

УДК 621.383.4/5

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz,
07.57.Kp, 85.60.Dw

Исследование времени жизни неосновных носителей заряда в структурах на основе InGaAs

Н. И. Яковлева, А. В. Никонов

Тройные и четверные растворы материалов группы A_3B_5 арсенидов InGaAs и фосфидов InGaAsP используются в современных приборах коротковолнового ИК-диапазона спектра различного назначения. Проведены оценки и моделирование времени жизни в структурах A_3B_5 в соответствии с тремя основополагающими механизмами генерации-рекомбинации: излучательным, Оже и Шокли-Рида-Холла. По проведенным оценкам время жизни в материале $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ n-типа проводимости в диапазоне концентраций $10^{13}-10^{17}$ см⁻³ составляет от 10^{-5} до $4,5 \times 10^{-4}$ с, что позволяет достигать высоких фотоэлектрических параметров.

Ключевые слова: коротковолновый инфракрасный диапазон, SWIR, ИК, InGaAs, InGaAsP, время жизни.

Ссылка: Яковлева Н. И., Никонов А. В. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 122.

Reference: N. I. Iakovleva and A. V. Nikonov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (1), 122 (2019).

Введение

Коротковолновый инфракрасный диапазон (англ. – SWIR) представляет огромный интерес с точки зрения развития различных направлений фотоэлектроники, которые включают приборы ночного видения, системы безопасности, камеры пассивного и активного обнаружения целей, системы детектирования возгораний и другие комплексированные системы, расширяющие возможности ИК фотоприемных устройств.

Среди фотоприемных материалов, работающих в коротковолновом ИК-диапазоне спектра, тройные InGaAs и четверные растворы InGaAsP выделяются благодаря своим уникальным характеристикам, которые обуслов-

лены возможностью выращивания бездефектных структур на основе материалов группы A_3B_5 высокого кристаллического совершенства с низкими темновыми токами.

Для предварительной оценки значений фотоэлектрических параметров фотоприемных устройств (ФПУ) необходимо провести подробные расчеты времени жизни в структурах InGaAs и InGaAsP в соответствии с тремя основополагающими механизмами генерации-рекомбинации: излучательным, Оже и Шокли-Рида-Холла, причем в широком диапазоне составов и температур. Это и являлось целью данной работы.

Общие положения

Одним из широко используемых полупроводниковых материалов является четверной раствор $Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}$, согласованный по кристаллической структуре с подложкой InP. Данное соответствие дополнительно накладывает ограничение на выбор составов x и y , которые связаны между собой известным соотношением [1]:

$$y = \frac{2,202x}{(1 + 0,0659x)}$$

Яковлева Наталья Ивановна¹, гл.н.с. НИЦ, к.т.н.
Никонов Антон Викторович^{1,2}, нач. НИЦ, к.ф.-м.н.
¹ АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
Тел. 8(499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru
² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет).
Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный,
Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 26 марта 2019 г.

© Яковлева Н. И., Никонов А. В., 2019

При условии равенства $y = 1$ четверное соединение $Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}$ переходит в тройное соединение с химической формулой $Ga_xIn_{1-x}As$, где параметр x принимает значения от 0 до 1. Раствор $Ga_xIn_{1-x}As$ является прямозонным полупроводниковым материалом во всем диапазоне составов, причем при $x = 1$ формула приводится к арсениду галлия (GaAs), при $x = 0$ – к арсениду индия (InAs).

Наиболее часто используемым в фотоэлектронике является соединение с содержанием $x_{GaAs} = 0,47$ мол. дол., поскольку замещение 1,5 % Ga в соединении GaAs на In обеспечивает практически идеальное согласование постоянных решеток фоточувствительного слоя $Ga_{0,47}In_{0,53}As$ с подложкой InP, что снижает напряженность, количество дислокаций и несовершенств. Выбор состава определяет также диапазон работы соединения $Ga_{0,47}In_{0,53}As$ в спектральных границах 0,9–1,7 мкм, включая наиболее часто используемые линии лазерного излучения 1,3 и 1,55 мкм.

Четверной раствор $Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}$ можно рассматривать как соединение четырех бинарных составляющих (GaAs, GaP, InAs, InP), поэтому для оценки какого-либо параметра $Q(x, y)$ берутся начальные данные бинарных соединений группы A_3B_5 в рамках изменения составов $y = \frac{2,202x}{(1+0,0659x)}$, а для промежуточных значений используется интерполяция от параметра одного бинарного соединения к другому, последовательно изменяя значения по заданной математической зависимости.

Например, вычисление любого параметра $Q(x, y)$ можно провести, используя интерполяцию

$$Q(x, y) = xyQ(GaAs) + x(1-y)Q(GaP) + y(1-x)Q(InAs) + (1-x)(1-y)Q(InP),$$

причем большинство параметров материала подчиняется данному соотношению.

