



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2003–24
ОНФ

Е.М. Болдырев А.М. Губочкин

**Математическая модель транспорта носителей зарядов
в арсенидгаллиевом (GaAs) детекторе**

Протвино 2003

Аннотация

Болдырев Е.М., Губочкин А.М. Математическая модель транспорта носителей зарядов в арсенидгаллиевом (GaAs) детекторе: Препринт ИФВЭ 2003–24. – Протвино, 2003. – 8 с., 18 рис., библиогр.: 3.

Проводится моделирование процесса переноса неравновесных носителей зарядов, образовавшихся в результате взаимодействия γ -кванта с телом детектора на основе арсенида галлия (GaAs). Математическая модель поставленной задачи представлена системой неоднородных дифференциальных уравнений с начальными и граничными условиями. Решение задачи находилось при помощи итерационного метода. Полученные решения даются графическими зависимостями концентраций носителей заряда и электрического поля в полупроводнике от пространственной координаты, времени, координаты точки взаимодействия γ -кванта с веществом детектора, приложенного электрического поля и эффекта ловушек.

Abstract

Boldyrev E.M., Gubochkin A.M. Mathematical model of transport of charges carriers in the (GaAs) detector: IHEP Preprint 2003–24. – Protvino, 2003. – p. 8, figs. 18, refs.: 3.

Modelling of the processes of a nonequilibrium charge carriers transport, derivated as a result of interaction of γ -ray photon with a body of the detector on the basis of gallium arsenide (GaAs), is represented. The mathematical model of this task is represented by system of the inhomogeneous differential equations with initial and boundary conditions. Solution of the task was by means of an iterative method. The solutions obtained are given by graphics dependences of charge carriers concentration and an electrical field in a semiconductor from space coordinate, time, coordinate of a point of interaction of γ -ray photon with substance of the detector, the enclosed electric field and trapping effects.

Введение

В настоящее время полупроводники на основе GaAs находят всё более широкое распространение во многих областях науки и техники. Одновременно с этим ведутся активные исследования их свойств. Важную роль при этом играет моделирование процессов, связанных с работой полупроводниковых приборов. Моделирование позволяет, во-первых, выявить основные свойства полупроводниковых материалов без проведения серий трудоёмких опытов, во-вторых, резко снижает материальные затраты, связанные с осуществлением этих опытов.

Настоящая работа выполнена в рамках проекта создания программного пакета для расчёта характеристик арсенидгаллиевых полупроводниковых детекторов [1]. Основной задачей указанного проекта является математическое моделирование физических процессов в полупроводнике

В работе проведено моделирование процесса переноса неравновесных носителей зарядов в детекторе резистивного типа, образовавшихся при взаимодействии γ -кванта с рабочим веществом детектора. Решение этой задачи представляет несомненный интерес как для самой задачи моделирования, так и для практического применения полупроводника как детектора, например в областях медицины, связанных с рентгенографией.

Математическая модель процесса переноса неравновесных носителей зарядов

В результате взаимодействия γ -кванта с веществом детектора, с учётом захвата носителей заряда ловушками в момент времени $t_0 = 0$ в точке x_0 , возникают неравновесные носители заряда с начальным потоком концентраций носителей заряда n_0 . Под действием внешнего поля неравновесные носители начинают двигаться к поверхности детектора. Для моделирования этого процесса в одномерном случае, с целью расчёта E , n , p , j_n , j_p , была составлена система уравнений [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} j_n = e[-nv_n(E) + D_n \frac{\partial n}{\partial x}], \quad j_p = e[pv_p(E) - D_p \frac{\partial p}{\partial x}], \\ \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{1}{\epsilon} e(N_d - N_a - n + p + N^+), \\ \frac{\partial n}{\partial t} - \frac{1}{e} \frac{\partial j_n}{\partial x} = -R_n, \quad \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{e} \frac{\partial j_p}{\partial x} = -R_p, \\ n(x, t_0) = n_0 \delta(x - x_0), \quad p(x, t_0) = n_0 \delta(x - x_0), \\ v_n = [\mu_n E + v_s (\frac{E}{E_0'})^4] / [1 + (\frac{E}{E_0'})^4], \quad v_p = [\mu_p E + v_p' (\frac{E}{E_p})] / [1 + (\frac{E}{E_p})], \\ R_n = \alpha_n(E) n N^+ - g_n N^0, \quad R_p = \alpha_p(E) p N^0 - g_p N^+, \\ \alpha_n = \alpha_0 + \alpha_E (\frac{E}{5600})^4 / [1 + 0,5 (\frac{E}{5600})^3 + (\frac{E}{5600})^4], \end{array} \right. \quad (1)$$

