

Заключение

Проведенные исследования показали, что импульсное гамма-излучение и импульсное нейтронное облучение приводят к улучшению фотоэлектрических характеристик фотодиодов на основе селенида индия.

Л и т е р а т у р а

1. Аскеров К. А., Исаев Ф. К., Амиров Д. Г. Дефектообразование и диффузионные процессы в некоторых слоистых полупроводниках. — Азербейшр, 1991. — 126 с.
2. Saito H., Rigg J. C., Granford J. H. // Phys. Rev. 1996. № 144. P. 725.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

Influence of ionizing radiations on photodiodes with thermoelectric cooler on the basis of indium selenide

K. A. Askerov, V. I. Gadzhieva, D. Sh. Abdinov

Institute of Physics of National Academy of Sciences of Azerbaijan,
Baku, Azerbaijan

Influence of simulating factors of nuclear explosion and proton irradiation on photoelectric properties of photodiodes on the basis of indium selenide have been investigated. It is established, that pulse gamma irradiation and a pulse neutron irradiation results in improvement of photoelectric characteristics of researched photodiodes. It is shown, that big fluences of the neutron irradiation facilitate process of formation of complexes in an interlaminar space of the layered indium selenide, and as a result photoelectric parameters of photodiodes a little worsen.

УДК 621.315.592

Параметры центров рекомбинации структур InGaN/AlGaIn/GaN с люминофорным покрытием

Н. С. Грушко, А. С. Хайрулина

Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск, Россия

В белых светодиодах (фирма Foryard Optoelectronics) на основе p-n-гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с тонким активным слоем InGaN и верхним люминофорным покрытием (алюмоиттриевый гранат, активированный церием), полученных на подложке из Al₂O₃, определены параметры центров рекомбинации по приведенной скорости рекомбинации R_{red} : энергии активации и коэффициенты захвата. Установлен диапазон изменения концентрации глубоких уровней N_{dep} и вероятности туннелирования в интервале изменения напряжения 1—2 В.

Введение

На основе структур InGaN/AlGaIn/GaN с тонким активным слоем InGaN созданы светодиоды (СД) для фиолетовой, синей, голубой и зеленой частей видимого спектра с внешним квантовым выходом до 15 %. Светодиоды синего свечения используются для создания светодиодов белого свечения. Их можно использовать в светофорах, видеозэкранах, полноцветных табло. Белые СД конкурентоспособны с лампами накаливания, так как обладают большей светоотдачей и сроком службы, большим 10^5 ч непрерывной работы. Они используются в полиграфии. КПД белых СД с

люминофорным покрытием достигает 40 % [1, 2]. Однако влияние дефектов на основные параметры не выяснено до сих пор. Ведется поиск путей повышения яркости СД, возможности использования их в других областях и приборах. Реальное положение дел определяется дефектами в GaN-структурах, плотностью дислокаций между подложкой и пленкой и т. д. Невыясненные вопросы затрудняют работу над улучшением параметров приборов.

Благодаря однодолинной структуре нижней зоны проводимости нитридные структуры InGaN/AlGaIn/GaN могут создать конкуренцию материалам GaAs/AlGaAs в приборах с попереч-

ным транспортом. Изучаемые гетероструктуры используют для разработок фотоприемников, СД и инжекционных лазеров.

Из изложенного выше ясно, что на сегодня актуальна задача определения параметров рекомбинационных центров. Такие параметры определены в работе [3] путем анализа кривых приведенной скорости рекомбинации $\partial R_{red}(U)/\partial U$ и из зависимости $R_{red}^2(U)/\exp(qU/2kT)$ (T — температура, k — постоянная Больцмана, U — напряжение, q — заряд) для кремниевых p^+n -диодов, легированных золотом.

В работе [4] предложены способы определения параметров глубоких уровней, участвующих в формировании рекомбинационного потока для структур AlGaIn/InGaIn/GaN и InGaIn/SiC, используя R_{red} , вероятность туннелирования и концентрацию N_{deep} .

В данной работе изучается туннельная рекомбинация с использованием выводов из работы [4]. Цель исследования — определение параметров рекомбинационных уровней по приведенной скорости рекомбинации.

