

УДК 621.382.323; 621.382.82

Тимофеев В. И., д. т. н., проф., Фалеева Е. М..

Анализ релаксационных процессов в субмикронном гетеротранзисторе с квантовыми точками

Представлен алгоритм моделирования субмикронного гетеротранзистора с квантовыми точками. Описанная модель основана на системе релаксационных уравнений, которые позволяют учитывать процессы релаксации в многодолинных полупроводниках. Проведен анализ пространственного распределения времен релаксации импульса и энергии при полярном оптическом и междолинном механизмах рассеяния.

In the paper an algorithm for heterostructure transistor with quantum dots modeling is presented. The described model is based on the system of relaxation equations which allow to take into account relaxation processes in multivalley semiconductors, and to describe submicron structures sufficiently. Spatial distribution of energy and impulse relaxation times is analysed.

Введение

Структуры с квантовыми точками (КТ) являются перспективными в развитии лазерной техники, диодов, спиновой памяти и т. д. [1-3]. Также есть ряд экспериментальных данных и теоретических обоснований принципа работы полевых гетеротранзисторов со встроенными КТ [4,5]. В таких транзисторах наблюдался значительный рост дрейфовой скорости носителей заряда в канале. Однако, представленные теоретические описания таких приборов не

содержат качественного описания распределения характеристик носителей в объеме транзисторной структуры.

В данной работе описан алгоритм двумерного моделирования субмикронного гетеротранзистора с КТ на основе соединений типа $A_{III}B_V$. При моделировании использовалась система релаксационных уравнений, решение которой позволило учесть времена релаксации импульса и энергии как вклад различных механизмов рассеяния носителей заряда в моделируемой структуре.

1.Алгоритм

Для описания модели полевого гетеротранзистора с КТ (структура которого аналогична [6]) используется система уравнений, полученная при решении уравнения Больцмана в приближении времени релаксации [7], которая содержит уравнение сохранения частиц, уравнение сохранения энергии, уравнения сохранения импульса, а также уравнение Пуассона и уравнение для тока:

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

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

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

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

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = -\rho / \epsilon \epsilon_0 \quad (5),$$

$$\vec{j} = -en\vec{v} \quad (6).$$

Для решения данной системы сначала необходимо задать адекватное начальное приближение. Для этого решается уравнение Пуассона, а затем, с помощью метода с регулировкой шага Ньютона – Рафсона находится новое распределение концентрации:

$$n_{i+1} = n_i - \alpha F_i^{(-1)} F_i \quad (7),$$

где целевая функция $F_i = \rho / \epsilon \epsilon_0 + \Delta\phi$. Полученная концентрация снова подставляется в уравнение Пуассона. Выход из цикла происходит при условии достижения функцией $\phi(x, y)$ минимума. Таким образом, с помощью последовательных итераций находятся распределения $\phi(x, y)$ и $n(x, y)$ в полевом транзисторе без КТ.

После получения распределения $\phi(x, y)$ для учета квантовой ямы и квантовых точек в потенциальный рельеф встраиваются ступеньки потенциала 0.3 В и 0.7 В отдельные узлы сетки вдоль квантовой ямы с учетом того, что плотность квантовых точек в реальной структуре составляет $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$ [5].

После нахождения распределений потенциала и концентрации необходимо решать уравнения (2-4) для нахождения распределения скоростей и энергии (электронной температуры) носителей заряда. Но в эти уравнения входят коэффициенты, такие как время релаксации импульса τ_p , время релаксации энергии τ_E , зависящие от электронной температуры. Следовательно, сначала необходимо найти начальное распределение электронной температуры в транзисторе. В свою очередь, для трехдолинной модели T_e зависит от напряженности электрического поля следующим образом [8]:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{3k_B(T_e - T)}{b_\Gamma \mu_\Gamma^2 m_\Gamma^* (\gamma_\Gamma - 1) + b_L \mu_L^2 m_L^* (\gamma_L - 1) + b_X \mu_X^2 m_X^* (\gamma_X - 1)}} \quad (8),$$

где b_Γ , b_L , b_X - коэффициенты заселенности Γ , L , X долин;

μ - подвижность, m^* - эффективная масса для трех долин соответственно;

$$\gamma = \frac{2\tau_E}{\tau_p}, \quad T=300 \text{ K.}$$

Коэффициенты, входящие в уравнение (8), также зависят от электронной температуры. Их расчет производился с помощью методов, описанных в [8].

