

05.4

Переходная характеристика пары Гото на малых джозефсоновских переходах

© И.Н. Аскерзаде, Refik Samet

Department of Computer Engineering, Engineering Faculty
of Ankara University, Aziz Kansu
Building Tandogan Kampus, 06100, Tandogan, Ankara, Turkey
Институт физики НАН Азербайджана, Баку
E-mail: iasker@science.ankara.edu.tr, solstphs@physics.ab.az

Поступило в Редакцию 21 января 2008 г.

В рамках резистивной модели исследуется отклик пары Гото на малых джозефсоновских переходах на скачок напряжения. Получена аналитическая формула для времени установления переходной характеристики и проведены соответствующие оценки.

PACS: 85.25.Cp

В последние годы широко исследуются квантовые эффекты в малых джозефсоновских переходах [1–5]. Как известно, при выполнении условия

$$\min[\hbar\omega_p, \hbar\omega_c] \gg E_j, \quad E_j = \frac{\hbar I_c}{2e}, \quad (1)$$

в малых переходах происходит кулоновская блокада куперовских пар. В формуле (1) введены следующие обозначения: $\omega_p = \left(\frac{2el_c}{\hbar C}\right)^{1/2}$ — плазменная частота, $\omega_c = \frac{2el_c R}{\hbar}$ — критическая частота джозефсоновского перехода с критическим током I_c , нормальным сопротивлением R и емкостью C . Несмотря на большие квантовые флуктуации в переходах, куперовские пары туннелируют через такие переходы коррелированным образом. Динамика туннелирования куперовских пар в малых переходах была рассмотрена в работе [4]. Квантовые свойства сверхпроводящего кольца с малым джозефсоновским переходом изучена в [5].

Более интересными свойствами обладает так называемая пара Гото–система, состоящая из двух малых джозефсоновских переходов, включенных последовательно относительно источника и параллельно относительно измеряемого сигнала (рис. 1) [6]. В сверхпроводниковой

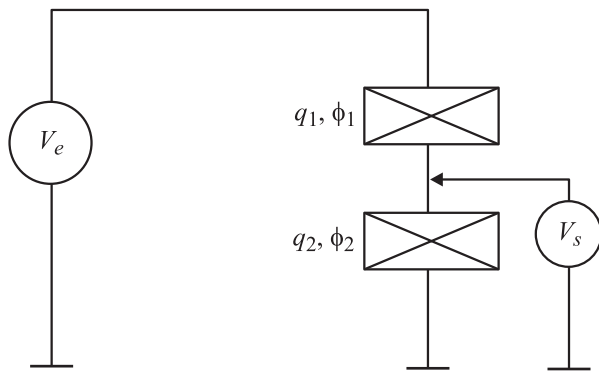


Рис. 1. Эквивалентная схема пары Гото на малых джозефсоновских переходах.

электронике пара Гото на обыкновенных джозефсоновских переходах используется как компаратор тока. Динамика и временное разрешение таких компараторов исследованы в [7]. Целью данной работы является изучение отклика пары Гото на малых джозефсоновских переходах на скачок напряжения, поданный в среднюю точку. Следует отметить, что пара Гото на малых джозефсоновских переходах представляет собой потенциально новый тип твердотельных квантовых битов, т.е. кубитов [8], и является предметом интенсивных исследований. При вычислениях используется резистивная модель малых джозефсоновских переходов, развитая в [9].

В этой работе представлена квазиклассическая теория малых джозефсоновских переходов с кулоновской блокадой. При этом электрический заряд q и джозефсоновская фаза ϕ рассматриваются как квантовые переменные [3,10]

$$\hat{q} = -2ei \frac{\partial}{\partial \phi} \quad (2)$$

При выполнении соотношения $E_j \ll E_C$, $E_C = \frac{e^2}{2C}$ в однозонном приближении (т.е. при пренебрежении зинеровским туннелированием в верхнюю зону) уравнение для квазизаряда можно написать в следующем виде [4,9]:

$$\frac{dq}{dt} = I(t) - \frac{1}{R} \frac{dE}{dq}, \quad (3)$$

где $E(\hat{q})$ — закон дисперсии для нижней зоны. При высокоомном окружении малого джозефсоновского перехода, для нормированного электрического заряда $y = \frac{q}{e}$ уравнение (3) переписывается как [4]:

