

# Характеристики многоостровковых одноэлектронных цепочек в зависимости от различных факторов

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

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
220013 Минск, Белоруссия

(Получена 6 февраля 2003 г. Принята к печати 10 февраля 2003 г.)

Проведен теоретический анализ характеристик многоостровковых одноэлектронных цепочек в зависимости от параметров конструкции, материалов, фонового заряда и температуры окружающей среды с помощью разработанной модели, основанной на решении уравнения Пуассона и использовании метода Монте-Карло. Показано, что основным параметром, определяющим температурную стабильность эффекта кулоновской блокады, является высота потенциального барьера туннельных переходов. Исследования трех систем материалов (Co–Al–O; Au–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Cr–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) показало, что наиболее предпочтительны по рабочей температуре многоостровковые одноэлектронные цепочки на Co–Al–O, а наименее — на Cr–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## 1. Введение

Многоостровковые одноэлектронные цепочки туннельных переходов перспективны для построения самых разнообразных приборных структур нанoeлектроники [1–4]. Их основными преимуществами по сравнению с одноостровковыми одноэлектронными транзисторами являются: большее пороговое напряжение кулоновской блокады при одинаковых с транзисторами размерах островков и туннельных переходов и, как следствие, большая рабочая температура, характеристики менее чувствительны к паразитному эффекту котуннелирования, а также к неизбежному разбросу основных геометрических размеров (островков, туннельных переходов и др.).

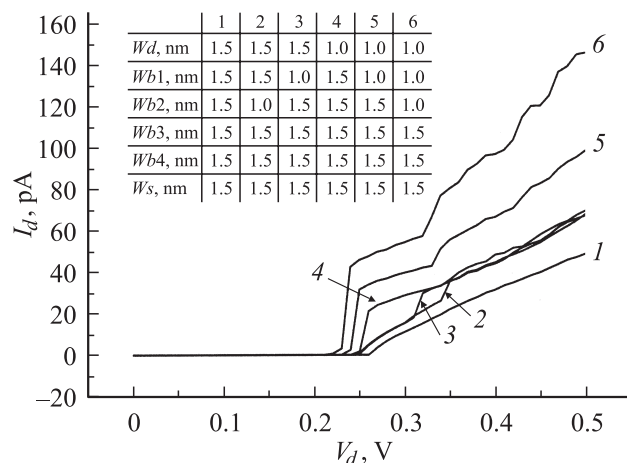
Как правило, в моделях многоостровковых одноэлектронных цепочек согласующими с экспериментом параметрами являются емкости и сопротивления туннельных переходов. В результате во многом утрачивается связь с физикой процессов, протекающих в данных приборных структурах. В статьях [5,6] были предложены модели двух- и многоостровковых одноэлектронных цепочек на базе решения уравнения Пуассона, а также либо решения основного уравнения (master equation), либо использования метода Монте-Карло, которые в определенной степени лишены отмеченного недостатка.

Цель работы — теоретический анализ характеристик многоостровковых одноэлектронных цепочек в зависимости от параметров конструкции, материалов, фонового заряда и температуры окружающей среды с помощью предложенной модели [6], основанной на решении уравнения Пуассона и использовании метода Монте-Карло.

## 2. Влияние параметров конструкции, материалов и фонового заряда

Проанализируем сначала влияние параметров конструкции и материалов на стоковые вольт-амперные характеристики (ВАХ) пятиостровковой одноэлектронной цепочки на основе наночастиц AuPd работы [7].

На рис. 1 показано влияние изменения ширин туннельных переходов на ВАХ приборной структуры. Для определенности основные закономерности установлены при уменьшении ширины (ширин) с 1.5 до 1.0 нм. Вследствие возможности большого количества комбинаций на рис. 1 представлены лишь наиболее характерные результаты. В таблице на вставке указаны соответствующие ширины.



