

К ВОПРОСУ О МОДУЛЯЦИИ ТОКА ЧЕРЕЗ ЦЕПОЧКУ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ СВЕРХМАЛЫХ РАЗМЕРОВ

© В.К.Корнев, Дж.Мюгинд, О.А.Горбоносков, М.Джонсон

Введение

Структура из двух близко расположенных и последовательно включенных туннельных переходов сверхмалых размеров представляет собой так называемый одноэлектронный транзистор, основные характеристики которого в настоящее время достаточно хорошо изучены (см., например, обзоры [1,2]). При достаточно низкой температуре $T \ll e^2/2kC$, где e — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, C — емкость туннельного перехода, в такой структуре имеет место так называемая кулоновская блокада туннелирования электронов в области напряжений $-V_t < V < V_t$, приложенных к транзистору. Величина порогового напряжения зависит периодическим образом от напряжения V_g на управляющем электроде, подключенном через дополнительный, не туннельный, конденсатор емкости C к центральному электроду (металлическому "острову" между туннельными переходами) такого одноэлектронного C -транзистора. При этом величина порогового напряжения осциллирует между $(V_t)_{\max} = e/2C$ и $(V_t)_{\min} = 0$, а период этих осцилляций при изменении V_g соответственно составляет $\Delta V_g = e/C_0$. Это обуславливает периодическую модуляцию вольт-амперной характеристики в целом и, в частности, модуляцию тока через транзистор при фиксированном напряжении $V > V_t$, глубина которой максимальна при $V \approx (V_t)_{\max}$.

Такой транзистор может быть использован в качестве высокочувствительного электрометра, для которого в работе [3] получена следующая оценка предельного значения зарядовой чувствительности в полосе частот Δf :

$$\sigma Q_{\min} = 5.4(kTC/e^2)^{1/2}(RC\Delta f)^{1/2}, \quad (1)$$

что для реальных с точки зрения современного эксперимента значений параметров туннельных переходов $C \sim 10^{-15}$ ф

и туннельного сопротивления $R \sim 100$ кОм, а также температуры $T \approx 50$ мК дает величину

$$\sigma Q_{\min}/(\Delta f)^{1.2} = 10^{-5} e/\Gamma_{\text{ц}}^{1/2}. \quad (2)$$

К сожалению, в литературе отсутствует достаточно подробное обсуждение вопроса о глубине модуляции вольтамперной характеристики цепочки, содержащей конечное число ($N > 2$), последовательно соединенных туннельных переходов сверхмалых размеров (см., например, рис. 1 для $N = 4$). Поэтому часто встречается ошибочное мнение, что использование такой цепочки может обеспечить большой размах сигнальной характеристики $I(V_g)$ и более высокое значение крутизны преобразования $(dI/dV_g)_{\max}$ и, как следствие, более высокую зарядовую чувствительность такой структуры, как электрометр. Это, а также полученные экспериментальные результаты, обнаруживающие достаточно сложную для объяснения зависимость тока через цепочку от управляющего напряжения, и, кроме того, обнаруженное уменьшение глубины модуляции этого тока по сравнению с глубиной модуляции тока через транзистор с близкими параметрами туннельных переходов побудили нас провести детальный анализ влияния на характер модуляции тока емкостных связей C_{0i} (см. рис. 1) управляющего электрода с каждым из металлических островов цепочки, а также влияния локализованных зарядов на этих островах. Анализ проводился путем численного моделирования динамики такой структуры, используя систему уравнений (3.22–3.27) обзора [2]. Полученные результаты и их сопоставление с экспериментальными данными приводятся в настоящей публикации.

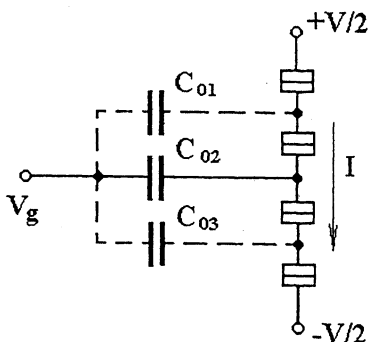


Рис. 1. Цепочка туннельных переходов сверхмалых размеров с управляющим электродом. C_{02} — основная, наибольшая емкость; C_{01} , C_{03} — емкости связи с крайними островами.

