рекомбинация

Рекомбинация через примеси и дефекты



$$g - r = -\Delta n / \tau_n$$

$$\tau_n = \frac{\Delta n}{r - g}$$

Излучательная рекомбинация

Для излучательных процессов $g = G$, $r = R \frac{np}{n_0 p_0} = \frac{np}{n_i^2}$

Время жизни

$$\tau = \frac{n_i^2}{G(n_0 + p_0 + \Delta n)}$$

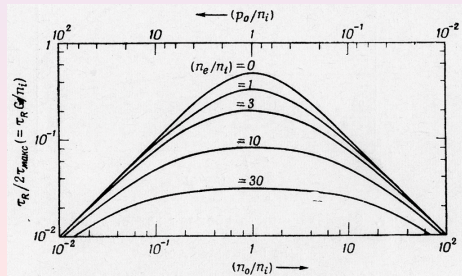
$$G = \frac{8\pi}{c^2 h^3} \int_0^\infty \frac{\epsilon(h\nu) \alpha(h\nu) (h\nu)^2 d(h\nu)}{\exp h\nu/kT - 1}$$

Время жизни в условиях слабого возбуждения

$$\tau_0 = \frac{n_i^2}{G(n_0 + p_0)}$$

Время жизни в собственном полупроводнике

$$\tau_{\max} = \tau_i = \frac{n_i}{2G}$$



Время жизни. Зависимость от температуры

Общие соображения

$$G = \frac{8\pi}{c^2 h^3} \int_0^\infty \frac{\epsilon(h\nu) \alpha(h\nu) (h\nu)^2 d(h\nu)}{\exp h\nu/kT - 1}$$

Так как $G \sim \exp(-\frac{E_g}{kT})$, $n_i \sim \exp(-\frac{E_g}{2kT})$

В области собственной проводимости

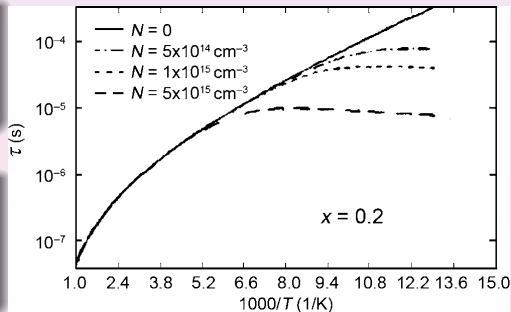
$$\tau_i = \frac{n_i}{2G}$$

убывает с ростом T

В области примесной проводимости

$$\tau_0 = \frac{n_i^2}{G(n_0 + p_0)}$$

слабо зависит от T



Время жизни в узкозонных КРТ структурах

Вводя $B = G/n_i^2$ и подставив выражение для коэффициента поглощения

$$\alpha = \frac{2^{2/3} m_0 e^2}{3 \varepsilon^{1/2} \hbar^2} \left(\frac{m_e m_h}{m_0 (m_e + m_h)} \right)^{3/2} \left(1 + \frac{m_0}{m_e} + \frac{m_0}{m_h} \right) \left(\frac{E - E_g}{m_0 c^2} \right)^{1/2}$$

Аналитическое выражение для времени жизни

$$\tau = \frac{1}{B(n_0 + p_0)}$$

$$B = 5.8 \cdot 10^{-13} \varepsilon^{1/2} \left(\frac{m_0}{m_e + m_h} \right)^{3/2} \left(1 + \frac{m_0}{m_e} + \frac{m_0}{m_h} \right) \left(\frac{300}{T} \right)^{3/2} (E_g^2 + 3kTE_g + 3.75k^2 T^2)$$

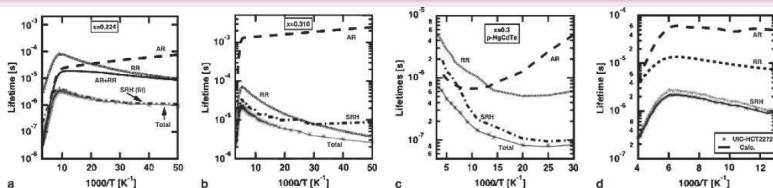


Fig. 11. Comparison of calculated and measured lifetimes in (a) $x = 0.224$, $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ n-doped; (b) $x = 0.310$, $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ n-doped; (c) $x = 0.30$, $5 \times 10^{16} \text{ p-doped}$; and (d) $x = 0.25$, $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ n-doped MBE-grown alloys. Experimental values for (a-c) from Ref. 14 and those for (d) from Ref. 15.

