

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОТРАНЗИСТОРОВ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

Аннотация. Предложены математические модели и результаты двумерного моделирования для анализа нестационарного дрейфа носителей в трёхмерных транзисторных гетероструктурах со встроенными квантовыми точками, а также алгоритм учёта неоднородностей характеристик квантовых точек.

1. Введение

Гетероструктурные полевые транзисторы с квантовыми точками (КТ) представляют собой новый класс приборов, позволяющих существенно повысить быстродействие и коэффициент усиления в области сотен гигагерц. Причем достигается это не предельными возможностями субмикрометровой литографии, а за счет преобладания двух физических факторов: безинерционной ударной ионизации КТ в сильном электрическом поле и существенного повышения дрейфовой скорости электронов в канале транзистора [1]. Способ получения КТ основан на способности самоорганизации наноструктур. Важнейшими факторами, определяющими направление и конечный результат самоорганизации являются рассогласования постоянных решетки (создающие упругие напряжения в системе и повышающие её внутреннюю энергию), толщина слоя, границы раздела и т. д. [2]. Но на сегодняшний день возможности технологии еще не позволяют сделать выращивание КТ полностью контролируемым и воспроизводимым. Поэтому неоднородность островков квантовых точек и их параметров приводит к необходимости учета случайного характера расположения, размеров, энергетических и других характеристик КТ.

2. Двумерная и трёхмерная численные модели

Для моделирования нестационарных процессов дрейфа в транзисторной структуре можно использовать уравнения численной физико-топологической модели, которые представляют собой уравнения в частных производных, полученные при решении уравнения Больцмана в приближении времени релаксации. Эта модель включает следующую систему уравнений: уравнение сохранения частиц (1), уравнение сохранения энергии (2), уравнения сохранения импульса (3), (4), (5), а также уравнение Пуассона (6) и уравнение для плотности тока (7), и решается с учетом соответствующих аппроксимаций поле-скоростных зависимостей:

$$v_x \frac{\partial n}{\partial x} + v_y \frac{\partial n}{\partial y} + v_z \frac{\partial n}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$v_x \frac{\partial T_e}{\partial x} + v_y \frac{\partial T_e}{\partial y} + v_z \frac{\partial T_e}{\partial z} = -\frac{T_e - T_0}{\tau_E} + \frac{2E_D}{3k} (\gamma - 1) \quad (2)$$

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = \frac{e\varepsilon_x}{m^*} - \frac{v_x}{\tau_p} \quad (3)$$

$$v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = \frac{e\varepsilon_y}{m^*} - \frac{v_y}{\tau_p} \quad (4)$$

$$v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{e\varepsilon_z}{m^*} - \frac{v_z}{\tau_p} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\rho / \varepsilon \varepsilon_0 \quad (6)$$

$$\vec{j} = -en\vec{v} \quad (7)$$

На рис. 1 приведено схематическое изображение структуры моделируемого транзистора.

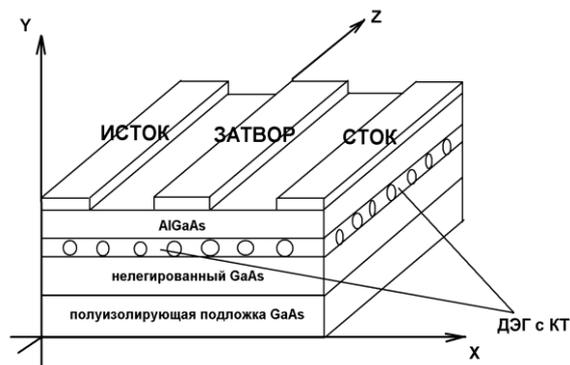


Рис. 1. Схематическое изображение гетероструктурного полевого транзистора с КТ; ДЭГ-двумерный электронный газ

На рис. 2-5 представлены результаты двумерного моделирования полевого транзистора Шоттки и полевого гетеротранзистора с квантовыми точками. Из полученных распределений скоростей (рис. 4) видно, что у границы гетероперехода в области формирования КТ дрейфовая скорость носителей повышается, что приводит к росту скорости всего коллектива электронов. Это можно объяснить инжекцией носителей из КТ в канал с двумерным электронным газом. Инжектированные из КТ электроны имеют меньшую начальную энергию, что приводит к понижению энергии всего коллектива носителей.

