

06:09:12

Преимущество джозефсоновских мостиков при использовании в синхронизованных цепочках для стандарта напряжения

© Х.А. Айнитдинов, Е.И. Ефанов, А.М. Клушин

Конструкторское бюро "Икар", Нижний Новгород

Поступило в Редакцию 7 апреля 1997 г.

Обсуждается оригинальная возможность получения эталонного напряжения порядка одного вольта при числе используемых сверхпроводниковых мостиков, меньшем, чем число джозефсоновских контактов в существующих стандартах вольта. Предлагается использовать особенность вольт-амперной характеристики сверхпроводящих мостиков, при которой на ней под действием СВЧ-излучения наблюдается группа индуцируемых ступенек тока.

Разработка более совершенных приборов на основе синхронизованных цепочек из большого числа джозефсоновских контактов (стандарт напряжения, генераторы, умножители, смесители в субмиллиметровом и ИК диапазоне и др.) является наиболее актуальной, интенсивно развивающейся областью практического использования эффекта Джозефсона [1–3]. В NIST США на больших цепочках интенсивно разрабатывается эталон постоянного напряжения до 1 V с шагом $150 \mu\text{V}$, равным напряжению ступеньки тока, индуцируемой СВЧ-облучением [1]. Другой группой создается генератор на синхронизованной джозефсоновской цепочке в субмиллиметровом и ИК диапазоне, позволяющий непрерывно изменять частоту генерации в широкой полосе, в частности в [3] в полосе 100–500 GHz.

В группе, занимающейся с 1970 г. разработкой стандарта напряжения, исследуется возможность стандарта напряжения на цепочке из большого числа последовательно соединенных ВТСП-переходов, работающего при температуре жидкого азота [4]. В настоящей работе предлагается новая возможность получения эталонного джозефсоновского напряжения 1 V со значительно меньшего, чем в существующих эталонах, числа контактов в цепочке. При этом используется

особенность ступенчатой вольт-амперной характеристики мостиков и точечных контактов, отличающая их от туннельных контактов. Эта особенность связана с так называемым "избыточным" сверхпроводящим током и заключается в том, что в широком интервале в области высоких напряжений на вольт-амперных характеристиках мостиков под действием СВЧ-облучения наблюдается группа индуцируемых ступенек тока, близких по амплитуде. С наличием этой группы расширяются возможности совмещения в интервале напряжений группы ступенек тока двух и более последовательно соединенных контактов с несколько отличающимися (из-за технологического разброса) параметрами: сопротивлением, критическим током. Ток через мостик с размерами, меньшими глубины проникновения магнитного поля в сверхпроводник (размер вихревого сверхпроводящего тока), согласно теории [5,6], описывается формулой

$$I = V/R + I_u(V) + I_s \sin \varphi, \quad (1)$$

где $\varphi(t) = 2e \int dt V(t)/\hbar$, V — напряжение на мостике, t — время, R — сопротивление мостика. В отличие от туннельного контакта ток через мостик содержит дополнительную составляющую — сверхпроводящий избыточный ток I_u , испытывающий при $V = 0$ скачок от $-I_u(0)$ до $I_u(0)$. Величина избыточного тока определяется [7] плотностью тока в сверхпроводящих берегах мостика, пропорциональна диаметру мостика и зависит от температуры при $V \rightarrow 0$ так же, как критический ток $I_c = I_s + I_u(0)$.

В режиме заданного тока, т. е. при сопротивлении контакта R , малом по сравнению с внешним импедансом, $I(t) = \dot{I} + \hat{I} \cos \omega_0 t$, в приближении $\hat{I} > I_0(0) > I_s$ для амплитуды N -й индуцированной ступеньки I_N в области высоких напряжений

$$2eI_N R / \hbar \omega_0 < 1, \quad (2)$$

где в [5] получено следующее выражение:

$$I_N \approx I_s(0) \left| J_{p-a}(\hat{A}) + \operatorname{Re} \left[\exp(\Phi_1 - \Phi_2) H_{p+a}^{(1)}(\hat{A}) \right] \right|, \quad (3)$$

