

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХКАНАЛЬНОГО ГЕТЕРОТРАЗИСТОРА С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

Тимофеев В. И., Фалеева Е. М.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
пр. Победы, д.37, в. Киев, 03056, Украина  
e-mail: v.timofeev@kpi.ua, elena.faleeva@gmail.com

**Аннотация** — Гетероструктурный транзистор с квантовыми точками (КТ) является перспективным прибором с точки зрения повышения дрейфовой скорости электронов в канале. В данной работе представлены результаты моделирования двухканального гетеротранзистора с КТ, а именно, распределения дрейфовых скоростей и концентрации подвижных носителей. Показано, что наличие в канале КТ приводит к заметному росту тока стока.

## I. Введение

Наряду с одноканальными гетеротранзисторами, большой интерес при исследованиях уделяется и двухканальным гетеротранзисторам. Преимущества их использования заключаются в повышении дрейфовой скорости носителей в канале и увеличении общего тока через канал.

Если квантовые ямы (КЯ) туннельно не связаны, то перераспределенные между ними носители теряют часть энергии на преодоление потенциального барьера, вследствие чего скорость в нижней яме растет [1].

В случае туннельно-связанных КЯ понижение или повышение скорости носителей в одной из ям достигается изменением скорости рассеяния на гетерограницах и примесях, а так же, как это будет показано ниже, введением КТ в область одного из каналов. Такие эффекты широко применяются для повышения быстродействия логических схем [2].

Введение дополнительного канала приводит к дополнительному ограничению носителей, не позволяя им «растекаться» по подложке [3]. Таким образом, даже при одинаковой дрейфовой скорости носителей в обоих каналах, ток через прибор будет расти.

## II. Результаты моделирования и их интерпретация

Для моделирования характеристик двухканального транзистора с КТ рассматривалась топология, приведенная на рис. 1.

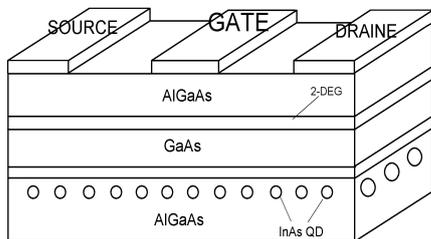
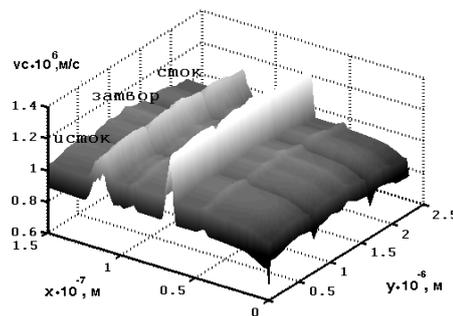


Рис. 1. Схематическое изображение топологии двухканального гетеротранзистора с КТ.

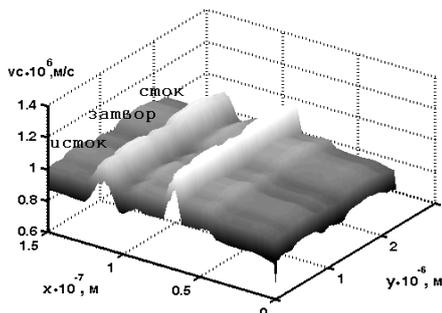
Fig. 1. Topology of a double-channel heterotransistor with QD

Квантовые точки встраивались в гетеропереход нижнего канала, и, как показали результаты физико-топологического моделирования, это привело к росту тока в данном канале. Детально двумерная модель гетеротранзистора приведена в [4, 5].

На рис. 2 (а) показано распределение дрейфовой скорости носителей для гетеротранзистора с двумя каналами, когда в нижний канал встроены КТ. Из графиков видно, что скорость носителей в нижнем канале увеличилась примерно на 20% по сравнению с гетеротранзистором без КТ (рис. 2, б). Ширина верхней ямы для обеих структур составляла 9 нм, а нижней – 0,45 мкм.



(а)



(б)

Рис. 2. Распределение скорости носителей в двухканальном гетеротранзисторе с КТ (а) и в двухканальном гетеротранзисторе (б) без КТ.

Fig. 2. Velocity distribution of carriers in the double-channel heterotransistor with QD (a) and in the double-channel heterotransistor (b) without QD

Рост тока при учете влияния КТ в большей мере достигается не за счет увеличения концентрации подвижных носителей, эмиттированных из КТ, а за счет увеличения средней дрейфовой скорости. Это объясняется тем, что эмиттированные из КТ электроны проводимости будут иметь большие, по сравнению с электронами в канале, начальные скорости из-за пока еще недостаточного разогрева электрическим полем.

Для более полного представления о процессах, происходящих в этих двухканальных транзисторах на рис. 3 представлены распределения скорости и концентрации в нижних каналах. Накопление носителей заметнее в структуре без КТ (рис. 3, б), что связано с большими значениями энергии и влиянием соответствующих видов рассеяния.

