

## О РЕКОМБИНАЦИОННОМ ЦЕНТРЕ В ФОСФИДЕ ИНДИЯ, ЛЕГИРОВАННОМ СЕРОЙ

О. И. ДАВАРАШВИЛИ, М.И. ЕНУКАШВИЛИ, Н.П. КЕКЕЛИДЗЕ,  
Е.Г. ЧИКОИДЗЕ

*Тбилисский Государственный Университет  
380028, г.Тбилиси, ул. Чавчавадзе, 1*

В.А. АЛИЕВ

*Институт Физики АН Азербайджана  
370143, г.Баку, пр. Г. Джавида, 33*

На примере кристаллов фосфида индия, легированном серой показано, что если из эксперимента удастся определить эффективное время жизни носителей  $\tau_{эфф}$ , при различных уровнях инжекции, то путем последовательных расчетов можно установить время на безызлучательной рекомбинации  $\tau_{nr}$ , времена захвата электронов и дырок на рекомбинационный центр. Также можно определить параметры этого центра – концентрацию, уровень залегания и сечение захвата носителей.

Изучение времени жизни неравновесных носителей в полупроводниках имеет важное значение с фундаментальной и прикладной точек зрения. Информация о рассеянии, захвате ловушками и в целом о механизмах рекомбинации является базовой для создания полупроводниковых приборов. Конкурирующие механизмы безызлучательной рекомбинации, осуществляемой, например, через дефекты, вводимые примесными атомами, и излучательной рекомбинации, обусловленной зонной структурой полупроводников, изучались в различных полупроводниках при экспериментальном исследовании и расчетном анализе релаксации (быстродействия) и интенсивности излучения [1-3]. В работах [4,5] путем подбора следующих параметров: коэффициент диффузии, эффективное время жизни носителей при различных уровнях инжекции, в диапазоне  $10^{14}-10^{18} \text{ см}^{-3}$ , были определены времена безызлучательной рекомбинации  $\tau_{nr}$  в InP, легированном серой до уровня концентрации электронов  $n_0=2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . В настоящей работе показано, что если из эксперимента удастся определить  $\tau_{эфф}$ , при различных уровнях инжекции, то путем последовательных расчетов можно установить  $\tau_{nr}$ , времена захвата электронов и дырок на рекомбинационный центр. Также можно определить параметры этого центра - концентрацию, уровень залегания и сечение захвата носителей.

Как известно, интенсивность излучательной рекомбинации пропорциональна избыточной концентрации носителей. Если в полупроводнике существует и безызлучательный механизм рекомбинации, то в процессе релаксации, например фотолюминесценции, выявляется перераспределение избыточной концентрации носителей между каналами рекомбинации. Поэтому изменение интенсивности излучения (концентрация носителей) во времени определяется эффективным временем жизни

$$\tau_{эфф} = \tau_{nr}(\Delta n) \tau_r(\Delta n) / \tau_{nr}(\Delta n) + \tau_r(\Delta n) \quad (1)$$

В таблице путем сопоставления экспериментальных и расчетных данных получены значения  $\tau_{эфф}$ , при соответствующих уровнях инжекции [4,5]. Предварительно для

расчетов  $\tau_{nr}$  по (1), необходимо рассчитать излучательные времена жизни по коэффициенту междузонной излучательной рекомбинации  $B=2 \times 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ , определенному на эксперименте для чистых полупроводников - при низкой концентрации носителей.

Действительно,  $\tau_{nr} = \Delta n / (dn/dt)$ ;  $dn/dt = R - R_p$ , где  $R = Bnp$ ;  $R_p = Bn_0p_0$ , скорости излучательной рекомбинации в неравновесных и в равновесных условиях. Подставляя  $n = n_0 + \Delta n$ ;  $p = p_0 + \Delta p$  и считая что  $\Delta n = \Delta p$ ;  $p_0 \ll n_0$ , получим:

$$\tau_{nr} = 1/B (n_0 + \Delta p) \quad (2)$$

Соответствующие значения  $\tau_{nr}$  при аналогичных условиях также приведены в таблице. Относительная ошибка в определении  $\tau_{nr}$  принята равной 10%.

Таблица. Временные характеристики рекомбинационных центров в кристаллах фосфида индия.

N	$\Delta p, \text{ см}^{-3}$	$\tau_{эфф}(\text{нс})$	$\tau_r(\text{нс})$	$\tau_{nr}(\text{нс})$
1	$3 \cdot 10^{14}$	70	250	100
2	$4 \cdot 10^{15}$	100	250	160
3	$1.4 \cdot 10^{16}$	130	240	280
4	$1 \cdot 10^{17}$	140	160	1010
5	$2 \cdot 10^{18}$	24	25	3000

