

01;05;06

## Рекомбинация через изоэлектронные ловушки с участием экситонов в точно компенсированных полупроводниках

© С.Ж. Каражанов

Физико-технический институт, Ташкент, Узбекистан

Поступило в Редакцию 11 мая 1999 г.

В окончательной редакции 10 ноября 1999 г.

Исследованы времена жизни электронов и дырок в условиях их рекомбинации через экситоны, формирующиеся на изоэлектронных ловушках. Показано, что зависимость времен жизни от концентрации ловушек является немонотонной и проходит через максимум. Причина этого эффекта связана с резким убыванием концентрации равновесных основных носителей заряда при полной компенсации. Показано, что при этом удельное сопротивление резко возрастает.

К настоящему времени накопилось огромное количество работ по исследованию времен жизни носителей заряда в полупроводниках [1–4]. До недавнего времени сложилось представление о том, что времена жизни электронов ( $\tau_n$ ) и дырок ( $\tau_p$ ) монотонно убывают с ростом концентрации глубоких примесей ( $N_t$ ). Однако более детальные исследования [5–8] для условий рекомбинации через одно [5–7] и двухзарядные [8] центры показали, что зависимость  $\tau_n$  и  $\tau_p$  от  $N_t$  может быть немонотонной и в некотором интервале значений  $N_t$  возрастать на несколько порядков. В данной работе будет показано, что аналогичный эффект может иметь место также в условиях рекомбинации электронов и дырок через экситоны, формирующиеся на изоэлектронных ловушках. Отметим, что изоэлектронные ловушки и связанное с ними экситонное излучение экспериментально обнаружено во многих полупроводниках, широко используемых в современной оптоэлектронике (например, в карбиде кремния, фосфиде галлия и т. д.).

Используя выражение для скорости рекомбинации, выведенное в [2], найдем времена жизни электронов  $\tau_n$  и дырок  $\tau_p$ :

$$\tau_n = \tau_{po}^* \frac{n + n_1^*}{n_o \Delta p / \Delta n + p} + \tau_{no}^* \frac{p + p_2^*}{n_o \Delta p / \Delta n + p} + \tau_{ex} \frac{\Delta n}{N_t}, \quad (1)$$

$$\tau_p = \tau_{po}^* \frac{n + n_1^*}{p_o \Delta n / \Delta p + n} + \tau_{no}^* \frac{p + p_2^*}{p_o \Delta n / \Delta p + n} + \tau_{ex} \frac{\Delta p}{N_t}. \quad (2)$$

Здесь  $n_o$  и  $p_o$  — равновесные, а  $\Delta n$  и  $\Delta p$  — избыточные концентрации электронов и дырок,  $n = n_o + \Delta n$ ,  $p = p_o + \Delta p$ ,  $\tau_{no}^* = 0.5\tau_{no}[1 + \exp(-E_{ex}/(kT))]$ ,  $\tau_{po}^* = \tau_{po} + \tau_{ex}p_1/N_t$ ;  $E_{ex}$  — энергия, выделяемая при аннигиляции экситона;  $\tau_{no} = 1/(C_n N_t)$ ,  $\tau_{po} = 1/(C_p N_t)$ ;  $C_n$  — коэффициент захвата свободного электрона на уровень глубокой примеси  $E_t$ , а  $C_p$  — коэффициент захвата свободной дырки на экситонный уровень  $E_h$ ;  $\tau_{ex}$  — время жизни экситона;  $n_1^* = 0.5n_1[1 + \exp(-E_{ex}/(kT))]$ ,  $p_2^* = 0.5p_1[1 + \exp(-E_{ex}/(kT))]^{-1}$ .  $n_1$  и  $p_1$  — статистические факторы Шокли-Рида.

Связь между концентрациями свободных электронов, дырок, мелких доноров ( $N_d$ ) и отрицательно заряженных изоэлектронных ловушек ( $N_t^-$ ) задается уравнением электронейтральности, причем выражение для  $N_t^-$ , согласно [4], имеет вид:

$$p + N_d = n + N_t^-,$$

$$N_t^- = N_t \frac{C_n C_p n p_2^* + C_n n v_t + C_p p_2 v_t'}{v_t [C_n (n + n_1^*) + C_p (p + p_2^*)] + C_n C_p (pn - n_t^2)}. \quad (3)$$

Удельное сопротивление оценивается по формуле  $\rho = [q(\mu_n n + \mu_p p)]^{-1}$ , где  $q$  — заряд электрона, а  $\mu_n$  и  $\mu_p$  — подвижность электронов и дырок соответственно.