Образцы для исследования

Изучались СД фирмы Foryard Optoelectronics, выращенные на подложке Al_2O_3 на основе p - n -гетероструктур InGaIn/AlGaIn/GaN. Основой белого цвета являются структура InGaIn, излучающая на длине волны 470 нм, и нанесенный на нее сверху люминофор (алюмоиттриевый гранат, активированный церием), имеющий максимум в желтой части спектра. КПД составляет 34 % с учетом полученной остронаправленной диаграммы направленности и 84 % — без учета направленности излучения.

Основная полоса электролюминесцентного излучения $\hbar\omega_{max} = 2,69$ эВ ($\lambda \approx 460$ нм) обусловлена рекомбинацией между квантовыми уровнями в квантовых ямах (КЯ). При малых напряжениях смещения проявляется пик 2,88 эВ (430 нм), который исчезает с увеличением напряжения. Вероятно, энергия его максимума обусловлена зоназональными переходами в материале GaN с хвостами плотности состояний, т. е. при малых напряжениях на структуре носители проскакивают КЯ и рекомбинируют в основном материале. С увеличением напряжения на структуре усиливаются процессы безызлучательной рекомбинации, т.е. туннельный поток поставляет в основной материал большее количество носителей. КПД падает в области больших напряжений ($U > 3,3$ В), чем порог подвижности (или вблизи порога подвижности GaN), при этом важную роль играют механизмы рассеяния.

Определение параметров уровней по скорости рекомбинации R_{red}

Измерены прямые вольт-амперные характеристики (ВАХ) в диапазоне температур 291—333 К, и по методике [5] построены графики приведенной скорости рекомбинации $R_{red} = f(U)$ в измеряемом диапазоне температур (рис. 1).

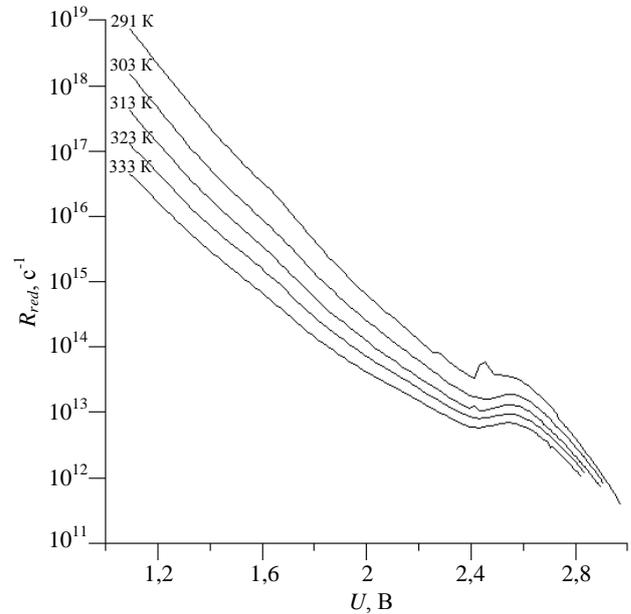


Рис. 1. Зависимость приведенной скорости рекомбинации R_{red} от напряжения в диапазоне температур 291—333 К

Из рис. 1 видно, что R_{red} экспоненциально уменьшается с ростом напряжения в исследуемом диапазоне температур, что говорит о туннельном механизме токопереноса. Особенности на графиках $R_{red} = f(U)$ дают возможность определить параметры уровней, участвующих в токопереносе, и говорить, что существует прыжковая проводимость, т. е. экспериментальные точки на зависимости $I = f(1/T)^{1/4}$ представляют прямую линию. Выражение для R_{red} с учетом туннелирования имеет следующий вид [4]:

$$R_{red} = \frac{I_r U U_k - U}{2kTsd U n_i \left(\exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) - 1 \right)} = \frac{\omega N^2 c_n c_p n_i \left(\exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) + 1 \right)}{c_n c_p n U + n_1 p U + p_1 + \omega N [c_n n U + n_1 + c_p p U + p_1]}, \quad (1)$$

где I_r — ток при прямом напряжении смещения;
 U_k — контактная разность потенциалов (определялась по вольт-фарадным характеристикам);