Для определения  $\tau_{no}$  и  $\tau_{po}$ , выразим  $\tau_{nr}$  через эти параметры. По определению  $\tau_{nr} = \Delta n / (dn/dt)$ ;  $dn/dt = R_{зах} - R_{воэ}$ , где  $R_{зах} = \gamma_n n N_L (1 - f_t)$ , интенсивность захвата электронов ловушкой с концентрацией  $N_L$ ,  $\gamma_n$  - коэффициент захвата,  $f_t$  - вероятность заполнения ловушки.  $R_{воэ} = \beta N_L f_t$  - интенсивность процессов освобождения ловушек,  $\beta$  - коэффициент эмиссии. Аналогичное изменение концентрации надо рассмотреть для дырок. При термодинамическом равновесии  $\beta n = \gamma_p n p_1 \beta p = \gamma_p p_1$ , тогда

$$dn/dt = \gamma_n N_L [n(1 - f_t) - n_1 f_t] \quad (3)$$

$$dp/dt = \gamma_p N_L [p(1 - f_t) - p_1 f_t] \quad (3^*)$$

Учитывая, что при  $\Delta n = \Delta p$ ,  $dn/dt = dp/dt$ , после приравнивания двух уравнений для изменения концен-

трации электронов и дырок, исключаются величины  $\beta$  и  $f_t$ , в конечном итоге получаем:

$$\tau_{nr} = \tau_{p0} [ (n_0 + n_1 + \Delta n) / (n_0 + p_0 + \Delta n) ] + \tau_{n0} (p_0 + p_1 + \Delta n) / (n_0 + p_0 + \Delta n) \quad (4)$$

здесь  $\tau_{p0} = 1/\gamma_p N_n$  - время захвата дырок,  $\tau_{p0} = 1/\gamma_n N_n$  время захвата электронов  $P_1 = N_v \exp(E_v - E_n/kT)$ ;  $n_1 = N_c \exp(E_n - E_c/kT)$ , концентрация дырок в валентной зоне и концентрации электронов в зоне проводимости соответственно, когда уровень Ферми совпадает с уровнем рекомбинации ловушки,  $E_F = E_n$ . Учитывая, что  $p_1, n_1, p_0$  меньше  $n_0$  при всех уровнях инжекции, имеем:

$$\tau_{nr} = \tau_{p0} + \tau_{n0} (P_1 + \Delta p) / n_0 + \Delta p \quad (5)$$

Из таблицы видно, что  $\tau_{nr}$  растет с уровнем инжекции  $\Delta p$ , принимая значение 100 нс при  $\Delta p = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3} \ll n_0$ . Поскольку в этом случае  $\Pi$  слагаемое в формуле (5), близко к нулю, то  $\tau_{p0} \approx \tau_{nr} \approx 100 \text{ нс}$ . Так как  $\tau_{p0}, \tau_{n0}$  не зави-

сят от уровня инжекции, определим значение  $\tau_{n0}$ , имея в виду что при высоких уровнях инжекции  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , тогда как следует из таблицы  $\tau_{nr} \approx 3000 \text{ нс}$  и  $\tau_{p0} \ll \tau_{nr}$ . Из (5) следует, что  $\tau_{nr} \approx \tau_{n0} (1 - n_0/n_0 + \Delta p)$ ,  $\tau_{n0} \approx 3000 \text{ нс}$ .

Оценим наибольшее значение параметра  $p_1$ . Учитывая найденное значение  $\tau_{n0} \approx 3000 \text{ нс}$  и рассматривая условия низкого уровня инжекции ( $\Delta n = \Delta p = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ;  $\tau_{nr} \approx 100 \text{ нс}$ ) т.к.  $\tau_{n0} (p_1 + \Delta p) / n_0 + \Delta p \leq 100 \text{ нс}$ , в этом случае оценка дает значение  $p_1 \leq 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Уточним полученное значение  $p_1$ . Подставим в формулу для  $\tau_{\text{эфф}} = \tau_{nr} \tau_r / (\tau_{nr} + \tau_r)$  выражение  $\tau_r$  из(2) и  $\tau_{nr}$  из (5):

$$\tau_{\text{эфф}} = \{ [\tau_{n0} (P_1 + \Delta p) / n_0 + \Delta p] + \tau_{n0} \} / B (n_0 + \Delta p) [ 1 / (n_0 + \Delta p) + \tau_{n0} (p_1 + \Delta p) / (n_0 + \Delta p) + \tau_{p0} ] \quad (6)$$

Для малых значений  $\Delta p = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3} < p_1, n_0$

$$\tau_{\text{эфф}} = [\tau_{n0} B p_1 / B n_0 + \tau_{p0}] / [1 + B \tau_{n0} p_1 + B n_0 \tau_{p0}] \quad (7)$$

Введем обозначение  $\tau_{p1} = 1/B p_1$ ;  $\tau_{n0}$ ;  $\tau_{p0}$ ;  $\tau_r = 1/B n_0$  тогда

$$\tau_{\text{эфф}} = \tau_{p0} (n_0 \tau_{nr} / \tau_{p1} \tau_{p0} + 1) / (1 + n_0 / \tau_{p1} + \tau_{p0} / \tau_r) \quad (8)$$

Поставляя численные значения  $\tau_{p1} = 2.5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ ,  $\tau_{n0} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ ,  $\tau_r = 2.5 \cdot 10^{-7} \text{ с}$  и допуская  $\tau_{p0} \approx 10^{-7} \text{ с}$ , получим:

$$\tau_{n0} \tau_{nr} / \tau_{p1} \tau_{p0} + 1 = 1 + [\tau_{n0} / \tau_{p1} + \tau_{p0} / \tau_{nr}] \approx 1,25$$

и следовательно  $\tau_{p0} = \tau_{\text{эфф}} = 70 \text{ нс}$ .