где $p = 2e\dot{I}R/\hbar\omega_0$, $a = 2eI_u R/\hbar\omega_0$, $\hat{A} = 2e\hat{I}R/\hbar\omega_0$, $\Phi_i = 2eR/\hbar\omega_0 \times [\hat{I} \sin \omega_0 t_i + \omega_0 t_i (\dot{I} \pm I_u)] \theta(\hat{I} - \dot{I} \pm I_u)$, $\omega_0 t_i = \arccos\{(\pm I_u - \dot{I})/\hat{I}\}$, $i = 1, 2$ соответствует верхнему и нижнему знаку в формуле, $\theta(x)$ — функция Хевисайда, $J_p(x)$, $H_p^{(1)}(x)$ — соответственно функции Бесселя и Ганкеля.

Из (2) следует, что в области постоянных токов $\hat{I} - I_u \geq \dot{I} \geq \hat{I} + I_u$, содержащей $\delta N \approx 4eI_u R / \hbar\omega_0$ ступенек, их амплитуда максимальна и мало изменяется от одной ступеньки к другой.

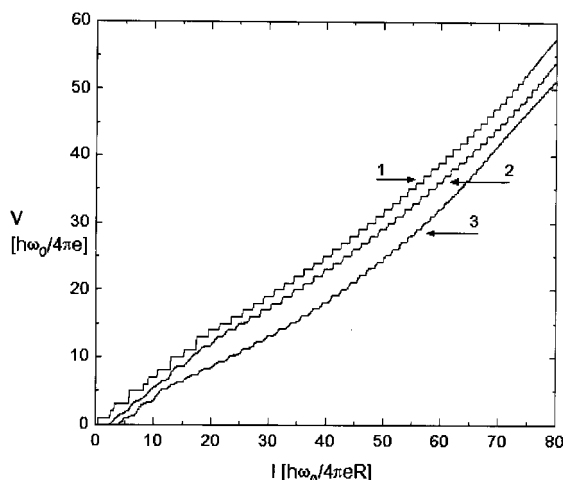
В эксперименте [5] на точечных $Nb-Nb$ контактах с $I_u(0)R \approx 0.5-1$ мВ под СВЧ-облучением с $f = \omega_0/2\pi = 10$ GHz описанная группа содержала 40–80 ступенек, тогда как в туннельных контактах подобная группа описывается функцией Бесселя $I_N = I_s J_N(\hat{A})$ и содержит [8] $\delta N = 2N^{1/3}$ ступенек, где $N = 2eV^- / \hbar\omega_0$, V^- — постоянное напряжение, в частности при $\dot{I}R = 2$ мВ $\delta N \approx 8$. Дифференциальное уравнение

$$CdV/dt + V/R + jdtV/L + I_s \sin \varphi + I_u(V) = \dot{I} + \hat{I} \cos \omega_0 t, \quad (4)$$

описывающее джозефсоновский контакт с внутренним сопротивлением R и с шунтирующей собственной емкостью C и индуктивностью L в режиме заданного тока, решалось на ЭВМ конечно-разностным методом. При начальных случайных значениях $\varphi(0) = 0$, $V(0) = 0$ результирующее постоянное напряжение $V^- = (\varphi(40/f) - \varphi(20/f))/40\pi$ усреднялось по 20 периодам $1/f$ и откладывалось по оси ординат в единицах $\hbar\omega_0/4\pi e$. По оси абсцисс откладывалось \dot{I} в единицах $\hbar\omega_0/4\pi eR$.

Без ограничения (2) на I_s в расчетах на ЭВМ первая широкая группа содержала $\delta N \approx 4eI_0 R / \hbar\omega_0$ ступенек тока, однако для получения больших δN увеличить I_s практически значительно труднее, чем $I_u(0)$.