Время жизни в условиях сильного возбуждения

$$\tau = \frac{n_i^2}{G(n_0 + p_0 + \Delta n)}, \Delta n \gg n_0 + p_0, \tau \approx \frac{1}{B\Delta n}$$

Релаксационный спад

Уравнение

$$-\frac{d\Delta n}{dt} = \frac{G(n_0 + p_0 + \Delta n)\Delta n}{n_i^2}$$

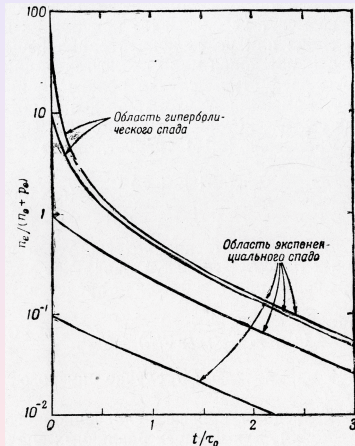
интегрируется в общем виде

$$\Delta n = \frac{\Delta n_0(n_0 + p_0)}{(n_0 + p_0 + \Delta n_0) \exp(t/\tau_0) - \Delta n_0}$$

Неэкспоненциальный характер спада при высоком уровне возбуждения

При $t \ll \tau$

$$\Delta n / \Delta n_0 = \frac{1}{1 + t(\Delta n_0 / (n_0 + p_0) \tau_0)}$$



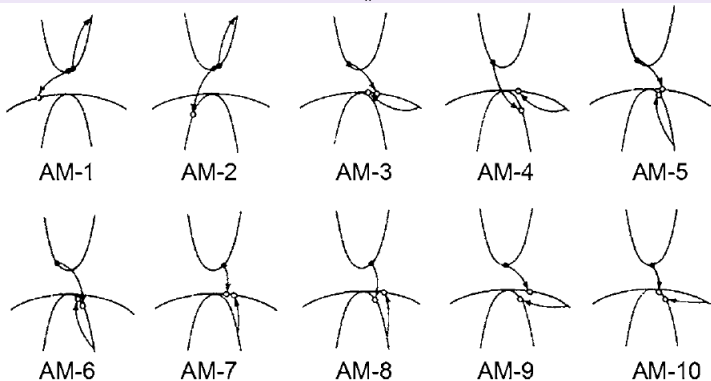
Фиг. 96. Кривые релаксационного спада при четырех различных начальных концентрациях избыточных пар носителей тока:

$$N = 100(n_0 + p_0), 10(n_0 + p_0), n_0 + p_0 \text{ и } 0,1(n_0 + p_0).$$

Оже-рекомбинация

Оже-рекомбинация — пороговый процесс!

$$E_g + E_k = E_g + \frac{p_1^2}{2m_c} + \frac{p_2^2}{2m_c} + \frac{p_h^2}{2m_h} = \frac{p_f^2}{2m_c} \approx E_g, \quad p_1 + p_2 + p_h = p_f$$



Время жизни при Оже-рекомбинации

Для Оже процессов $g_{ee} = G_{ee} \frac{n}{n_0}$, $r_{ee} = G_{ee} \frac{n^2 p}{n_0^2 p_0}$

$$\tau = \frac{n_i^4}{(G_{ee} n p_0 + G_{hh} p n_0)(n_0 + p_0 + \Delta n)}$$

Время жизни

$$\tau_A = \frac{2n_i^2 \tau_i}{n_0 + \Delta n + \beta(p_0 + \Delta n)(n_0 + p_0 + \Delta n)}$$

$$\beta = \frac{\mu^{1/2}(1+2\mu)}{2+\mu} \exp \left[-\frac{1-\mu}{1+\mu} \frac{E_g}{kT} \right]$$

Время жизни в собственном полупроводнике

$$\tau_i = \frac{3.8 \cdot 10^{-18} \varepsilon^2 (1+\mu)^{1/2} (1+2\mu) \exp \left[\frac{1+2\mu}{1+\mu} \frac{E_g}{kT} \right]}{m_e/m_0 |F_1 F_2|^2 (kT/E_g)^{3/2}}$$

Зависимость от интенсивности возбуждающего излучения.

