

01;05.4

Влияние переменного тока на порог термической активации в туннельных джозефсоновских переходах

© И.Н. Аскерзаде

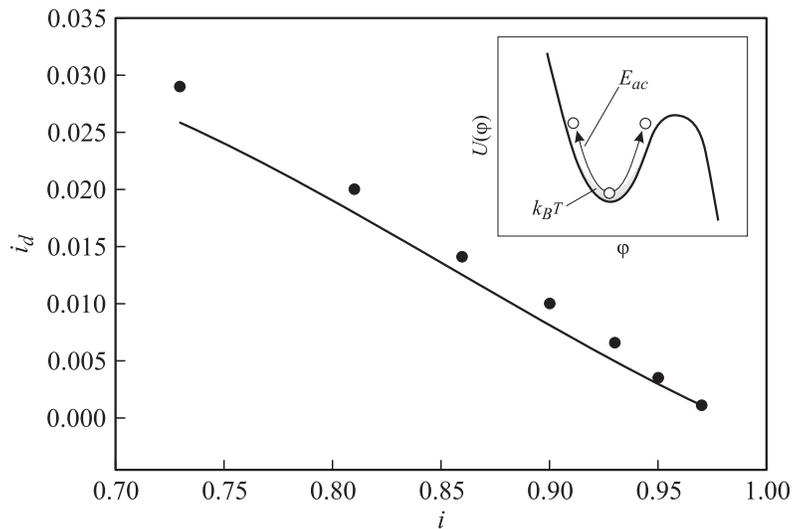
Институт физики НАН Азербайджана, Баку
 Department of Physics, Ankara University,
 06100, Tandogan, Ankara, Turkey
 E-mail: solstphs@physics.ab.az; iasker@science.ankara.edu.tr

Поступило в Редакцию 16 апреля 2004 г.

Исследуется процесс термической активации в туннельных джозефсоновских переходах при одновременном приложении постоянного и переменного токов. Показано, что пропускание переменного тока приводит к снижению потенциального барьера метастабильного состояния джозефсоновского перехода. Найдена зависимость порога термической активации от амплитуды приложенного переменного тока. Результаты находятся в согласии с недавним экспериментом по статистике переключений туннельных джозефсоновских переходов из сверхпроводящего состояния в резистивное.

Джозефсоновские переходы проявляют макроскопическое квантовое поведение при низких температурах [1]. Подобные эффекты привлекают внимание исследователей в последние годы [2,3]. В случае когда емкость джозефсоновского перехода велика, т.е. параметр МакКамбера–Стюарта β намного больше единицы [1] $\beta = \frac{2e}{\hbar} I_c R_N^2 C \gg 1$ (R и C — сопротивление и емкость джозефсоновского перехода), то в нем могут происходить плазменные колебания фазы на дне нормированной потенциальной ямы $u(\phi) = (-i\phi - \cos \phi)$ (см. рисунок). Здесь $u(\phi)$ измеряется в единицах джозефсоновской энергии $E_J = \frac{\hbar I_c}{2e}$, постоянный ток i через джозефсоновский переход дается в единицах критического тока перехода I_c . Частота таких колебаний зависит от приложенного к переходу постоянного тока и определяется выражением (см., например, [4])

$$\omega_p = \left(\frac{2eI_c}{\hbar C} \right)^{1/2} (1 - i^2)^{1/4}. \quad (1)$$



Зависимость порога термической активации от амплитуды переменного тока. Вставка изображает зависимость потенциальной энергии джозефсоновского перехода $u(\phi) = (-i\phi - \cos\phi)$ от разности фаз ϕ при прохождении через него тока.

Такая зависимость впервые наблюдалась в работе [5] при изучении туннельных джозефсоновских переходов, подключенных к источнику постоянного тока. Выполнение этой зависимости является подтверждением синусоидальности соотношения ток–фаза в джозефсоновских переходах. Время жизни на дне потенциальной ямы определяется формулой Крамерса [6] $\tau = \frac{2\pi}{\omega_A} e^{-\frac{\Delta u}{kT}}$, где ω_A — так называемая частота попыток [1]. В случае туннельных джозефсоновских переходов $\beta \gg 1$ частота попыток ω_A равна плазменной частоте ω_p . Здесь высота потенциального барьера Δu дается выражением $\Delta u = \frac{3}{2}(1 - i^2)^{3/2}$, если к переходу приложен постоянный ток (см. вставку к рисунку).

В работе [7] было исследовано время жизни метастабильного состояния в туннельных джозефсоновских переходах при одновременном приложении постоянного и переменного токов. В этой работе подтверждена справедливость выражения (1). Кроме того, было исследовано влияние переменной части тока на порог термической активации. Экспериментально было показано, что порог термической активации

уменьшается с увеличением амплитуды переменного тока. Однако теоретический анализ такой зависимости не был проведен. Целью настоящей работы является теоретическое исследование влияния переменного тока на высоту потенциального барьера и тем самым на порог термической активации при одновременном воздействии постоянного и переменного токов. Полученные результаты находятся в согласии с экспериментальными данными работы [7].