Значения коэффициентов тройного соединения $In_{1-x}Ga_xAs$ можно также рассчитать путем интерполяции коэффициентов двойных соединений. Так, параметры $E_0(x, 0)$, α и β вычисляются при $T = 0$ К, используя линейные приближения:

$$E_0(x, 0) = 0,359 + 1,154x \text{ (эВ)},$$

$$\alpha(x) = (3,3 + 2,5x) \times 10^{-4} \text{ (эВ/К)},$$

$$\beta(x) = 217 - 11x \text{ (К)}.$$

Для расчета ширины запрещенной зоны от температуры T в соединениях группы A_3B_5 используется формула Varshni [2]

$$E_g(x, y, T) = E_{g0}(x, y) - \frac{\alpha(x, y)T^2 \times 10^{-4}}{T + b(x, y)},$$

где $E_{g0}(x, y)$ – ширина запрещенной зоны при температуре абсолютного нуля $T = 0$ К; $\alpha(x, y)$ и $b(x, y)$ – коэффициенты, T – температура.

Коэффициенты $E_{g0}(x, y)$, $\alpha(x, y)$ и $b(x, y)$ для бинарных соединений группы A_3B_5 приведены в таблице.

Таблица

Коэффициенты для бинарных соединений A_3B_5

	$E_0(x, 0)$, эВ	$\alpha(x)$, эВ/К	$\beta(x)$, К	$\Theta(x)$, К
InSb	0,240	6	500	260
InAs	0,415	2,76	83	340
GaSb	0,813	3,78	94	340
GaAs	1,519	5,4	204	410

Используя квадратичную аппроксимацию, можно вывести уравнение энергии запрещенной зоны для четверного соединения $Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}$

$$E_g(x, y, T) = 1,41 + 0,668x - 1,068y + 0,758x^2 + 0,078y^2 - 0,069xy - 0,332x^2y + 0,03xy^2 - 4,3 \times 10^{-4} \times \frac{T^2}{T + 224},$$

при $y = 1$ получим уравнение для тройного раствора $In_{1-x}Ga_xAs$,

$$E_g(x, T) = 0,42 + 0,629x + 0,426x^2 - 4,3 \times 10^{-4} \times \frac{T^2}{T + 224}.$$

На рис. 1, а, б показана рассчитанная зависимость ширины запрещенной зоны соеди-

нения $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ от состава (*а*) и температуры (*б*). Здесь использованы приближение квадратичной аппроксимации и более простая зависимость от температуры

$$E_{g1}(T) = 0,813 - \left(\frac{4,906 \times 10^{-4} \times T^2}{T + 301} \right),$$

которая находится с ней в хорошем соответствии.

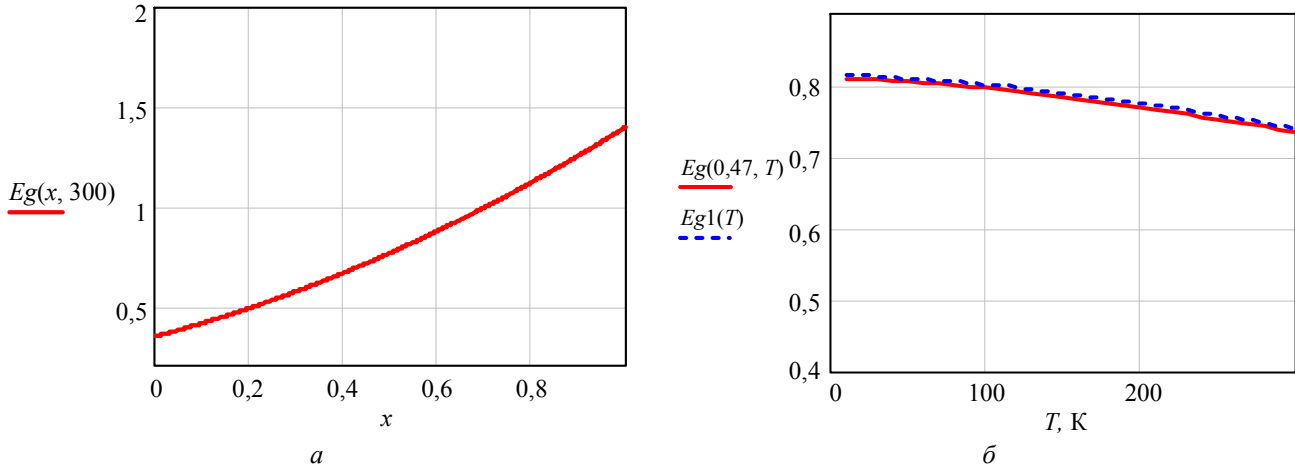


Рис. 1. Моделирование энергии запрещенной зоны E_g от состава и температуры: *а* – ширина запрещенной зоны от состава x при температуре 300 К; *б* – ширина запрещенной зоны от температуры T при $x = 0, 47$ и $x = 1$.

