

УДК 621.382

В.И. Тимофеев, д-р техн. наук, Е.М. Фалеева

## Особенности моделирования выходных характеристик гетеротранзистора с квантовыми точками

Рассмотрен вопрос расчета выходных статических характеристик гетеротранзистора с квантовыми точками. Приведен подход к учету влияния квантовых точек на ток транзистора в физико-топологической модели. Полученные результаты подтверждают предполагаемую ранее расходимость с экспериментальными данными, связанную с неоднозначностью расположения квантовых точек в плоскости канала.

A problem of the output static characteristics of heterotransistor with quantum dots obtaining was researched. A method for the influence accounting of quantum dots on a transistor current in the physical and topological models was described. The obtained results confirm the previously estimated divergence of experimental data related to the ambiguity of the location of quantum dots in the channel plane.

**Ключевые слова:** квантовая точка, квантовая яма, гетеротранзистор с квантовыми точками, выходные характеристики, расходимость по сравнению с экспериментом.

### Введение

В последнее время одним из наиболее популярных объектов исследования являются полупроводниковые квантовые точки (КТ). Их свойства широко применяются в одноэлектронных и оптоэлектронных приборах, интенсивно исследуются возможности создания на их основе более быстродействующих вычислительных и объемных запоминающих устройств [1-3].

Квантовые точки могут «встраиваться» в гетеросистему из двух полупроводников, улучшая тем самым характеристики приборов. Наиболее распространены такие решения в лазерных диодах, при этом улучшается температурная стабильность пороговой плотности тока, увеличивается усиление, улучшаются динамические характеристики лазеров [4]. Также, гетеропереходы с квантовыми точками показали хорошие скоростные характеристики в сильных электрических полях, тогда как в гетероструктурном полевом транзисторе при тех же условиях средняя дрейфовая скорость носителей была значительно ниже [5,6].

Авторами была разработана физико-топологическая модель гетероструктурного транзистора с квантовыми точками (рис. 1), описан-

ная в ряде предыдущих работ (например, в [7,8]). Естественно, возникла проблема верификации данной модели, при разрешении которой получены важные физические результаты.

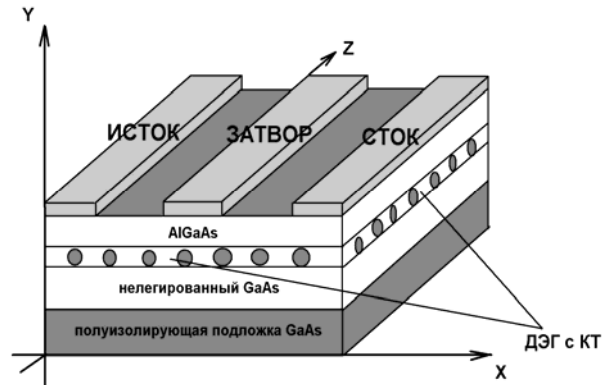


Рис. 1. Гетеротранзистор с КТ (ДЭГ с КТ – двумерный электронный газ с КТ)

### 1. Моделирование выходных характеристик гетеротранзистора с квантовыми точками

Используя результаты физико-топологического моделирования [7,8], были получены выходные статические характеристики исследуемого транзистора. Ток транзистора рассчитывался посредством усреднения токов в каждом узле прямоугольной сетки для соответствующих областей.

Эмиссия электронов из квантовых точек для их последующего вклада в ток транзистора возможна при ударной ионизации, туннелировании носителей из КТ в квантовую яму и вследствие теплового выброса носителей.

На рис. 2 приведена энергетическая диаграмма гетеротранзистора с квантовыми точками для проекции, поперечной плоскости канала (см. рис. 1).