Динамика джозефсоновского перехода со внешним током с учетом тепловых флуктуаций описывается уравнением [4]

$$\ddot{\phi} + \alpha\dot{\phi} + \sin\phi = i + i_d \sin(\omega_d t) + \xi(t), \quad (2a)$$

$$\langle \xi(t)\xi(t') \rangle = 4 \frac{kT}{E_J} \delta(t - t'), \quad \langle \xi(t) \rangle = 0, \quad (2b)$$

где ϕ — джозефсоновская фаза, i , i_d — постоянные и переменные составляющие тока в единицах критического тока I_c , ω_d — частота внешнего поля в единицах плазменной частоты при нулевом постоянном токе $\omega_p(i=0) = \left(\frac{2eI_c}{\hbar C}\right)^{1/2}$, $\xi(t)$ — флуктуационная часть тока. Здесь рассматриваются δ коррелированные термические флуктуации. Для оценки времени жизни метастабильного состояния выделим быстрое и медленное движение фазы в виде $\phi = \phi_0 + \phi_1$, где быстрая часть фазы ϕ_1 удовлетворяет уравнению

$$\ddot{\phi}_1 + \alpha\dot{\phi}_1 = i_d \sin \omega_d t, \quad (3)$$

а медленная часть фазы ϕ_0 мало меняется за период изменения внешнего тока. Последнее уравнение означает, что в уравнении состояния джозефсоновского перехода (2) при усреднении по периоду переменного тока $\sin\phi$ зануляется и получается уравнение (3). Решение последнего уравнения имеет вид

$$\phi_1 = -\frac{i_d}{\alpha^2 + \omega_p^2} \sin \omega_p t - \frac{\alpha}{\omega_p} \frac{i_d}{\alpha^2 + \omega_p^2} \cos \omega_p t. \quad (4)$$

Для дальнейшего анализа термической активации в джозефсоновских переходах необходимо найти вид усредненного по периоду переменного поля потенциала $u(\phi) = (-i\phi - \cos\phi)$. Используя формулы [8]

$$\cos(a \sin \Omega t) = \sum_n A_n e^{in\Omega t}, \quad A_n = J_{2k}(a), \quad n = 2k,$$

$$\sin(a \sin \Omega t) = \sum_n B_n e^{in\Omega t}, \quad B_n = J_{2k+1}(a), \quad n = 2k + 1 \quad (5)$$

и усредняя по периоду переменного тока, получим следующее выражение для эффективного потенциала:

$$u_{eff}(\phi) = -J_0 \left(\frac{i_d}{\alpha^2 + \omega_p^2} \right) J_0 \left(\frac{\alpha}{\omega_p} \frac{i_d}{\alpha^2 + \omega_p^2} \right) \cos \phi - i\phi, \quad (6)$$

$J_0(x)$ — функция Бесселя нулевого порядка. Таким образом, присутствие переменной части тока приводит к перенормировке джозефсоновского потенциала $u(\phi) = (-i\phi - \cos \phi)$. Из формулы (6) становится ясно, что высота потенциального барьера уменьшается с увеличением амплитуды переменной части тока i_d .

Результаты вычислений на основе выражения (6) представлены на рисунке сплошной линией, а экспериментальные данные из работы [7] — кружками. Поскольку высота энергетического барьера Δu снижается при увеличении тока через переход, то из-за воздействия термических флуктуаций переключение из сверхпроводящего состояния в резистивное произойдет не при $I(t) = I_c$, а несколько раньше. В работе [7] измерялась статистика переключений из сверхпроводящего состояния в резистивное. Этот метод является мощным инструментом для определения природы потенциального барьера и был применен для изучения классического и квантового поведения джозефсоновских туннельных переходов [1,4]. Объектами исследований в работе [7] были низкотемпературные туннельные переходы Nb–NbAlO_x–Nb. Статистика переключений из сверхпроводящего состояния в резистивное была определена для 10 000 событий. Изменением амплитуды переменной части определялась величина постоянного тока, при которой возникает пик в распределении переключений. Как видно из рисунка, определяемая таким образом зависимость $i_d(i)$ соответствует вычислениям на основе вышепредставленной модели.

Таким образом, в этой работе развита теория термической активации джозефсоновских переходов при одновременном воздействии как переменного, так и постоянного тока. Показано, что приложение переменного тока приводит к снижению высоты потенциального барьера и тем самым облегчает термическую активацию в туннельных джозефсоновских переходах. Результаты вычислений находятся в согласии с экспериментом.

Автор выражает благодарность профессорам Дж. Айдын (С. Aydin) и С. Атаг (S. Atag) за поддержку.

Список литературы

- [1] *Лихарев К.К.* // Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука, 1985.
- [2] *Quantum Mesoscopic Phenomena and Mesoscopic Devices in Microelectronics* / Ed. I.O. Kulik and R. Ellialtioglu, 2000. Kluwer Academic Publisher.
- [3] *Cosmelli C., Carelli P., Castelliano M.G.* et al. // Superconductor Science and Technology. 2003. V. 16. P. 1337.
- [4] *Бароне А., Патерно Г.* Физика и применение эффекта Джозефсона. М.: Мир, 1984.
- [5] *Dahm A.J., Denenstein A., Finnegan T.F., Langenberg D.N., Scalapino D.J.* // Phys. Rev. Lett. 1968. V. 20. P. 859.
- [6] *Kramers H.* // Physica. 1940. V. 7. P. 284.
- [7] *Gronbech-Jensen N., Castelliano M.G., Chiarello F., Torrioli G.* et al. // Cond-Mat. 2004. 0403245.
- [8] *Корн Г., Корн Т.* // Справочник по математике. М.: Наука, 1985.