Как видно из рис. 1, *а*, ширина запрещенной зоны во всех растворах группы A_3B_5 при возрастании состава x увеличивается, а при возрастании температуры (рис. 1, *б*) уменьшается. Гидростатическое напряжение сжатия приводит к более широкой, а растягивающее напряжение к более узкой ширине запрещенной зоны. Одноосное напряжение приводит к снятию вырождения в максимумах валентной зоны в окрестности точки Γ_8 .

Собственная концентрация носителей заряда $n_i(x, T)$ в тройных растворах материалов группы A_3B_5 определяется уравнением

$$n_i(x, T) = \sqrt{N_C(x, T)N_V(x, T)} \times \exp\left[\frac{-qE_g(x, T)}{k_B T}\right],$$

где N_C и N_V – плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне, q – заряд

электрона, k_B – постоянная Больцмана; T – температура.

Эффективная плотность состояний в зоне проводимости N_C тройного раствора $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ определяется выражением:

$$N_C(x, T) = 4,82 \times 10^{15} \times \left[(0,023 + 0,037x + 0,003x^2) \times T \right]^{3/2},$$

а эффективная плотность состояний в валентной зоне N_V $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ составляет величину:

$$N_V(x, T) = 4,82 \times 10^{15} \times [(0,41 - 0,1x) \times T]^{3/2}.$$

Более сложная зависимость для собственной концентрации выведена в работе [3]:

$$n_i(x, T) = 4,83 \times 10^{15} \left[(0,41 + 0,09x)^{1,5} + (0,027 + 0,047x)^{1,5} \right]^{0,5} \times (0,025 + 0,043x)^{0,75} \times \left[T^{1,5} \times \exp\left(\frac{-E_g(x, T)}{2k_B T}\right) \times \left(1 + \frac{3,75}{v} + \frac{3,28}{v^2} - \frac{2,46}{v^3}\right)^{0,5} \right].$$

где $v = \frac{E_g(x, T)}{k_B T}$

На рис. 2 представлена зависимость $n_i(x, T)$ от состава при различных температурах.

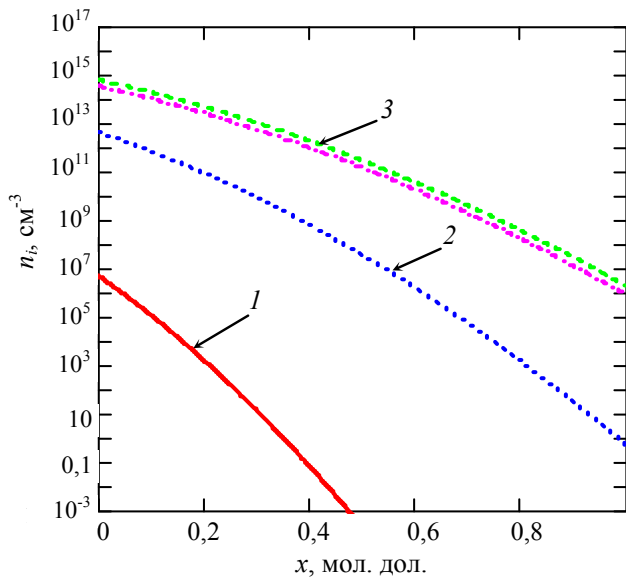


Рис. 2. Зависимость собственной концентрации $n_i(x, T)$ от состава при различных температурах: кривая 1 – $T = 100$ К; 2 – $T = 200$ К; 3 – $T = 300$ К.

Время жизни неосновных носителей заряда

Время жизни для излучательной рекомбинации

Согласно теории Ван Русброка, Шокли и Блэкмора (Van Roosbroeck W. and Shockley W., 1954 [4]; Blakemore J. S., 1962 [5]), время жизни для излучательной рекомбинации в тройных растворах $In_{1-x}Ga_xAs$ определяется по формуле

$$\tau_{rad} = \frac{1}{B(n_0 + p_0)},$$

где n_0 и p_0 – равновесные концентрации электронов и дырок в области поглощения; B – коэффициент излучательной рекомбинации с размерностью cm^3/c , который задается формулой (Long, D. 1977 [6]),

$$B = 5,8 \times 10^{-13} \times \epsilon_{\infty}^{1/2} \times \left(\frac{m_0}{m_e^* + m_h^*} \right)^{3/2} \times \left(1 + \frac{m_0}{m_e^*} + \frac{m_0}{m_h^*} \right) \left(\frac{300}{T} \right)^{3/2} \times E_g^2,$$

здесь E_g – ширина запрещенной зоны в эВ, T – температура в К, ϵ_{∞} – высокочастотная диэлектрическая постоянная; а m_e и m_h – удельные эффективные массы электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне; m_0 – масса свободного электрона.