Оценка выражений для  $\tau_{no}^*$ ,  $\tau_{po}^*$  и  $n_1^*$ ,  $p_1^*$  показала, что  $\tau_{no}^* \approx \tau_{no}$ ,  $\tau_{po}^* \approx \tau_{po}$  и  $n_1^* \approx n_1$ ,  $p_2^* \approx p_1 = N_v \cdot \exp[(E_t - E_g)/(kT)] \ll n_1$ . Соответственно времена жизни  $\tau_n$  и  $\tau_p$  не зависят от глубины залегания экситонного уровня ( $p_2^* \approx p_1$ ) и определяются положением основного уровня ловушки ( $n_1^* \approx n_1$ ). При этом если процесс аннигиляции экситона более инертный по сравнению с электронным обменом уровней изоэлектронного центра с близлежащими разрешенными зонами, то третье слагаемое в (1) и (2) больше, чем остальные две и определяет времена жизни электронов и дырок. Соответственно  $\tau_n$  и  $\tau_p$  монотонно убывают с ростом  $N_t$  и линейно растут с ростом  $\Delta n$ ,  $\Delta p$ . Это одно из отличительных признаков того, что рекомбинация через изоэлектронную ловушку происходит с участием экситонов.

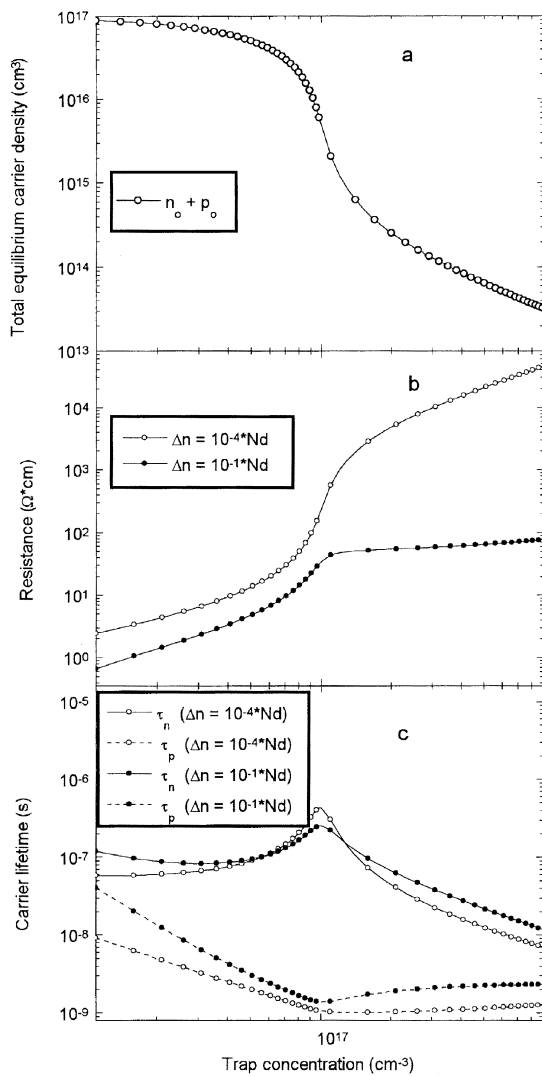
Дальнейший анализ проведем для случая, когда экситон аннигилирует быстрее, чем проходит электронный обмен ловушки с разрешенными зонами. При этом переход электрона с уровня ловушки на экситонный

уровень не вносит определяющего вклада во времена жизни  $\tau_n$  и  $\tau_p$ , и в (1) и (2) третье слагаемое всегда меньше, чем первые два. Соответственно при небольших отклонениях избыточной концентрации электронов  $\Delta n$  от избыточной концентрации дырок  $\Delta p$  ( $\Delta n/\Delta p \sim 1$ ) и низких уровнях возбуждения времена жизни  $\tau_n$  и  $\tau_p$  будут увеличиваться, если равновесная концентрация основных носителей заряда резко убывает с ростом  $N_t$ . Часто такая ситуация может иметь место при компенсации, когда  $N_t = N_d$ . При этом огромная доля основных носителей заряда захватится на ловушки и резко уменьшится их концентрация, что приведет к убыванию скорости рекомбинации и гигантскому росту времени жизни.

Поскольку рассматриваемый эффект зависит от равновесной концентрации носителей заряда, исследуем зависимость суммы  $n_o + p_o$  от  $N_t$ , используя условие электронейтральности (3) и соотношение  $n_o p_o = n_i^2$ . Оценка проведена для GaP, содержащего изоэлектронные ловушки Zn–O. Известно, что рекомбинации через эти ловушки идут посредством связывания в экситоны [9] в соответствии с механизмом, предложенным в [2]. Исследование проведено при  $C_n \approx 10^{-10}$ ,  $C_p \approx 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/с,  $E_t = 0.3 E_h = 0.036$ ,  $E_g = 2.26$  eV и  $T = 300$  K,  $N_t = 10^{16} \div 10^{18}$ ,  $N_d = 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Во всем рассмотренном интервале значений  $N_t$  и  $N_d$  тип проводимости полупроводника не меняется и  $n_o \gg p_o$ .

