

УДК 621.382.2.029.64

КАНЕВСКИЙ В. И., ПАК К. Н.

## **РАСЧЕТ ВАХ ОДНОЭЛЕКТРОННОГО ТРАНЗИСТОРА С НЕПРЕРЫВНЫМ СПЕКТРОМ ЭНЕРГИЙ В ОСТРОВКЕ**

Представлены результаты расчета ВАХ одноэлектронного транзистора с непрерывным спектром энергий в островке на основе ортодоксальной теории. Расчет кривых выполнен с использованием процедуры Монте-Карло.

Одноэлектронные транзисторы — многообещающая перспектива развития микроэлектроники. Они обеспечивают ультранизкие потребляемую мощность и рабочие напряжения новых электронных цепей одноэлектроники. Значительные усилия затрачены в последнее десятилетие, чтобы изучить физические принципы работы данного транзистора, причем указанное направление исследований достигло значительных результатов [1]. Технология изготовления этого транзистора также прошла длинный путь развития от отдельных металлических островков, работающих при гелиевых температурах до приборов, функционирующих при комнатных температурах [2].

Цель данной работы — описание модели и результатов расчета ВАХ одноэлектронного транзистора с непрерывным спектром энергий носителей в островке на основе ортодоксальной теории [3].

Моделирование транспорта носителей в транзисторе основано на анализе эквивалентной схемы данного прибора, состоящей из двух туннельных переходов, островка и управляющего электрода затвора, характеризующихся с помощью емкостей и сопротивлений. Расчет ВАХ выполнен путем использования процедуры Монте-Карло [4]. Существуют более точные подходы, описывающие транспорт носителей в одноэлектронном транзисторе, т. е. самосогласованное решение системы нелинейных уравнений, которая содержит уравнение

Шредингера, Пуассона и уравнения движения носителей [5]. Указанные методы позволяют детально описать транспорт носителей в транзисторе, но они практически непригодны для расчета цепей, содержащих несколько рассматриваемых приборов. Заметим, что транспорт носителей в указанных цепях является принципиально стохастическим процессом, зависящим от состояния

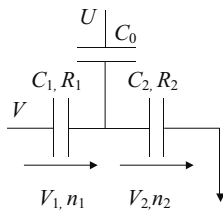


Рис. 1

туннельных переходов, являющихся одним из основных элементов данных цепей [6, 7].

Рассмотрим эквивалентную схему одноэлектронного транзистора, представленную на рис. 1. Смещение последовательно соединенных двух туннельных переходов обеспечивается с помощью источника напряжения  $V$ , причем смещение электрода затвора осуществляется с помощью источника напряжения  $U$ . Предполагая, что заряд электрона имеет положительный знак, поляризационные заряды первого перехода  $Q_1$ , второго перехода  $Q_2$ , емкости затвора  $Q_0$  и полный заряд в островке  $Q$  могут быть записаны как

$$Q_1 = C_1 * (V - V_2); Q_2 = C_2 * V_2; Q_0 = C_0 * (U - V_2),$$

$$Q = Q_2 - Q_1 - Q_0 = N * e + Q_{IND}, \quad (1)$$

где  $C_0, C_1, C_2$  — емкости затвора, первого и второго переходов;  $N = n_1 - n_2$  — избыточный заряд электронов в островке, причем число носителей, осуществивших туннелирование сквозь первый и второй электроды, соответственно равны  $n_1$  и  $n_2$  электронам.

Дополнительный заряд  $Q_{IND}$ , индуцированный в островке с помощью случайных емкостей, примесных центров, не показан на рис. 1. Предположим, что поляризационный заряд полностью не зависит от напряжений смещения. Используя соотношения (1), выражения для падения напряжений на туннельных переходах можно записать как [8]

$$V_2(N) = (C_1 * V + C_0 * U + N * e + Q_{IND}) / C_S, \quad (2)$$

$$V_1(N) = ((C_0 + C_2) * V - C_0 * U - N * e - Q_{IND}) / C_S, \quad (3)$$

где суммарная емкость транзистора  $C_S = C_0 + C_1 + C_2$ .

