

06;12

## О рабочей температуре одноэлектронных транзисторов

© И.И. Абрамов, И.А. Гончаренко, Е.Г. Новик

Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники, Минск

Поступило в Редакцию 25 ноября 1997 г.

Описан модифицированный подход оценки рабочей температуры одноэлектронных транзисторов, приводящий к расчетам, удовлетворительно согласующимся с экспериментальными данными.

Предметом интенсивных теоретических и экспериментальных исследований становятся структуры на основе эффекта одноэлектронного туннелирования [1]. Перспективным прибором этого вида является одноэлектронный транзистор (ОЭТ). Оценка рабочей температуры ОЭТ является одной из главных задач при разработке прибора, поскольку ее значение существенно зависит от размеров структуры.

В настоящее время известен подход [2], позволяющий получить оценку рабочей температуры в зависимости от физической геометрии и размеров структуры. Используются две различающиеся модели прибора: в первой модели — плоская, во второй — сферическая конфигурация прибора. Соответственно емкости туннельных переходов структуры рассчитываются по известным соотношениям для плоского и сферического конденсаторов. Проводимость переходов определяется по модели Симмонса [3] для простейшего случая — прямоугольной формы потенциальных барьеров. Таким образом, в работе [2] используются упрощенные модели, приводящие к погрешностям в оценке рабочей температуры ОЭТ.

Кроме того, вводится ряд параметров (назовем их "параметрами неопределенности"), численные значения которых выбираются достаточно произвольно. Отмеченные недостатки, по-видимому, и являются основной причиной пессимистических оценок рабочей температуры ОЭТ [2]. По сравнению с ними экспериментальные данные выглядят гораздо более обнадеживающими [4–6].

В данной работе осуществлена попытка устранить отмеченные недостатки оценки рабочей температуры ОЭТ. Для этого при расчете емкости и проводимости туннельных переходов прибора использовались более адекватные модели. Опишем кратко произведенные модификации.

Так, при вычислении емкости переходов  $C$  учитывалось распределение потенциала не только в диэлектрическом слое, но и на металлических электродах [7]

$$C = \left( \frac{s}{\varepsilon_d \cdot A} + \frac{2.3 \cdot L}{\varepsilon_m \cdot A} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_d$ ,  $\varepsilon_m$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика и материала электродов соответственно;  $s$  — толщина диэлектрика;  $L$  — характерная глубина проникновения электрического поля в металл;  $A$  — площадь туннельного перехода.

При вычислении проводимости переходов использовалась гиперболическая аппроксимация формы потенциального барьера [3], более адекватная реальному случаю, а именно:

$$\phi(x) = \phi_s - 1.15 \cdot \frac{\lambda \cdot s^2}{x(s-x)}; \quad \lambda = \frac{e^2 \cdot \ln 2}{8 \cdot \pi \cdot \varepsilon_d \cdot s}, \quad (2)$$

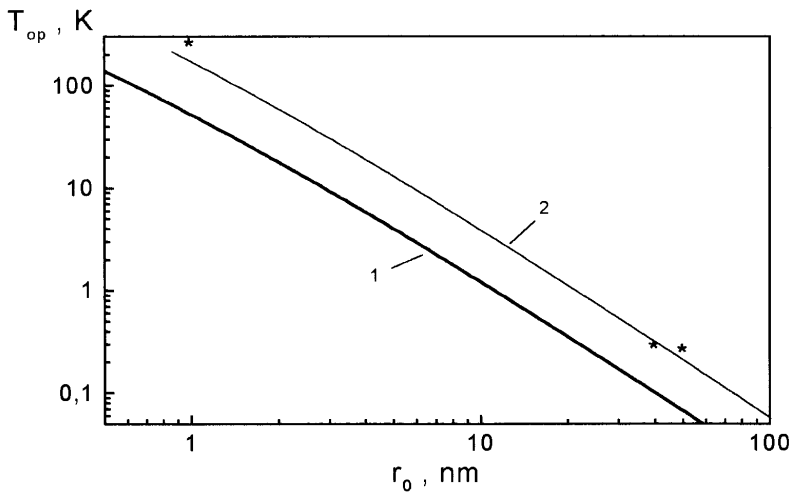
где  $\phi_s$ ,  $x$  — параметры барьера,  $e$  — заряд электрона.

