

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ НА ВАХ ДЛИННЫХ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ПЕРЕХОДОВ С РЕШЕТКОЙ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

И.Л.Серпученко ¹⁾, А.В.Устинов ²⁾

На ВАХ длинных джозефсоновских переходов с пространственно-периодической модуляцией критической плотности тока обнаружены дополнительные ветви, интерпретируемые как резонансное взаимодействие солитона с излучаемыми им плазменными волнами.

Распределенный джозефсоновский переход представляет собой модельную систему для изучения солитонов и других возбуждений, описываемых возмущенным уравнением синус-Гордон ^{1, 2}:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = f(x) \sin \varphi + \alpha \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \gamma.$$

Здесь φ – разность фаз волновых функций сверхпроводников, α – коэффициент диссипации, γ – внешний ток, координата x нормирована на джозефсоновскую длину λ_J , время t – на обратную плазменную частоту ω_0^{-1} .

В работах ³⁻⁶ теоретически исследовалась задача о движении и излучении солитона в системе с регулярно расположенными вдоль оси x структурными неоднородностями, моделировавшимися в виде $f(x) = 1 + f_0 \sum_{n=1}^N \delta(x - na)$. Была рассчитана зависимость частоты и амплитуды излучения от расстояния a между неоднородностями и скорости солитона β ^{3, 4}. Показано, что на вольт-амперной характеристике (ВАХ) джозефсоновского перехода с решеткой неоднородностей должны возникать дополнительные ступеньки тонкой структуры ^{5, 6}, соответствующие резонансам между солитоном и плазменными волнами, излучаемыми при его движении в таком переходе.

Целью данной работы являлось экспериментальное наблюдение предсказанных теоретически в работах ^{5, 6} особенностей на ВАХ квазиодномерных джозефсоновских переходов с искусственно созданными неоднородностями диэлектрического барьера.

Нами исследовались переходы Nb–NbO_x–Pb, изготовленные по стандартной тонкопленочной технологии с окислением ниобия в плазме тлеющего разряда ⁷. На кремниевой подложке 15 × 24 мм² методом фотолитографии формировались 12 переходов поперечной гео-

¹⁾ ИГЭ АН СССР

²⁾ ИФТТ АН СССР

метрии ⁸ размером $500 \times 20 \text{ мкм}^2$ (рис. 1). Неоднородности в виде пленки монооксида кремния толщиной 80 нм и шириной 10 мкм вдоль большего размера перехода создавались перед окислением ниобия методом "взрывной" фотолитографии. При этом 4 перехода являлись контрольными (без неоднородностей). Величина критической плотности тока в переходах составляла от 30 до 60 А/см², что соответствовало $\lambda_J \sim 45 - 60 \text{ мкм}$.

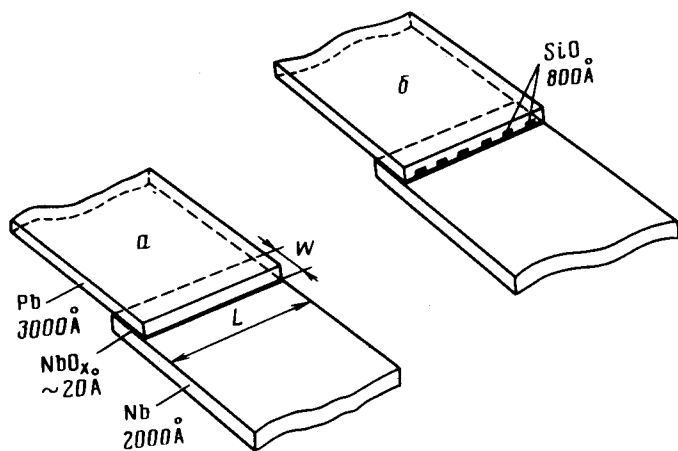


Рис. 1. Джозефсоновские переходы поперечной overlap-геометрии: однородный (а) и с искусственными неоднородностями (б)

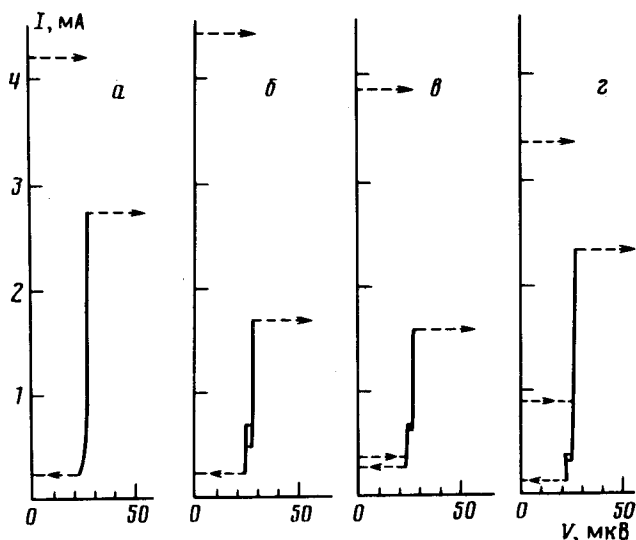


Рис. 2. Первая ступенька нулевого поля на ВАХ: а – однородный (контрольный) джозефсоновский переход; б, в и г – переходы, соответственно, с 9-ю, 5-ю и 3-мя неоднородностями