Влияние локализованных зарядов

Изучение динамики цепочки туннельных переходов сверхмалых размеров показало, что глубина модуляции ее вольт-амперной характеристики (ВАХ) определяется наличием локализованных зарядов на островах цепочки, их величинами и распределением по островам цепочки. Общая тенденция влияния локализованных зарядов Q_{0i} , независимо от их знака ($|Q_{0i}| \leq e/2$ из-за того, что величина заряда, протуннелировавшего через переход, всегда кратна заряду электрона e) — это уменьшение порогового напряжения цепочки V_t и, как следствие, увеличение тока через нее при $V \approx V_t$. Действительно, в случае, когда локализованные заряды отсутствуют и к цепочке из N одинаковых туннельных переходов с емкостью C приложено напряжение, например, $V < V_t$, то напряжение на каждом из туннельных переходов будет одинаковым и равным V/N . Наличие на одном из островов локализованного заряда изменит соотношение напряжений на туннельных переходах, и в первую очередь — на переходах, подключенных к этому острову. Поэтому на одном из этих двух переходов заряд достигнет критической величины Q_c (см., например, [4]) раньше, при более низком напряжении на цепочке, чем V_t . Иными словами, локализованный на одном из островов заряд уменьшает величину порогового напряжения V_t , начиная с которого туннелирование электрона через один из переходов, подключенных к этому острову, приводит не к увеличению, а к уменьшению энергии Гиббса G системы в целом [2]. После туннелирования электрона через данный переход произойдут также акты последовательного туннелирования электронов через другие переходы цепочки, что и будет в итоге соответствовать прохождению заряда $Q = e$ через эту цепочку.

Оказалось, что влияние зарядов, локализованных на крайних и на внутренних островах цепочки, не одинаково. Наличие на одном из крайних островов максимального по абсолютной величине заряда $Q_{0,1} = \pm e/2$ или $Q_{0,N-1} = \pm e/2$ приводит к уменьшению порогового напряжения цепочки V_e на величину $e/2C$. Наличие такого же заряда $\pm e/2$ на одном из внутренних островов уменьшает V_t на величину e/C . Такой же эффект получается в присутствии заряда $\pm e/2$ на обоих крайних островах цепочки при $N \geq 4$. Оказалось, что понижение порогового напряжения цепочки на величину e/C является предельным, так как в этом состоянии появление дополнительных локализованных зарядов на других островах цепочки не приводит к дальнейшему понижению V_t . Для цепочки из $N = 3$ туннельных переходов оба ее острова являются крайними, поэтому понижение V_t возможно лишь на величину $e/2C$.

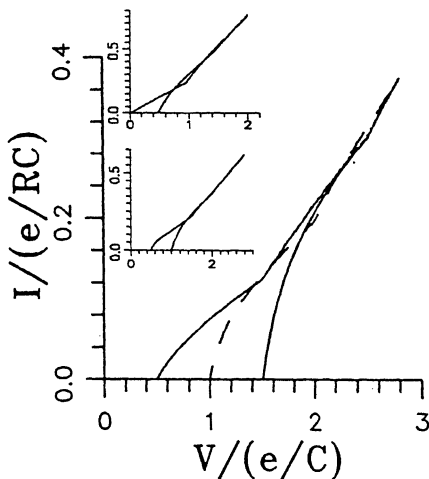


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) цепочки из $N = 4$ туннельных переходов сверхмалых размеров в отсутствие локализованных зарядов на металлических островах (правая сплошная кривая), в присутствии локализованного заряда $\pm e/2$ на одном из крайних островов (штриховая кривая), в присутствии заряда $\pm e/2$ на центральном острове или одновременно на двух островах (левая сплошная кривая). На вставке: ВАХ цепочек из $N = 2$ (верхняя часть) и $N = 3$ (нижняя часть) туннельных переходов в отсутствие локализованных зарядов (правые кривые) и в присутствии зарядов $\pm e/2$ (левые кривые). Температура $T = 0$.

В качестве примера на рис. 2 показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) цепочек из $N = 4$, $N = 3$ и $N = 2$ одинаковых туннельных переходов с емкостью C и туннельным сопротивлением R в отсутствие локализованных зарядов на островах, а также в присутствии зарядов $\pm e/2$ на одном или двух островах.

Сигнальные характеристики

Полученное семейство основных характеристик ВАХ цепочки (рис. 2) поможет теперь объяснить вид сигнальных характеристик цепочки $I(V_g)$ и проанализировать влияние факторов.

