

06;12

Модель одноэлектронного транзистора, основанная на численном решении уравнения Пуассона

© И.И. Абрамов, Е.Г. Новик

Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, Минск

Поступило в Редакцию 25 декабря 1998 г.

В окончательной редакции 25 октября 1999 г.

Предложена численная модель металлического одноэлектронного транзистора, основанная на решении уравнения Пуассона. Показано, что разработанная модель позволяет получить хорошее согласование с экспериментальными данными по вольт-амперным характеристикам при ненулевых температурах окружающей среды.

В настоящее время при моделировании одноэлектронных транзисторов (ОЭТ) традиционно используются полуклассические модели [1]. Общим для них недостатком является использование в качестве согласующих с экспериментальными данными параметрами емкостей и сопротивлений туннельных переходов, которые не рассчитываются. Результат этого — слабая связь моделей с конкретной конструкцией и электрофизическими параметрами материалов ОЭТ, что затрудняет прогнозирование электрических характеристик данного вида приборов.

В связи с изложенным целью данной статьи является разработка модели, в которой в качестве исходных используются геометрические и электрофизические параметры ОЭТ.

Анализ литературных данных показывает, что большинство ОЭТ может быть представлено принципиальной структурной схемой, приведенной на рис. 1 [2], поэтому в статье рассмотрена структура именно такого вида.

В рамках полуклассического приближения при расчете вольт-амперных характеристик одноэлектронных структур можно использовать основное уравнение (master equation) [3]. В результате для токов через

туннельные переходы стока и истока можем записать:

$$\begin{aligned} \partial\rho(n)/\partial t = & (\overleftarrow{T}_1^\rightarrow(n-1) + \overleftarrow{T}_2^\rightarrow(n-1))\rho(n-1) + (\overleftarrow{T}_1^\leftarrow(n+1) + \overleftarrow{T}_2^\leftarrow(n+1)) \\ & \times \rho(n+1) - (\overrightarrow{T}_1^\rightarrow(n) + \overleftarrow{T}_1^\leftarrow(n))\rho(n) - (\overrightarrow{T}_2^\rightarrow(n) + \overleftarrow{T}_2^\leftarrow(n))\rho(n). \end{aligned} \quad (1)$$

Тогда полный ток через структуру имеет вид

$$I = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \rho(n)(\overrightarrow{T}_1^\rightarrow(n) - \overleftarrow{T}_1^\leftarrow(n)) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \rho(n)(\overrightarrow{T}_2^\rightarrow(n) - \overleftarrow{T}_2^\leftarrow(n)). \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) $\overrightarrow{T}_1^\rightarrow$, $\overleftarrow{T}_1^\leftarrow$ — токи через туннельный переход стока в прямом и обратном направлениях; $\overrightarrow{T}_2^\rightarrow$, $\overleftarrow{T}_2^\leftarrow$ — токи через туннельный переход истока; $\rho(n)$ — вероятность нахождения n избыточных носителей на "островке".

Напряжения на туннельных переходах находятся с учетом результатов расчета распределения электростатического потенциала φ и значений контактных разностей потенциалов в структуре. Сопротивления

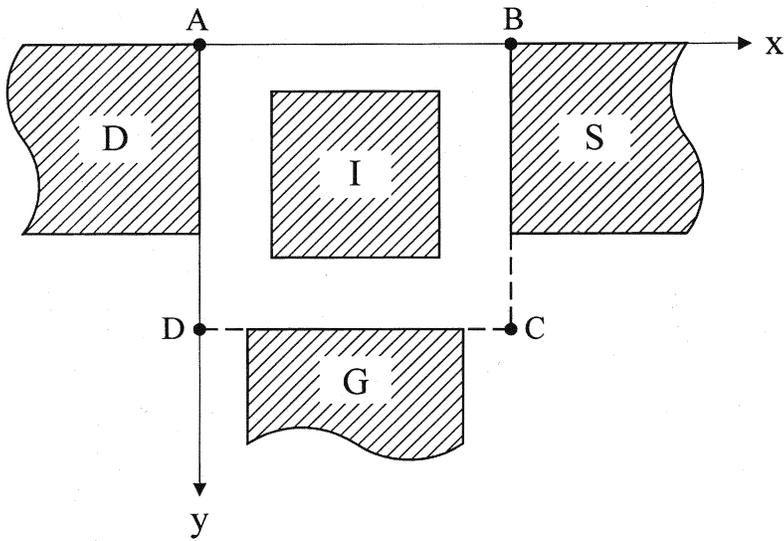


Рис. 1. Структура моделируемого прибора: D — сток, I — "островок", S — исток, G — затвор.

туннельных переходов вычисляются согласно известным соотношениям [4,5].

В предположении пренебрежимого влияния магнитного поля на работу транзистора электростатический потенциал находится из решения уравнения Пуассона:

$$\nabla \varepsilon \nabla \varphi = -q_M, \quad (3)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость; q_M — объемная плотность заряда. В работе также предполагается электронейтральность плазмы на "островке", за исключением избыточных свободных носителей заряда. Заряды в диэлектрике не учитываются. Следовательно, q_M определяется только усредненной плотностью избыточных зарядов непосредственно на "островке". Уравнение (3) с учетом принятых предположений решается в активной области транзистора между стоком, истоком и затвором (двумерная область ABCD на рис. 1). В качестве краевых условий используются граничные условия Дирихле на контактах и условия Неймана на свободных границах.