Экспериментально нами исследовалась форма первой ступеньки нулевого поля ² на ВАХ, соответствующей движению одного солитона в переходе. Напряжение этой ступеньки составляло $\sim 27 \text{ мкВ}$ при $T = 4,2 \text{ К}$ и для различных переходов отличалось не более, чем на 2–3%. При измерении ветвей ВАХ были весьма существенными требования к защите образца от внешних источников наводок и шумов. Измерения проводились в экранированном криостате с остаточным магнитным полем $\sim 1 \times 10^{-4} \text{ Гс}$. Для задания тока использовался стабильный ртутно-цинковый элемент, а в качестве токовых и потенциальных проводов – по две экранированные витые пары для каждого из переходов. Чувствительность измерений на постоянном токе ограничивалась наводимыми термоэдс в измерительных проводах и контактах и составляла $\sim 0,5 \text{ мкВ}$ до накопления и усреднения.

На рис. 2 показаны первые ступеньки на ВАХ нескольких исследованных переходов. В переходах с неоднородностями обнаружены дополнительные ветви на ВАХ при напряжениях, меньших напряжения первой ступеньки. Форма и положение этих ветвей по напряжению

зависят от числа неоднородностей и параметров переходов. На ВАХ однородных (2, а) каких-либо особенностей ступенек нулевого поля не наблюдалось. В переходе с тремя неоднородностями (2, г) дополнительная ветвь имеет отчетливое отрицательное дифференциальное сопротивление, что согласуется с результатом численного расчета перехода с близкими параметрами⁵. На характеристиках 2, в и 2, г наблюдались по два устойчиво воспроизводимых значения критического тока, меньшее из которых $I_{п}$, видимо, было связано с пиннингом солитона на одной из неоднородностей. При достижении тока $I_{п}$ происходил "прыжок" на первую ступеньку, соответствующую движению этого солитона в переходе. С уменьшением расстояния между неоднородностями в единицах λ_J величина порогового тока $I_{п}$ уменьшалась, что соответствует уменьшению силы пиннинга.

Таким образом, в работе экспериментально обнаружены особенности на ВАХ, которые качественно могут быть интерпретированы как предсказанные теоретически ранее^{5, 6} резонансы между солитоном и порождаемым им излучением при выполнении условия $m\omega_{sq1} = \omega_{p1}$. Положение таких резонансов по напряжению V_m определяется соотношением⁶:

$$V_m = \left[\left(1 - \frac{2l}{ma} \right)^2 + \left(\frac{l}{\pi m} \right)^2 \right]^{1/2} \tilde{V}; \quad V_m < \tilde{V}, \quad (1)$$

где \tilde{V} — напряжение первой ступеньки нулевого поля, l и a — соответственно, длина перехода и расстояние между неоднородностями в единицах λ_J , m — номер резонанса.

Сравнение экспериментально измеренных значений V_m с расчетом по формуле (1) позволяет оценить порядок наблюдаемых резонансов, что дает результат $m = 11, 6$ и 5 для ВАХ на рис. 2, б, в и 2, г соответственно. Тот факт, что на всех исследованных ВАХ имеется лишь по одной ветви тонкой структуры, связан, как мы полагаем, с тем, что другие ветви при меньших напряжениях не наблюдаются из-за сильной неустойчивости нижних участков ВАХ к внешним шумам при измерениях. Интервал напряжений, в котором наблюдались ВАХ первых ступенек нулевого поля, не превышал $0,8\tilde{V} \lesssim V \lesssim 1,0\tilde{V}$ даже для однородных контактов. Например, для перехода с пятью неоднородностями в соответствии с формулой (1) могут иметь место резонансы с номерами $m \geq 6$, причем $V_6 = 0,85\tilde{V}$, $V_7 = 0,63\tilde{V}$, $V_8 = 0,47\tilde{V}$. Экспериментальное значение напряжения дополнительной ветви составляло $V^* \approx 0,89\tilde{V}$. Таким образом, в условиях нашего эксперимента расчетные ветви с $m \geq 7$ находились вне измеренной области ВАХ. Расхождение результатов теории и эксперимента для случаев 2б — 2г при рассчитанных значениях m не превышает $5 \div 8\%$.

Авторы выражают благодарность Н.С.Степакову за помощь в изготовлении экспериментальной установки, В.П.Кошелецу и Ю.Ф.Драчевскому за полезное обсуждение.

Литература

1. Barone A., Esposito F., Magee C.J., Scott A.C. Riv. Nuovo Cim., 1971, 1, 227.
2. Pedersen N.F., Welner D. Phys. Rev. B, 1984, 29, 2551.
3. McLaughlin D.W., Scott A.C. Phys. Rev. A, 1978, 18, 1652.
4. Mkrtchyan G.S., Schmidt V.V. Sol. St. Comm., 1979, 30, 791.
5. Голубов А.А., Устинов А.В. Письма в ЖТФ, 1986, 12, 435.
6. Golubov A.A., Ustinov A.V. IEEE Trans. Magn., 1987, 23, 781.
7. Выстывкин А.Н., Губанков В.Н., Константиныч К.И., Кошелец В.П., Обухов Ю.В. ЖТФ, 1982, 52, 1637.
8. Лихарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. 1985, М.

Поступила в редакцию

5 июля 1987 г.

14 сентября 1987 г.