Функция $T_e(\varepsilon)$ находится как обратная к функции $\varepsilon(T_e)$ с учетом того, что $\varepsilon = -\text{grad}(\varphi)$.

Усредненные по долинам характеристики будут равны [8]:

$$\text{подвижность: } \mu = b_\Gamma \mu_\Gamma + b_L \mu_L + b_X \mu_X,$$

$$\text{омическая эффективная масса: } 1/m^* = 1/m_\Gamma^* + 1/m_L^* + 1/m_X^*,$$

$$\text{время релаксации импульса: } \tau_p = \mu m^* / e,$$

$$\text{время релаксации энергии: } \tau_E = \tau_p / 2 + 3k_B(T_e - T) / 2e\mu\varepsilon^2.$$

После того, как найдены коэффициенты для уравнений (2) - (4), эти уравнения можно решить с помощью последовательных итераций. Сначала решаются уравнения (2), (3) для проекций скорости. В качестве начального приближения берутся значения v_x , v_y , вычисленные по аппроксимации скорости для локальной модели.

Найденное распределение скорости носителей заряда используется для нахождения начального распределения концентрации носителей в данной структуре. Для этого используется уравнение (6). Далее снова в замкнутом цикле

находится новое распределение концентрации (7) и решается уравнение Пуассона (5), причем на каждой итерации в потенциальную поверхность встраиваются квантовая яма с квантовыми точками. Затем находится новое распределение электронной температуры и проекций скорости. Найденные проекции скорости подставляются в уравнение (4). Это уравнение решается также итерационно с использованием полученного ранее распределения $T_e(x,y)$ как начального приближения.

2. Полученные результаты

При расчетах времен релаксаций учитывались следующие механизмы рассеяния: для времени релаксации импульса – акустическое, примесное, оптическое, полярное оптическое и междолинное рассеяния, для времени релаксации энергии – те же, что и для времени релаксации импульса, но без учета примесного рассеяния. Известно, что из всех механизмов рассеяния в многодолинных полупроводниках наибольшую роль играют оптическое полярное и междолинное рассеяние [8]. Результаты расчета обратных времен релаксации импульса и энергии для этих видов рассеяния представлены на рис (3-6). Видно, что в области повышения электронной температуры частота релаксации импульса при междолинном рассеянии гораздо превышает частоту релаксации импульса при полярном оптическом рассеянии (рис. 3, 4). Частота релаксации энергии при полярном оптическом рассеянии падает с увеличением T_e , так как практически вся энергия будет рассеиваться при междолинных переходах (рис. 5, 6).