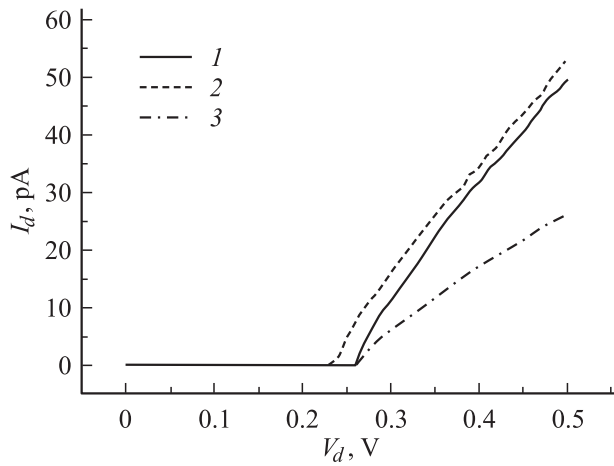
**Рис. 1.** Влияние ширин туннельных переходов на ВАХ пятиостровковой цепочки. Соответствующие ширины указаны в таблице на вставке:  $W_d$  — ширина перехода сток–островок 1,  $W_{b1}$  — ширина перехода островок 1–островок 2 и т.д.,  $W_s$  — ширина перехода островок 5–исток. Номера кривых соответствуют номерам столбцов в таблице.

Выделим следующие характерные черты.

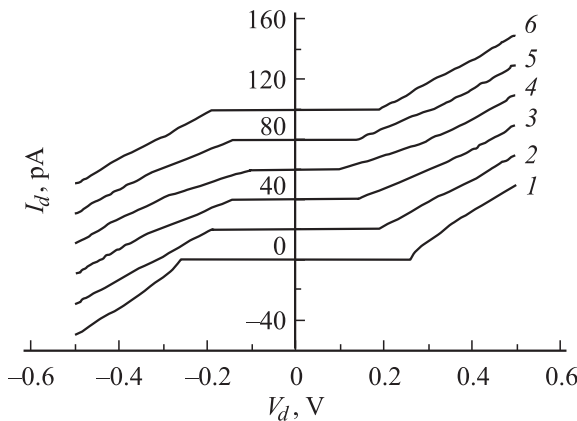
1. При неодинаковых размерах ширин на ВАХ наряду с кулоновской блокадой появляется кулоновская лестница. Последнее объясняется появлением устойчивых комбинаций избыточных носителей на островках, причем каждой ступеньке соответствует определенная устойчивая комбинация.

2. С уменьшением ширины туннельного перехода и увеличением количества таких переходов проходящий ток увеличивается. Объясняется это увеличением

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



**Рис. 2.** Влияние параметров материала ( $\epsilon_d$  и  $\phi$ ) на ВАХ пятиостровковой цепочки: 1 —  $\epsilon_d = 10$ ,  $\phi = 1.5$  эВ; 2 —  $\epsilon_d = 11$ ,  $\phi = 1.5$  эВ; 3 —  $\epsilon_d = 10$ ,  $\phi = 1.6$  эВ.



**Рис. 3.** Влияние фонового заряда на ВАХ пятиостровковой цепочки. 1 — для случая всех нулевых фоновых зарядов; 2–6 соответствуют числу фоновых зарядов  $N_{0i} = 0.5$  только на одном островке с номером, меньшим на единицу. При этом на всех остальных островках фоновые заряды — нулевые. 2–6 приведены со сдвигом с шагом 20 пА.

вероятности туннелирования электронов через соответствующий потенциальный барьер (барьеры).

3. С увеличением количества переходов с малой шириной область кулоновской блокады уменьшается (кривые 4–6). В то же время расположение перехода с наименьшей шириной не влияет на область блокады (кривые 2–4). Эти характерные черты объясняются соответствующим перераспределением напряжений, падающих на туннельных переходах системы.

На рис. 2 показано влияние относительной диэлектрической проницаемости изолятора  $\epsilon_d$  и высоты потенциальных барьеров туннельных переходов  $\phi$  на ВАХ. Кривая 1 получена при  $\epsilon_d = 10$  и  $\phi = 1.5$  эВ, кривая 2 — при  $\epsilon_d = 11$  и  $\phi = 1.5$  эВ, кривая 3 — при  $\epsilon_d = 10$  и  $\phi = 1.6$  эВ. Видно, что ВАХ наиболее чувствительны к изменению высоты потенциальных барьеров. Объясняется это существенным уменьшением вероятности тун-

нелирования электронов через потенциальные барьеры большей высоты. Уменьшение же области кулоновской блокады при увеличении  $\epsilon_d$  объясняется перераспределением напряжений в структуре. Данные закономерности влияния параметров материалов на стокровые ВАХ пятиостровковой цепочки хорошо согласуются с установленными для двухостровковых цепочек [5].