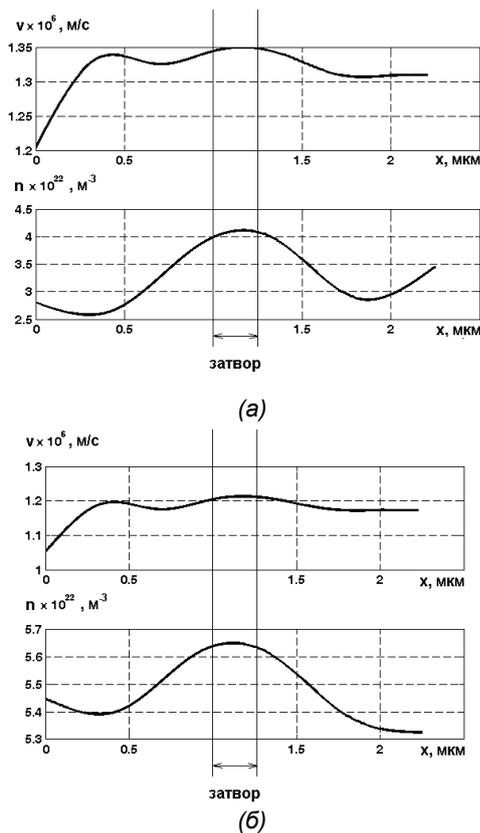


Рис. 3. Скорость и концентрация носителей в нижнем канале гетеротранзистора, содержащего КТ (а) и гетеротранзистора без КТ (б).

Fig. 3. Velocity and concentration of carriers in bottom channel for heterotransistor with (a) and without (b) QD.

При моделировании транзисторов квантовые точки имели площадь в основании порядка  $1 \text{ мкм}^2$  и задавались плавным изменением потенциала в двумерной сетке, что ближе к форме потенциала встроенных КТ. При этом достигается лучшая сходимость вычислительного процесса из-за отсутствия резких градиентов напряженности электрического поля, а полученные распределения отображают перераспределение концентрации носителей между квантовой ямой и квантовыми точками. Это заметно из приведенных зависимостей, так как полученная концентрация носителей во втором канале в транзисторе с КТ ниже, чем в том же канале для транзистора без КТ.

### III. Заключение

При встраивании КТ в канал транзистора наблюдается перераспределение концентрации подвижных носителей из-за наличия квантовых точек.

Встраивание в гетеротранзистор с двумя гетеропереходами квантовых точек приводит к росту тока канала и росту средней дрейфовой скорости электронного газа. Также, на примере двухканальной структуры показано, что при существенных различиях ширины квантовых ям скорость носителей в них будет разной (рис. 2, б).

### IV. Список литературы

[1] 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. 2007. Vol. 4. No 76. P.33—36.

[2] Коноплев Б. Г., Рындин Е. А. Элементарная база наноконпьютеров на основе связанных квантовых областей // Вестник южного научного центра РАН (Нанозлектроника). 2005. Т. 1. №3. С. 22—28.  
 [3] JieLiu, YugangZhou, JiaZhu, Yong Cai, Kei May Lau, KevinJ. Chen DC and RF Characteristics of Al-GaN/GaN/InGaN/GaN Double-Heterojunction HEMTs // IEEE Transactions on Electron Devices. 2007. Vol.54. №.1. P. 2—10.  
 [4] V. I. Timofeyev, E. M. Faleeva The Relaxation Processes Analysis in the Submicron Heterojunction Transistor with Quantum Dots // 32<sup>nd</sup> International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE'2009). Abstracts Proceeding. (Brno, Czech Republic, May 13-17, 2009) Brno 2009, P. 262—263.  
 [5] Тимофеев В. И., Фалеева Е. М. Методы численного решения систем релаксационных уравнений для анализа субмикронных гетероструктур // Электроника и связь. 2008. №6. С. 5—9.

## SIMULATING OF DOUBLE-CHANNEL HETEROTRANSISTOR WITH QUANTUM DOTS

V. I. Timofeyev, E. M. Faleeva  
 National Technical University of Ukraine "KPI"  
 37, Peremogy Str., Kyiv 03056, Ukraine  
 e-mail: v.timofeev@kpi.ua, elena.faleeva@gmail.com

**Abstract** — A heterostructure transistor with quantum dots (QD) is a perspective device due to its increase of electrons' drift velocity in the channel. In this work simulation results of double-channel heterotransistor with QD are present. QD application causes significant drain current increasing.

### I. Introduction

For higher current densities double-channel HEMT's are used. If quantum wells are not tunnel-coupled carriers, redistribution leads to decreasing of electron temperature and as a consequence to velocity increasing. If the channels are located closely, there is an opportunity to control the conductivity inertialessly with a gate voltage, if the channels have different resistances. Also addition of the second channel limits leakage current through a substrate.

### II. Simulation Results

Quantum dots were built in the bottom channel, and as results of physical- topological simulation have shown, it has led to current growth in the given channel. Current growth at the account of influence of QD is reached not only by increasing in concentration of the mobile carriers emitted from QD, but in the big manner by increasing in average electrons' drift velocity. This is due to the fact that electrons emitted from QD will have bigger, in comparison with electrons in the channel, initial velocities because of the insufficient warming up by electric field. While simulating of transistors, quantum dots had the area in the basis of an order of 1 square micron and were set by a smooth change of potential in a two-dimensional grid that is closer to the form of built-in QD potential. Thus the best convergence is reached in the absence of sharp gradients of intensity of electric field, and the received distributions display redistribution of concentration of carriers between a quantum well and quantum dots. It is appreciable from the resulted dependences, as the received concentration of carriers in the second channel in the transistor with QD is lower, than in the same channel for the transistor without QD.

### III. Conclusion

With embedding of QD into the transistor channel redistribution of concentration of mobile carriers, because of presence of quantum dots, is observed. Embedding in the heterotransistor with two heterojunctions of quantum dots leads to growth of current of the channel and growth of average drift speed of electron gas.