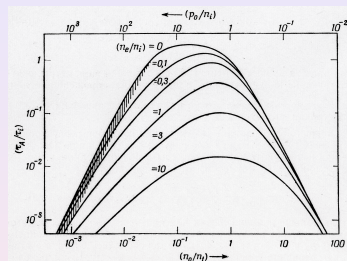
Время жизни

в условиях слабого возбуждения

$$\tau_0 = \frac{2n_i^2 \tau_i}{(n_0 + \beta p_0)(n_0 + p_0)}$$

в условиях сильного возбуждения

$$\tau = \frac{2n_i^2}{(\Delta n)^2} \tau_i$$



Релаксационный спад

Рассмотрим случай полупроводника n-типа $\beta p_0 \ll p_0 \ll n_0$

$$\frac{d(\Delta n / n_0)}{(\Delta n / n_0)(1 + (\Delta n / n_0)^2)} = -\frac{dt}{\tau_0}$$

Начальная стадия релаксационного спада более быстрая по сравнению с излучательной рекомбинацией!

Время жизни. Зависимость от температуры

$$\text{Так как } n_i \sim T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

В области собственной проводимости

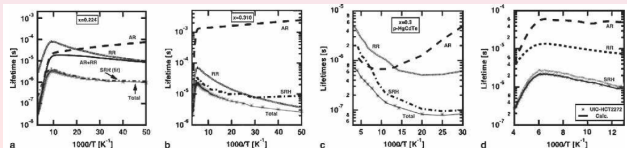
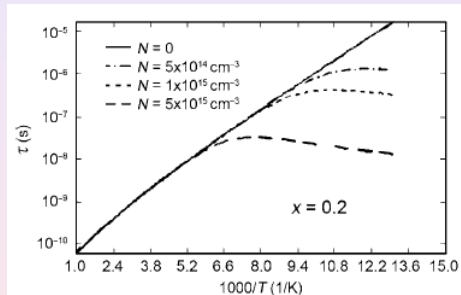
$$\tau_i \sim T^{-3/2} \exp\left[\frac{1 + 2\mu}{1 + \mu} \frac{E_g}{kT}\right]$$

убывает с ростом T

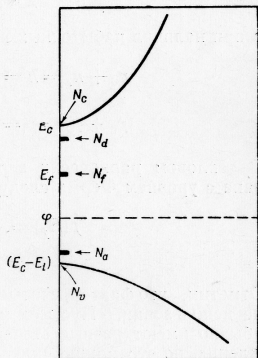
В области примесной проводимости

$$\tau_0 \sim 2n_i^2 \tau_i \sim T^{3/2} \exp\left[\frac{\mu}{1 + \mu} \frac{E_g}{kT}\right]$$

слабо зависит от T



Рекомбинация Шокли-Рида-Холла.



Ф и г. 109. Энергетическая схема полупроводника, используемая для рассмотрения рекомбинации через дефекты одного рода.

N_c и N_v — плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне; N_d — концентрация доноров; N_f — концентрация дефектов; N_a — концентрация акцепторов; φ — уровень Ферми.

Обозначения

$$n_1 = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right)$$

$$p_1 = N_v \exp\left(\frac{E_c - E_g - E_f}{kT}\right)$$

$$f(E_f) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_f - \varphi}{kT}\right)} = \frac{n_0}{n_0 + n_1} = \frac{p_1}{p_0 + p_1}$$

$$\tau_{n0} = \frac{1}{c_n N_f}$$

$$\tau_{p0} = \frac{1}{c_p N_f}$$

$$\gamma = \frac{\tau_{n0}}{\tau_{p0}}$$

Время жизни при рекомбинации через дефекты

Время жизни в приближении малой концентрации дефектов

При малой концентрации дефектов $\Delta n \approx \Delta p$ и можно ввести

$$\tau_{SRH} = \tau_{n0} \frac{p_0 + p_1 + \Delta n}{n_0 + p_0 + \Delta n} + \tau_{p0} \frac{n_0 + n_1 + \Delta n}{n_0 + p_0 + \Delta n}$$

Время жизни

в условиях слабого возбуждения

$$\tau_0 = \tau_{n0} \frac{p_0 + p_1}{n_0 + p_0} + \tau_{p0} \frac{n_0 + n_1}{n_0 + p_0}$$

в условиях сильного возбуждения

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

Время жизни может расти при увеличении интенсивности возбуждающего излучения!

Релаксационный спад

$$-t = \tau_0 \ln \left(\frac{\Delta n_0}{\Delta n} \right) + (\tau_{\infty} - \tau_0) \ln \left(\frac{n_0 + p_0 + \Delta n_0}{n_0 + p_0 + \Delta n} \right)$$

В условиях сильного возбуждения присутствуют для экспоненциальных участка!