На рис. 3 приведено семейство ВАХ пятиостровковой одноэлектронной цепочки для различных значений фоновых зарядов на островках. Видно, что фоновый заряд изменяет область кулоновской блокады. Для кривой 1 (с нулевыми фоновыми зарядами) она максимальна ( $\sim 0.26$  В), а при числе фонового заряда  $N_{0,3} = 0.5$  на центральном островке — минимальна ( $\sim 0.1$  В). Эта характерная черта согласуется с известными данными для одноэлектронных структур [1] и объясняется изменением электростатической энергии системы, а следовательно, модифицируются условия наступления кулоновской блокады.

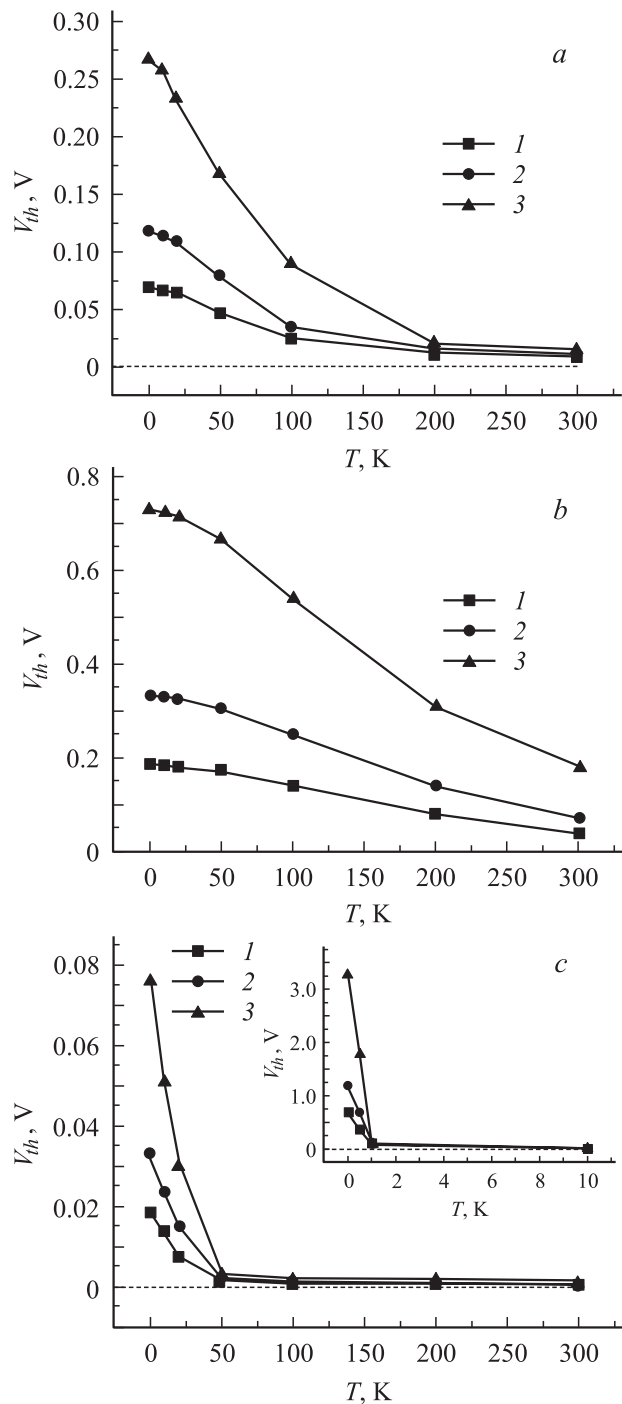
### 3. Пороговое напряжение и предельная рабочая температура

Под предельной рабочей температурой  $T_{op}$  понимается температура, при которой пороговое напряжение кулоновской блокады  $V_{th}$  имеет ненулевое значение.

В качестве объектов исследования были выбраны одно-, двух- и пятиостровковые цепочки на трех перспективных системах материалов, а именно Au–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Co–Al–O, Cr–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Для расчета ВАХ одно- и двухостровковых цепочек использовалась модель [5], базирующаяся на основном уравнении, а для пятиостровкового случая — модель на основе метода Монте-Карло [6].