На рис. 3 показаны сигнальные характеристики цепочки (зависимость тока I через цепочку от напряжения V_g на управляющем электроде при фиксированном значении напряжения V , приложенного к цепочке), рассчитанные в предположении, что управляющий электрод связан емкостью C_0 только с одним из островов цепочки из $N = 4$ переходов, а локализованных зарядов на островах нет. Некоторый "фазовый сдвиг" этих кривых, зависящий от того, к

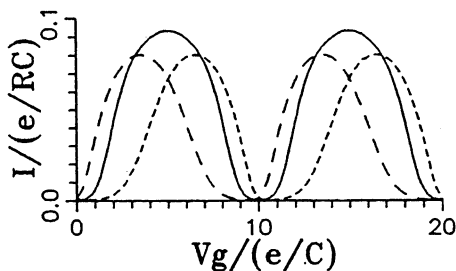


Рис. 3. Сигнальные характеристики цепочки из $N = 4$ туннельных переходов в случае, когда управляющий электрод подключен через емкость $C_0 = 0.1C$ (C — собственная емкость туннельного перехода) только к одному из островов цепочки (характеристика с наибольшим значением максимального тока соответствует подключению к центральному острову). Локализованные заряды на островах отсутствуют. $V/(e/C) = 1.2$; $T/(e^2/2kC) = 0.01$.

какому острову подключен управляющий электрод, обусловлен несимметрией системы из-за приложенного к цепочке напряжения $V \geq V_t$. Локализованный заряд Q_0 на острове, который подключен к управляющему электроду, будет вызывать лишь дополнительный “фазовый сдвиг” сигнальной характеристики, не влияя на ее размах, так как этот заряд будет лишь добавляться к заряду на острове, индуцированному под действием приложенного управляющего напряжения. Локализованные заряды на островах, не подключенных к управляющему электроду, будут уменьшать размах сигнальной характеристики (за счет увеличения минимального значения тока, см. семейство ВАХ на рис. 2), который максимален в отсутствие зарядов и близок к нулю при наличии заряда $\pm e/2$ на среднем острове или зарядов $\pm e/2$ на двух островах одновременно.

Практически невозможно обеспечить емкостную связь управляющего электрода только с одним из металлических островов цепочки туннельных переходов сверхмалых размеров. Поэтому, как показано на рис. 1, следует учитывать, что управляющий электрод имеет связь через емкости C_{01} с каждым из островов цепочки. Напряжение, приложенное к управляющему электроду, обуславливает появление на островах индуцированных зарядов, влияние которых на пороговое напряжение V_t и ток I через цепочку эквивалентно влиянию локализованных зарядов. Поэтому в наиболее наглядном и интересном с практической точки зрения случае, когда емкость C_{02} между управляющим электродом и центральным островом намного больше, чем емкости C_{01} , C_{03} между этим электродом и крайними островами цепочки, индуцированные на крайних островах заряды можно рассма-

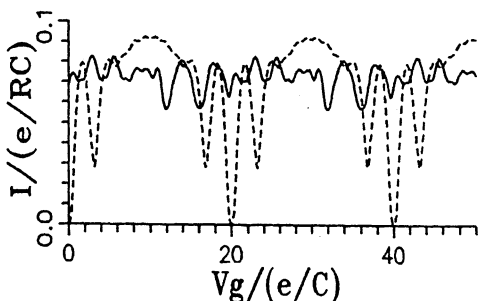


Рис. 4. Сигнальные характеристики структуры, изображенной на рис. 1, в отсутствие локализованных зарядов на островах (штриховая линия) и в присутствии локализованного заряда $\pm e/2$ на одном из крайних островов (сплошная линия). $C_{01} = C_{03} = 0.2C_{02}$; $C_{02} = 0.25C$; $V/(e/C) = 1.2$; $T/(e^2/2kC) = 0.01$.

тривать как эквивалентные, медленно меняющиеся локализованные заряды, которые в сумме с реальными локализованными зарядами и определяют глубину модуляции тока через цепочку под воздействием быстро осциллирующего индуцированного заряда на центральном острове (см. рис. 4 для случая, когда $C_{01} = C_{03} = 0.2C_{02}$).

В случае произвольного соотношения величин емкостей C_{0i} , что должно иметь место в экспериментальной ситуации, сигнальная характеристика цепочки будет в общем случае непериодической функцией управляющего напряжения V_g . На рис. 5 показан пример такой сигнальной характеристики, рассчитанной для цепочки из $N = 4$ туннельных переходов с параметрами, близкими к параметрам экспериментально исследовавшейся структуры, сигнальная характеристика которой приведена на этом же рисунке. Среднее значение емкости туннельных переходов в экспериментально исследовавшейся структуре $C \approx 5 \cdot 10^{-16}$ Ф было найдено из соотношения $V_t = e(N - 1)/C$ [4], а величина V_t оценивалась по вольт-амперной характеристике цепочки. Величины емкостей C_{0i} между управляющим электродом и островами цепочки оценивались на основании сигнальной характеристики путем выделения основного, максимального "периода", за который отвечают наименьшие емкости $C_{01} \approx C_{03} \approx 0.3 \cdot 10^{-16}$ Ф, и выделения наименьшего "периода" модуляции тока, который должен определяться наибольшей емкостью $C_{02} \approx 1.2 \cdot 10^{-16}$ Ф между управляющим электродом и центральным островом. Измерить или более точно оценить параметры каждого перехода в отдельности (емкость C и туннельное сопротивление R), а также величины емкостей C_{0i} и величины локализованных зарядов на островах не представлялось возможным. Тем не менее

