

# Учет фонового заряда на "островке" при моделировании одноэлектронных транзисторов

© И.И. Абрамов<sup>†</sup>, Е.Г. Новик

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
220027 Минск, Белоруссия

(Получена 8 августа 2000 г. Принята к печати 18 сентября 2000 г.)

Описаны три приближения для учета влияния фонового заряда на "островке" в предложенной двумерной численной модели металлического одноэлектронного транзистора. С их использованием можно получить хорошее согласование с экспериментом при расчете вольт-амперных характеристик одноэлектронных транзисторов по разработанной модели в самых разнообразных случаях. Показана эффективность применения приближений на конкретных примерах расчета вольт-амперных характеристик транзисторов.

## Введение

Актуальное направление нанoeлектроники — разработка и исследование приборных структур, функционирующих на эффекте одноэлектронного туннелирования. Большое внимание в настоящее время уделяется одноэлектронным транзисторам ввиду перспективности их использования для создания различных устройств, включая интегральные схемы более высокого уровня интеграции по сравнению с известными [1,2]. Исследование и разработка одноэлектронных транзисторов невозможны без адекватных моделей.

Наиболее известными моделями, которые предназначены для расчета электрических характеристик одноэлектронных транзисторов, являются модель, основанная на полуклассическом приближении и решении основного уравнения (master equation) [3], и модель, базирующаяся на методе Монте-Карло [4]. Они позволяют рассчитывать характеристики прибора на основе его эквивалентной схемы с учетом дискретности туннельных событий. Для получения соответствия экспериментальным данным при моделировании характеристик приборов и структур в различных моделях вводятся согласующие параметры. В известных моделях, упомянутых выше, в качестве таких параметров используются сопротивления и емкости туннельных переходов, емкость конденсатора затвора, а также фоновый заряд на "островке". В работах [5–7] была предложена двумерная численная модель металлического одноэлектронного транзистора в рамках полуклассического приближения, позволяющая рассчитать электрические характеристики прибора в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров структуры. Отметим, что в этой модели число согласующих параметров меньше: плотность состояний металлических электродов и фоновый заряд на островке. В ряде случаев, однако, удается получить хорошее соответствие с экспериментом при расчете по двумерной численной модели без учета фонового заряда, т.е. с использованием только одного согласующего параметра [5,6].

В данной статье приведено описание трех приближений для учета влияния фонового заряда на островке в предложенной двумерной численной модели и показана эффективность их применения.

## Учет фонового заряда

В известных полуклассических моделях [3,4] фоновый заряд рассматривается как некоторая постоянная  $Q_0 = N'_0 e$ , где  $e$  — заряд электрона. Количество избыточных носителей заряда на островке при этом определяется следующим образом:

$$N' = N'_t + N'_0, \quad (1)$$

где  $N'_t$  — число носителей заряда на островке, участвующих в туннелировании,  $N'_0$  может быть нецелым числом, согласуемым с экспериментом.

Разработанная модель основана на численном решении двумерного уравнения Пуассона (влияние магнитного поля на работу транзистора не учитывается), а именно [5–7],

$$\nabla \varepsilon \nabla \varphi(x, y) = -q_M, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость ( $\varepsilon = \varepsilon_m$  в области проводящего островка,  $\varepsilon = \varepsilon_i$  в области изолятора);  $\varphi$  — электростатический потенциал;  $q_M$  — объемная плотность зарядов, включающая плотность носителей заряда  $q_t$ , участвующих непосредственно в туннелировании, и плотность фонового заряда  $q_0$ . Была предложена конечно-разностная аппроксимация уравнения Пуассона (2) на основе интегро-интерполяционного подхода Тихонова–Самарского в сочетании с рядом физических предположений [6,7]. При этом проинтегрированная по площади  $S$  ячейки сетки пространственной дискретизации усредненная плотность избыточных зарядов на островке определялась в виде [7]

$$F = \iint_S q_M dS = \frac{N}{kL_{\text{char}}}, \quad (3)$$

где  $N$  — число избыточных носителей заряда, приходящихся на ячейку сетки пространственной дискретизации

<sup>†</sup> E-mail: device@micro.bsuir.edu.by,  
nanodev@bsuir.edu.by

площадью  $S$ ;  $k$  — постоянный коэффициент;  $L_{\text{char}}$  — размер островка в направлении переноса носителей заряда. Как показали исследования [7], наиболее целесообразные численные значения коэффициента  $k \in [1/6, 1/4]$ .

К сожалению, в действительности фоновый заряд распределен по островку случайным образом. Поэтому в общем случае практически невозможно дать для него истинное микроскопическое описание. Приводимые далее результаты показывают, что в этом нет особого смысла, по крайней мере в рамках полуклассического подхода. В разработанной двумерной численной модели с учетом очень малого количества дискретных зарядов, составляющих суть фонового заряда на островке, предлагаются следующие три подхода для учета его влияния.

