

# О МОДЕЛИРОВАНИИ ДИФФУЗИИ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ШИРОКИМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ В ОДНОРОДНЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИШЕНЯХ

М.А. Степович<sup>1)</sup>, В.В. Калманович<sup>1)</sup>, Е.В. Серегина<sup>2)</sup>, Д.В. Туртин<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, Калуга, Россия, m.stepovich@mail.ru

<sup>2)</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Калужский филиал, Калуга, Россия

<sup>3)</sup>Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Ивановский филиал, Иваново, Россия

Рассмотрены некоторые возможности математического моделирования процессов, описывающих взаимодействие широких электронных пучков с однородными и многослойными планарными полупроводниковыми объектами. Рассмотрение проведено для классических математических моделей и для новых математических моделей и способов решения и исследования соответствующих дифференциальных уравнений. Для широких электронных пучков (диаметр пучка много больше диффузионной длины неравновесных неосновных носителей заряда (ННЗ)), падающих перпендикулярно поверхности мишеней, решались одномерные задачи диффузии. Для некоторых задач изучены проблемы корректности моделей. Рассмотрение таких задач актуально как для однородных толстых (с математической точки зрения полубесконечных) полупроводников, так и для планарных полупроводниковых структур конечной толщины, широко используемых на практике для создания различных структур опто-, микро-, наноэлектроники и СВЧ-техники.

Для полубесконечных однородных мишеней классическое решение задачи диффузии неравновесных ННЗ, генерированных широким пучком киловольтных электронов (т.н. модель коллективной диффузии ННЗ) приведено в [1]. Для этой модели и модели независимых источников, описываемой следующими выражениями [2]:

$$D \frac{d^2 \Delta p(z, z_0)}{dz^2} - \frac{\Delta p(z, z_0)}{\tau} = -\rho(z) \delta(z - z_0), \quad (1)$$

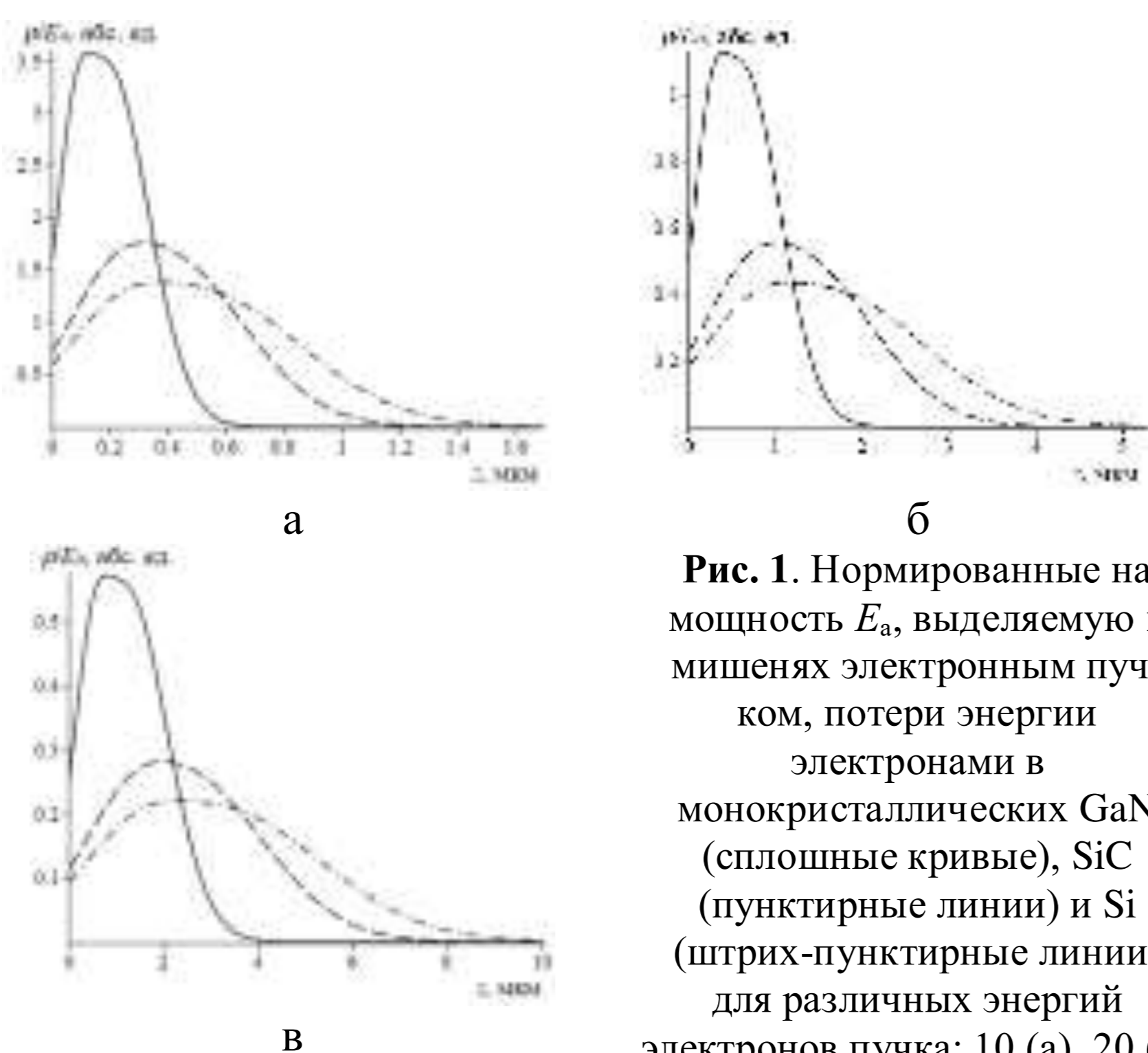
$$D \left. \frac{d\Delta p(z, z_0)}{dz} \right|_{z=0} = v_s \Delta p(0, z_0), \quad \Delta p(\infty, z_0) = 0. \quad (2)$$

