

Вакуумная, плазменная и квантовая электроника

УДК 621.382

В.И. Тимофеев, д.-р.техн.наук., **Е.М. Фалеева**, канд.техн.наукНациональный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
ул. Политехническая, 16, каб.419, Киев, 03056, Украина.

Анализ процессов релаксации импульса и энергии в гетеротранзисторах с системами квантовых точек

Проведено моделирование и сравнительный анализ релаксационных характеристик для четырех различных гетероструктур: гетеротранзистора, гетеротранзистора с двумя каналами (гетеропереходами), гетеротранзистора с двумя каналами и системой квантовых точек, а также гетеротранзистора с двумя каналами и двумя системами квантовых точек. Показано, что разогрев носителей заряда в сильных электрических полях в гетеротранзисторах со встроенными квантовыми точками с двумя гетеропереходами менее интенсивен, а средние значения дрейфовой скорости выше, чем в других исследуемых структурах. Библиограф. 7, рис. 2.

Ключевые слова: гетеротранзистор, квантовая точка, гетеротранзистор с системой квантовых точек, двухканальный гетеротранзистор с системой квантовых точек, механизмы рассеяния, время релаксации импульса, время релаксации энергии.

Введение

Известно, что в субмикронных гетеротранзисторных структурах на основе многодолинных полупроводников наиболее существенными механизмами рассеяния электронов являются рассеяние на полярных оптических (ПО) фононах и междолинное рассеяние [1-3]. Встраивание систем квантовых точек в канал приводит к изменению характера транспорта носителей во всей структуре из-за изменения не только электронного, но и фононного спектров. Кроме того, при определенных условиях, могут проявляться процессы, связанные с эмиссией электронов из квантовых точек, а также процессы захвата и освобождения носителей из квантовой точки. Это может существенным образом влиять на процессы разогрева электронного газа в гетеропереходах сильным электрическим полем, а также на процессы релаксации энергии и импульса носителей.

Экспериментальные исследования показывают, что «встраивание» квантовых точек (КТ) в

гетеропереход транзистора приводит к росту выходного тока [4,5]. Это может быть связано как со свойствами квантовых точек в условиях сильных электрических полей, так и с квантованием полярных оптических фононов в области канала.

В работе исследуются релаксационные процессы на основе анализа времен релаксации импульса и энергии электронов с учетом наиболее существенных механизмов рассеяния: междолинного рассеяния, фононного оптического и акустического, примесного рассеяния, а также квантования энергетических уровней в КТ.

Моделирование гетеротранзисторов с квантовыми точками

Система уравнений двумерной физикотопологической модели для гетероструктур с квантовыми точками приведена в работе [6]. Она включает в себя уравнения сохранения энергии и импульса, уравнение Пуассона, уравнение непрерывности тока, а также соотношения для расчета скорости рассеяния для различных механизмов рассеяния. Для учета эффектов размерного квантования использовалось приближение прямоугольной квантовой ямы, а также самосогласованно решались уравнения Пуассона и Шредингера

При этом учитывались механизмы рассеяния, характерные для субмикронных гетероструктур.

Результаты двумерного численного моделирования

Моделируемая структура в поперечной (координата y) к направлению тянущего поля стока плоскости (координата x) представляет собой квантовую систему «гетеропереход»-«слой КТ»-«гетеропереход»-«слой КТ». При этом гетеропереходы формируются слоями GaAs и AlGaAs, квантовые точки – арсенидом индия – InAs. В исследуемой структуре длина затвора составляет 0,2 мкм, а размеры потенциальных ям двухканального транзистора – около 10 нм.