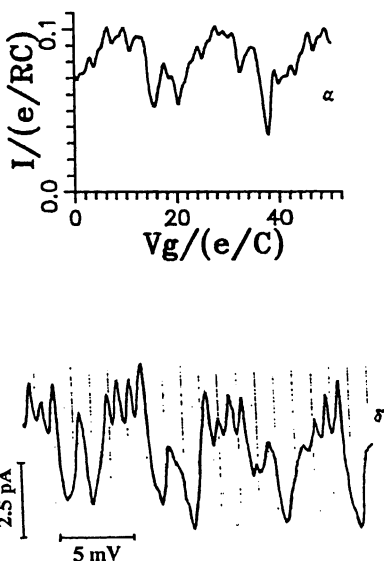


Рис. 5. Сигнальные характеристики цепочки из $N = 4$ туннельных переходов: *a* — рассчитанная для случая, когда собственные емкости туннельных переходов относятся как $1.3 : 1.2 : 0.8 : 0.7$, туннельные сопротивления переходов равны, $C_{01} = C_{03} = 0.05C$, $C_{02} = 0.18C$ (C — среднее значение собственной емкости туннельных переходов); на одном из крайних островов присутствует локализованный заряд, равный $0.45e/2$, а на среднем острове локализован заряд $0.2e/2$; $V/(e/C) = 1.2$; $T/(e^2/2kC) = 0.01$;

b — экспериментально полученная сигнальная характеристика: $T = 50$ мК, $V_i = 1$ мВ, $V = 0.9$ мВ, $C \approx 5 \cdot 10^{-16}$ Ф, что отвечает соответствующим безразмерным параметрам расчетной кривой (А); $C_{02} \approx 1.2 \cdot 10^{-16}$ Ф.

можно отметить общее сходство характера рассчитанных и полученных экспериментально сигнальных характеристик (см. рис. 5).

Цепочки туннельных переходов сверхмалых размеров (площадью $S \leq 0.01 \mu\text{м}^2$) были изготовлены из алюминия с помощью известной “теневого” методики напыления слоев алюминия под двумя различными углами через “висячую” маску [5–7]. Топология структуры была близка к топологии, описанной в работах [6,8]. Сверхпроводимость алюминиевых пленок подавлялась с помощью магнитного поля. Измерения проводились в рефрижераторе растворения при температуре $T = 50$ мК.

В заключение авторы выражают благодарность А.Н. Короткову за консультации и помощь в проведении численных расчетов.

Данная работа частично поддерживалась грантами NCU000 Международного научного фонда и NCU300 Международного научного фонда и правительства России.

Список литературы

- [1] *Likharev K.K.* IBM J. Research and Development. 1988. V. 32. N 1. P. 144–158.
- [2] *Averin D.V., Likharev K.K.* // Mesoscopic Phenomena in Solids // Ed. by B.L Altshuller, P.A. Lee, R.A. Webb. Elsevier, Amsterdam, 1991. P. 173.
- [3] *Korotkov A.N., Averin D.V., Likharev K.K., Vasenko S.A.* // Single-Electron Tunneling and Mesoscopic Devices / Ed. by H. Koch, and H. Lubbig. Springer, Berlin. 1992. P. 45.
- [4] *Geerligs B.* // Classical and Quantum Charge Dynamics in small Tunnel Junctions. Doctoral Dissertation. Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden. 1990.
- [5] *Fulton T.A., Dolan G.J.* // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. P. 109.
- [6] *Kuzmin L.S., Delsing P., Claeson T., Likharev K.K.* // Phys. Rev. Lett. 1989. V. 62. P. 2539.
- [7] *Geerligs L.J., Peters M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1989. V. 63. P. 326.
- [8] *Hergenrother J.M., Tuominen M.T. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1993. V. 3. N 1. P. 1980.

Поступило в Редакцию

3 августа 1995 г.