Эффективная масса электронов в диапазоне составов $y \approx 2,2x$ рассчитывается в соответствии с эмпирической зависимостью

$$\frac{1}{m_e} = \frac{1}{m_0} + \left[\frac{2P^2}{3\hbar^2} \right] \left[\frac{2}{E_g} + \frac{1}{E_g + \Delta} \right],$$

где m_0 – масса свободного электрона; P – матричный элемент; Δ – энергия спин-орбитального взаимодействия в точке Γ валентной зоны.

Эффективную массу электрона (в долях m_0) для тройного раствора $In_{1-x}Ga_xAs$ можно рассчитать по формуле $m_e^*(x) = 0,023 + 0,037x + 0,003x^2$ (Adachi S., 1992 [7]). На рис. 3 представлена зависимость массы электрона от состава в тройном растворе $In_{1-x}Ga_xAs$.

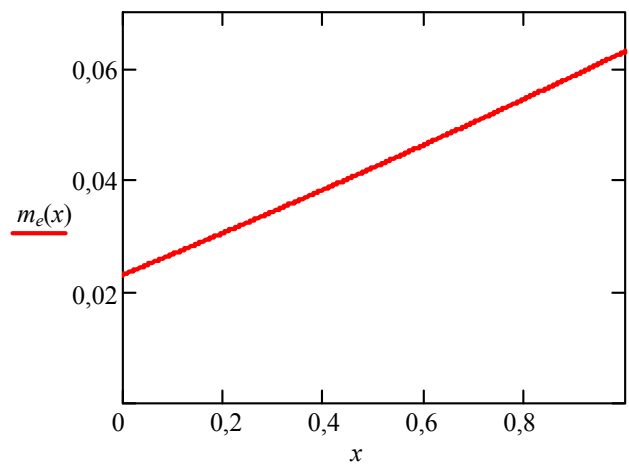


Рис. 3. Зависимость эффективной массы электрона (в долях m_0) от состава x для тройного раствора $In_{1-x}Ga_xAs$.

На рис. 4 представлены зависимости времени жизни от обратной температуры для излучательного механизма рекомбинации в структурах с поглощающим слоем $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ n -типа с различными концентрациями основных носителей заряда.

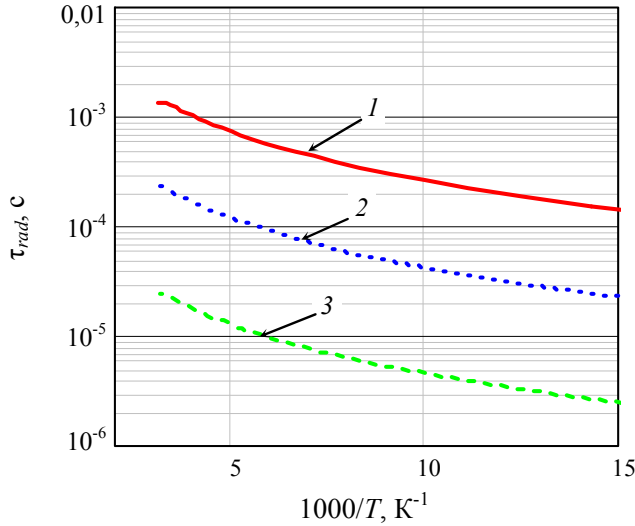


Рис. 4. Зависимости времени жизни τ_{rad} от обратной температуры для излучательного механизма рекомбинации в структурах с поглощающим слоем $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ n -типа с концентрациями доноров: кривая 1 – $N_D = 10^{13} \text{ см}^{-3}$; 2 – $N_D = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 3 – $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Обработка Ван Русброка и Шокли не учитывает дополнительное взаимодействие излучаемых фотонов внутри полупроводника. Явление, связанное с рециркуляцией фотонов в полупроводниковом соединении, определено Хамфри (Humphreys R. G., 1986) [8]. В соответствии с данным явлением, образуемые в полупроводнике фотоны практически полностью перепоглощаются, поэтому данный механизм времени жизни, как правило, не включается в формулу суммарного времени жизни в материалах группы A_3B_5 .

Время жизни по механизму Оже

Время жизни по механизму Оже-1 характеризует поведение неосновных носителей заряда в необедненных областях поглощения n -типа в сложных структурах на основе материалов группы A_3B_5 и рассчитывается по формуле из работ [9, 10]

$$\tau_{aug} = \frac{2\tau_{Ail}n_i^2}{n_0(n_0 + p_0)},$$

$$\begin{aligned} \tau_{A1}^i &= 3,8 \times 10^{-18} \varepsilon_{\infty}^2 \frac{m_0}{m_e^*} \left(1 + \frac{m_e^*}{m_h^*}\right)^{1/2} \times \\ &\times \left(1 + \frac{2m_e^*}{m_h^*}\right) \left(\frac{E_g}{k_B T}\right)^{3/2} \times \\ &\times \exp \left[\left(1 + \frac{2m_e^*}{m_h^*}\right) \times \left(1 + \frac{m_e^*}{m_h^*}\right)^{-1} \left(\frac{E_g}{k_B T}\right) \right] \times \\ &\times |F_1 F_2|^{-2} \end{aligned}$$

где τ_{A1}^i – время жизни в собственном материале; E_g – ширина запрещенной зоны в эВ; k_B – постоянная Больцмана; T – температура в К, ε_{∞} – высокочастотная диэлектрическая постоянная; m_e^* и m_h^* – удельные эффективные массы электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне; m_0 – масса свободного электрона; $\frac{m_e^*}{m_h^*}$ – отношение эффективных масс

электрона и дырки; $|F_1 F_2|$ – произведение функций Блоха, показывающих степень перекрытия волновых функций между зоной проводимости и валентной зоной.