S — площадь p - n -перехода;
 $d(U)$ — ширина области пространственного заряда (ОПЗ);
 ω — вероятность туннелирования;
 N — концентрация глубоких уровней;
 $c_n(c_p)$ — коэффициент захвата электронов (дырок) локализованными состояниями;
 k — постоянная Больцмана;
 $n_1 = N_c \exp(-(E_c - E)/kT)$ — концентрация электронов, выброшенных в результате эмиссии в зону проводимости;
 $p_1 = N_v \exp(-(E - E_v)/kT)$ — концентрация дырок, выброшенных в результате эмиссии в валентную зону;
 $N_c(N_v)$ — эффективные плотности состояний в зоне проводимости (валентной зоне).

$$n(U) = n_i \sqrt{\frac{c_p(c_n n_1 + \omega N)}{c_n(c_p p_1 + \omega N)}} \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right);$$

$$p(U) = n_i \sqrt{\frac{c_n(c_p p_1 + \omega N)}{c_p(c_n n_1 + \omega N)}} \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right).$$

Значения концентрации носителей заряда $n(U)$, $p(U)$ — в максимуме приведенной скорости рекомбинации. На зависимости $R_{red} = f(U)$ можно выделить максимум при $U = U_{max}$, положение которого использовалось для определения параметров уровней по методике, изложенной в работе [4].

Считаем, что коэффициент захвата электронов рассматриваемого уровня равен коэффициенту захвата дырок $c_n = c_p = c$, и выполняется условие $\omega N \gg c_n n_1, c_p p_1, p_1 \ll n_1, \exp(qU/2kT) \gg 1$.

Тогда из выражения (1) вводя новую переменную $x = \exp(qU/2kT)$, получаем следующее выражение, коэффициенты которого связаны с параметрами уровня, участвующего в создании рекомбинационного потока, т. е. имеем

$$R_{red} = \frac{ax}{x^2 + bx + d}; \tag{2}$$

$$a = \frac{\omega N^2}{n_i}; \quad b = \frac{n_1}{n_i} + \frac{2\omega N}{n_i c}; \quad d = \frac{\omega N n_1}{c n_i^2}.$$

Из условия максимума функций $\partial R_{red} / \partial U = 0$ находим, что $d = x_{max}^2$ ($x_{max} = x|_{U_{max}}$).

Выбирая две точки на зависимости $R_{red}(U)$ вблизи максимума (R_{red1}, R_{red2}), получаем уравнение для нахождения b :

$$K \equiv \frac{R_{red1}}{R_{red2}} = \frac{x_1(x_2^2 + bx_2 + d)}{x_2(x_1^2 + bx_1 + d)}.$$

Зная b и d , из (2) определяем отношение n_1/n_i :

$$Y \equiv \frac{n_1}{n_i} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 8d}}{2}. \tag{3}$$

С учетом (3) из d определяем коэффициент захвата для уровня $c = \omega N Y / d n_i$, а из выражения для Y — положение уровня $E_i = -kT \ln(Y n_i / N_c)$.

Метод анализа зависимости $R_{red}(U)$ дает возможность определить коэффициент захвата уровня и его положение относительно дна зоны проводимости или валентной зоны (в зависимости от типа материала).

По зависимости $R_{red}(U)$ были рассчитаны параметры уровней с учетом туннелирования, создающие рекомбинационный поток. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры уровней при температуре 291 К, определенные по R_{red}

$U_{max}, \text{В}$	$R_{max}, \text{с}^{-1}$	$E_i, \text{эВ}$	$c, \text{см}^3/\text{с}$
1,572	$4,26 \cdot 10^{16}$	0,889	2,33
1,833	$2,95 \cdot 10^{15}$	0,773	$1,83 \cdot 10^{-3}$
2,032	$4,73 \cdot 10^{14}$	0,697	$1,58 \cdot 10^{-3}$
2,274	$8,32 \cdot 10^{13}$	0,547	$1,21 \cdot 10^{-4}$
2,453	$6,00 \cdot 10^{13}$	0,360	$3,14 \cdot 10^{-3}$
2,722	$9,95 \cdot 10^{12}$	0,273	$1,76 \cdot 10^{-7}$

Таким образом, можно определить энергию уровня и коэффициент захвата.