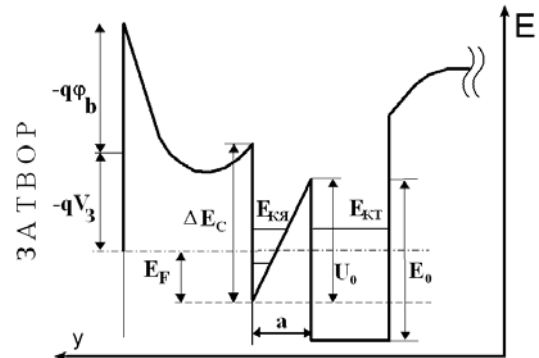


Рис. 2. Зонная диаграмма структуры гетеротранзистора с КТ ( $U_0$  – высота потенциального барьера квантовой точки,  $a$  – его ширина)

Вероятность теплового выброса носителей из-за взаимодействия с колебаниями кристаллической решетки можно оценить при помощи Больцмановского фактора [9]:

$$\delta = \exp(-\Delta E_a / k_B T),$$

где  $E_a = E_0 - E_j$ ,

где  $k_B$  - постоянная Больцмана,  $E_0$  - глубина потенциальной ямы для КТ,  $E_j$  - энергетические уровни в КТ.

Ускорение электронов до порога ударной ионизации зависит от соотношения двух факторов – ускорения во внешнем электрическом поле и рассеяния при взаимодействии с фононами, преимущественно с полярными оптически и междолинными. Полученное при решении системы релаксационных уравнений распределение электронной температуры учитывает эти факторы, и событие ионизации происходит, если электронной температуры ( $T_e$ ) достаточно в месте расположения КТ. Этот механизм учета эмиссии электронов использовался в работе без «физического» встраивания КТ в распределение потенциала транзистора для исключения скачков градиентов функции. При расчетах ионизация КТ учитывалась в предположении, что энергия, переданная локализованному в КТ носителю заряда, тратится на преодоление потенциального барьера и выброс этого носителя из КТ, и в канале транзистора электрон снова будет с начальной энергией, равной энергии основного уровня КТ, с которого произошла эмиссия.

Для учета влияния туннелирования на ионизацию КТ нужна оценка коэффициента туннелирования для треугольного барьера при переходе электронов из КТ в квантовую яму (КЯ) (см. рис. 2). Также, необходимым условием (при пренебрежении влияния рассеяния на уширение квантовых уровней) является совпадение уровней по энергии. Вычисленные положения уровней для КТ и КЯ в одномерном приближении дают совпадение только верхних уровней, при совпадении которых коэффициент прохождения практически равен единице. Для потенциального барьера с шириной  $a$  и при выполнении условия

$$\left(\frac{2m^* qV_3}{\hbar^2}\right) a \gg 1, \quad \left(\frac{2m^* qV_3}{\hbar^2}\right) a |1 - E_{КТ} / U_0| \gg 1$$

можно использовать выражение при  $E < U_0$  [10]:

$$D(E_{КТ}) \approx 4\sqrt{\alpha(1-\alpha)} \exp\left[-\frac{4}{3}\sqrt{\gamma(1-\alpha)^3}\right],$$

где  $m^*$  – эффективная масса электрона,

$q$  – единичный положительный заряд,  $V_3$  – напряженность поля, приложенного к затвору,  $\hbar$  - постоянная Планка,  $U_0$  – высота потенциального барьера между КТ и КЯ,  $E_{КТ}$  – уровень в КТ, с которого происходит туннелирование,

$$\alpha = E / U_0, \quad \gamma = U_0 / E_1, \quad E_1 = \hbar^2 / (2m^* a).$$

Вероятность туннелирования с остальных уровней КТ является незначительной. В плоскости расположения КТ, параллельной плоскости канала, туннелирование между КТ может быть учтено в случае связанных квантовых точек или наличия вертикально связанных слоев КТ. В случае изолированных КТ коэффициент прохождения также стремится к нулю.

## 2. Результаты моделирования

С помощью приведенной методики учета влияния КТ на ток транзистора рассчитаны его выходные характеристики для нескольких режимов работы.