$$\dot{y} + v(y) = v_e, \quad (4)$$

где $v(q)$ — нормированное напряжение, определяемое как $v(q) = \frac{V(q)}{V_0} = \frac{dE}{dq} \frac{1}{V_0}$ (здесь $V_0 = \frac{e}{C}$), можно аппроксимировать следующим образом [4]:

$$v(q) = \frac{(y - y^3)}{((y^2 - 1) + \frac{\kappa^2}{4})^{1/2}}. \quad (5)$$

В последнем уравнении параметр κ определяется как отношение джозефсоновской энергии к электростатической $\kappa = \frac{E_J}{E_C}$, и его величина определяет степень проявления кулоновских эффектов в малых джозефсоновских переходах. В уравнении (4) время измеряется в единицах RC .

Для оценки отклика пары Гото на малых джозефсоновских переходах на скачок напряжения будем пользоваться вышеприведенными уравнениями (4), (5), записанными для последовательно соединенных идентичных малых джозефсоновских переходов (рис. 1)

$$\dot{y}_1 + v(y_1) = v_e, \quad (6a)$$

$$\dot{y}_2 + v(y_2) = v_e + v_s, \quad (6b)$$

где v_e — напряжение, возникающее в цепи под действием туннелирования куперовской пары, v_s — сигнальное напряжение. При туннелировании куперовских пар через малый джозефсоновский переход выполняется следующее соотношение для электрического заряда

$$\int i(t) dt = 2e. \quad (7)$$

В уравнении (6b) v_s представляет собой малый сигнал, подаваемый в среднюю точку пары Гото на малых джозефсоновских переходах. Для малых приращений квазизаряда, $\delta y = y_2 - y_1$ по отношению к импульсу v_s , имеет место система уравнений

$$\delta \dot{y} + \frac{dv}{dy}(y_+) \delta y = v_s, \quad (8a)$$

$$y_+ + v(y_+) = v_e, \quad (8b)$$

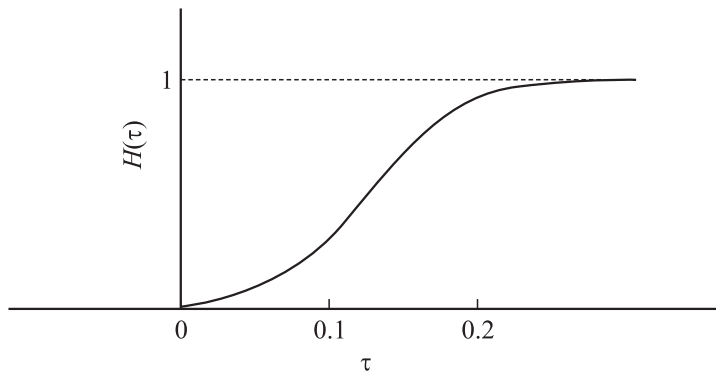


Рис. 2. Переходная характеристика пары Гото на малых джозефсоновских переходах.

где $y_+ = (y_1 + y_2)/2$. Асимптотическое решение (8b) при линейном нарастании напряжения $v_e = \alpha\tau$ представлено в работе [4] и имеет вид

$$y_+ = \begin{cases} C_1 \left(\frac{\alpha\kappa^2}{16}\right)^{2/3} z, & y_+ < 1, \\ \frac{2^{1/3}}{\left(C_2 \left(\frac{\alpha\kappa^2}{16}\right)^{-1/3} - z\right)^{1/3}}, & y_+ > 1. \end{cases} \quad (9)$$

В последнем уравнении введено обозначение $z = \frac{4}{\kappa}\tau - \frac{8}{\alpha\kappa^2}$. Здесь C_1, C_2 являются константами порядка единицы. Пусть $v_s = 1(t - \tau)$ является входным сигналом. При этих условиях решение уравнения (8a) определяется выражением

$$\delta y = \int_{-\infty}^t \exp\left(-\int_{\xi}^t y_+(x) dx\right) \{1(\xi - \tau) + v_{fb}\} d\xi. \quad (10)$$

Переходная характеристика $H(\tau)$, полученная из условия невозрастающего решения уравнения (8a), с учетом (10) имеет вид

$$H(\tau) = 1 - \operatorname{erf}\left\{\left(\frac{1}{2}\right)^{1/2} \left(\frac{\alpha\kappa^2}{16}\right)^{1/3} \tau\right\}, \quad (11)$$