На экспериментальной вольт-амперной характеристике двух последовательно соединенных бикристаллических ВТСП-переходов из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (кривая 2 на рисунке) отмеченная группа в области 1–4 мВ содержит 40 ступенек. На рисунке для сравнения приведена рассчитанная на ПЭВМ РС/АТ ступенчатая вольт-амперная характеристика одного перехода с близкими к экспериментальному параметрами (R , I_u , I_s), снятая с экрана дисплея (кривая 1). В отличие от ВАХ одного перехода в области 0–0.5 мВ ступеньки тока сглажены (кривая 2), поскольку сопротивления и критические токи двух ВТСП-переходов экспериментальной ВАХ отличаются приблизительно на 7%. Несмотря на такое различие параметров, ступеньки в области 1–4 мВ обоих переходов оказались совмещенными по току и четко выраженными. Возможность изменять избыточный ток $I_u(0)$ в широких пределах является преимуществом бикристаллических переходов при создании стандарта напряжения на синхронизованных цепочках. Бипереходы получались путем



Вольт-амперные характеристики джозефсоновских контактов под действием СВЧ-излучения: 1 — вольт-амперная характеристика одного перехода, снятая с экрана дисплея ПЭВМ, $I_u = 22$, $I_s = 5$, $\hat{I} = 48$ в единицах $h\omega_0/4\pi eR$; 2, 3 — экспериментальные вольт-амперные характеристики соответственно двух и трех последовательно соединенных бикристаллических ВТСП-переходов из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (масштаб по осям увеличен соответственно в 2, 3 раза, вольт-амперные характеристики смещены по оси тока).

напыления YBCO-пленок толщиной 2000 Å на монокристаллическую YSZ-подложку, состоящую из двух частей, отличающихся ориентацией кристаллографических осей в ab -плоскости. Переход формировался в виде мостика на бикристаллической границе и имел ширину $4 \mu m$, угол разориентации 19° , плотность тока в мостике при 67 K $j = 5 \cdot 10^5 A/cm^2$, соответственно джозефсоновская глубина проникновения магнитного поля $\lambda_l = 0.5 \mu m$. Более подробно технология получения биконтактов оисана в [9]. Экспериментальные вольт-амперные характеристики переходов снимались четырехзондовым методом с экрана осциллографа, частота облучения контактов 18.81903 CHz. Из анализа наблюдаемых вольт-амперных характеристик наиболее вероятно, что переход в месте бикристаллической границы содержит прослойку с полупроводниковым характером проводимости вследствие кислородных вакансий в решетке YBCO. Полупроводниковые свойства подтверждаются температурной за-

висимостью сопротивления $R(T)$ [1]. Аналогично $Nb-Nb$ прижимным контактам [5] по характеру зависимостей $R(V)$ и $R(T)$ можно разделить бипереходы на два типа в зависимости от угла кристаллографической разориентации. При малых углах разориентации сопротивление растёт с увеличением температуры. В таких переходах высокая плотность тока, а $R(T)$ и $R(V)$ сходны с аналогичными зависимостями для металлических мостиков, а именно, дифференциальное сопротивление растёт с увеличением температуры и напряжения (из-за джоулевого разогрева током через мостик). Уменьшение сопротивления R с ростом T и V для переходов с большим углом разориентации [10] можно объяснить лишь потенциальным барьером в мостике для прохождения электронов [5]. С вариацией проницаемости потенциального барьера в переходе величина избыточного тока $I_0(0)$, определяющаяся плотностью тока в сверхпроводящих берегах перехода, для разных переходов может различаться в широких пределах $0 < I_u < I_c$. В частности, для переходов с углом разориентации 37° она близка к нулю. Отсюда следует, что для получения стандартного напряжения 1 В с наименьшего числа последовательно соединённых переходов необходимы переходы с достаточно большим избыточным током, т.е. с небольшим углом разориентации $10-20^\circ$. Однако увеличение I_u ограничено характерным размером переходов с джозефсоновскими свойствами [6]. В НТСП-мостике таким размером является размер абрикосовского вихря, а в ВТСП-мостике — размер гипervихря, т.е. джозефсоновская глубина проникновения λ_j , уменьшающаяся с ростом критической плотности тока в мостике j_c , $\lambda_j \sim j_c^{-1/2}$. Переходы с достаточно большими I_u и критическим током $I_c = I_u + I_s$ необходимы ещё с целью создания стандарта напряжения, работающего в жидком азоте, где ступеньки тока небольшой амплитуды $I_N \sim I_s(T)$ сглаживаются при высоких тепловых шумах [11], а также вследствие проникновения вихревых токов внутрь сверхпроводящих берегов вблизи критической температуры T_c . Следует заметить, что для индуцирования ступенек тока при высоком напряжении в соответствии с условием $\hat{I} - I_u < \dot{I} < \hat{I} + I_u(0)$ необходимо пропускать через мостик большой постоянный \dot{I} и СВЧ-ток \hat{I} , что в свою очередь увеличивает дробовые шумы на переходе, кроме того, внутрь сверхпроводника проникает индуцированное током магнитное поле (вихри) величиной выше критической H_c . Поэтому монокристаллические ВТСП-плёнки с более высокой критической напряжённостью магнитного поля предпо-