Наличие расходимости результатов эксперимента и моделирования зависит, прежде всего, от погрешностей используемых численных методов – дискретизации и аппроксимации, погрешностей машинного округления и точности, даваемой используемым алгоритмом, а также от точности задания граничных условий и физико-топологических параметров структуры.

Для данной структуры наиболее существенное влияние на несоответствие результатов моделирования и экспериментальных данных оказывает неоднозначность расположения квантовых точек в канале и флуктуация их размеров, которая обусловлена особенностями их роста в процессе самоорганизации, несмотря на постоянное совершенствование технологии [11]. При одинаковых поверхностных концентрациях КТ могут быть получены разные выходные токи, так как процессы ионизации квантовых точек для каждой структуры будут проходить по-разному.

На рис. 3 приведены результаты расчета выходного тока транзистора с концентрацией КТ в канале  $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и сравнение с экспериментом [5]. Размеры и форма КТ считались одинаковыми, менялся лишь способ их расположения в канале. Пунктирной линией выделены режимы, для которых приведено распределение электронной температуры на рис. 4 (а) и (б) соответственно.

Наибольшей расходимости токов соответствует более сильный разогрев электронного газа, так как вклад ионизации КТ в ток в этом режиме становится наиболее заметным. Также, при сильном разогреве электронного газа в стоковой части затвора происходит накопление

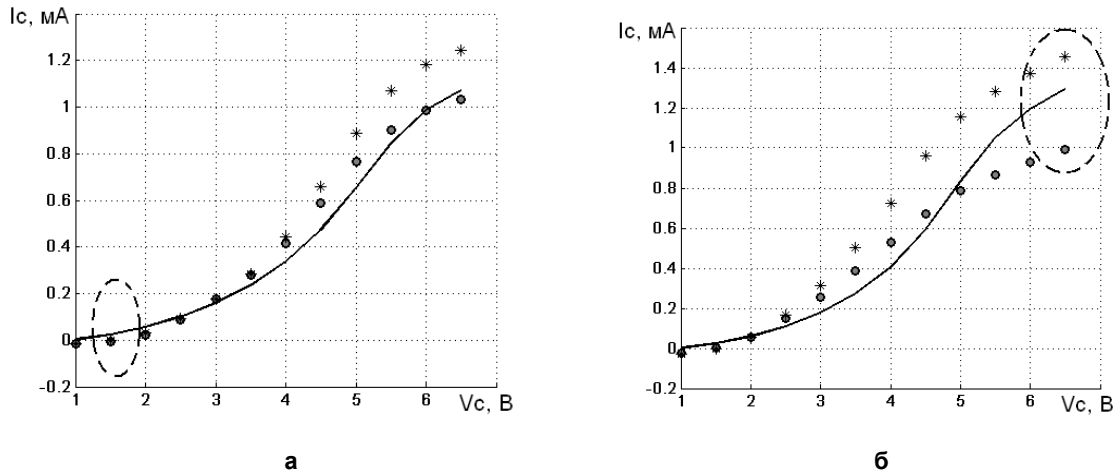


Рис. 3. ВАХ гетеротранзистора с КТ. Сплошная линия – эксперимент, точки – результаты расчетов для концентрации КТ  $3 \cdot 10^{10}$  см $^{-2}$ ; а)  $V_3 = 0$  В, б)  $V_3 = -0,8$  В