Зависимость $\partial \beta / \partial U = f(U)$ имеет несколько максимумов, которым соответствуют уровни с энергиями:

$$E_i = 0,5 E_g - qU_{max} + kT \ln \left(\left[\frac{m_n^*}{m_p^*} \right]^{3/2} \frac{\omega N}{c_p n_i} \right), \tag{4}$$

где E_g — ширина запрещенной зоны; m_n^*/m_p^* — отношение эффективных масс электронов и дырок.

Рассчитывая энергию уровня по (4) для 291 К, получим следующие значения E_i (табл. 2).

Таблица 2

Параметры уровней при температуре 291 К, определенные по $\partial \beta / \partial U = f(U)$

$U_{max}, \text{В}$	1,592	1,833	2,072	2,233	2,413	2,730
$E_i, \text{эВ}$	0,863	0,801	0,650	0,554	0,292	0,221

В этих структурах основной механизм токопереноса — туннелирование с участием прыжковой проводимости. Ток рекомбинации с участием туннелирования имеет участок насыщения из-за ограничения пропускной способности туннельного канала ($j_r \approx \omega N^2$), и плотность тока можно записать в виде [5]

$$j_r = \frac{2kTd}{U_k - U} N^2 v \exp\left(-\frac{2}{a\sqrt[3]{N}}\right),$$

где $d(U)$ — ширина ОПЗ;

v — частота попыток преодоления потенциального барьера, равная частоте характеристического фонона и близкая к частоте акустического фонона;

a — радиус локализации (для GaN $a = 27,7 \text{ \AA}$).

Вероятность туннелирования рассчитывается на единицу концентрации $\omega = \omega(r)/N$.

Тогда (4) представим в виде

$$\left(\frac{I_r C}{2kT \epsilon_S \epsilon_0 S^2 v} (U_k - U)\right) = N^2 \exp\left(-\frac{2}{a\sqrt[3]{N}}\right),$$

где C — емкость;

S — площадь.

После логарифмирования имеем

$$\ln A = \ln \left(\frac{I_r C}{2kT \epsilon_S \epsilon_0 S^2 v} (U_k - U)\right) = \ln N - \frac{2N^{-1/3}}{a}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) определяем концентрацию глубоких уровней (рис. 2) при данной температуре и вероятность туннелирования

$$\omega / N = v \exp(-2r/a),$$

где r — расстояние между узлами;

ω — функция температуры, поля, плотности состояний.

При увеличении напряжения выражение (ω/N) растет в диапазоне напряжений 1—2 В и изменяется от $1 \cdot 10^{-13}$ до $7,5 \cdot 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с}$. Концентрация глубоких центров растет и изменяется от $2 \cdot 10^{16}$ до $4,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в указанном диапазоне напряжений. На рис. 3 приведена температурная зависимость коэффициента захвата для уровня 0,697 эВ. Как видно, с ростом температуры коэффициенты захвата уменьшаются.

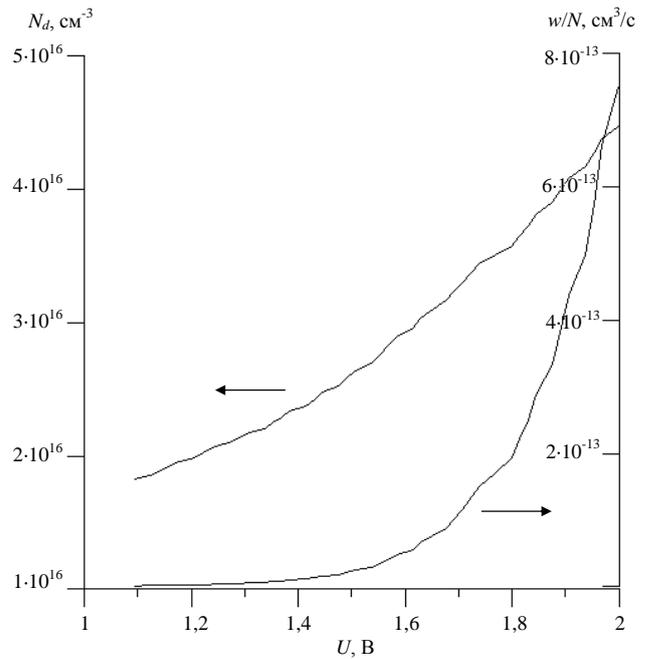


Рис. 2. Концентрация уровней N_d и вероятность туннелирования в зависимости от напряжения при $T = 291 \text{ K}$