где: E – вектор напряжённости электрического поля; n – концентрация электронов; p – концентрация дырок; j_n, j_p – вектор плотности тока электронов и дырок; e – заряд электрона; D_n, D_p – коэффициент диффузии электронов и дырок; v_n, v_p – средние скорости электронов и дырок; ε – диэлектрическая проницаемость GaAs; N_d, N_a – концентрация доноров и акцепторов; N^+ – концентрация ловушек с дырками; R_n, R_p – темпы рекомбинации электронов и дырок; a_n, a_p – коэффициенты захвата электронов и дырок; N^0 – концентрация пустых ловушек; $g_e N^0, g_h N^+$ – скорости тепловых генераций заполненных центров; μ_n, μ_p – подвижность электронов и дырок; h – толщина детектора; x_0 – точка взаимодействия γ -кванта с веществом детектора.

После преобразования системы (1) имеем:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_t - D_n n_{xx} + v_n(E) n_x + \left\{ \frac{\partial v_n}{\partial E} \frac{\partial E}{\partial x} + \alpha_n(E) N^+ \right\} n = g_n N^0 + \\ + n_0 \delta(x - x_0) \delta(t - t_0), \\ p_t - D_p p_{xx} + v_p(E) p_x + \left\{ \frac{\partial v_p}{\partial E} \frac{\partial E}{\partial x} + \alpha_p(E) N^0 \right\} p = g_p N^+ + \\ + n_0 \delta(x - x_0) \delta(t - t_0), \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -\frac{1}{\varepsilon} e (N_d - N_a - n + p + N^+), \\ E = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \\ \varphi|_{x=0} = 0, \varphi|_{x=h} = \varphi_0, \\ \frac{\partial j_n}{\partial x} = e \left[-\frac{\partial n}{\partial x} v_n(E) - n \frac{\partial v_n}{\partial E} \frac{\partial E}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \right], \\ \frac{\partial j_p}{\partial x} = e \left[\frac{\partial p}{\partial x} v_p(E) + p \frac{\partial v_p}{\partial E} \frac{\partial E}{\partial x} - D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right], \\ v_n = \left[\mu_n E + v_s \left(\frac{E}{E_0'} \right)^4 \right] / \left[1 + \left(\frac{E}{E_0'} \right)^4 \right], \\ v_p = \left[\mu_p E + v_{p'} \left(\frac{E}{E_p} \right) \right] / \left[1 + \left(\frac{E}{E_p} \right) \right], \\ \alpha_n = \alpha_0 + \alpha_E \left(\frac{E}{5600} \right)^4 / \left[1 + 0,5 \left(\frac{E}{5600} \right)^3 + \left(\frac{E}{5600} \right)^4 \right]. \end{array} \right. \quad (2)$$

Численные значения постоянных величин:

$$\begin{aligned} n_i &= 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}, \quad n_0 = 10^{10} \text{ см}^{-2}, \quad N_d - N_a = 0 \text{ см}^{-3}, \\ N^+ &= 10^{15} \text{ см}^{-3}, \quad N^0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}, \quad e = 4,8032 \cdot 10^{-10} \text{ СГС}, \\ \mu_n &= 8500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}, \quad \mu_p = 400 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}, \quad \varepsilon = 10,9, \\ v_s &= 8 \cdot 10^6 \text{ см/с}, \quad v_{p'} = 10^6 \text{ см/с}, \quad E_0' = 4000 \text{ В/см}, \quad E_p = 10^5 \text{ В/см}, \\ \alpha_E &= 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}, \quad \alpha_p = 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}, \quad \alpha_0 = 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}, \\ t_0 &= 0 \text{ с}, \quad \sigma = 10^{-2} \text{ с}^{-1}, \\ D_n &= 290 \text{ см}^2/\text{с}, \quad D_p = 12 \text{ см}^2/\text{с}, \\ h &= 360 \text{ мкм}. \end{aligned}$$

Численные значения изменяемых величин:

$$\varphi_0 = (250-700) \text{ В}, \quad E_0 = \varphi_0/h.$$

Решение системы (2) находилось итерационным методом [3].