В первом подходе предполагается, что распределение фонового заряда аналогично распределению заряда, участвующего в туннелировании. Тогда выражение (3) можно записать в виде

$$F = \frac{N_t + N_0}{kL_{\text{char}}}, \quad (4)$$

где  $N_t$ ,  $N_0$  — число избыточных носителей заряда, участвующих в туннелировании и определяющих фоновый заряд соответственно.

Второй подход отличается от предыдущего тем, что предполагается равномерное распределение фонового заряда по всей площади островка. В этом случае функцию  $F$  можно записать следующим образом:

$$F = \frac{N_t + N_0 S / L_x L_y}{kL_{\text{char}}}, \quad (5)$$

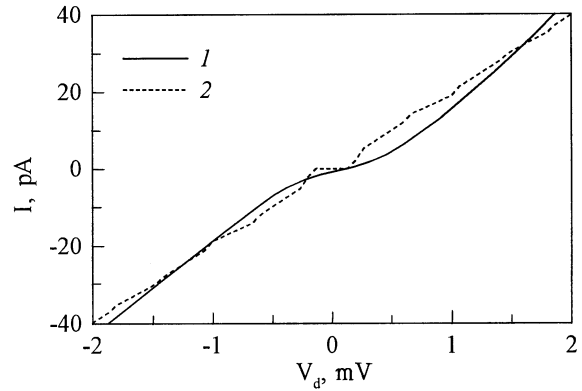
где  $L_x$  и  $L_y$  — длина и ширина островка соответственно. Здесь  $N_0$  — полное число избыточных носителей фонового заряда на островке.

Следует, однако, рассматривать возможность зависимости величины фонового заряда от режима работы транзистора, в частности от рабочего напряжения на стоке. В этом случае целесообразно представить число избыточных носителей заряда  $N$  в виде:  $N = k_f N_t$ , где  $k_f$  — коэффициент, учитывающий влияние фонового заряда и его зависимость от режима работы прибора. Следовательно, в третьем подходе  $k_f$  является согласующим параметром, зависящим от рабочего напряжения. Можно привести аналогичный пример согласующего параметра, зависящего от режима работы прибора, — коэффициент усиления биполярного транзистора. Таким образом, в третьем подходе выражение (3) примет вид

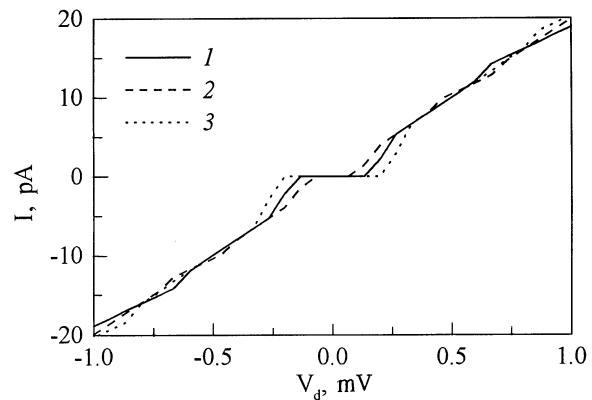
$$F = \frac{k_f N_t}{kL_{\text{char}}}. \quad (6)$$

## Результаты моделирования

Выбирая один из описанных подходов к аппроксимации фонового заряда на "островке", можно получить хорошее согласование с экспериментом при расчете



**Рис. 1.** Вольт-амперные характеристики одноэлектронного транзистора на основе туннельных переходов Al/AIO<sub>x</sub>/Al: 1 — экспериментальные данные [8], 2 — результаты расчета по двумерной численной модели.

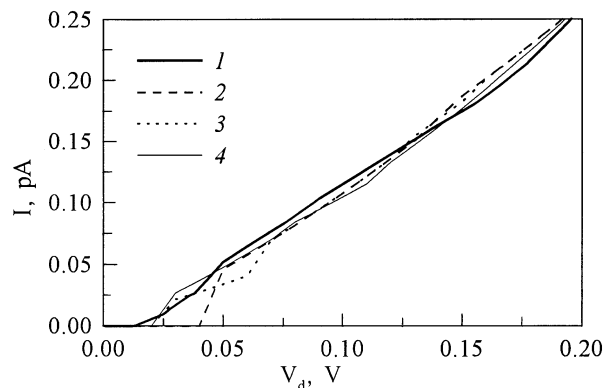


**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики одноэлектронного транзистора на основе туннельных переходов Al/AIO<sub>x</sub>/Al для различных значений фонового заряда на островке. Пояснения в тексте.

вольт-амперных характеристик (ВАХ) одноэлектронных транзисторов по предложенной двумерной численной модели в самых разнообразных случаях.