где $\operatorname{erf}(x)$ — функция ошибок. Далее, используя численное моделирование для функции ошибок, можно получить следующую оценку для

времени установления (время между уровнями 0.1 и 0.9 максимального значения) переходной характеристики в единицах RC (значение параметра $\kappa = 0.33$) (рис. 2):

$$\delta\tau = 0.235. \quad (12)$$

При выводе последнего соотношения мы полагаем, что импульс напряжения, соответствующий куперовской паре, имеет треугольную форму и соответственно для скорости нарастания импульса в безразмерных единицах можно написать значение $\alpha = 1/\pi$. Из вышеприведенных формул для время установления $\delta\tau$ становится ясно, что $\delta\tau$ определяется физическими характеристиками малых джозефсоновских переходов. Для реальных значений сопротивления и емкости ($R = 5.2k\Omega$; $C = 1fF$), при которых проявляются кулоновские эффекты, можно достичь время нарастания порядка 1 пс.

Динамические свойства пары Гото на малых джозефсоновских переходах исследовались в литературе. Резонансное туннелирование куперовских пар в системе из двух малых переходов экспериментально наблюдалось в [11]. Пиковые значения на вольт-амперной характеристике при малых напряжениях $2eV < 2\Delta$, где Δ — энергетическая щель сверхпроводника, являются следствием резонансного туннелирования куперовских пар. При этом частота джозефсоновской генерации совпадает с частотой туннелирования куперовских пар.

Следующим этапом в исследованиях явились поиски эффектов кулоновской блокады в высокотемпературных сверхпроводниковых соединениях с джозефсоновскими связями между плоскостями. Кулоновская блокада в слоистых высокотемпературных сверхпроводниках $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+d}$ впервые была отмечена в работе [12]. Как известно, высокотемпературные сверхпроводники являются резкоанизотропными, благодаря чему эффекты кулоновской блокады в таких системах усиливаются [13]. В работе [12] было показано, что поведение субмикронных переходов на основе висмутовых сверхпроводников определяется кулоновской блокадой собственного джозефсоновского туннелирования между слоями.

Совсем недавно в работе [8] исследовалась вольт-амперная характеристика пары Гото малых джозефсоновских переходов и зарегистрирована $2e$ периодичность модуляции вольт-амперной характеристики. Этот факт свидетельствует о туннелировании именно коррелированных куперовских пар.

В данной работе рассмотрена переходная характеристика пары Гото на малых джозефсоновских переходах и получено аналитическое

выражение для последней. Проведенные оценки позволяют сделать вывод о том, что время установления переходной характеристики порядка 1 ps.

Данная работа частично поддерживалась исследовательским грантом НАТО (980766).

Список литературы

- [1] *Лухарев К.К.* // Микроэлектроника. 1987. Т. 16. В. 3. С. 195–209.
- [2] *Kuzmin L.S., Pashkin Yu., Golubov D.S., Zaikin A.D.* // Phys. Rev. B. 1996. V. 54. P. 10074–10080.
- [3] *Brink A.M., v.d., Odintsov A., Botbert A., Shon G.* // Z. Phys. 1991. V. B85. P. 459–467.
- [4] *Аскерзаде И.Н.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. В. 4. С. 140–142.
- [5] *Аскерзаде И.Н.* // Письма ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 16. С. 8–11.
- [6] *Бахтин П.А., Кандыба П.Е., Махов В.И., Павлов Г.Я.* // А. с. № 1008908 (СССН). БИ. 1983. N 12.
- [7] *Аскерзаде И.Н.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 4. С. 1–8.
- [8] *Gorlevi S., Guichard W., Hekking F.W., Haviland D.B.* // Phys. Rev. B. 2006. V. 74. P. 224505-1-8.
- [9] *Likharev K.K., Zorin A.B.* // J. Low Temperature Physics. 1986. V. 62. P. 345–353.
- [10] *Anderson P.W.* Lectures Many body Problems/Ed. E.R. Caianiello. 1962. P. 113.
- [11] *Haviland D.B., Jarada Y., Delsing P., Chen C.D., Claeson T.* // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73. P. 1541-1544.
- [12] *Latishev Y.T., Kim S.J., Yamachita T.* // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 69. С. 75–80.
- [13] *Likharev K.K., Matsuoka K.A.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 67. P. 3037–3039.