Результаты моделирования потенциальной энергетических поверхностей исследуемых

структур представлены на рис. 1

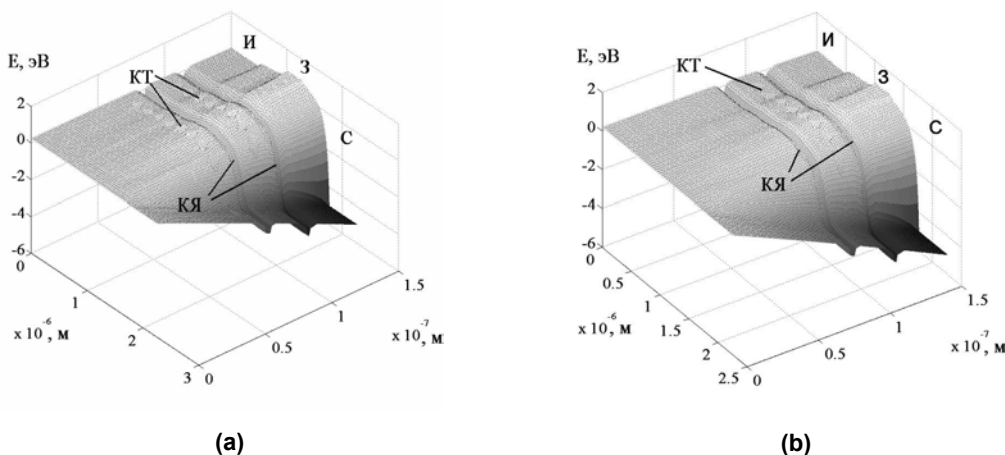


Рис. 1. Графическое изображение потенциальной энергетической поверхности для (а) – гетеротранзистор с двумя гетероканалами и двумя системами КТ, (б) – гетеротранзистор с двумя гетероканалами и одной системой КТ

При расчете различных вариантов структур последовательно исключался один из слоев: либо гетеропереход либо одна из систем КТ.

Анализ процессов релаксации импульса и энергии

Представляет интерес исследование вклада различных механизмов рассеяния на перенос

заряда в заданных структурах. На рис. 2 приведен пример расчета средних частот (или обратных времен) релаксации энергии для полярного оптического и междолинного рассеяния для основной Г-долины. Данные распределения рассчитаны вдоль исследуемых структур (координата x), усредненные в сечении по координате y в области с максимальной концентрацией носителей.

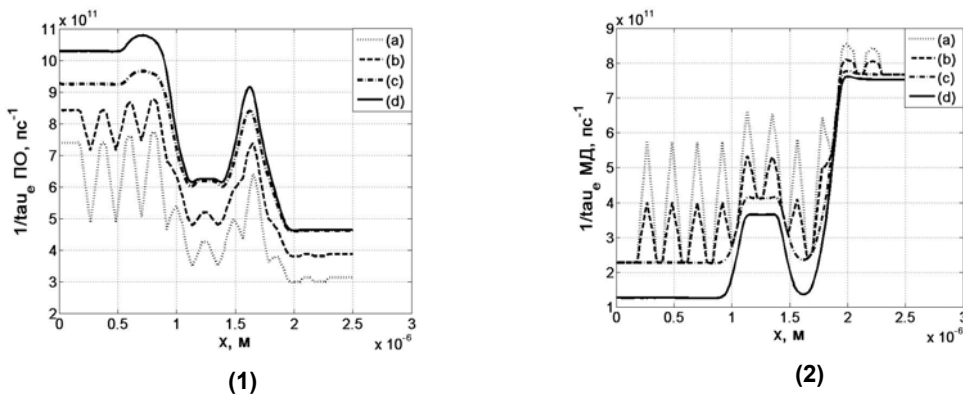
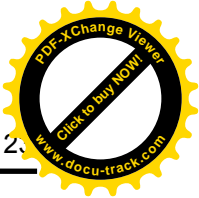
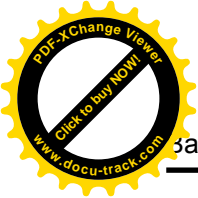


Рис. 2 Графики пространственного распределения обратных времен релаксации энергии для ПО (3-1) и междолинного (3-2) механизмов рассеяния, где кривые (а) – 2-х канальный гетеротранзистор с 2-мя системами КТ, (б) – 2-х канальный транзистор с системой КТ, (с) – 2-х канальный транзистор и (d) – одноканальный транзистор