читательны. На основании вышеизложенного выясняются трудности и в то же время определяются ориентиры при разработке технологии напыления микросхем из последовательно соединенных ВТСП-переходов для стандарта напряжения, работающего при температуре жидкого азота, а именно при выборе угла разориентации, ширины и толщины барьера. В работе [4] описаны результаты сравнения установки опорного напряжения ступенек тока биперехода и точечного $Nb-Nb$ -контакта, соединенных навстречу друг другу при одинаковом напряжении ~ 2 mV. С относительной погрешностью 10^{-6} напряжение ступенек совпадает. Измерения с бипереходом проводились в интервале температур от 4.2 до 40 К. В заключение приведем сравнение эффективности предлагаемого варианта стандарта напряжения на цепочках из джозефсоновских переходов с существующими. При напряжении ступенек с одного перехода в среднем 2 mV (кривая 2) 1 V можно получить с 500 переходов, тогда как в разрабатываемых в настоящее время эталонах на цепочках из мостиков [1], совмещенных на первой ступеньке тока, необходимо 20–50 тысяч переходов. Переход от работающих в настоящее время стандартов напряжения на цепочках из туннельных контактов к цепочкам из мостиков связан с нестабильностью напряжения на первых в силу дискретной неоднозначности $\dot{I}(V)$. При одном токе смещения напряжение ступенек на туннельном контакте имеет дискретный ряд значений, т. е. возможно скачкообразное изменение напряжения, приводящее к выходу из строя нормального элемента, аттестуемого по стандарту. Ступенчатая же вольт-амперная характеристика в безгистерезисном режиме $\dot{I}(V)$ однозначна.

Список литературы

- [1] *Hamilton C.A., Burroughs C.J.* // IEEE Trans. Instrum. Meas. 1995. 44. P. 223.
- [2] *Hebrank F.X., Vollmer E., Funck T., Gutmann P.* // Niemeyer. 1996. СРЕМ'96. P. 148.
- [3] *Han S., Bi B., Zang W., Lukens J.E.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. P. 1424.
- [4] *Ainutdinov Kh.A., Borovitskii S.I., Gelikonova V.D., Komkov A.V., Copetti C., KLushin A.M., Sodtke E., Vonderbeck L., Siegel M., Prusseit W.* // Ext. Abstr. of 5th Intern. Supercond. Electr. Conf. (ISEC'95). 1995. P. 144.
- [5] *Айнитдинов Х.А., Боровицкий С.И., Малиновский Л.Л.* // ЖЭТФ. 1979. Т. 76. В. 4. С. 1342.
- [6] *Малиновский Л.Л.* // ЖЭТФ. 1996. Т. 110. В. 2 (8). С. 661.

- [7] Айнитдинов Х.А., Малиновский Л.Л. // ФНТ. 1986. Т. 12. С. 10.
- [8] Hamilton C.A. // Phys. Rev. B. 1972. V. 5. P. 912.
- [9] Klushin A.M., Amatuni L.E., Sotke E., Prusseit W., Borovitskii S.I., Kohlstedt H. // Appl. Phys. Lett. V. 69. P. 1634.
- [10] Венгрус И.И., Курьянов М.И., Сизгирев О.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60. В. 5. С. 372.
- [11] Катков А.С., Козырев С.В., Кржимовский В.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 9. С. 70.