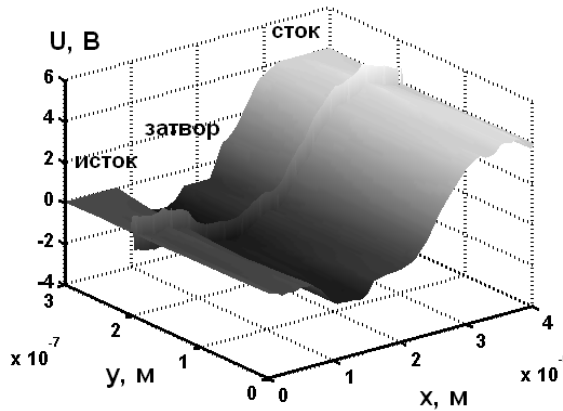


Рис. 1 Распределение потенциала

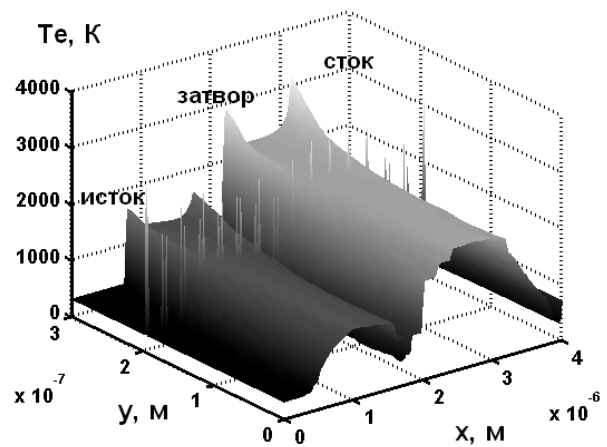


Рис. 2 Распределение электронной температуры

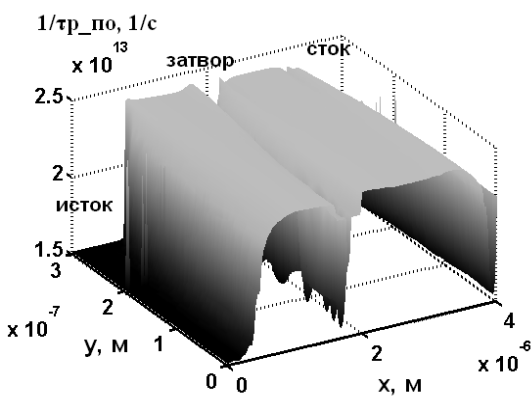


Рис. 3 Распределение обратного времени релаксации импульса при полярном оптическом рассеянии

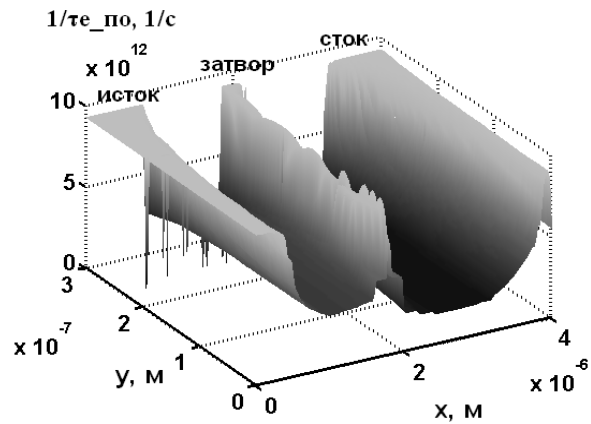


Рис. 4 Распределение обратного времени релаксации энергии при полярном оптическом рассеянии

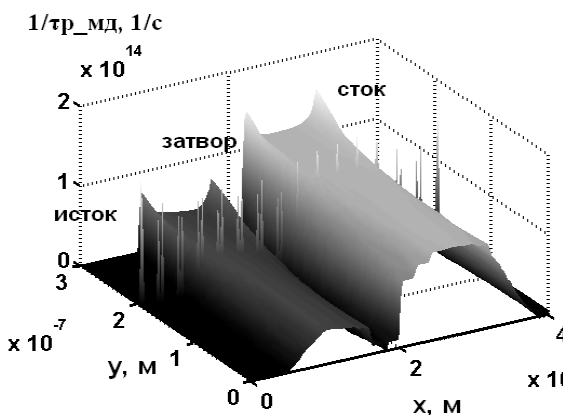


Рис. 5 Распределение обратного времени релаксации импульса при междолинном рассеянии

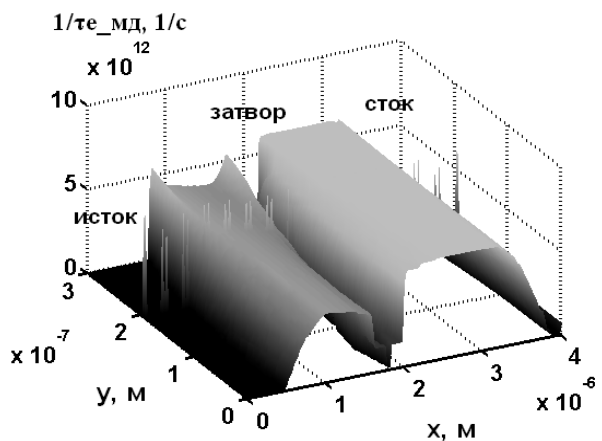


Рис. 6 Распределение обратного времени релаксации импульса при междолинном рассеянии

Также из рис. 7 видно, что при встраивании в канал транзистора квантовой ямы (КЯ) с КТ, скорость носителей заряда в канале возрастает примерно на порядок.