Рассмотрим несколько примеров. На рис. 1 представлена полученная в результате расчета по двумерной численной модели зависимость тока  $I$  от напряжения на стоке  $V_d$  для транзистора на основе туннельных переходов Al/AIO<sub>x</sub>/Al (кривая 2) в сравнении с экспериментальными данными [8] (кривая 1). Расчеты проведены для рабочей температуры 0.05 К. В данном случае был выбран третий подход к аппроксимации фонового заряда на островке, что позволило получить неплохое согласие с экспериментальными данными. Коэффициент  $k_f$ , учитывающий влияние фонового заряда на островке, был выбран постоянным.

Были также проведены расчеты ВАХ прибора для других значений фонового заряда. Полученные зависимости приведены на рис. 2. Кривая 2 соответствует наименьшему из выбранных значений фонового заряда



**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики одноэлектронного транзистора на основе туннельных переходов  $\text{Ti}/\text{TiO}_x/\text{Ti}$ :  $I$  — экспериментальные данные [9],  $2$  — результаты расчета без учета величины фонового заряда,  $3$  и  $4$  — результаты расчета с использованием первого (второго) и третьего подходов к аппроксимации распределения фонового заряда соответственно.

на острове, кривая  $3$  — наибольшему. Из рисунка можно видеть, что изменение величины фонового заряда существенным образом влияет на область кулоновской блокады (диапазон напряжений на стоке  $V_d$ , соответствующий нулевому значению тока) и мало влияет на величину тока. Необходимо отметить, что фоновый заряд в известной полуклассической модели [1] также оказывает сильное влияние на эту область.

Как было отмечено ранее, использование одного из предложенных подходов к аппроксимации распределения фонового заряда позволяет получить хорошее согласие с экспериментом. В ряде случаев, однако, можно использовать все три подхода, при этом результаты расчета ВАХ могут различаться не сильно. В качестве примера на рис. 3 приведены характеристики для транзистора на основе туннельных переходов  $\text{Ti}/\text{TiO}_x/\text{Ti}$ , соответствующие расчету по различным подходам (кривые  $3, 4$ ), а также расчету без учета величины фонового заряда (кривая  $2$ ), в сравнении с экспериментальными данными [9] (кривая  $1$ ). Результаты расчета с использованием первого и второго подходов совпадают с достаточно высокой степенью точности и соответствуют кривой  $3$ . Из рисунка можно также видеть, что характеристики, полученные с учетом фонового заряда, по сравнению с зависимостью без учета его влияния наиболее существенно различаются лишь областью кулоновской блокады.

## Заключение

Предложены три различных приближения для учета влияния фонового заряда на острове, использование которых позволяет получить хорошее согласие с экспериментом. Приведены примеры расчета ВАХ одноэлектронных транзисторов с использованием различных подходов, иллюстрирующие эффективность их применения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Республиканских научно-технических программ: "Низкоразмерные системы", "Нанoeлектроника" и гранта Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь (№ Ф99М-074).

## Список литературы

- [1] *Single Charge Tunneling: Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures*, ed. by H. Grabert, M.H. Devoret [NATO ASI Series B: Physics (N.Y., Plenum, 1992) v. 294].
- [2] И.И. Абрамов, В.Г. Новик. ФТП, **33** (11), 1388 (1999).
- [3] M. Amman, K. Mullen. J. Appl. Phys., **65**, 339 (1989).
- [4] R.H. Chen, K.K. Likharev. Appl. Phys. Lett., **72**, 61 (1998).
- [5] И.И. Абрамов, Е.Г. Новик. ФТП, **34** (8), 1014 (2000).
- [6] И.И. Абрамов, Е.Г. Новик. Письма ЖТФ **26** (16), 63 (2000).
- [7] И.И. Абрамов, Е.Г. Новик. *Численное моделирование металлических одноэлектронных транзисторов* (Минск, Бестпринт, 2000).
- [8] M. Götz, K. Blüthner, W. Krech, A. Nowack, H.-J. Fuchs, E.-B. Kley, P. Thieme, Th. Wagner, G. Eska, K. Hecker, H. Hegger. J. Appl. Phys., **78**, 5499 (1995).
- [9] K. Matsumoto, M. Ishii, K. Segawa, Y. Oka, B.J. Vartanian, J.S. Harris. Appl. Phys. Lett., **68**, 34 (1996).

Редактор Л.В. Шаронова

## Background charge approximations for single-electron transistor modeling

I.I. Abramov, E.G. Novik

Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics,  
220027 Minsk, Belarus

**Abstract** Three background charge approximations for the metal single-electron transistor simulation with employment of the developed two-dimensional numerical model are presented. The current-voltage characteristics of real transistors with these approximations were calculated. Good agreement with the experimental data was obtained.