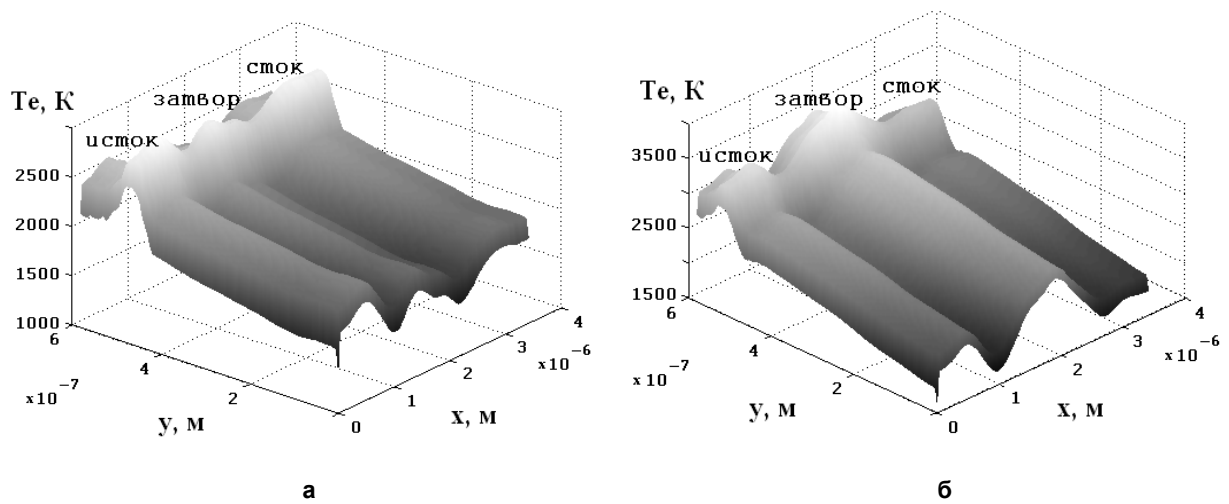


Рис. 4. Распределение электронной температуры в гетеротранзисторе с КТ для режимов: а)  $V_3 = 0$ ,  $V_{G1} = 1,5$  В, б)  $V_3 = -0,8$  В,  $V_{G1} = 6,5$  В

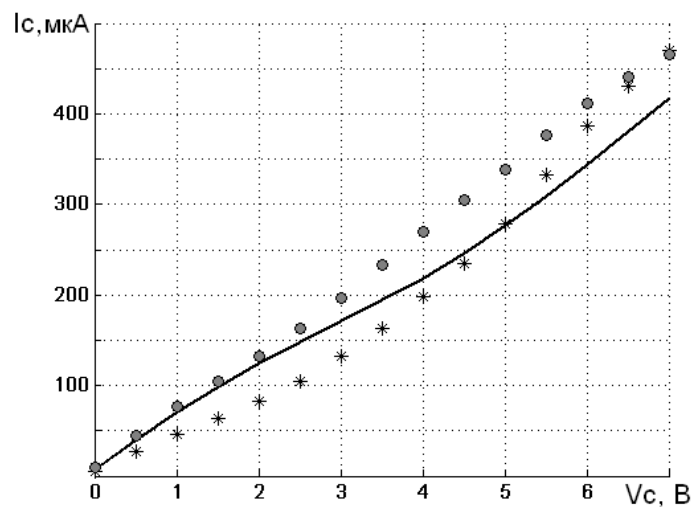


Рис. 5. ВАХ беззатворной гетероструктуры с КТ. Сплошная линия – эксперимент, точки – результаты расчетов для концентрации КТ  $3 \cdot 10^{10}$  см $^{-2}$ .

подвижных носителей за счет увеличения вероятности междолинного рассеяния.

На рис. 5 приведены вольтамперные характеристики для структуры без затвора [6] – экспериментальные и рассчитанные.

Видно, что при одной и той же концентрации КТ в канале их расположение заметно влияет на отклонения выходного тока относительно экспериментальных данных. Особенно это заметно для структур с затвором, где напряженности электрического поля будут больше по сравнению с беззатворной структурой.

Максимальное полученное при расчетах отклонение значений тока для заданного количества инжектированных из КТ электронов составляет 23% при напряжении на затворе -0,8 В. В зависимости от количества захватываемых в КТ электронов и концентрации КТ значение относительного отклонения может меняться.