Ширина запрещенной зоны E_g определяется функцией Варшни, а эффективная масса электрона задается формулой Адаши. Для легированных прямозонных полупроводниковых материалов в точке Γ ($k=0$) зоны Бриллюэна существует неопределенность при вычислении интеграла перекрытия волновых функций зоны проводимости и валентной зоны. В расчетах для материалов группы A_3B_5 , как правило, используется значение $[F_1 F_2] = 0,25$ (Beattie A. R. and Landsberg P. T., 1960 [11]). Соотношение собственных времен жизни по механизмам Оже-1 и Оже-7 принимает равным от 5 до 10.

На рис. 5 представлены зависимости времени жизни носителей заряда от обратной температуры для Оже-рекомбинации в структурах с поглощающим слоем $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ n -типа с концентрациями основных носителей заряда: (1) – $N_D = 10^{13} \text{ см}^{-3}$; (2) – $N_D = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; (3) – $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

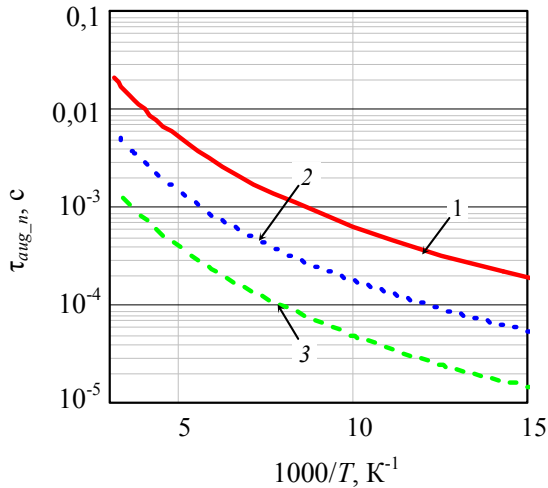


Рис. 5. Зависимости времени жизни τ_{avg_n} от обратной температуры для Оже-рекомбинации в структурах с поглощающим слоем $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ n -типа с концентрациями основных носителей заряда: кривая 1 – $N_D = 10^{13} \text{ см}^{-3}$; 2 – $N_D = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 3 – $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Время жизни по механизму ШРХ

Механизм Шокли-Рида-Холла типичен для материала $InGaAs$ n -типа проводимости. Причиной возникновения дополнительных уровней в запрещенной зоне, как правило, являются собственные дефекты и примеси. Скорость генерации Шокли-Рида-Холла выводится из условия равновесия скоростей генерации-рекомбинации через центры ШРХ, расположенные на уровне энергии на E_t ниже края зоны проводимости зонной диаграммы полупроводника, в котором отсутствуют дополнительные поля. Для модели рассматривается случай, в котором концентрация собственных дефектов меньше, чем концентрация

основных и неосновных носителей заряда, т. е. $N_t < n, p$.

Уравнение для скоростей генерации-рекомбинации электронов и дырок в равновесных условиях выражается формулой из работ [12, 13]:

$$G_{th} = \frac{np - n_i^2}{(n + n_1) \times \tau_{p0} + (p + p_1) \times \tau_{n0}}$$

где n_1, p_1 – концентрации равновесных электронов и дырок, расположенных на ловушках. При этом считается, что дополнительные уровни в запрещенной зоне близки или совпадают с собственным уровнем Ферми, что позволяет записать следующие соотношения:

$$n_1 := N_C \exp(-E_t/kT)$$

$$p_1 := N_V \exp(-(E_g - E_t)/kT)$$

$$\tau_{n0} = (\sigma_n \nu_{th} N_t)^{-1} = (\gamma_n N_t)^{-1}$$

$$\tau_{p0} = (\sigma_p \nu_{th} N_t)^{-1} = (\gamma_p N_t)^{-1},$$

где σ_n, σ_p – эффективные площади захвата электронов и дырок; ν_{th} – тепловая скорость носителей заряда; N_t – концентрация ловушек; γ_n и γ_p – коэффициенты рекомбинации электронов и дырок через N_t -центры; N_C и N_V – плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне соответственно; E_g – ширина запрещенной зоны. Эффективное время жизни при наличии нейтральных ловушек (других типов ловушек в материалах группы A_3B_5 не обнаружено) определяется выражением:

$$\tau_{srh} = \frac{\sigma_n \left(n_0 + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_F}{k_B T}\right) \right) + \sigma_p \left(p_0 + n_i \exp\left(\frac{E_F - E_t}{k_B T}\right) \right)}{N_t \sigma_n \sigma_p \nu_T (n_0 + p_0)}$$