Алгоритм итерационного метода:

1. Шаг 1. Задание начальных условий.

Концентрациям электронов и дырок присваивается значение равновесной концентрации $n_1 = n_1 = n_i$. После чего находится значение напряжённости E_1 .

2. На i -м шаге подстановкой значения напряжённости E_{i-1} , найденной на предыдущем шаге, находятся значения концентраций n_i и p_i . Из полученных значений концентраций находится значение напряжённости E_i .

3. Условие выхода из итерационного процесса.

Если значения E , n , p , полученные на i -м шаге, отличаются от значений, полученных на шаге $i-1$ более чем на 10^{-5} , то переход в 2. В противном случае – выход. Полученные значения E , n , p являются искомыми решениями.

Результаты расчётов и их анализ

На рис. 1-12 приведены значения концентрации электронов n и дырок p в зависимости от положения в теле полупроводника x [мкм] при различных значениях x_0 [мкм] и ϕ_0 [В] в указанные моменты времени t [пс] без учёта действия ловушек (рисунки слева) и с учётом действия ловушек (рисунки справа).

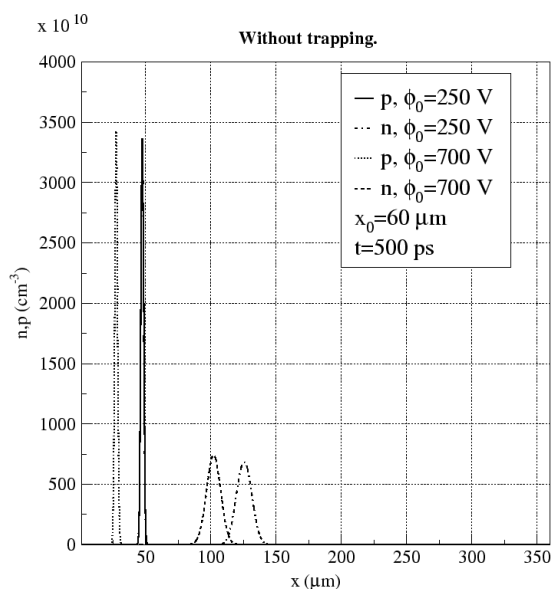


Рис. 1.

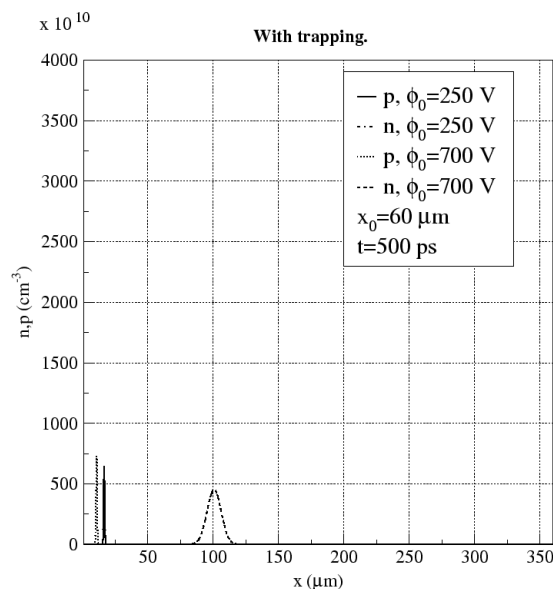


Рис. 2.

