

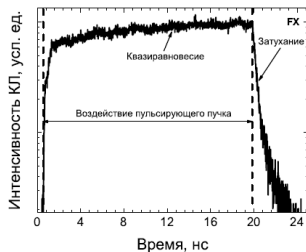
О математическом моделировании и качественных оценках в методе времяпролётной катодолуминесценции

Д.В. Туртин¹, М.А. Степович², Н.В. Щербаков²

¹ *Ивановский государственный университет, г. Иваново*

² *Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, г. Калуга*

При времяпролётных исследованиях диффузии и излучательной рекомбинации носителей заряда, генерированных остро сфокусированным электронным пучком, электронным зондом, используются образцы, покрытые непроницаемой для катодолуминесцентного (КЛ) излучения маской, имеющей круглые отверстия различного диаметра. КЛ излучение возбуждается в центре отверстия при помощи пульсирующего электронного зонда и регистрируется в области спектра, характерной для излучательной рекомбинации в исследуемом полупроводнике. В процессе облучения в образце устанавливается квазиравновесие между процессами генерации и рекомбинации генерированных неосновных носителей заряда (ННЗ), затем электронный пучок отклоняется системой бланкирования, возбуждение прекращается и наблюдается затухание КЛ (см. рис.), характер которого зависит в общем случае только от



известного радиуса отверстия, времени жизни генерированных зондом носителей заряда τ и коэффициента диффузии D , характеризующего движение генерированных носителей под маску [1]. Это позволяет при наличии математической модели, описывающей спад интенсивности КЛ, на основе анализа экспериментальных данных получать оценки электрофизических параметров полупроводника путем решения соответствующей обратной задачи. Ранее [2, 3] был проведен качественный анализ дифференциальных уравнений диффузии неравновесных ННЗ, генерированных электронным зондом. Полученные результаты позволяют говорить о корректности рассмотренной задачи, однако некоторые из оценок нуждаются в уточнении. В настоящей работе такие исследования продолжены и получены уточненные оценки рассматриваемого процесса.

В состоянии квазиравновесия диффузионный процесс описывается следующим уравнением:

$$\Delta n(x, y, z) - \frac{n(x, y, z)}{\lambda^2} = -\rho(x, y, z). \quad (1)$$

с граничными условиями

$$D \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \nu_s n(x, y, 0), \quad \lim_{z \rightarrow +\infty, x, y \rightarrow \pm\infty} n(x, y, z) = 0.$$

При выключении зонда диффузионный процесс описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial c(x, y, z, t)}{\partial t} = D \Delta c(x, y, z, t) - \frac{c(x, y, z, t)}{\tau}$$

с начальным условием

$$c(x, y, z, 0) = n(x, y, z).$$

Здесь Δ – оператор Лапласа.

В состоянии квазиравновесия при наличии внешних воздействий на полупроводник в правой части дифферен-

циального уравнения диффузии (1) для рассматриваемой математической модели будем иметь различные функции генерации $\rho_1(x, y, z)$ и $\rho_2(x, y, z)$, описывающие концентрации генерированных в единицу времени ННЗ и, соответственно, два различных решения уравнения диффузии $n_1(x, y, z)$ и $n_2(x, y, z)$. Получено, что если

$$|\rho_2(x, y, z) - \rho_1(x, y, z)| \leq \varepsilon,$$

где ε – неотрицательная константа, то в условиях квазиравновесия для соответствующих концентраций ННЗ справедлива следующая оценка:

$$|n_2(x, y, z) - n_1(x, y, z)| \leq C\varepsilon,$$

где $C = \lambda^2 / 2$, $\lambda^2 = D\tau$. Такая оценка при этих условиях получена и для изменения концентрации ННЗ $c(x, y, z, t)$ на спаде сигнала КЛ:

$$|c_2(x, y, z, t) - c_1(x, y, z, t)| \leq C\varepsilon.$$

При этом для информативного сигнала КЛ

$$|I_2(t, x, y, z) - I_1(t, x, y, z)| \leq \pi \varepsilon \lambda^2 R^2 \exp(-t/\tau).$$

Отсюда также следует и корректность рассматриваемой модели.

Возможен и иной подход к подобным оценкам: провести моделирование рассматриваемых зависимостей для различных функций $\rho(x, y, z)$ и по виду информативного сигнала, например КЛ, оценить величины отклонений $|\rho_2(x, y, z) - \rho_1(x, y, z)|$, $|n_2(x, y, z) - n_1(x, y, z)|$, а также $|c_2(x, y, z, t) - c_1(x, y, z, t)|$. В настоящее время результаты некоторых таких оценок получены для широкого однородного пучка, падающего перпендикулярно мишени конечной толщины, и параметров, характерных для монокристаллического GaN.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-03-00271.

Литература

1. Noltmeyer M., Bertram F., Hempel T., Bastek B., Polyakov A.N., Christen J., Brandt M., Lorenz M., Grundmann M. Excitonic transport in ZnO // Journal of Materials Research. 2012, vol. 27, issue 17, pp. 2225-2231.
2. Поляков А.Н., Степович М.А., Туртин Д.В. Математическое моделирование катодолуминесценции экситонов, генерированных узким электронным пучком в полупроводниковом материале // Известия РАН. Серия физическая. – 2016. – Т. 80, № 12. – С. 1629-1633.
3. Степович М.А., Туртин Д.В., Серегина Е.В. О корректности математических моделей диффузии, обусловленной остро сфокусированным электронным зондом в однородном полупроводниковом материале // Итоги науки и техники. Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры. 2021, т. 193, с. 122-129.