Для конечно-разностной аппроксимации уравнения Пуассона (3) использовался интегроинтерполяционный подход Тихонова–Самарского [6]. Все величины нормировались в соответствии с коэффициентами работы [6]. Решение системы линейных алгебраических уравнений, получаемой после конечно-разностной аппроксимации, осуществляется с использованием метода матричной прогонки [7].

Предложенная полуклассическая двумерная численная модель ОЭТ была положена в основу программы, написанной на языке Паскаль для ЭВМ типа IBM PC/AT и включенной в комплекс программ моделирования нанoeлектронных приборов NANODEV [8]. С использованием программы были проведены расчеты вольт-амперных характеристик реального металлического ОЭТ [9] на основе Ti/TiO_x/Ti-туннельных переходов при ненулевой температуре $T = 103$ К. Результаты расчета по предложенной модели, как видно на рис. 2, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Для сравнения на этом же рисунке приведена зависимость, полученная при расчете по программе MOSES [10]. Время расчета вольт-амперной характеристики по разработанной программе составляет ~ 3 min, а по программе MOSES — около 20 min на ЭВМ Pentium 200.

Проведем анализ причин отклонения результатов расчетов по разработанной численной модели и модели, основанной на методе Монте-Карло и реализованной в программе MOSES [10], от экспериментальных

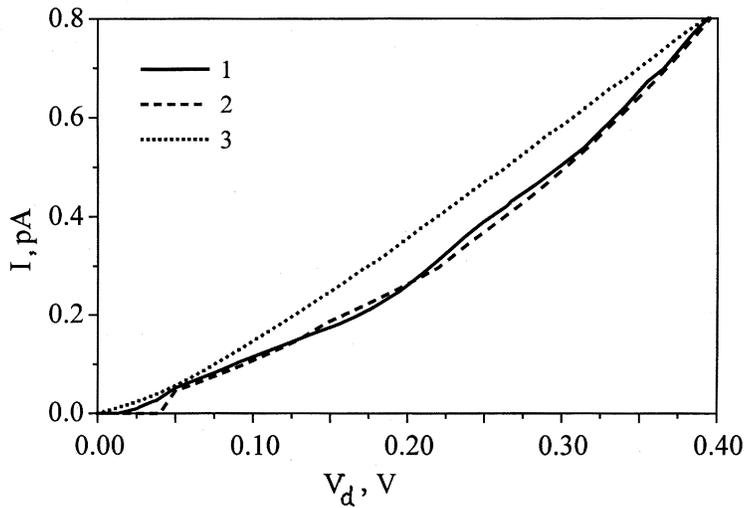


Рис. 2. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными: 1 — экспериментальные данные; 2 — результаты расчета по предложенной модели; 3 — результаты расчета по программе MOSES.

данных. В предложенной модели при расчете электрических характеристик прибора учитывается двумерное распределение потенциала в структуре, полученное при решении уравнения Пуассона. В известных моделях [1,10] распределение потенциала задается для одномерного случая независимо от конструкции, исходя из значений контактных разностей потенциалов. Поэтому разработанная модель позволяет получить лучшее согласование с экспериментом по сравнению с ними. Небольшое отклонение от экспериментальных данных можно объяснить тем, что в модели не учитываются паразитные эффекты. Следует, однако, отметить, что они не учитываются и в известных полуклассических моделях.

Таким образом, разработана полуклассическая двумерная численная модель металлического ОЭТ, основанная на решении уравнения Пуассона, позволяющая получить хорошее согласование с экспериментальными данными по вольт-амперным характеристикам. Модель целесообразно использовать для прогнозирования электрических характеристик рассмотренного вида приборов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Республиканских научно-технических программ: "Информатика", "Низкоразмерные системы" и "Нанoeлектроника".

Список литературы

- [1] *Single Charge Tunneling: Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures* / Ed. by H. Grabert, M.H. Devoret // NATO ASI Series B: Physics Plenum, New York, 1992. V. 294.
- [2] *Абрамов И.И., Новик Е.Г.* // Изв. Белорусской инженерной академии. 1998. № 2 (6)/2. С. 4–8.
- [3] *Likharev K.K.* // IEEE Trans. Magn. 1987. V. MAG-23. N 2. P. 1142–1145.
- [4] *Simmons J.G.* // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. N 6. P. 1793–1803.
- [5] *Fukui H., Fujishima M., Hoh K.* // Jpn. Appl. Phys. 1997. V. 36. Part 1. N 6B. P. 4147–4150.
- [6] *Абрамов И.И., Харитонов В.В.* Численное моделирование элементов интегральных схем. Минск: Высш. школа, 1990. 224 с.
- [7] *Самарский А.А., Николаев Е.С.* Методы решения сеточных уравнений. М., Наука. 1978. 592 с.
- [8] *Абрамов И.И., Гончаренко И.А., Новик Е.Г.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 8. С. 16–19.
- [9] *Matsumoto K., Ishii M., Segawa K.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. N 1. P. 34–36.
- [10] *Chen R.H., Likharev K.K.* // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. N 1. P. 61–63.