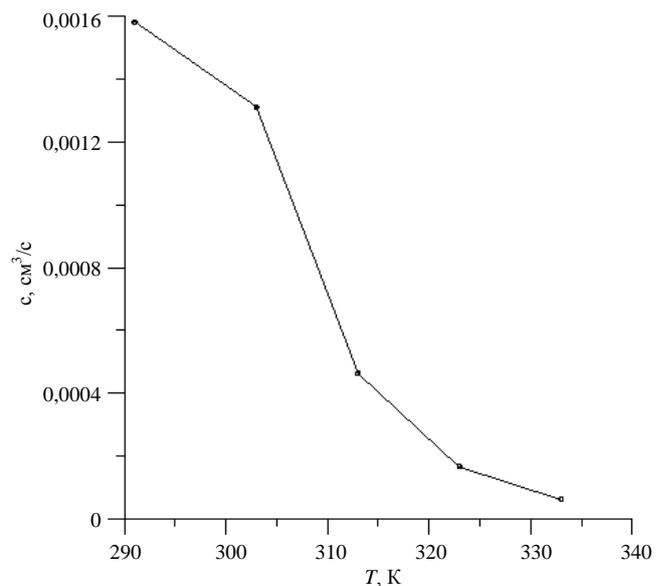


Рис. 3. Коэффициент захвата для уровня 0,697 эВ в зависимости от температуры

Заключение

Измерены температурные зависимости прямых ВАХ (291—333 К). Определены приведенные скорости рекомбинации R_{red} и их зависимости от напряжения. Установлено, что в изучаемых структурах основной механизм токопереноса — туннелирование с участием прыжкового механизма. На зависимостях $R_{red} = f(U)$ и $\partial\beta/\partial U = f(U)$ проявляются одни и те же уровни. Наблюдается совпадение E_a в пределах погрешности. $(\omega/N = f(U))$ изменяет-

ся от $1 \cdot 10^{-13}$ до $7,5 \cdot 10^{-13}$ см³/с (см. рис. 2). Концентрация $N_d = f(U)$ изменяется от $2 \cdot 10^{16}$ до $4,5 \cdot 10^{16}$ см⁻³ в диапазоне напряжений 1—2 В. Это важная величина, так как при указанном механизме токопереноса она учитывается при вычислении энергии активации, которая приведена в таблице. Обнаружено шесть уровней. Коэффициенты захвата имеют большую величину (см. рис. 3), что может указывать на существование комплексов.

Л и т е р а т у р а

- 1 Коган Л. М.// Электронные компоненты. 2000. № 2. С. 22—27.
- 2 Грушко Н. С., Хайрулина А. С.// 14-я всерос. межвуз. науч.-технич. конф. студентов и аспирантов. "Микроэлектроника и информатика-2007". Москва-2007. — Зеленоград. 18—20 апреля 2007. С. 21.
- 3 Булярский С. В., Грушко Н. С., Лакалин А. В.// ФТП. 1998. Т. 32. С. 1193—1196.
- 4 Грушко Н. С., Логинова Е. А., Потанахина Л. Н.// Там же. 2006. Т. 40. В. 5. С. 584—588.
- 5 Булярский С. В., Грушко Н. С.// ЖЭТФ. 2000. Т. 118. № 11. С. 1222.

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2007 г.

Parameters of recombination centers for the InGaN/AlGaIn/GaN structures with a phosphor surface

N. S. Grushko, A. S. Khairulina
Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia

Parameters of recombination centers are defined for the white light-emitting diodes (Foryard Optoelectronics) on the basis of the InGaN/AlGaIn/GaN p-n-heterostructures with a thin active InGaIn layer and a top phosphor surface. A range of change of concentration for the deep levels and probabilities of tunneling in the 1—2 V interval are established.

* * *