Выражение для суммарной электростатической энергии, запасенной в емкостях туннельных переходов и в емкости затвора, можно представить как

$$E_Q = \frac{Q_0^2}{2C_0} + \frac{Q_1^2}{2C_1} + \frac{Q_2^2}{2C_2} = \frac{Q^2}{2C_S} + \frac{C_0 C_1 (V - U)^2 + C_1 C_2 V^2 + C_0 C_2 U^2}{2C_S}. \quad (4)$$

Предположим, что величины напряжений на электродах внешних источников не изменяются даже в течение тех промежутков времени, в течение которых происходит туннелирование носителей сквозь барьеры. Чтобы рассчитать сво-

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Averin D. A., Likharev K. K.* Possible Applications of Single Charge Tunneling // Chapter 9 in *Single Charge Tunneling: Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures.*— Eds. H. Grabert and M. H. Devoret.— Plenum Press.— NATO ASI Series B: Physics.— Vol. 294.— 1992.
2. *Nakajima A., Futatsugi T., Kozemura K., Fukano T., Yokoyama N.* Room Temperature Operation of Si Single-Electron Memory with Self-Aligned Floating Dot Gate // *Appl. Phys. Lett.*— 1997.— Vol. 70.— No. 13.— P. 1742—1744.
3. *Likharev K. K.* Correlated Discrete Transfer of Single Electrons in Ultrasmall Tunnel Junctions // *IBM J. Res. Develop.*— 1988.— Vol. 32.— P. 144—158.
4. *Roy S. A.* Simulation Tools for the Analysis of Single Electronic Systems // PhD Thesis.— 1994.— University of Glasgow.
5. *Jovanovic D., Leburton J.-P.* Self-Consistent Analysis of Single-Electron Effects in Quantum-Dot Nanostructures // *Phys. Review B.*—1989.— Vol. 49.— No. 11.— P. 7474—7483.
6. *Amakawa S., Majima H., Fukui H., Fujishima M., Hoh K.* Single-Electron Simulation // *IEICE Trans. Electron.*— 1998.— Vol. E81-C.— No. 1.— P. 21—29.
7. *Yu Z., Dutton R. W., Kiehl R. A.* Circuit Device Modeling at the Quantum Level // *IEEE Trans. on Electron. Devices.*— 2000.— Vol. 47.— No. 10.— P. 1819—1825.
8. *Amman M., Mullen K.* The Charge-Effect Transistor // *J. Appl. Phys.*— 1989.— Vol. 65.— No. 1.— P. 339—346.
9. *Scholze A., Schenk A., Fichtner W.* Single-Electron Device Simulation // *IEEE, Trans. on Electron. Devices.*— 2000.— Vol. 47.— No. 10.— P. 1811—1818.
10. *Likharev K. K.* Single-Electron Transistors: Electrostatic Analogs of the DC SQUIDS // *IEEE Trans. on Magnetics.*— 1987.— Vol. MAG-23.— No. 2.— P. 1142—1145.
11. *Hanna A. E., Tinkham M.* Variation of the Coulomb Staircase in a Two-Junction System by Fractional Electron Charge // *Phys. Review B.*— 1991.— Vol. 44.— No. 11.— P. 5919—5922.
12. *Hirvi K. P., Paalanen M. A., Pekola J.P.* Numerical Investigation of One-Dimensional Tunnel Junction Arrays at Temperatures above the Coulomb Blockade Regime // *J. Appl. Phys.* — 1996.— Vol. 80.— No. 1.— P. 256—263.
13. *Kim J.-J., Lee J.-O., Kim J., Yoo K. H., Park J. W., Choi J. B.* Charge Transfer Study of Aluminum-based Single Electron Transistors Fabricated by using a Controlled Anodization Technique // *J. of the Korean Phys. Soc.*— 1998.— Vol. 33.— No. 6.— P. 750—754.

Национальный ун-т Чунгбук (Республика Корея). Поступила после переработки 20.10.03.