Полученные результаты показывают как перераспределяется вклад механизмов рассеяния вдоль структуры транзистора, что позволяет учесть их влияние на средние значения энергии и импульса. Полярное оптическое рассеяние является основным в таких структурах, пока в

области затвор-сток не начинает преобладать механизм междолинного рассеяния. Следует отметить, что при определенных условиях, описанных в [4], введение систем КТ позволяет, за счет изменения потенциального рельефа кристаллической решетки, добиться уменьшения



рассеяния на ПО-фононах. Этот эффект достигается при условии, что расстояния между слоем КТ и гетеропереходом канала меньше длины волны ПО-фонона. В таком случае можно смоделировать ситуацию, когда, при встраивании в гетеротранзистор массивов КТ, вероятность ПО рассеяния будет уменьшаться. Следует отметить, что преимущества такой структуры проявляются при не больших (0,1 – 0,3 В) отрицательных электрических смещениях на затворе и относительно невысоких (до 0,4 эВ) барьерах в гетеропереходах и системах КТ. Уменьшение влияния эффектов сильного электрического поля в данной структуре связано с уменьшением вероятности рассеяния как на полярных оптических фононах, так и вследствие процессов инжектирования в канал электронов с высокими начальными скоростями и малыми значениями энергии, что уменьшает вероятность также и междолинного рассеяния.

Также, как следствие, наблюдается рост дрейфовой скорости носителей в канале. Для усредненных значений скорости получены следующие результаты ($\cdot 10^5$ м/с): (а) – 3,8, (b) – 3,35, (с) – 3,2, (d) – 3,0 [7].

Выводы

Разработаны модели учета влияния квантовых ям и КТ на продольный транспорт носителей заряда в гетеротранзисторах с субмикронной длиной затвора. Показано, что встраивание КТ в гетеропереход приводит к росту дрейфовой скорости и уменьшению влияния релаксационных процессов. Дрейфовая скорость в канале гетеротранзистора с КТ растет вследствие уменьшения актов рассеяния, а также за счет инжекции «холодных» электронов из квантовых точек вследствие ударной ионизации и туннелирования. Приведенные результаты могут использоваться для разработки перспективных гетероструктур со встроенными системами квантовых ям и КТ.

УДК 621.382

В.І. Тимофеев, д.-р.техн.наук, **Є.М. Фалеева**, канд.техн.наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр-т. Перемоги , 37 , Київ- 56 , 03056 , Україна .

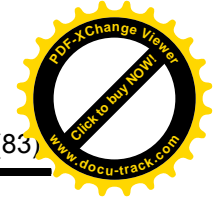
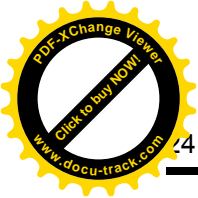
Аналіз процесів релаксації імпульсу і енергії в гетеротранзисторах з системами квантових точок

У статті наведені результати моделювання та порівняльний аналіз релаксаційних характеристик для чотирьох різних гетероструктур: традиційного гетеротранзистора, гетеротран-

Список использованных источников

1. *Timofeyev V. I.* Non-stationary Drift of Electrons in Submicron High Electron Mobility Transistor with two Heterojunctions / V. I. Timofeyev, M. Amini, E. M. Faleeva // *ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING*. – Kaunas: Technologija, 2007. – №. 4(76). – P. 33-36.
2. *Timofeyev V. I.* Model of Heterotransistor with Quantum Dots / V. I. Timofeyev, E. M. Faleeva // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. – 2010. – Vol. 13. – №2. – P. 186-188.
3. *Moskalyuk V. A.* Physics of Electron Processes. Part II: Dynamic Processes. – Kyiv: Avers, 2004. – 186 p. (Rus) Москалюк В. А. Физика электронных процессов. Часть II. Динамические процессы : [уч. пособие]. – К. : Аверс, 2004. – 186 с.
4. *Požela J. K.* A large enhancement of the maximum drift velocity of electrons in the channel of a field-effect heterotransistor/ Požela J. K., Mokerov V. G. // *Semiconductors, StPtb.: Ioffe Institute*. – 2006. – Vol. 40 – P. 357-361,
5. *Mokerov V.* A quantum-dot heterostructure transistor with enhanced maximum drift velocity of electrons / Mokerov V., Pozhela J., Pozhela K., Juciene V. // *Semiconductors, StPtb.: Ioffe Institute*. – 2006. – Vol. 40 – P. 367-371.
6. *V. I. Timofeyev, E. M. Faleeva* Two-channel hetero transistors with quantum dots systems, *IEEE XXXIII International Scientific Conference ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY*. Kyiv, Ukraine, p. 107-111, April 16-19, 2013.
7. *Timofeyev V.* Relaxation Processes Analysis In Heterotransistors With Systems Of Quantum Wells And Quantum Dots / Timofeyev V., Faleeva E. // *Electronics and Nanotechnology (ELNANO) 2014 IEEE XXXIII International Scientific Conference*. – 15-18 April 2014. – Kiev. – P. 115 – 118.