$$\Delta p(z) = \int_0^\infty \Delta p(z, z_0) dz_0 \quad (3)$$

— показана их корректность и получены оценки, позволяющие оценить распределение ННЗ  $\Delta p(z)$  после их диффузии в зависимости от условий проведения эксперимента.

Отметим, что в принципе подход (1)-(3) применим и для многослойных структур.

При моделировании процессов диффузии ННЗ в многослойных структурах на различных подложках одной из основных является проблема количественного описания потерь энергии электронами пучка в различных слоях мишени. В качестве примера на рис. 1 приведены примеры расчётов этих параметров для одного из перспективных материалов оптоэлектроники и СВЧ-техники — GaN и подложечных материалов, используемых для плёнок GaN.



**Рис. 1.** Нормированные на мощность  $E_a$ , выделяемую в мишенях электронным пучком, потери энергии электронами в монокристаллических GaN (сплошные кривые), SiC (пунктирные линии) и Si (штрих-пунктирные линии) для различных энергий электронов пучка: 10 (а), 20 (б) и 30 (в) кэВ

Из анализа полученных данных следует, что моделирование многослойных структур с толстыми плёнками

сопряжено с трудностями при описании потерь энергии в слоях структур, начиная со второго, вследствие потери монохроматичности пучка электронов после прохождения первого и последующих слоёв. Отметим также, что проведение расчётов для многослойной структуры методом (1)-(3) связано с вычислительными трудностями уже для 4-х слойной структуры.

Решить задачи диффузии ННЗ может матричный метод, позволяющий решать дифференциальные уравнения тепломассопереноса в многослойных планарных структурах конечной толщины с произвольным числом слоев [3, 4]. Соответствующая математическая модель имеет вид:

$$D^{(i)}(z) \frac{d^2 \Delta p^{(i)}(z)}{dz^2} - \frac{\Delta p^{(i)}(z)}{\tau^{(i)}(z)} = -\rho^{(i)}(z), \quad i = \overline{1, n},$$

$$D^{(1)} \left. \frac{d\Delta p^{(1)}(z)}{dz} \right|_{z=0} = v_s^{(1)} \Delta p^{(1)}(0),$$

$$D^{(n)} \left. \frac{d\Delta p^{(n)}(z)}{dz} \right|_{z=l} = -v_s^{(n)} \Delta p^{(n)}(l).$$

Здесь в скобках у верхних индексов указан номер слоя. При близких параметрах плёнки и подложки можно положить  $\rho^{(i)}(z) \approx \rho(z) \quad \forall i = \overline{1, n}$ .

## Выводы

Анализ рассмотренных моделей показал, что наиболее приемлемым является матричный метод, который позволяет получить решение задачи в аналитическом виде. При этом наилучшие результаты получаются при использовании в качестве подложечного материала такого, который имеет близкие параметры, характеризующие рассеяние энергии в плёнке и подложке (например, для структур HgCdTe-CdTe). В этом случае в правой части дифференциального уравнения для  $\rho(z)$  можно использовать параметры подложки.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 19-03-00271, а также РФФИ и правительства Калужской области, грант № 18-41-400001.

1. Wittry D.B., Kyser D.F. Measurements of diffusion lengths in direct-gap semiconductors by electron beam excitation // J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. No. 1. P. 375-382.
2. Белов А.А., Петров В.И., Степович М.А. Использование модели независимых источников для расчета распределения неосновных носителей заряда, генерированных в полупроводниковом материале электронным пучком // Изв. РАН. Сер. физ. 2002. Т. 66. № 9. С. 1317-1322.
3. Калманович В.В., Серегина Е.В., Степович М.А. Математическое моделирование явлений тепломассопереноса, обусловленных взаимодействием электронных пучков с многослойными планарными полупроводниковыми структурами // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 7. С. 1027-1033.
4. Stepovich M.A., Seregina E.V., Kalmanovich V.V. and Filippov M.N. On some problems of mathematical modeling of diffusion of non-equilibrium minority charge carriers generated by kilovolt electrons in semiconductors // Journal of Physics: Conf. Series. 2021. Vol. 1740. Art. No. 012035.