

# О МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИФФУЗИИ ЭКСИТОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКЕ С УЧЕТОМ ИХ ПЕРЕМЕННОГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ

Е.В. Серегина<sup>1</sup>, М.А. Степович<sup>2</sup>, М.Н. Филиппов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Калужский филиал, Россия, 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2

<sup>2</sup>Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, Россия, 248023, г. Калуга, ул. Степана Разина, д. 26

<sup>3</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Россия, 119991, ГСП-1, г. Москва, В-71, Ленинский просп., д. 31

Рассмотрен процесс нестационарной диффузии после прекращения воздействия низкоэнергетического электронного зонда на полупроводниковую мишень. Предложена математическая модель двумерной диффузии носителей заряда, возбуждаемых электронным зондом в полупроводниковом материале, с учетом их переменного эффективного времени жизни. Практические расчёты проведены для диффузии экситонов в однородном монокристаллическом нитриде галлия для параметров, характерных для этого полупроводника.

В работах [1, 2] рассмотрен процесс нестационарной диффузии носителей заряда в полупроводниковой мишени после прекращения воздействия низкоэнергетического электронного зонда на полупроводниковую мишень. Рассматривался один канал рекомбинации и потому электрофизические параметры мишени при проведении расчетов полагались постоянными. В то же время результаты экспериментальных исследований КЛ полупроводников: гетероструктур ZnMgO/ZnO с Zn-квантовой ямой [1] и нитрида галлия [2] — установили немонотонную зависимость некоторых электрофизических параметров (коэффициента диффузии и времени жизни экситонов) от температуры, что является основанием для рассмотрения модели при наличии нескольких каналов рекомбинации в полупроводниковой мишени. Математическое моделирование диффузии экситонов в полупроводнике с учетом переменного времени жизни экситонов в GaN и составляет предмет рассмотрения в настоящей работе.

Суть математической модели рассматриваемого явления состоит в следующем. При выключении электронного зонда низкой энергии концентрация экситонов  $c(x, y, t)$  в точке с координатами  $(x, y)$  может быть найдена как решение нестационарного дифференциального уравнения диффузии [2]:

$$\partial c(x, y, t) / \partial t = D \Delta c(x, y, t) - c(x, y, t) / \tau \quad (1)$$

с начальным условием

$$c(x, y, 0) = n(x, y) \quad (2)$$

Здесь  $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$  — двумерный оператор Лапласа,  $D$  — коэффициент диффузии и  $\tau$  — время жизни экситонов, а функция  $n(x, y)$  может быть найдена, как решение стационарного дифференциального уравнения, описывающего диффузию экситонов в состоянии квазиравновесия (до выключения электронного зонда):

$$D \Delta n - n / \tau = -\Phi(x, y) \quad (3)$$

где  $\Phi(x, y)$  — функция источника генерации экситонов, которая определяется характером возбуждения и свойствами материала. Для узкого электронного пучка (электронного зонда) область генерации экситонов может быть описана функцией распределения Гаусса, что дает для правой части (3) соотношение  $G_0 \varphi(x, y)$ . Здесь  $\varphi(x, y)$  — плотность двумерного нормального распределения Гаусса, а  $G_0$  — частота генерации экситонов [2].

Ранее в модели (1)-(3) рассматривался один канал рекомбинации экситонов и потому электрофизические параметры мишени при проведении расчетов полагались постоянными. В настоящей работе предложена математическая модель с двумя независимыми каналами рекомбинации. В этом случае

$$\partial \tilde{c}(x, y, t) / \partial t = D \Delta \tilde{c}(x, y, t) - \tilde{c}(x, y, t) / \tau_{эф}(t), \quad (4)$$

где эффективное время жизни  $\tau_{эф}(t)$  находится по формуле:

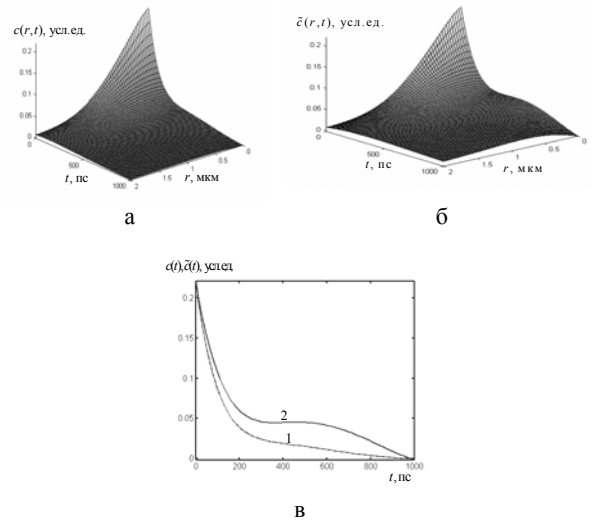
$$\tau_{эф}(t) = -t / \ln(\alpha \exp(-t/\tau_1) + (1 - \alpha) \exp(-t/\tau_2)),$$

а начальные условия выбираются в виде (2).

Для рассматриваемой задачи найдено решение уравнения (4) с начальным условием (2):

$$\tilde{c}(r, t) = \exp\left(-\int_0^t ds / \tau(s)\right) / (2Dt) \times \int_0^{+\infty} \exp\left(-(r^2 + \xi^2) / 4Dt\right) J_0((r\xi) / (2Dt)) n(\xi) \xi d\xi.$$

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты расчетов для параметров полупроводника, характерных для однородного монокристаллического нитрида галлия [2].



**Рис. 1.** Концентрация экситонов  $c(r, t)$  для случая постоянных электрофизических параметров мишени и рассчитанная с использованием модели (1), (2) (а); концентрация экситонов  $\tilde{c}(r, t)$  для случая переменного эффективного времени жизни и рассчитанная с использованием модели (4), (2) для  $\tau_1 = 382$  пс,  $\tau_2 = 10 \cdot \tau_1$  и  $\alpha = 0,1$  (б); сечение поверхности  $c(r, t)$  (кривая 1) и  $\tilde{c}(r, t)$  (кривая 2) при  $r=0$  (в).

## Выводы

Предлагаемая модель учитывает два независимых канала рекомбинации, которые могут оказывать влияние на изменение профиля концентрации носителей заряда во времени. Для параметров полупроводника, характерных для однородного монокристаллического нитрида галлия, начиная приблизительно с момента времени  $t=200$  пс, профиль концентрации экситонов для модифицированной модели заметно медленнее убывает с ростом времени, что обусловлено влиянием второго канала рекомбинации.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-03-00271).

1. Noltemeyer M., Bertram F., Hempel T. et al. // J. Mater. Research. 2012. Vol. 27. Issue 17. P. 2225-2231.

2. Поляков А.Н., Noltemeyer M., Hempel T. и др. // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 41-46.