Для области обеднения при обратном напряжении смещения ($n = p = 0$), если центры захвата расположены на собственном энергетическом уровне Ферми E_i ($n_1 \approx p_1 \approx n_i$), уравнение для скорости генерации упрощается

$$G_{th} = \frac{-n_i^2}{n_1 \times \tau_{p0} + p_1 \times \tau_{n0}} = \frac{-n_i}{\tau_{p0} + \tau_{n0}} = \frac{-n_i}{\tau_{srh}},$$

и эффективное время жизни ШРХ равно $\tau_{srh} = \tau_{p0} + \tau_{n0}$.

Расчет времени жизни по механизму ШРХ проводился в соответствии с вышепредставленными формулами при следующих начальных параметрах: концентрация носителей заряда в области поглощения $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; эффективные площади захвата электронов и

дырок составили $\sigma_n = 10^{-14} \text{ см}^2$, $\sigma_p = 10^{-13} \text{ см}^2$; плотность ловушек: 1) – $N_t = 10^9 \text{ см}^{-3}$; 2) – $N_t = 10^{10} \text{ см}^{-3}$; 3) – $N_t = 10^{11} \text{ см}^{-3}$, расположенных на энергетическом уровне $E_t \approx 0,37 \text{ эВ}$ ниже дна зоны проводимости. Результаты расчетов представлены на рис. 6.

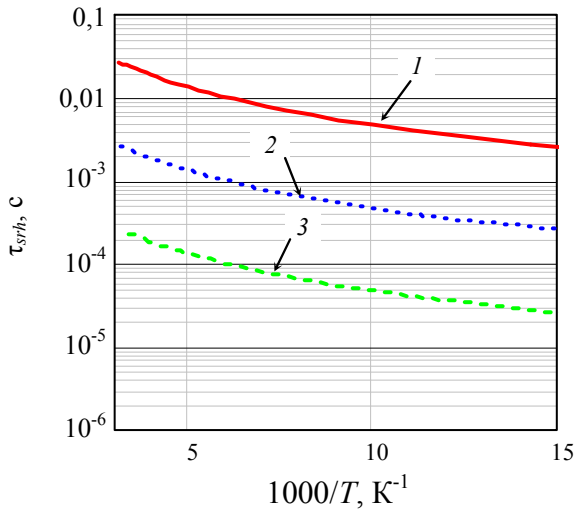


Рис. 6. Время жизни τ_{srh} в зависимости от обратной температуры для механизма рекомбинации ШРХ в структурах с поглощающим слоем $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ n -типа с плотностью ловушек: кривая 1 – $N_t = 10^9 \text{ см}^{-3}$; 2 – $N_t = 10^{10} \text{ см}^{-3}$; 3 – $N_t = 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Из рис. 6 видно, что время жизни по механизму ШРХ существенно зависит от концентрации ловушек.

Обобщение

Представленная модель определения времени жизни в материалах группы A_3B_5 может использоваться при конструировании широкого круга фотодетекторов ИК-диапазона спектра. Объемную составляющую времени жизни в материалах группы A_3B_5 можно представить в виде суммы τ_{sum} , которая в общем случае включает три составляющие:

$$\frac{1}{\tau_{sum}} = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{aug}} + \frac{1}{\tau_{srh}},$$

где τ_{rad} – время жизни вследствие излучательных процессов; τ_{aug} – время жизни вследствие влияния Оже-механизмов генерации-рекомбинации; τ_{srh} – время жизни вследствие механизмов ШРХ.

В материалах группы A_3B_5 p -типа проводимости помимо характерных механизмов рекомбинации Оже-1 и Оже-7, добавляется механизм Оже-S с использованием валентной подзоны спин-орбитального расщепления (Takeshima M., 1972 [14]).

Суммарное время жизни для структур с поглощающим слоем $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ n -типа проводимости, не учитывая излучательный механизм, рассчитывалось по формуле:

$$\tau_{sum} = \left(\frac{1}{\tau_{srh}} + \frac{1}{\tau_{aug1}} \right)^{-1}.$$

На рис. 7 представлены зависимости времени жизни от обратной температуры в структурах с поглощающим слоем $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ n -типа с концентрациями доноров: 1) – $N_D = 10^{13} \text{ см}^{-3}$; 2) – $N_D = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 3) – $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 4) – $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