Результаты представлены на рисунке, *a*. Если  $N_d > N_t$ , то  $n_o \approx N_d$  и основная доля изоэлектронной ловушки находится в отрицательно заряженном состоянии  $N_t^-$ , т.е.  $N_t^- \approx N_t \gg N_{og}^o, N_{oe}^o$ . Здесь  $N_{og}^o$  и  $N_{oe}^o$  — концентрация равновесных нейтральных ловушек без экситона и с экситоном соответственно.

При  $N_t = N_d$  значение  $n_o$  резко убывает на несколько порядков до уровня, определяемого термической генерацией с уровня ловушки, которая характеризуется параметром  $n_1$ . Соответственно резко возрастает удельное сопротивление  $\rho$  (см. рисунок, *b*) и времена жизни электронов  $\tau_n$  и дырок  $\tau_p$  (см. рисунок, *c*). Максимальные значения  $\rho$  и  $\tau_n$  имеют место при низком уровне возбуждения  $\Delta n = 10^{-4} \times N_d$  и убывают с ростом  $\Delta n$ , полностью исчезая при  $\Delta n \geq N_d$  (см. рисунок, *b* и *c*). Это свидетельствует о том, что полупроводник становится чувствительным к изменениям интенсивности слабого освещения, приводящего к изменению  $\Delta n$  и  $\Delta p$ . Эти эффекты (см. рисунок, *a, b, c*) можно использовать как один из экспериментальных признаков определения степени полной компенсированности полупроводника.



Зависимость суммы равновесной концентрации  $n_o + p_o$  (a), удельного сопротивления  $\rho$  (b) и времен жизни электронов  $\tau_n$  и дырок  $\tau_p$  (c) от концентрации изоэлектронных ловушек  $N_t$  при  $T = 300$  К,  $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\Delta n = 10^{-4} \times N_d$  и  $\Delta n = 0.1 N_d \text{ cm}^{-3}$ .

Анализ рисунка *c* показывает, что время жизни дырок монотонно убывает с ростом  $N_t$ , не содержит максимума и на несколько порядков меньше, чем  $\tau_n$ , что связано с различием в величинах избыточной концентрации  $\Delta n > \Delta p$ . В этом нетрудно убедиться, разделив (1) на (2), что дает  $\tau_n/\tau_p = \Delta n/\Delta p$ .

Следует подчеркнуть, что описанный эффект существенно зависит от глубины залегания основного уровня ловушки. Если он лежит близко к зоне проводимости ( $n_1 \geq N_d$ ), то описанных выше резких изменений удельного сопротивления, времен жизни и т. д. вовсе не будет. Однако при больших глубинах залегания основного уровня ловушки концентрация свободных носителей и удельное сопротивление падают на несколько порядков с ростом  $N_t$ , причем эта зависимость может быть немонотонной.

Таким образом, зависимость времен жизни носителей заряда от концентрации изоэлектронных ловушек при рекомбинации с участием экситонов может быть немонотонной. Причиной этого эффекта является резкое убывание концентрации носителей заряда при полной компенсации ( $N_d = N_t$ ). При этом удельное сопротивление полупроводника и другие параметры, зависящие от  $n_o$  и  $p_o$ , также резко меняются.

В заключение хотелось бы отметить, что аналогичный эффект резкого роста удельного сопротивления (на 7 порядков) наблюдался экспериментально на поликристаллическом кремнии [10]. Возможно, это явление обусловлено механизмом, предлагаемым в данной работе.

Автор выражает благодарность А.Ю. Лейдерман и Э.Н. Цой за обсуждение данной работы и техническую помощь.

## Список литературы

- [1] Shockley W., Read W. // Phys. Rev. 1952. V. 87. N 5. P. 835–842.
- [2] Евстропов В.В., Б.В. Царенков // ФТП. 1970. Т. 4. В. 5. С. 923–932.
- [3] Landsberg P.T. *Recombination in semiconductors*. Cambridge University Press. 1992. P. 595.
- [4] Landsberg P.T., Kanaki E.V., Karazhanov S.Zn. // Узбекский физический журнал. 1997. № 6. С. 52–56.
- [5] Холоднов В.А. // ФТП. 1996. Т. 30. В. 6. С. 1011–1025.
- [6] Drugova A.A., Kholodnov V.A. // Solid State Electronics. 1995. V. 38. N 6. 1247–1252.
- [7] Холоднов В.А. // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67. В. 9. С. 655–660.

- [8] *Холоднов В.А., Серебряников П.С.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 7. С. 39–45.
- [9] *Dishman J.M., DiDomenico M.* // Phys. Rev. B. 1970. V. 1. N 8. P. 3381–3391.
- [10] *Seto J.Y.W.* // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. N 12. P. 5247–5254.