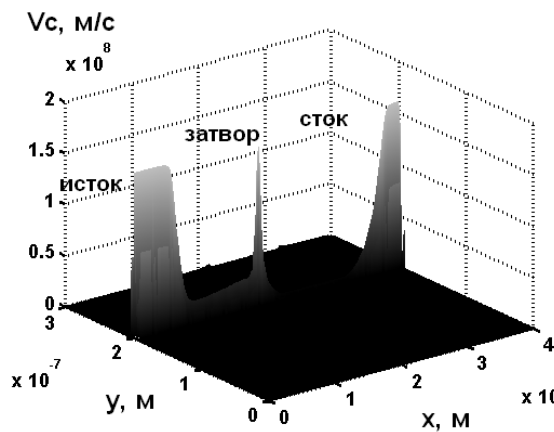


Рис. 7 Распределение скорости носителей заряда

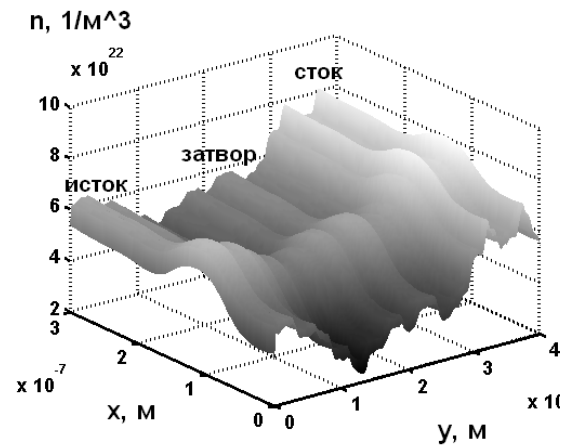


Рис. 8 Распределение концентрации носителей заряда.

Анализ распределений концентрации носителей (рис. 6, 7) показывает, что при встраивании в канал КЯ и КТ часть носителей вытесняется из канала. Это может быть связано с их высокими начальными скоростями. Также видно, что локализация носителей в ПТ с КТ происходит не в области между затвором и стоком, а немного далее, что может свидетельствовать о повышенной скорости насыщения носителей в таких транзисторных структурах.

Заключение

Был представлен алгоритм моделирования субмикронного полевого гетеротранзистора с квантовыми точками. В модели использовалась система релаксационных уравнений, дополненная уравнением Пуассона и уравнением для плотности тока. Полученные результаты позволяют судить о

том, что встраивание с канал транзистора квантовых точек повышает порядок скорости дрейфа носителей. Также показано пространственное распределение обратных времен релаксации импульса и энергии при двух основных механизмах рассеяния – полярном оптическом и междолинном.

Список литературы

1. Соболев М. М., Васильев А. П., Жуков А. Е., Семенова Е. С., Михрин В. С., Цырлин Г. Э., Мусихин Ю. Г. Связывание состояний электронов в молекуле квантовых точек InAs/GaAs // Физика и техника полупроводников - 2006. - Т. 40, №3 – с. 336-342.
2. Соколов А. С., Талалаев В. Г., Новиков Б. В., Штурм И. В., Захаров Н. Д., Цырлин Г. Э., Тонких А. А. Резонансы в массиве квантовых точек InAs, управляемые внешним электрическим полем // Физика и техника полупроводников - 2007. - Т. 41, №2 – с. 203-210
3. Николук В. А., Игнатъев И. В. Энергетическая структура квантовых точек, индуцированных неоднородным электрическим полем в квантовых ямах // Физика и техника полупроводников - 2007. - Т. 41, №12 – с. 1443-1450.
4. Мокеров В. Г., Фёдоров Ю. В., Великовский Л. Э., Щербакова М. Ю. Новый гетероструктурный транзистор на квантовых точках // Докл. РАН - 2000 - Т. 375, №6 – с. 754-747.
5. Пожела Ю. К., Мокеров В. Г. Большое повышение максимальной дрейфовой скорости электронов в канале

полевого гетеротранзистора // Физика и техника полупроводников – 2006. – Т. 40, №3. – с. 362-366.

6. Тимофеев В. И., Фалеева Е. М. Численное моделирование транзистора с квантовыми точками на основе соединения нитрида галлия. – Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники» - Киев 2007 – с. 62-65.
7. V. I Timofeyev, M. Amini, E. M. Faleeva, “Non-stationary Drift of Electrons in Submicron High Electron Mobility Transistor with two Heterojunctions”, Electronics And Electrical Engineering , vol. 4(76), pp. 33-36, Kaunas, 2007.
8. Москалюк В. А. Физика электронных процессов. Часть II. Динамические процессы: Учебное пособие – Киев – Аверс, 2004. – 186 с.