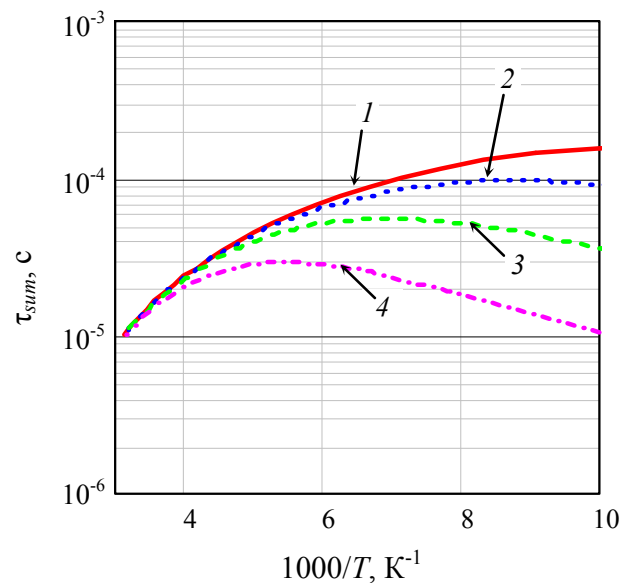


Рис. 7. Время жизни τ_{sum} в зависимости от обратной температуры в структурах с поглощающим слоем $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ n -типа с концентрациями доноров: кривая 1 – $N_D = 10^{13} \text{ см}^{-3}$; 2 – $N_D = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 3 – $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 4 – $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Из рис. 7 видно, что время жизни в материале $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ n -типа проводимости в диапазоне концентраций 10^{13} – 10^{17} см^{-3} изменяется от 10^{-5} до 2×10^{-4} с.

Для p - i - n -фотодиодов вследствие полного обеднения области поглощения при обратном напряжении смещения время жизни по меха-

низму Оже не играет большой роли и может не учитываться.

Время жизни по механизму ШРХ существенно зависит от концентрации центров захвата, поэтому выращивание бездефектных слоев InGaAs является основой достижения высоких фотоэлектрических параметров.

Проведена оценка времени жизни носителей заряда в области поглощения согласно формуле Шокли-Рида-Холла [12] для $p-i-n$ -фотодиодов из гетероструктуры $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$ с размерами 20×20 мкм, толщиной области поглощения 2,0 мкм и фоновой концентрацией в поглощающем слое n -типа $N = 7 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при полном обеднении области поглощения W по формуле

$$\tau_{srh} = \frac{q \times n_i \times W}{j_B} = \frac{1,6 \times 10^{-19} \times 4,6 \times 10^7 \times 2 \times 10^{-4}}{5 \times 10^{-12}} = 2,9 \times 10^{-4} \text{ с}$$

где $n_i = 4,6 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$ – собственная концентрация носителей заряда при $T = 200 \text{ К}$; W – ширина области обеднения (считается, что она совпадает с областью поглощения), j_B – измеренная объемная составляющая плотности темнового тока, которая при $T = 200 \text{ К}$ и напряжении смещения $U = -5 \text{ В}$ составила $j_B = 5 \text{ пА/см}^2$. Таким образом, время жизни носителей заряда составило $\tau_{srh} = 2,9 \times 10^{-4} \text{ с}$.

На рис. 8 представлена зависимость времени жизни от концентрации легирующей примеси $\tau_{sum}(N_D)$ в структурах с поглощающим слоем $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ n -типа при $T = 200 \text{ К}$ и концентрации центров ШРХ $N_t = 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Результаты расчетов времени жизни неосновных носителей заряда для исследованных гетероструктур $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ n -типа проводимости, выращенных на оптически прозрачных подложках InP, показывают, что при уровнях легирования от 10^{13} до 10^{17} см^{-3} оно изменяется в пределах от 10^{-5} до $4,5 \times 10^{-4} \text{ с}$. Это позволяет достигать высоких фотоэлектрических параметров в ИК ФПУ.

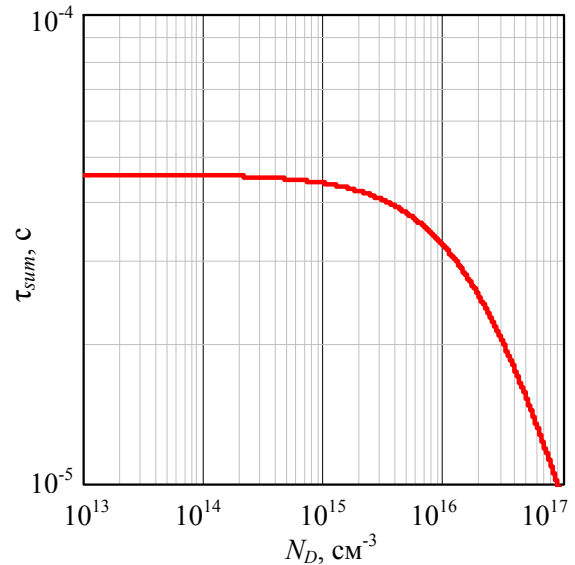


Рис. 8. Время жизни в зависимости от концентрации легирующей примеси в структурах с поглощающим слоем $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ n -типа при $T = 200 \text{ К}$ и концентрации центров ШРХ $N_t = 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Заключение

В работе проведены оценки и моделирование времени жизни в структурах A_3B_5 в соответствии с тремя основополагающими механизмами генерации-рекомбинации: излучательным, Оже и Шокли-Рида-Холла. По проведенным оценкам, время жизни в материале $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ n -типа проводимости в диапазоне концентраций $10^{13} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$ составляет от 10^{-5} до $4,5 \times 10^{-4} \text{ с}$, что позволяет достигать высоких фотоэлектрических параметров.

