

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЖОЗЕФСОНА
С РЕЗОНАНСНЫМИ ТИПАМИ КОЛЕБАНИЙ
В СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ¹⁾

И.М.Дмитренко, И.К.Янсон, В.М.Свиштунов

Ранее было отмечено [1,2], что на вольтамперных характеристиках сверхпроводящих пленочных туннельных структур, отчетливо проявляющих эффект Джозефсона, наблюдаются ступеньки. Они характеризуются тем, что изменение тока через туннельный переход, обычно задаваемое измерительной схемой, происходит при почти неизменном напряжении на переходе $V \neq 0$. В работе [3] нами было показано, что при этом излучаются фотоны с частотой $\omega = 2eV/\hbar$, соответствующей частоте переменного сверхпроводящего тока Джозефсона [4]. В настоящей заметке предлагается простая модель, рассматривающая возникновение ступеней как результат возбуждения резонансных электромагнитных колебаний в туннельной структуре при протекании между пленками переменного тока Джозефсона. Приводятся экспериментальные данные, подтверждающие эти представления.

Рассмотрим условия распространения электромагнитных волн в слое окисла между сверхпроводящими пленками олова. В такой системе могут распространяться замедленные поперечные электромагнитные волны [5] с фазовой скоростью $\tilde{c} = c\sqrt{\ell/\epsilon\alpha}$, где c - скорость света, ℓ - толщина окисла, ϵ - диэлектрическая проницаемость окисла, а $\alpha = 2\lambda_L + \ell$ (λ_L - лондоновская глубина проникновения). Так как вол-

новое сопротивление этой полосковой линии очень мало^[4,5], то на границе будет происходить сильное отражение волны, и в ограниченной системе возникнет возможность существования резонансных типов колебаний с достаточно высокой добротностью. Условие резонанса электромагнитных волн в области, образующей туннельный переход между пленками, запишется в виде:

$$n \frac{\lambda_p^{(n)}}{2} = W \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

где $\lambda_p^{(n)}$ - n -я резонансная длина волны в полосковом резонаторе, W - размер прямоугольного резонатора, вдоль которого возникает резонанс. Используя соотношение частот Джозефсона, выражение для \bar{c} и температурную зависимость $\lambda_L(T) = \lambda_L(0) [1 - (T/T_k)^4]^{-1/2}$, можно получить всю систему расположения ступеней на оси напряжений $V_p^{(n)}$ и их зависимость от температуры:

$$V_p^{(n)}(T) = \frac{\hbar}{2e} \sqrt{\frac{\ell}{\epsilon d}} \frac{\pi c n}{W} [1 - (T/T_k)^4]^{1/4}. \quad (2)$$

Таким образом, мы трактуем возникновение ступени как следствие возбуждения переменным током Джозефсона резонансных колебаний электромагнитных волн в туннельной структуре.

Экспериментально исследовались туннельные структуры типа $Sn-I-Sn$ (I - изолятор толщиной 10-20 Å), подобные описанным в работах^[2,3], а также более сложные (см. рис. 1).

Наблюдаемые максимальные значения постоянного тока Джозефсона составляли 0,8 - 0,95 теоретически предсказываемого значения^[8,9]. Зависимость критического значения постоянного тока Джозефсона хорошо описывалась теоретическими формулами^[4,8]. Экспериментальные результаты показывают, что для каждой туннельной структуры имеется дискретный набор напряжений $V_p^{(n)}$, при которых в постоянных магнитных полях порядка эрстеда, приложенных параллельно пленке шириной W , появляются ступени, причем хорошо выражена кратность положений ступеней: $V_p^{(n)} = n V_p^{(1)}$, где $n = 1, 2, 3, \dots$. Равенство фазовых скоростей выполняется для 13-й ступеньки. Напряжение, при котором наблюдается первая ступень $V_p^{(1)}$, обратно пропорционально W , при изменении W в несколько раз. Положение ступени на оси V

почти не зависит от магнитного поля. На рис. 1 приведены вольтамперные характеристики одного из туннельных переходов структуры, показанной на вставке. Площадь перехода $S = 1,25 \times 0,36$ мм, $T = 1,6^\circ\text{K}$. Шк-

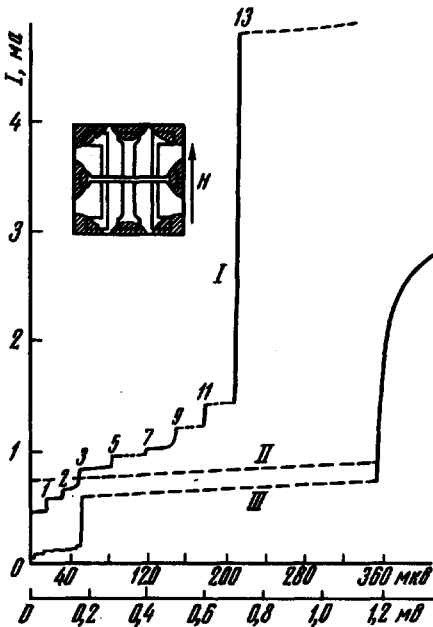


Рис. 1. Вольтамперные характеристики туннельного перехода Sn-I-Sn : I - начальный участок ($H = 1,12$ э); 1, 2, 3 ... - номера ступенек; II - полная вольтамперная характеристика ($H=0$); III - то же ($H = 1$ э). Масштаб тока для II и III следует уменьшить в 10 раз

рины нижних пленок образца на вставке равны: 0,23, 1,25, 0,45 мм соответственно, ширина верхней пленки - 0,36 мм. Численные значения $V_p^{(n)}$ хорошо совпадают с рассчитанными по формуле (2), если принять $\ell = 20$ Å, $\epsilon = 9$. Измеренная температурная зависимость положения первой ступени (рис. 2) хорошо согласуется с формулой (2).