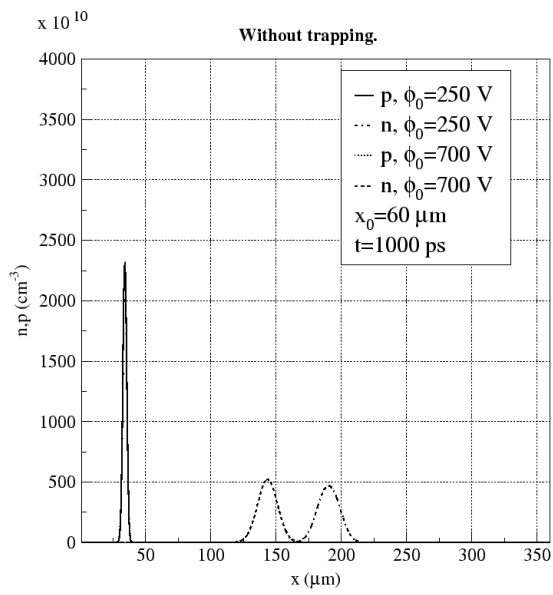


Рис. 3.

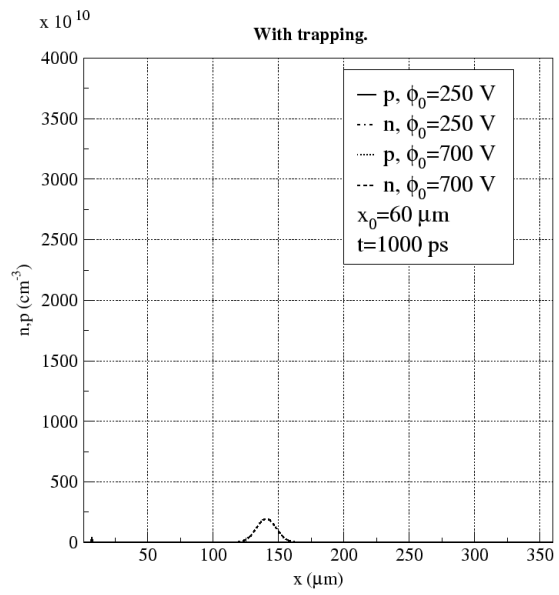


Рис. 4.

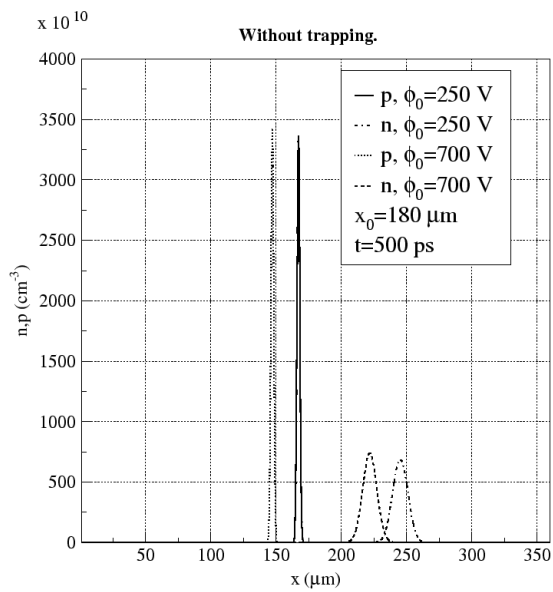


Рис. 5.

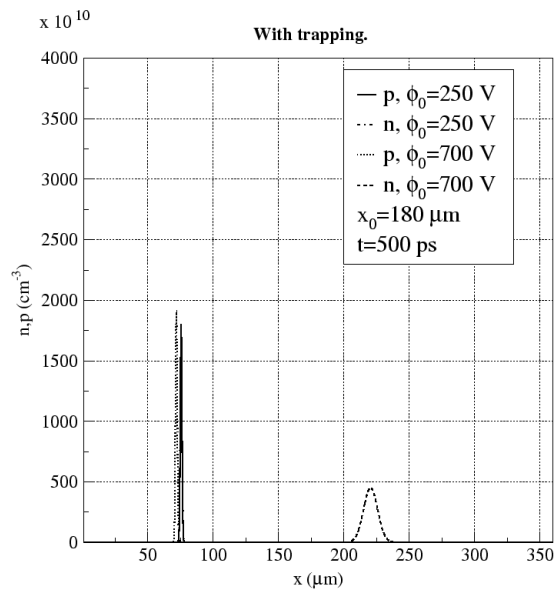


Рис. 6.