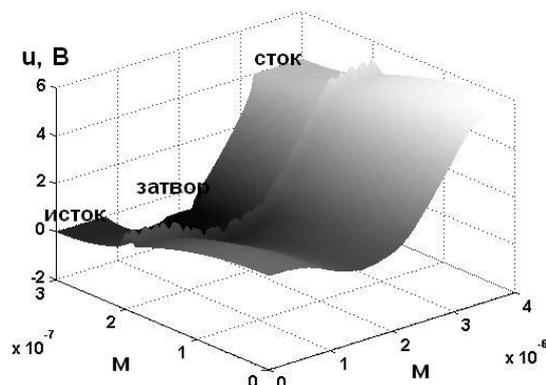


Рис. 2. Распределение потенциала в гетероструктурном транзисторе с КТ

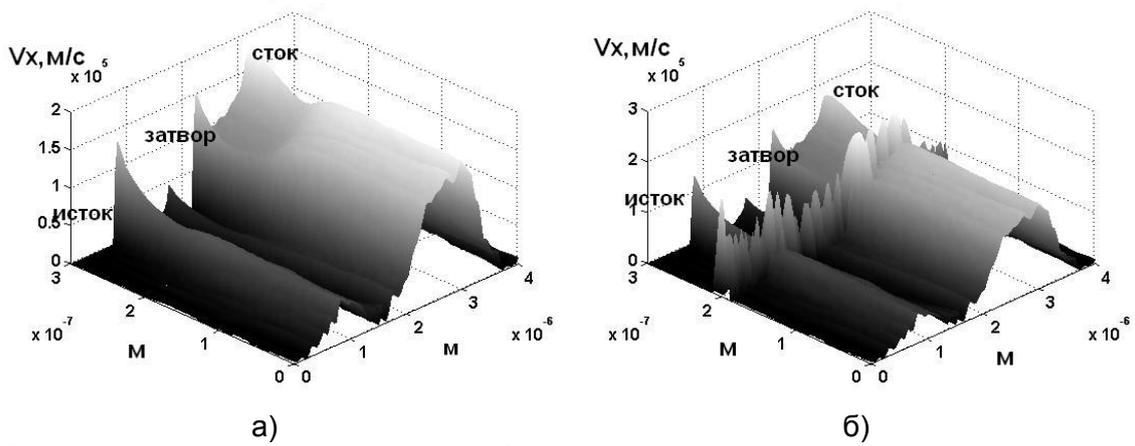


Рис. 3. Дрейфовые скорости носителей в обычном полевом транзисторе с затвором Шоттки (а) и в гетеротранзисторе с КТ (б)

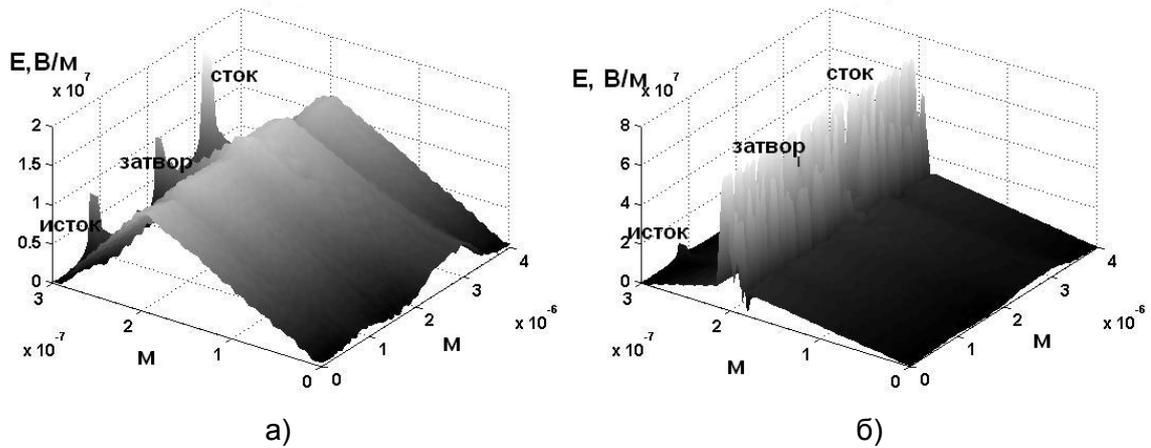


Рис. 4. Напряженности электрического поля в обычном полевом транзисторе с затвором Шоттки (а) и в гетеротранзисторе с КТ (б)