Поступила в редакцию 20 сентября 2014 г.



зистора з двома каналами (гетеропереходами), гетеротранзистора з двома каналами і системою квантових точок, а також гетеротранзистора з двома каналами і двома системами квантових точок. Показано, що розігрів носіїв заряду в сильних електричних полях в гетеротранзисторах з вбудованими квантовими точками з двома гетеропереходами менш інтенсивний, а середні значення дрейфової швидкості вищі, ніж в інших досліджуваних структурах. Бібл. 7, рис.2.

Ключові слова: гетеротранзистор, двоканальний гетеротранзистор, квантова точка, система квантових точок, гетеротранзистор з системою квантових точок, час релаксації імпульсу, час релаксації енергії.

UDC 621.382

V.I. Timofeyev, Dr.Sc., **E.M. Faleyeva**, Ph.D.

The National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
st. Polytechnique, 16, off. 419, Kyiv, 03056, Ukraine.

Analysis of relaxation processes of momentum and energy in heterotransistors with systems of quantum dots

The modeling and comparative analysis of the relaxation processes in four different heterostructures: traditional heterotransistor, heterotransistor with two channels (heterojunctions), heterotransistor with two channels and a system of quantum dots (QDs), as well as heterotransistor with two channels and two systems of quantum dots were made. It is shown that the heating of electrons in high electric fields in heterotransistors with embedded quantum dots with two heterojunctions is less intensive, and the values of the drift velocity is higher than in the other structures under study. References 7 figures 2.

Keywords: heterotransistor, heterojunction, quantum well (QW), quantum dots (QDs).

References

1. *Timofeyev V. I., Amini M., Faleyeva E. M.* (2007), "Non-stationary Drift of Electrons in Submicron High Electron Mobility Transistor with Two Heterojunctions". *Electronics and Electrical Engineering*, No 4(76). Pp. 33-36.
2. *Timofeyev V. I., Faleyeva E. M.* (2010), "Model of Heterotransistor with Quantum Dots". *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, Vol. 13, No 2. Pp. 186-188.
3. *Moskalyuk V. A.* (2004), "Physics of Electron Processes. Part II: Dynamic Processes". Kiev: Avers, P.186. (Rus)
4. *Požela J. K., Mokerov V. G.* (2006), "A Large Enhancement of the Maximum Drift Velocity of Electrons in the Channel of a Field-effect Heterotransistor". *Semiconductors*, Vol. 40. Pp. 357-361.
5. *Mokerov V., Pozhela J., Pozhela K., Juciene V.* (2006), "Quantum-dot Heterostructure Transistor with Enhanced Maximum Drift Velocity of Electrons". *Semiconductors*, Vol. 40. Pp. 367-371.
6. *Timofeyev V. I., Faleyeva E. M.* (2013), "Two-channel Heterotransistors with Quantum Dots Systems". *IEEE XXXIII International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology"*. Kyiv, Ukraine. Pp. 107-111.
7. *Timofeyev V., Faleyeva E.* (2014), "Relaxation Processes Analysis In Heterotransistors With Systems of Quantum Wells And Quantum Dots". *IEEE XXXIII International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology"*. Kyiv, Ukraine. Pp. 115 – 118.