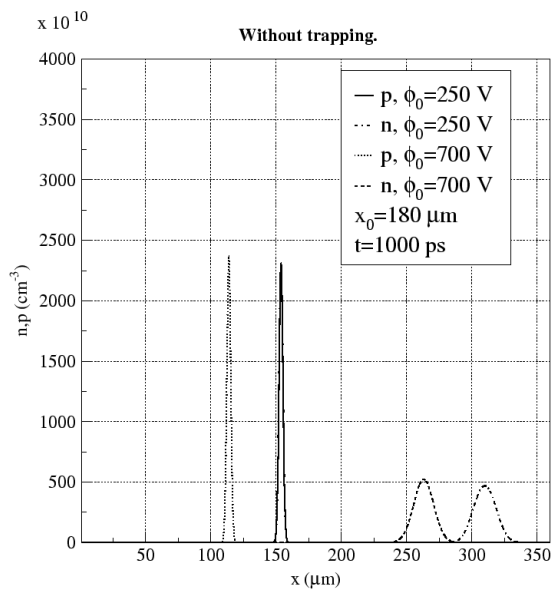


Рис. 7.

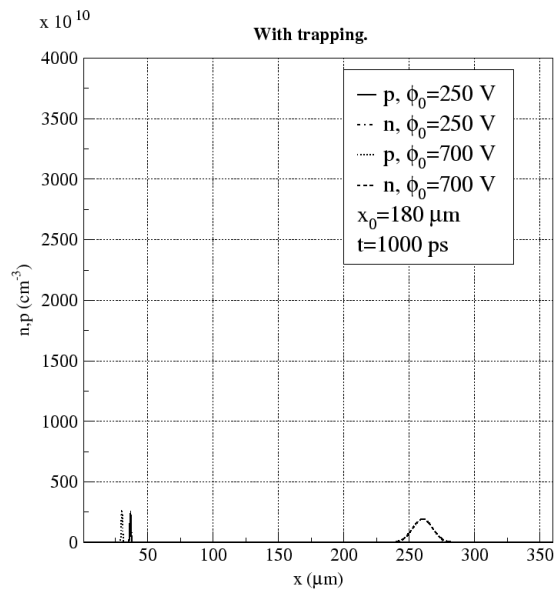


Рис. 8.

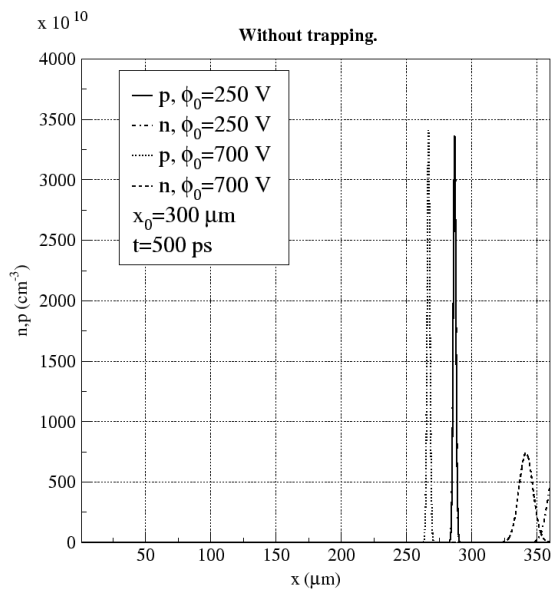


Рис. 9.