Для получения наиболее достоверных оценок  $T_{op}$  сначала было проведено сравнение расчетов ВАХ с экспериментальными результатами. С этой целью использовались данные статьи [8] для двухостровковой цепочки на системе Au–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, статьи [9] для двухостровковой цепочки на системе Co–Al–O и статьи [10] для одноостровкового транзистора на Cr–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Наиболее важными параметрами материалов для последующего анализа являются высота потенциального барьера  $\phi$  и относительная диэлектрическая проницаемость изолятора  $\epsilon_d$ . Геометрические размеры островков и ширины туннельных переходов соответствуют используемым для отмеченных выше реальных цепочек [8–10]. Установленные параметры согласования модели с экспериментом применялись свои для каждой из систем материалов. В расчетах использовались следующие параметры материалов систем:  $\phi = 1.65$  эВ,  $\epsilon_d = 9$  (для Au–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>);  $\phi = 2.0$  эВ,  $\epsilon_d = 9$  (для Co–Al–O);  $\phi = 0.17$  эВ,  $\epsilon_d = 12$  (для Cr–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Таким образом, наиболее важное отличие между системами заключается в величине потенциального барьера туннельного перехода.



**Рис. 4.** Зависимость  $V_{th}$  от температуры для одноэлектронных цепочек с одним (1), двумя (2) и пятью (3) островками систем: *a* — Au-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *b* — Co-Al-O, *c* — Cr-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

На рис. 4 приведены результаты расчета  $V_{th}$  для различных цепочек для исследуемых систем. На их основе можно сделать следующие выводы: 1) пороговое напряжение увеличивается с ростом числа островков, 2) с увеличением температуры  $V_{th}$  уменьшается. Эти выводы полностью согласуются с известными экспериментальными [11] и теоретическими [12] данными. Первый

вывод объясняется тем, что с увеличением количества островков необходимо подавать большее напряжение, чтобы преодолеть область блокады дополнительных туннельных переходов системы. В свою очередь увеличение температуры приводит к росту термических флуктуаций, а следовательно, кулоновская блокада происходит в меньшем диапазоне напряжений (вывод 2). Следствиями первого и второго выводов является то, что многоостровковые цепочки более устойчивы к влиянию температуры (см. рис. 4). Поэтому их и имеет смысл использовать для построения высокоинтегрированных систем.

Оценим  $T_{op}$  для рассматриваемых цепочек. Для первой системы (Au-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, рис. 4, *a*)  $V_{th}$  имеет малые значения уже при  $T = 200$  К. Отметим, что это значение температуры хорошо согласуется с данными [12] для подобной системы (Au-SiO<sub>2</sub>,  $T_{op} = 185$  К). Заметим, что для исследуемой системы  $V_{th}$  имеет все же ненулевое значение и при  $T = 300$  К, однако оно очень мало даже для пятиостровковой цепочки (рис. 4, *a*). Наиболее устойчивой из исследуемых систем к влиянию температуры является вторая система (Co-Al-O, рис. 4, *b*). Так,  $V_{th} = 0.21$  В при  $T = 300$  К для пятиостровковой цепочки. Следовательно, данная приборная структура может функционировать и при комнатной температуре, что согласуется с экспериментальными данными работы [9] для двухостровковой цепочки. Наименее устойчивой к влиянию температуры из исследуемых систем является третья система (Cr-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, рис. 4, *c*, вставка). Оцениваемая  $T_{op}$  около 10 К, хотя  $V_{th}$  очень мало уже при  $T = 1$  К (рис. 4, *c*, вставка). Заметим, что эти данные приведены для размеров островков  $20 \times 20$  нм. Результаты же рис. 4, *a* и *b* приведены для гораздо меньших значений. Поэтому на рис. 4, *c* даны также результаты прогноза для системы Cr-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для сравнения с приведенными на рис. 4, *a* и *b* размерами островков, в частности  $4 \times 4$  нм. Видно, что с уменьшением их размеров  $V_{th}$  увеличивается, а  $T_{op}$  возрастает, что согласуется с известными данными [1]. Как следует из рис. 4, *c*,  $V_{th}$  уже незначительно для Cr-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в данном случае при  $T = 50$  К.

Приведенные результаты позволяют расположить исследованные системы в следующем порядке: 1) Co-Al-O, 2) Au-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3) Cr-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Наиболее устойчивой к влиянию температуры является система Co-Al-O, а наименее — Cr-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Обращает на себя внимание то, что наибольшей устойчивостью к влиянию температуры характеризуется система с максимальной величиной высоты барьера  $\phi$ . Объяснить это можно большей устойчивостью к влиянию термических флуктуаций систем с более высокими потенциальными барьерами туннельных переходов. В то же время термические флуктуации являются основным фактором, приводящим к разрушению области кулоновской блокады с ростом температуры.

