

Краткие сообщения

05;06

Пороговый ток симметричного двухконтактного интерферометра с малой индуктивностью

© И.Н. Аскерзаде

Институт физики АН Азербайджана,
370143 Баку, Азербайджан
E-mail: solstphs@lan.ab.az

(Поступило в Редакцию 13 мая 1999 г.)

Найдена зависимость порогового тока симметричного двухконтактного интерферометра с малой индуктивностью от емкости джозефсоновского контакта и геометрической индуктивности.

Известно, что при разработке схем сверхпроводниковой электроники уменьшение размеров электродов и плосковых линий приводит к увеличению их импедансов. В силу этого весьма важной является разработка переключающих устройств с малыми токами. В этом отношении целесообразным является использование интерференционных устройств, обладающих более высокой чувствительностью к магнитному полю, чем одиночные джозефсоновские переходы. С другой стороны, в интерференционных устройствах можно получить значительное уменьшение емкости, что связано с достижением субмикронных размеров при современной технологии [1].

Двухконтактный интерферометр является простейшей системой, критический ток которой зависит от приложенного магнитного поля [2]. Ячейки памяти на одиночных квантах с использованием двухконтактных интерферометров были и являются наилучшими кандидатами для создания сверхпроводниковых ЭВМ. На двухконтактных интерферометрах также строятся быстродействующие аналогово-цифровые преобразователи параллельного типа. Богатство нелинейных свойств двухконтактных интерферометров позволяет создавать на их основе ряд других импульсных [3] и цифровых устройств [4]. Так, в работе [3] двухконтактный интерферометр действует как формирователь коротких стробирующих импульсов.

Ход процессов переключения в двухконтактном интерферометре между различными состояниями сильно зависит от тока питания I_e , от параметра емкости джозефсоновского контакта $\beta = 2\pi I_c R_N^2 C / \Phi_0$ (C — емкость; R_N — нормальное сопротивление; Φ_0 — квант магнитного потока, определяемый как $\Phi_0 = \hbar/2e$) и, конечно же, от геометрической индуктивности $l = 2\pi L I_c / \Phi_0$. Как отмечено в [2], всегда существует зависящий от l и β , а также от степени асимметрии критических токов I_{c1}/I_{c2} пороговый ток интерферометра I_Q , такой что при $I_e > I_Q$ переключение происходит в резистивное R -состояние. Ниже порогового тока $I_e < I_Q$ переключение происходит в сверхпроводящее S -состояние.

Несмотря на существенный прогресс в создании джозефсоновских схем с двухконтактными интерферометрами, зависимости порогового тока I_Q от β и от l до сих пор оставались неисследованными. На наш взгляд, такая задача является актуальной также в связи с существованием проблемы неразрушающего считывания информации [5], а также с необходимостью использования внешнего тактируемого питания в импульсных схемах [6,7]. С учетом этого в настоящей работе проведен расчет порогового тока симметричного двухконтактного интерферометра в приближении малой индуктивности.

Известно, что в пределе малой индуктивности симметричный двухконтактный интерферометр ведет себя как единый джозефсоновский переход с критическим током

$$I_M = 2I_c \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}$$

и с эффективной фазой $\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$. Для замкнутости нужно добавить уравнение для полного магнитного потока

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_e - l \sin \frac{\varphi_e}{2} \cos \varphi, \quad (1)$$

где $\varphi_e = 2\pi \Phi_e / \Phi_0$.

С учетом (1) при малых $l \ll 1$ для тока питания (в единицах критического тока контакта) в рамках резистивной модели имеем

$$i_e = \frac{I_e}{I_c} = 2 \cos \frac{\varphi_e}{2} \sin \varphi + \frac{l}{2} \sin^2 \frac{\varphi_e}{2} \sin 2\varphi. \quad (2)$$

При вычислении аналитической зависимости порогового тока пренебрежем внешним током в силу ее малости по сравнению с критическим током. Пренебрежем также затуханием в контактах, считая β^{-1} малым параметром. При выполнении этих условий свободная

энергия эффективного перехода имеет вид

$$E = E_c = \left\{ \frac{\beta \dot{\varphi}^2}{2} + 2 \cos \frac{\varphi_e}{2} (1 - \cos \varphi) + \frac{l}{4} \sin^2 \frac{\varphi_e}{2} (1 - \cos 2\varphi) \right\}, \quad (3)$$

где $E_c = \Phi_0 I_c / 2\pi$.

Потери энергии на активном сопротивлении на каждом 2π -периоде вычисляются как

$$W_i = E_c \int_0^{2\pi} \dot{\varphi}(\varphi) d\varphi. \quad (4)$$

Зависимость $\dot{\varphi}(\varphi)$ находим из формулы (3)

$$\dot{\varphi} = \left(\frac{2}{\beta} \right)^{1/2} \left\{ e - 2 \cos \frac{\varphi_e}{2} (1 - \cos \varphi) - \frac{l}{4} \sin^2 \frac{\varphi_e}{2} (1 - \cos 2\varphi) \right\}^{1/2}, \quad (5)$$

где $e = E/E_c$.

Инфинитное движение фазы возможно лишь при $e \geq 4 \cos(\varphi_e/2)$. Вложение энергии от источника питания при фиксированном токе находится как

$$W_e = E_c \int_0^{2\pi} i_e d\varphi = 2\pi E_c \cdot i_e. \quad (6)$$

Среднее напряжение $\bar{\varphi} = \vartheta$ определяется из равенства энергий (4) и (6). Значение тока питания, при котором прекращается джозефсоновская генерация, соответствует пределу в выражении (5) при $e = 4 \cos(\varphi_e/2)$

$$i_e = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \dot{\varphi} d\varphi. \quad (7)$$

В этом случае интеграл (4) вычисляется после разложения выражения (5) по малому параметру l , и мы получим

$$\frac{I_Q}{2I_c} = \frac{4}{\pi \sqrt{\beta}} |\cos(\varphi_e/2)|^{1/2} \left\{ 1 - \frac{l \sin^2(\varphi_e/2)}{6 \cos(\varphi_e/2)} \right\}. \quad (8)$$

Как видно, из последней формулы при $l = 0$ и $\varphi_e = 0$, величина $I_Q/2I_c$ уменьшается так же, как и ток возврата одиночного перехода [2]. Пороговый ток симметричного двухконтактного интерферометра оказывается модулированным внешним магнитным потоком подобно критическому току. Если фиксировать индуктивность l , то при некотором значении потока Φ_e пороговый ток обращается в нуль. Это означает, что при $I_e \neq 0$ и при больших параметрах β переключение будет исключительно происходить в R -состояние.

Список литературы

- [1] Лихарев К.К., Зорин А.Б., Семенов В.К. Новые возможности для сверхпроводниковой электроники. Т. 1. М., 1988. 74 с.
- [2] Лихарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. М., 1985. 320 с.
- [3] Wolf P., Van Zeghbroeck B.J., Deutsch U. // IEEE Trans. Magn. 1985. Vol. 21. P. 226–229.
- [4] Hamilton C.A., Lloyd F.L. // IEEE Trans. Magn. 1983. Vol. 19. P. 1259–1264.
- [5] Harris R.E., Hamilton C.A., Lloyd F.L. // Appl. Phys. Lett. 1979. Vol. 35. P. 720–721.
- [6] Whiteley S.R., Hohenwarter G.K.G., Faris S.M. // IEEE Trans. on Magn. 1987. Vol. 23. P. 899–902.
- [7] Аскерзаде И.Н. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 1. С. 68–71.