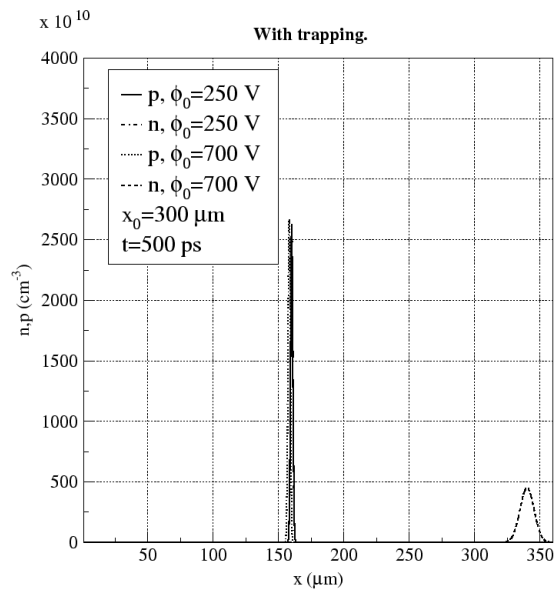


Рис. 10.

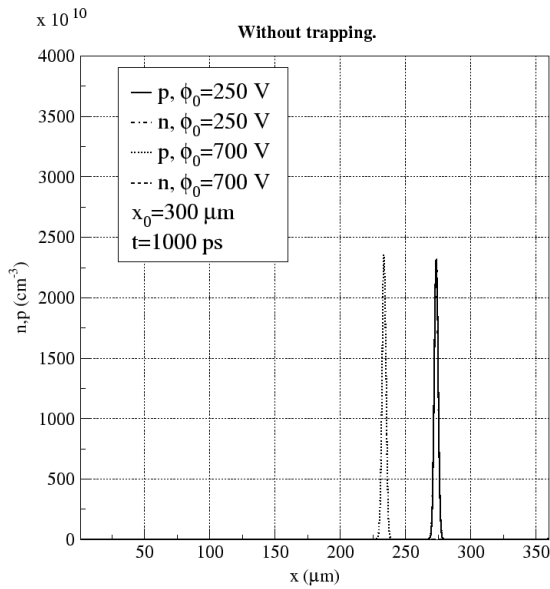


Рис. 11.

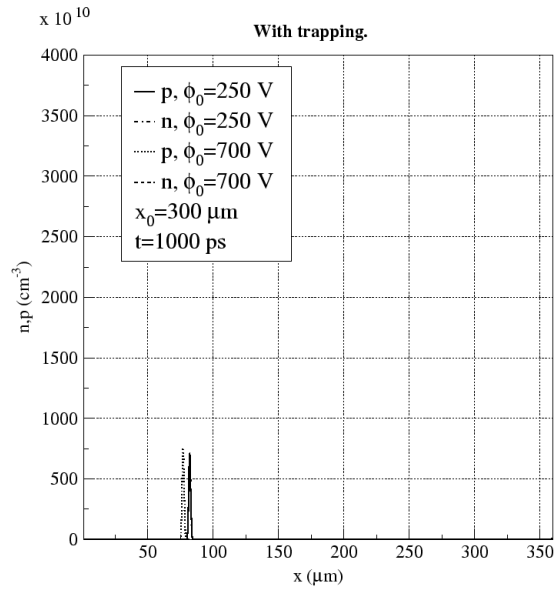


Рис. 12.

После взаимодействия μ -кванта с веществом полупроводника происходит разделение зарядов, которые начинают двигаться к поверхности полупроводника. В дальнейшем электроны и дырки покидают тело полупроводника, что видно на **рис. 3, 4** (для дырок) и **9-12** (для электронов). Также видно, что с ростом внешнего поля дрейфовая скорость электронов и дырок растёт. При наличии ловушек в полупроводнике происходит захват неравновесных носителей зарядов ловушками, что обуславливает уменьшение со временем их концентраций.

На **рис. 13-18** приведены значения напряжённости E в полупроводнике в зависимости от положения в теле полупроводника x [мкм] при различных значениях x_0 [мкм] и ϕ_0 [В] в указанные моменты времени t [пс] без учёта действия ловушек.