Из наших результатов следует, что  $V_{th}$  зависит от  $\phi$  и при  $T \rightarrow 0$  К (см. рис. 4). Традиционно же считалось,

что в этом случае  $V_{th}$  должно зависеть только от емкостей переходов [1,12]. Причина этого расхождения связана, с одной стороны, со сложностью экстраполяции параметров согласования с экспериментом на эту область температур, а с другой — с тем, что согласование с экспериментом проведено для различных геометрических размеров цепочек и значений фоновых зарядов ввиду недостаточности экспериментальных данных. Здесь необходимо, однако, указать и на то, что в реальной системе ток при  $V \neq 0$  проходит всегда и в области кулоновской блокады, хотя он и очень мал. Поэтому энергия системы в области кулоновской блокады, строго говоря, будет определяться не только емкостными характеристиками системы, но и проходящими токами, которые во многом зависят от высоты потенциальных барьеров переходов и температуры.

#### 4. Заключение

Проведенный с использованием предложенных моделей анализ позволил объяснить изменение функционирования многоостровковых одноэлектронных цепочек при вариации параметров их конструкции и материалов, а также фоновых зарядов на островках. Показано, что основным параметром, определяющим температурную стабильность эффекта кулоновской блокады в одноэлектронных цепочках, является высота потенциального барьера туннельных переходов. Определены предельные рабочие температуры трех систем материалов, а именно Co–Al–O; Au–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Cr–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Установлено, что наиболее предпочтительны по рабочей температуре многоостровковые одноэлектронные цепочки на Co–Al–O, а наименее — на Cr–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке республиканских программ научных исследований „Электроника“, „Наноэлектроника“ и гранта Министерства образования Республики Беларусь.

#### 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, Е.Г. Новик. ФТП, **33** (11), 1388 (1999).
- [3] И.И. Абрамов, Е.Г. Новик. *Численное моделирование металлических одноэлектронных транзисторов* (Минск, Бестпринт, 2000).
- [4] *Technology Roadmap for Nanoelectronics*, ed. by R. Compano (European Commission, IST programme, Future and Emerging Technologies, 2000).
- [5] И.И. Абрамов, С.А. Игнатенко, Е.Г. Новик. ФТП, **36** (10), 1272 (2002).
- [6] И.И. Абрамов, С.А. Игнатенко, Е.Г. Новик. ФТП, **37**, 583 (2003).
- [7] H. Ahmed. J. Vac. Sci. Technol. B, **15** (6), 2101 (1997).
- [8] E. Bar-Sadeh, Y. Goldstein, M. Wolovelsky, D. Porath, C. Zhang, H. Deng, B. Abeles, O. Millo. J. Vac. Sci. Technol. B, **13** (3), 1084 (1995).

- [9] H. Imamura, J. Chiba, S. Mitani, K. Takanashi, S. Takahashi, S. Maekawa, H. Fujimori. Phys. Rev. B, **61** (1), 46 (2000).
- [10] L.S. Kuzmin, Yu.A. Pashkin, A.N. Tavkhelidze, F.-J. Ahlers, T. Weimann, D. Quenter, J. Niemeyer. Appl. Phys. Lett., **68** (20), 2902 (1996).
- [11] A. Bezryadin, R.M. Westervelt, M. Tinkham. Appl. Phys. Phys. Lett., **74** (18), 2699 (1999).
- [12] A.S. Cordan, Y. Leroy, A. Goltzene, A. Pepin, C. Vieu, M. Mejias, H. Launois. J. Appl. Phys., **87** (1), 345 (2000).

Редактор Л.В. Беляков

#### Influence of a variety of factors on characteristics of multiple-island single-electron arrays

I.I. Abramov, S.A. Ignatenko, E.G. Novik

Belarussian State University  
of Informatics and Radioelectronics,  
220013 Minsk, Belarus

**Abstract** A two-dimensional model based on a numerical solution of the Poisson equation along with a Monte-Carlo method was used for analyzing multiple-island single-electron arrays. Investigations have shown that the potential barrier height of tunnel junctions is a main parameter determining the temperature stability of Coulomb blockade effect. Three material systems, i. e. Co–Al–O; Au–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Cr–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, are investigated.