## Выводы

Из полученных результатов можно сделать ряд важных выводов:

1. В области слабых полей способ расположения КТ в канале мало влияет на выходные характеристики, так как КТ вносят незначительный вклад в проводимость транзистора.

2. С увеличением напряженности электрического поля вклад КТ в проводимость канала становится заметнее из-за их ионизации. В сильных полях все КТ ионизированы и неоднозначность их расположения наиболее сильно влияет на ток транзистора и расходимости в значениях токов будут наибольшими.

3. При проведении серии измерений выходных характеристик набора тестовых структур транзисторов с КТ возможно получение данных для уточнения параметров разработанной физико-топологической модели, в том числе, и подбор адекватного расположения КТ в канале.

## Литература

1. *Wood, J.D., Tougaw, D.* Matrix multiplication using quantum-dot cellular automata to implement conventional microelectronics // *Nanotechnology*, IEEE Transactions on. – Digital Object Identifier: 10.1109/TNANO.2010.2099665
2. *Stalford, H., Young, R., Nordberg, E., Levy, J., Borrás Pinilla, C., Carroll, M.* Capacitance modeling of complex topographical silicon quantum dot structures // *IEEE Transactions on Nanotechnology*. – Digital Object Identifier: 10.1109/TNANO.2010.2087035
3. *V. Jovanovi, C. Biasotto, L. K. Nanver, J. Moers, D. Grutzmacher, J. Gerharz, G. Mussler, J. van der Cingel, J.J. Zhang, G. Bauer, O. G. Schmidt, and L. Miglio* n-Channel MOSFETs Fabricated on SiGe Dots for Strain-Enhanced Mobility // *IEEE Electron Device Letters*. – Vol. 31. – No. 10. - OCTOBER 2010. – P. 1083-1085.
4. Теория пороговых характеристик полупроводниковых лазеров на квантовых точках / состав.: Л.В.Асрян, Р.А.Сурис. Журнал физика и техника полупроводников. том 38. № 1. 2004. – 23 с.
5. *В.Г. Мокеров, Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене* Гетероструктурный транзистор на квантовых точках с повышенной максимальной дрейфовой скоростью электронов // *Физика и техника полупроводников*. – СПб : ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2006. – Т. 40, вып. 40. – С. 367-371.
6. *В.Г. Мокеров, Ю.В. Фёдоров, Л.Э. Великовский, М.Ю. Щербакова* Новый гетероструктурный транзистор на квантовых точках // *ДАН: (доклады РАН)*. – М.: Наука / Интерпериодика, 2000.– Т. 375, №6. – С. 754-747.
7. *В.Г. Мокеров, Ю.В. Фёдоров, Л.Э. Великовский, М.Ю. Щербакова.* Методы численного решения систем релаксационных уравнений для анализа субмикронных гетероструктур // *Электроника и связь*. – К.: НТУУ "КПИ", ДУИКТ, 2008. – №47(6). – С. 5-9.
8. *V.I. Timofeyev, E.M. Faleeva.* Model of Heterotransistor with Quantum Dots // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. – 2010. – Vol. 13. – №2. – P. 186-188.
9. *М.Б. Смирнов, В.Г. Талалаев, Б.В. Новиков, С.В. Сарангов, Г.Э. Цирлин, Н.Д. Захаров.* Численное моделирование температурной зависимости спектров фотолюминесценции квантовых точек InAs/GaAs // *Физика твердого тела*. – 2007. – Т. 49, вып.6.– С. 1126-1131.
10. *В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин.* Основы наноэлектроники: Учеб. пособие // – М. : Логос, 2006. – 496 с
11. *Jihoon Lee, Member, IEEE, Zhiming M. Wang, Vitaliy G. Dorogan, Yuriy I. Mazur, and Gregory J. Salamo* Evolution of Various Nanostructures and Preservation of Self-Assembled InAs Quantum Dots // *Nanotechnology*, IEEE Transactions on. – VOL. 9. – No. 2. – MARCH 2010. – P. 149-156