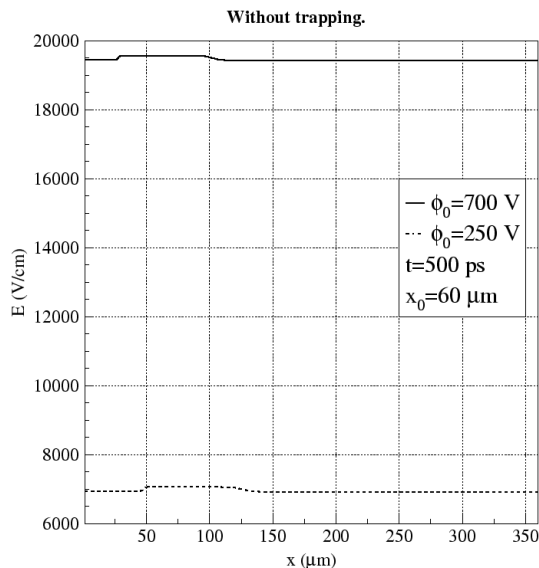


Рис. 13.

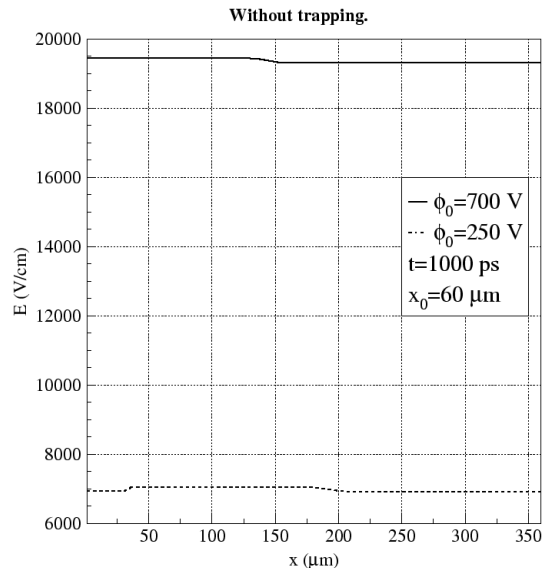


Рис. 14.

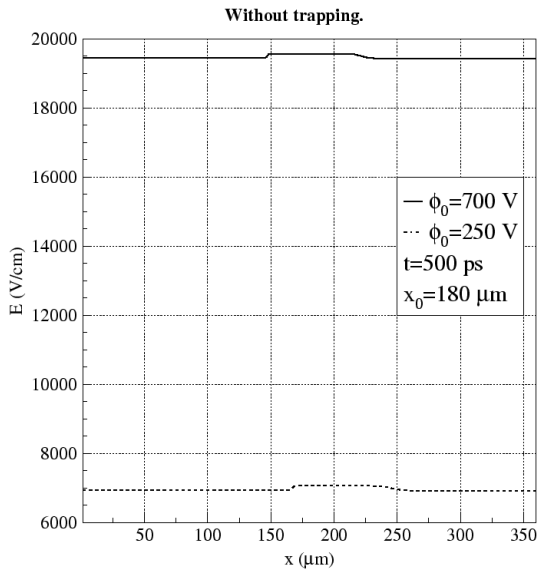


Рис. 15.

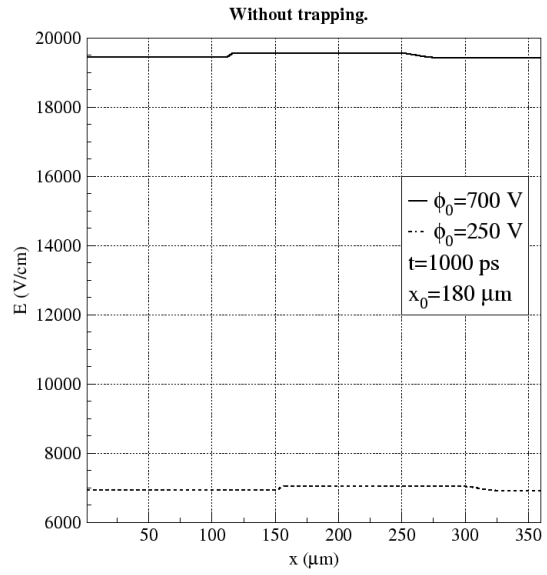


Рис. 16.