Рассчитаем точные значения  $p_1$ . Как видно из (5)  $\tau_{n0} (p_1 + \Delta p) / n_0 + \Delta p = \tau_{nr} - \tau_{p0}$ ,  $p_1 = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Точность определения  $\tau_{p0}$  и  $p_1$  проверяем по расчетам  $\tau_{nr}$  по (5). При уровне инжекции  $\Delta p = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $\tau_{nr} = 160 \text{ нс}$  а при  $\Delta p = 1.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $\tau_{nr} = 280 \text{ нс}$ . Эти результаты соответствуют данным приведенным в таблице. При  $E_F = E_n$  уровень рекомбинационной ловушки полностью ионизирован. (С точностью до снижения уровня ферми на кТ).

Так как  $N_n = N_v \exp(E_v - E_n/kT)$ , после подстановки численных значений:  $N_v = 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , при  $m^*/m_0 = 0.4$ ,  $T = 300 \text{ К}$  получаем  $E_n = 0.19 \text{ эВ}$ .

Оценим  $n_1$  при  $E_g(\text{InP}) = 1.3 \text{ эВ}$ .  $n_1 = N_c \exp(-E_g/kT) < p < n_0$  минимальное значение захвата  $\sigma = (\tau_{p0} V_T N_n)^{-1}$ . Так как  $\gamma_p = \sigma V_T$ , где  $V_T$  - тепловая скорость носителей, при  $T = 300 \text{ К}$ ,  $V_T = 10^7 \text{ см/с}$ . Подставляя  $N_n = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $\tau_{p0} = 70 \text{ нс}$ , получим  $\sigma = 7 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ .

Таким образом, путем сравнительного анализа  $\tau_{\text{эфф}}$  и  $\tau_{nr}$  удастся определить характеристики рекомбинационной ловушки: концентрацию, уровень залегания, сечение захвата, а также времена захвата электронов и дырок. Проведенный анализ показывает, что при больших временах захвата нельзя пренебречь избыточной концентрацией носителей, если она даже невелика.

Подобный анализ позволяет также установить доминирующий механизм рекомбинации в зависимости от уровня инжекции. Например, в полупроводнике InP, легированного донорной примесью - серой, до уровня концентрации носителей  $n_0 = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , безызлучательная рекомбинация доминирует при низких уровнях инжекции, а излучательная - при уровнях свыше  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

[1] Д.М. Гуреев, О.И. Даварашвили, И.И. Засавитский, Б.И. Мацонашвили, А.П. Шотов - ФТП, т.9, N 10, с. 1902 1975.  
 [2] О.И. Даварашвили, Т.Ф. Караваяев, Е.Т. Катаев, В.Т. Тютеров - ФТП, т.26, N 5, с 905, 1992  
 [3] В.М. Андреев, О.И. Даварашвили, М.С. Матинова, Т.Д. Мхеидзе и др. Труды международной конфе-

ренции по физике и химии гетеропереходов, Будапешт, 1970.  
 [4] I.Rosenwaks, I.Shapira, D.Huppert. Phys.Rev B, 45, 9108, 1991  
 [5] I.Rosenwaks, I.Shapira, D.Hupper.t Appl.Phys.Lett. 57, 2552, 1990

O.İ.Davaraşvili, M.İ. Yenukaşvili, N.P.Kekelidze, E.Q.Çikoidze, V.Ə. Əliyev

## KÜKÜRD LƏ AŞQARLANMIŞ İNDİUM-FOSFİDDƏ REKOMBİNASİYA MƏRKƏZİ

Kükürdlə aşqarlanmış InP kristalının nümunəsində göstərilmişdir ki, əgər təcrübədə müxtəlif injeksiya səviyyəsində müxtəlif yukdaşıyıcıların effektiv həyat müddətini təyin etmək olarsa, onda ardıcıl hesablamalarla şüalanmasız rekombinasiya müddəti, elektronların və deşiklərin rekombinasiya mərkəzinə zəbt olunması müddətlərini tapmaq olar. Bundan başqa mərkəzin konsentrasiyasını, səviyyəsini və yukdaşıyıcıların zəbt olunma kəsiyini də təyin etmək olar.

O.I.Davarashvili, M.I.Enukashvili, N.P.Kekelidze, E.G.Chikoidze, V.A.Aliyev

## THE RECOMBINATION CENTER IN InP DOPED WITH SULPHUR

In the InP crystals doped with sulphur is shown that if from the experiment may determine the carriers effective time of life at different levels of injection then by successive calculations way the time of nonradiative recombination, the electrons and holes occupation time on the recombination center can be obtained. Also the parameters of this center as thus the concentration, the level and the carriers occupation section can be determined.

*Дата поступления: 20.08.2000*

*Редактор: М.Г. Шахтаминский*