Для максимального взаимодействия волны тока с электромагнитной волной, помимо условия равенства частоты переменного тока Джозефсона на одной из резонансных частот системы, необходимо еще равенство их фазовых скоростей. Это приводит к соотношению [6]

$$V_p^{(n)} = \alpha \sqrt{\frac{\ell}{\epsilon \alpha}} H_{max}, \quad (3)$$

позволяющему найти значение постоянного магнитного поля, при котором взаимодействие будет максимальным. Наблюдаемые экспериментально ступени есть постоянная составляющая тока Джозефсона, появляющаяся в результате самомодуляции [6, 7], поэтому высота ступени зависит от магнитного поля. В магнитном поле, равном H_{max} для n -й ступе-

ни, ее высота имеет максимум. Экспериментальная зависимость

$V_p^{(n)}(H_{max})$ представляет собой прямую линию (см.рис.3), что подтверждает соотношение (3). Тот факт, что прямая не проходит через

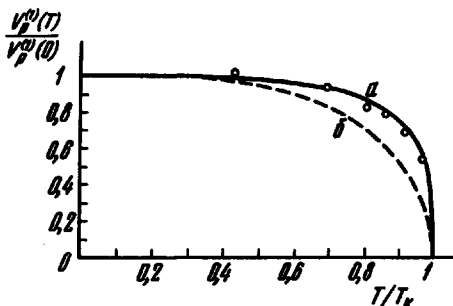


Рис. 2. а - Относительное изменение положения первой ступени в функции приведенной температуры. Сплошная линия - функция $1 - (T/T_c)^{4/3}$, кружками обозначены экспериментальные точки; б - зависимость $\Delta(T)$

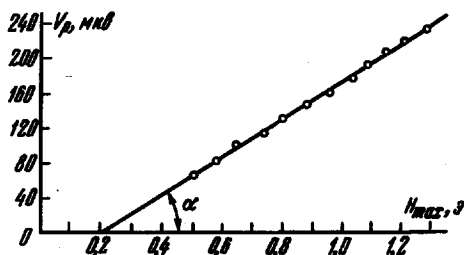


Рис. 3. Зависимость напряжения n -й ступени, для которой выполняется соотношение (3), от постоянного магнитного поля

нуль, связан со сдвигом главного максимума зависимости постоянного критического тока Джозефсона от магнитного поля [2]. Так как соотношения (2) и (3) независимы (соотношение (3) имеет место и в нерезонансном случае [6]), то можно найти значение квадратного корня из экспериментальной зависимости $V_p^{(n)}(H_{max})$ и затем определить весь спектр генерируемых частот и соответствующих им напряжений по формуле (2). Найденные таким образом значения $V_p^{(n)}$ хорошо (с точностью $\sim 10\%$) согласуются с экспериментом. Подробное описание результатов экспериментального исследования будет опубликовано позднее.

Таким образом, в отличие от туннельных структур $P\delta-I-P\delta$, описанных в работе [6], в туннельных структурах, исследованных нами, возникает сильное взаимодействие переменного тока Джозефсона с резонансными типами волн полоскового резонатора, образуемого туннельным переходом. Этот механизм и является причиной столь эффективной связи переменного тока Джозефсона с электромагнитным полем, которая и позволила прямо наблюдать излучение фотонов в работе [3].

Авторы благодарны Б.И.Веркину за постоянный интерес к работе, И.О.Кулику и Д.Ф.Комнику за полезные обсуждения полученных результатов.

Физико-технический институт
низких температур
Академии наук Украинской ССР

Поступило в редакцию
18 мая 1965 г.

Литература

- [1] M.D.Fiske. Revs. Mod. Phys., 36, 221, 1964.
- [2] И.К.Янсон, В.М.Свистунов, И.М.Дмитренко. ЖЭТФ, 47, 2091, 1964.
- [3] И.К.Янсон, В.М.Свистунов, И.М.Дмитренко. ЖЭТФ, 48, 976, 1965.
- [4] B.D. Josephson. Revs. Mod. Phys., 36, 216, 1964.
- [5] J.C. Swihart. J.Appl. Phys., 32, 461, 1961.
- [6] R.E.Eck, D.J. Scalapino, B.N. Taylor. Phys. Rev. Lett., 13, 15, 1964.
- [7] S.Shapiro, A.R.Janus, S.Holly. Revs. Mod. Phys., 36, 223, 1964.
- [8] V.Ambegaokar, A.Baratoff. Phys. Rev. Lett., 10, 486, 1963.
- [9] R.A.Ferrell, R.E.Prange. Phys. Rev. Lett., 10, 479, 1963.

I) Настоящая работа была доложена на Всесоюзном совещании по физике конденсированного состояния 11-15 мая 1965 г. в г.Харькове.