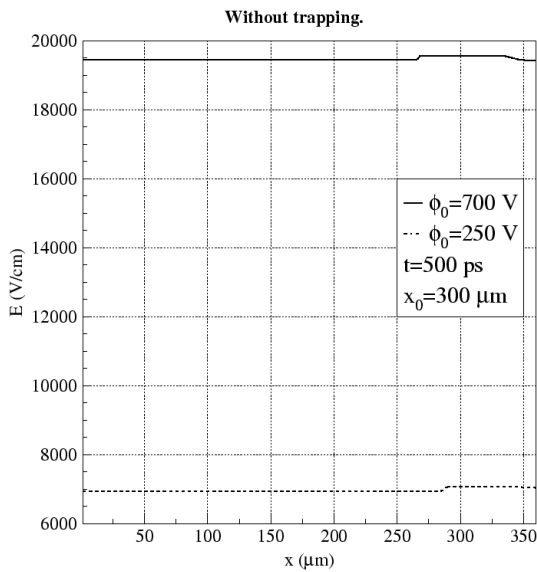


Рис. 17.

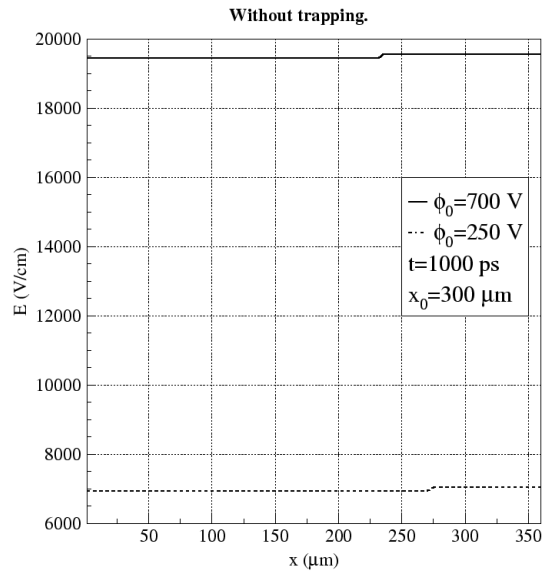


Рис. 18.

Видно, что с ростом внешнего поля значение поля внутри полупроводника растёт. Наблюдается также увеличение значения поля внутри полупроводника, вызванное изменением концентрации носителей заряда.

В случае учёта действия ловушек наблюдается линейный рост поля внутри полупроводника, вызванный этим действием. Влияние внешнего поля аналогично случаю без учёта ловушек. Влияние концентрации носителей заряда также имеет место, но на фоне роста, вызванного действием ловушек, оно малозаметно.

Заключение

Сравнение полученных результатов с результатами работы [2] показывает их близость, что даёт уверенность достоверности предлагаемой модели. Одномерная модель транспорта неравновесных носителей заряда даёт возможность провести наблюдение за динамикой изменения поля и концентраций электронов и дырок внутри полупроводника. Однако моделирование в одномерном случае не позволяет измерить коэффициент сбора заряда для последующего его сравнения с экспериментальными данными, что затрудняет оценку качества полученной модели. Провести сбор заряда и его сравнение с экспериментом позволит трёхмерная модель, работы над которой ведутся в настоящее время.

Список литературы

- [1] С.М. Buttar. GaAs detectors. - A review.// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A 395 (1997), 1-8.
- [2] G.I. Ayzenshtat, O.P. Tolbanov, A.P. Vorobiev. Modeling of processes of charge division and collection in GaAs detectors taking into account trapping effects.// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A 466 (2001) 1-8.
- [3] Г. Корн Т. Корн Справочник по математике для научных работников и инженеров. -М., 1974.

Рукопись поступила 21 августа 2003 г.

Е.М. Болдырев, А.М. Губочкин
Математическая модель транспорта носителей зарядов
в арсенидгаллиевом (GaAs) детекторе.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 27.08.2003. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.

Печ.л. 1. Уч.–изд.л. 0,8. Тираж 130. Заказ 123.

Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2003-24, ИФВЭ, 2003