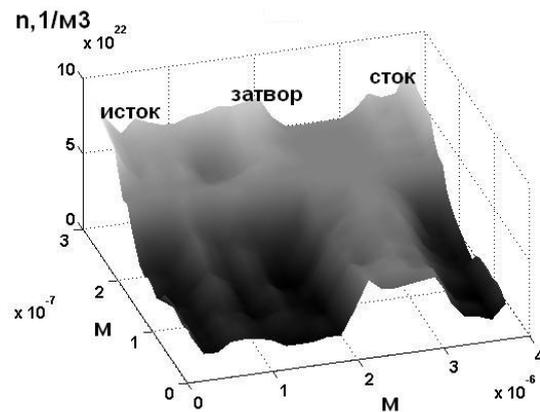


Рис. 5. Распределение концентрация носителей в в гетеротранзисторе с КТ

Необходимость трехмерного моделирования физических процессов в гетеротранзисторах с КТ связана как с особенностями топологии (ширина транзистора сравнима с размерами вдоль координаты X , связанной с тянущим электрическим полем), так и случайным характером параметров КТ.

Таким образом, один из подходов к моделированию заключается в решении приведенной выше системы уравнений с учётом самоорганизовавшихся случайным образом дефектов в виде квантовых точек.

Однако, численное моделирование на основе трехмерных уравнений связано с проблемой сходимости итерационного процесса из-за высоких градиентов потенциала как в области гетероперехода, так и в областях локализации КТ, а также существенными вычислительными затратами.

Другой способ учета эффектов третьего измерения может заключаться в следующем:

1. Транзистор вдоль ширины затвора (вдоль оси Z) разбивается на n секций с размерами, соизмеримыми с размерами КТ.

2. Для каждой секции задаются соответствующие граничные условия и с заданной точностью решается система двумерных релаксационных уравнений [3]. В результате находится распределение потенциала, скорости и концентрации носителей. Физические процессы в канале и в КТ моделируются путем встраивания в потенциальный рельеф каждой секции ступенек потенциала: для квантовой ямы и для КТ.

3. Для учета случайного характера параметров КТ и задания этих параметров для каждой секции транзистора используется метод Монте-Карло. Значение потенциала точек лежит в пределах 0.5-0.8 В. Общая плотность КТ должна составлять $(3-10) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ [4].

4. Для получения распределения электрического поля, скорости, концентрации носителей и полного тока через транзистор полученные распределения и токи для n секций исходной структуры интегрируются по Z.

3. Заключение

В работе приведены результаты моделирования субмикронного транзистора Шоттки и полевого гетеротранзистора с КТ. Показана необходимость учёта эффекта третьего измерения при моделировании полевого гетеротранзистора со встроенными квантовыми точками и предложены два подхода к моделированию характеристик гетеротранзисторов с КТ, из которых более экономичным с точки зрения вычислительных затрат является способ, связанный с процедурой деления структуры на секции вдоль третьей координаты.

4. Список литературы

1. Мокеров В. Г., Пожела Ю., Пожела К., Юцене В. Гетероструктурный транзистор на квантовых точках с повышенной максимальной дрейфовой скоростью электронов. Физика и техника полупроводников, 2006, т. 40, №3.

2. Карпович И. А. Квантовая инженерия: самоорганизованные квантовые точки. Соровский образовательный журнал, 2001, т. 7, №11.

3. Тимофеев В.І. Моделювання релаксаційних процесів розігріву електронного газу в субмікронних гетеротранзисторах // Наукові вісті НТУУ „КПІ”.–2004.–№5.–С.23–29.

4. Пожела Ю. К., Мокеров В. Г. Большое повышение максимальной дрейфовой скорости электронов в канале полевого гетеротранзистора. Физика и техника полупроводников, 2006, т. 40, №3.