

РЕЗОНАНСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЦЕПОЧКИ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ВИХРЕЙ НА РЕШЕТКЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Б.А.Маломед ¹⁾, И.Л.Серпученко ²⁾, М.И.Трибельский ³⁾, А.В.Устинов

Теоретически рассмотрен коллективный эффект резонансного излучения при движении цепочки вихрей в длинном джозефсоновском переходе с периодически расположенными вдоль него структурными неоднородностями. Экспериментально обнаружены особенности на вольт-амперной характеристике перехода с искусственными неоднородностями во внешнем магнитном поле, связываемые с возникновением таких резонансов.

В недавней работе ¹ экспериментально наблюдались ступеньки тонкой структуры на вольт-амперной характеристике (ВАХ) длинных джозефсоновских переходов (ДП) с искусственно сформированной решеткой неоднородностей. Эти ступеньки соответствуют резонансам, возникающим при движении одиночного джозефсоновского вихря (флаксона) в поле его излучения на неоднородностях ². В настоящей работе рассмотрен теоретически и обнаружен экспериментально коллективный резонансный эффект излучения плазменных волн цепочкой флаксонов при ее движении в ДП с решеткой неоднородностей. Отличие обсуждаемого здесь эффекта от однофлаксонального резонанса на неоднородностях ¹ состоит в том, что в цепочке флаксонов излучение может усиливаться за счет когерентного сложения волн, излучаемых каждым флаксонам. Цепочка флаксонов в ДП может быть создана внешним магнитным полем H , причем расстояние между соседними флаксонами $b \sim H^{-1}$.

Длинный ДП с встроенной решеткой описывается хорошо известным обезразмеренным уравнением для магнитного потока φ :

$$\varphi_{tt} - \varphi_{xx} + \sin \varphi = -\alpha \varphi_t - \gamma - \mu \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - an) \sin \varphi, \quad (1)$$

где α – диссипативный коэффициент, γ – плотность тока, протекающего через переход, a – период решетки.

Условие резонанса имеет вид:

$$m (2\pi v/b) = n \omega_{pl}, \quad (2)$$

где m и n – целые числа, v – скорость флаксонов, ω_{pl} – частота излучаемых волн.

Как известно, напряжение на ДП $V \sim b^{-1} v$, так что ВАХ определяется зависимостью $v(\gamma)$, следующей из уравнения энергетического баланса

$$2\pi\gamma v = 8\alpha v^2 + W(v), \quad (3)$$

где $W(v)$ – мощность радиационных потерь в расчете на один флаксон, $8\alpha v^2$ – мощность диссипативных потерь. При скоростях, удовлетворяющих уравнению (2), работа, совершаемая током над цепочкой, расходуется не на ее ускорение, а на генерацию плазменных волн. Следовательно, при соответствующих напряжениях на ВАХ должны возникать ступеньки почти постоянного напряжения. Для модели (1), согласно ²,

$$v_m, n = \{ [1 - (4\pi n b / m a)]^2 + (2\pi n b / m)^2 \}^{1/2}. \quad (4)$$

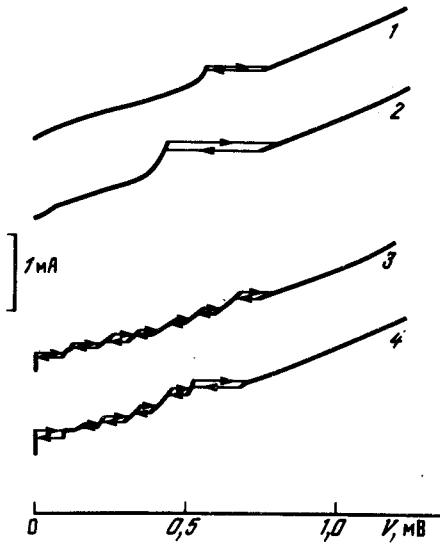
¹⁾ Институт океанологии Академии наук СССР

²⁾ Институт радиотехники и электроники Академии наук СССР

³⁾ Научно-исследовательский институт органических полупродуктов и красителей

С помощью "резонансной" теории возмущений для уравнения синус-Гордон ³ можно, рассматривая μ в (1) как малый параметр, оценить также высоту ступенек (4): $\gamma \sim \mu^2/\alpha b$.

Экспериментально нами исследовались ДП Nb - NbO_x - Pb с решеткой искусственных неоднородностей, изготовленных методом фотолитографии. Неоднородности создавались при помощи модуляции толщины диэлектрической прослойки переходов ¹. На рис. 1 показаны ВАХ, измеренные при различных значениях внешнего магнитного поля, направленного в плоскости прослойки переходов. Кривые 1 и 2 получены для контрольного однородного перехода в полях $H = 3,63$ Э и $2,70$ Э соответственно. Видно, что на этих кривых имеется характерный пик, соответствующий скорости цепочки вихрей в ДП, близкой к предельной $v_0 = 1$. При увеличении внешнего поля этот пик смещается в сторону больших напряжений. Кривые 3 и 4 получены для ДП с пятью неоднородностями, расстояние между которыми $a \sim b$, в полях $H = 3,21$ Э и $2,75$ Э соответственно. Как видно, имеет место целый набор особенностей на ВАХ при различных напряжениях. Оценка по формуле (4) показывает, что наблюдаемые особенности с удовлетворительной точностью порядка $5 \div 8\%$ совпадают с положением резонансных пиков с $m/n = 2/3, 3/4, 1/2$ и так далее. Неопределенность в оценке параметров, необходимых для расчета, связана с погрешностью при определении джозефсоновской глубины проникновения по экспериментальным данным.



В заключение заметим, что описанный эффект можно интерпретировать, как синхронизацию цепочки коротких ДП, соединенных параллельно друг другу. Длинный ДП с решеткой неоднородностей можно рассматривать, как многоконтактный интерферометр малой индуктивности. При этом наблюдаемые особенности на ВАХ в рамках такой модели представляют собой эффект синхронизации ступенек Фиске ⁴ в коротких переходах. Существенным в таком рассмотрении является то, что при фазовом сдвиге колебаний в отдельных переходах, кратном 2π , мощность излучения N коротких ДП пропорциональна N^2 , что напоминает известный эффект сверхизлучения.

Авторы признательны А.А.Голубову, Ю.С.Кившарю, В.П.Кошельцу, К.К.Лихареву, Г.А.Овсянникову и В.В.Рязанову за обсуждение результатов и Н.С.Степакову за помощь в изготовлении экспериментальной установки.

Литература

1. Серпученко И.Л., Устинов А.В. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 435.
2. Соколов А.А., Устинов А.В. IEEE Trans. Magn., 1987, 23, 781.

3. *Malomed B.A.* Phys. Lett., 1987, A 120, 28; Physica, 1987, D27, 113.

4. *Кулик И.О., Янсон И.К.* Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах. М.: Наука, 1970.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
11 марта 1988 г.