Третья модификация [2] заключается в следующем. Вместо фиксированных численных значений "параметров неопределенности" был исследован диапазон их возможного изменения. В [2] используются два таких параметра.

Параметр  $\xi$  определяет величину эффективной проводимости туннельных переходов:

$$G = \frac{4 \cdot e^2}{\xi \cdot h}, \quad (3)$$

где  $h$  — постоянная Планка. Для него был исследован следующий диапазон изменения  $\xi \in [4; 10]$ . Нижняя граница (минимальное значение  $\xi$ ) диапазона выбрана исходя из требования, предъявляемого к сопротивлению туннельного перехода, — оно должно превышать величину квантового сопротивления  $h \cdot e^{-2} \approx 25.8 \text{ k}\Omega$  [8]. Верхняя граница (максимальное значение  $\xi$ )  $\xi = 10$  взята исходя из данных работы [9].



Зависимость рабочей температуры от радиуса проводящего "островка": 1 — результаты расчета согласно [2]; 2 — результаты расчета в рамках модифицированного подхода; \* — экспериментальные данные.

Второй "параметр неопределенности"  $\eta$  используется при вычислении рабочей температуры ОЭТ:

$$T_{op} = \frac{T_0}{\eta}, \quad (4)$$

где  $T_0$  — значение температуры, выше которого термические флуктуации подавляют эффект одноэлектронного туннелирования, рассчитываемое согласно работе [2]. При задании  $\eta$  существуют подобные неопределенности, поэтому исследовался тот же диапазон:  $\eta \in [4; 10]$ .

В рамках [2] и с учетом принятых модификаций проведены расчеты предельной рабочей температуры ОЭТ в зависимости от радиуса проводящего "островка"  $r_0$  транзистора (рис. 1) с использованием комплекса программ моделирования нанoeлектронных приборов NANODEV [10]. Вычисления осуществлены в рамках сферической модели прибора. График 1 соответствует расчетам согласно [2], в котором оба параметра равны 10. Второй получен с учетом введенных модификаций и при  $\xi = 10$ ,  $\eta = 4$ . Как видно из рисунка, последняя зависимость

неплохо согласуется с экспериментальными данными [4–6]. Заметим, что график 2 соответствует наилучшему согласованию с экспериментом из исследованных диапазонов значений  $\xi$  и  $\eta$ .

Таким образом, введенные в известную оценку модификации рабочей температуры ОЭТ позволяют получить удовлетворительное согласование с экспериментом при следующих различающихся значениях ”параметров неопределенности”  $\xi = 10$ ,  $\eta = 4$ .

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Республиканской межвузовской программы фундаментальных исследований в области естественных наук ”Физические основы получения, диагностики, функционирования и применения низкоразмерных элементов и систем”, грант 04.04.

## Список литературы

- [1] *Single Charge Tunneling: Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures* / Ed. by Grabert H. and Devoret M. // NATO ASI Ser. B: Physics. V. 294. Plenum, New York, 1992.
- [2] *Lutwyche M.I., Wada Y.* // J. Appl. Phys. 1994. V. 75. N 7. P. 3654–3661.
- [3] *Simmons J.G.* // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. N 6. P. 1793–1803.
- [4] *Солдатов Е.С., Ханин В.В.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 64. В. 7. С. 510–514.
- [5] *Gotz M., Blüthner K.* et al. // J. Appl. Phys. 1995. V. 78. N 9. P. 5499–5502.
- [6] *Ali D., Ahmed H.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. N 16. P. 2119–2120.
- [7] *Ku H.Y., Ullman F.G.* // J. Appl. Phys. 1964. V. 35. N 2. P. 265–267.
- [8] *Averin D.V., Likharev K.K.* // J. Low Temp. Phys. 1986. V. 62. N 3/4. P. 345–373.
- [9] *Fulton T.A., Dolan G.J.* // Phys. Rev. Lett. 1987. V 59. N 1. P. 109–112.
- [10] *Novik E.G., Sheremet I.V., Ivashkevich S.S., Abramov I.I.* // Physics Chemistry and Application of Nanostructures. World Scientific, Singapore, 1997. P. 317–321.