Полученные результаты для тройных и четверных растворов материалов группы A_3B_5 арсенидов InGaAs и фосфидов InGaAsP могут быть широко использованы при создании современных приборов коротковолнового ИК-диапазона спектра различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pearsall T. P. GaInAsP Alloy Semiconductors. – Wiley, New York, 1682.
2. Varshni, Y. P. // Physica. 1967. Vol. 34. No. 1. P. 149.
3. Paul S., Roy J. B., Basu P. K. // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 69. No. 2. P. 827.

4. Van Roosbroeck W., Shockley W. // Phys. Rev. 1954. Vol. 94. No. 6. P. 1558.
5. Blakemore J. S. Semiconductor Statistics, International Series of Monographs on Semiconductors, Vol. 3. – New York: Pergamon, 1962.
6. Long D. Optical and Infrared detectors. In Book: Topics in Applied Physics Vol. 19. – Springer, New York, 1977.
7. Adachi S. Physical Properties of III-V Semiconductor compounds. – John Wiley and Sons, 1992.
8. Humphreys R. G. // Infrared Physics. 1986. Vol. 26 (6). P. 337.
9. Rogalski A. Infrared Photon Detectors. – SPIE Optical Engineering Press. 1995.
10. Rogalski A., Orman Z. // Infrared Phys. 1985. Vol. 25. No. 3. P. 551.
11. Beattie A. R., Landsberg P. T. // Proc. Royal Society. London. 1959. Vol. A 249. P. 1629; 1960. Vol. A 258. P. 486495.
12. Hall R. N. // Phys. Rev. 1952. Vol. 87. Vol. 2. P. 387.
13. Shockley W., Read W. T. // Phys. Rev. 1952. Vol. 87. No. 5. P. 835.
14. Takeshima M. // J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. No. 10. P. 4114.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Investigation of the lifetime of minority charge carriers in structures based on InGaAs

N. I. Iakovleva¹ and A. V. Nikonov^{1,2}

¹Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskiy al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received March 26, 2019

The family of ternary $In_xGa_{1-x}As$ and quaternary $Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}$ compounds are of considerable interest for photodetection in NIR and SWIR regions. The recombination minority carrier lifetimes modeling in wide structure compositions and temperatures have been carried out for three important mechanisms of generation-recombination: radiative, Auger and Shockley-Reed-Hall. According to estimates, the lifetime in $n-In_{0.53}Ga_{0.47}As$ for the concentration range of 10^{13} – 10^{17} cm^{-3} changes from 4.5×10^{-4} to 10^{-5} sec and allows to achieve high performance.

Keywords: SWIR, infrared, IR, InGaAs, InGaAsP, lifetime.

REFERENCES

1. T. P. Pearsall, *GaInAsP Alloy Semiconductors*, (Wiley, New York, 1982).
2. Y. P. Varshni, *Physica* **34** (1), 149 (1967).
3. S. Paul, J. B. Roy, and P. K. Basu, *J. Appl. Phys.* **69** (2), 827 (1991).
4. W. Van Roosbroeck and W. Shockley, *Phys. Rev.* **94** (6), 1558 (1954).
5. J. S. Blakemore, *Semiconductor Statistics, International Series of Monographs on Semiconductors, Vol. 3.* (New York: Pergamon, 1962).
6. D. Long, *Optical and Infrared detectors*. In Book: *Topics in Applied Physics, vol 19.* (Springer, New York 1977).
7. S. Adachi, *Physical Properties of III-V Semiconductor Compounds.* (John Wiley and Sons. 1992).
8. R. G. Humphreys, *Infrared Physics* **26** (6), 337 (1986).
9. A. Rogalski, *Infrared Photon Detectors*, (SPIE Optical Engineering Press, 1995).
10. A. Rogalski and Z. Orman, *Infrared Phys.* **25** (3), 551 (1985).
11. A. R. Beattie and P. T. Landsberg, *Proc. Royal Society. London* **A 249**, 1629 (1959); **258**, 486495 (1960).
12. R. N. Hall, *Phys. Rev.* **87** (2), 387 (1952).
13. W. Shockley and W. T. Read, *Phys. Rev.* **87** (5), 835 (1952).
14. M. Takeshima, *J. Appl. Phys.* **43** (10), 4114 (1972).