

Письма в ЖЭТФ, том 11, стр. 92 – 97

20 января 1970 г.

**О ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ТОЧЕЧНОГО КОНТАКТА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ**

А.Ф.Волков, Ф.Я.Надь

В настоящее время известно, что точечные контакты между сверхпроводниками обладают свойствами, аналогичными свойствам туннель-

ных переходов Джозефсона [1-3]. Однако, наличие такой внешней аналогии с туннельным переходом, свойства которого хорошо изучены как экспериментально, так и теоретически [4], не вносило полной ясности в понимание механизма обнаруженных на сверхпроводящих контактах эффектов. В работе [5] была предложена и теоретически исследована модель сверхпроводящего контакта, которая позволила объяснить основные наблюдаемые особенности. Эта теория объяснила, например, наличие вертикального участка-ступеньки на вольт-амперной характеристике $I(V)$ при напряжении $V = \hbar \omega / 2e$ под действием слабого СВЧ излучения. Как можно показать, полученная в [5] формула для $I(V)$ при облучении справедлива только при $V = \hbar \omega / 2e$ и вопрос о виде вольт-амперной характеристики вблизи ступеньки остался неясным. В частности, согласно работе [5] зависимость $V(I)$ при облучении неоднозначна, т. е. вид измеряемой вольт-амперной характеристики вблизи ступеньки должен зависеть от режима измерения (задан ток через контакт или напряжение на нем).

В настоящей работе на основе предложенной в [5] модели вычисляется характеристика $I(V)$ при облучении, в частности, вблизи ступеньки, и результат сравнивается с проведенным экспериментом. Получено, что $V(I)$ — однозначная функция и поэтому вид наблюдаемой вольт-амперной характеристики не зависел от режима измерений.

Запишем уравнение для разности фаз ϕ параметра порядка при наличии внешнего облучения в безразмерных переменных [5]:

$$\dot{\phi} + \sin \phi = j + j_1 \sin(\Omega \tau) \quad (1)$$

Здесь $\tau = t/t_0$, $t_0 = \hbar / 2e I_k R$, I_k — критический ток контакта, R — сопротивление контакта в нормальном состоянии, $j = \frac{I}{I_k}$ — ток через контакт, который считается постоянным. Последнее слагаемое в правой части (1) соответствует внешнему сигналу с амплитудой $I_1 = j_1 I_k$ и частотой $\omega = \Omega / t_0$. Для определения вольт-амперной характеристики из (1) следует найти напряжение $v(\tau) = \frac{d\phi}{d\tau}$ и усреднить его по времени. Уравнение (1) удастся исследовать в предположении $\Omega \gg 1$ (фактически неравенство не должно быть сильным). Если интересоваться видом вольт-амперной характеристики при напряжениях не слишком близких к Ω (положение ступеньки), то решение можно искать в виде $\phi = v\tau + \psi$, где v — среднее напряжение, а ψ — осциллирующая

функция, амплитуда которой оказывается малой ($\psi \sim 1/j$, i_1/Ω ; $j \sim v \sim \Omega$). Тогда, решая (1) итерациями по ψ , можно найти:

$$j = j_0(v) - \frac{j_1^2}{8\Omega^2(\Omega - v)} - \frac{j_1^2}{8\Omega v(v + \Omega)}. \quad (2)$$

Здесь $j_0(v) = v + 1/2v + \dots = \sqrt{1 + v^2}$ – вольт-амперная характеристика в отсутствие облучения [5]. Из (2) видно, что при напряжениях не близких к Ω поправка к вольт-амперной характеристике за счет облучения имеет второй порядок по j_1 . Однако при уменьшении разности $(\Omega - v)$ она растет. В этом случае второе слагаемое в (2) становится более существенным, что приводит к опусканию вольт-амперной характеристики, тем большему, чем ближе v к Ω (при $(\Omega - v) \ll i_1/\Omega$ выражение (2) становится несправедливым), если $v < \Omega$ и поднятию ее, если $v > \Omega$. Последнее слагаемое в (2) описывает опускание всей вольт-амперной характеристики при облучении.

Вблизи ступеньки решение (1) ищем в виде $\phi = \chi + \psi_\delta$, где $\chi = vt + \psi_M$, ψ_M – медленно меняющаяся (с периодом $(v - \Omega)$) часть фазы, она отвечает гармоникам разностной частоты (второе слагаемое в (2) обусловлено вкладом именно этих гармоник); ψ_δ – быстро меняющаяся (с периодом $v \sim \Omega$) часть фазы, она соответствует собственным и вынужденным колебаниям напряжения. Подставляя это выражение в (1), получим с учетом малости ψ_δ :

$$\dot{\chi} + \dot{\psi}_\delta + \sin \chi + \psi_\delta \cos \chi = j + i_1 \sin(\Omega t). \quad (3)$$

Усредняя (3) по быстрым оцилляциям, получим уравнение для медленно меняющейся функции:

$$\dot{\chi} + \langle \psi_\delta \cos \chi \rangle = j. \quad (4)$$

Вычитая (4) из (3), получим уравнение для ψ_δ , из которого в первом порядке по v^{-1} найдем $\psi_\delta = \cos \chi / \dot{\chi}(r_0) - (i_1/\Omega) \cos(\Omega t)$, где r_0 – некоторый фиксированный момент времени. После подстановки этого выражения в (4) уравнение для χ принимает вид:

$$\dot{\chi} - (i_1/2\Omega) \cos(\chi - \Omega t) = j - \frac{1}{2\dot{\chi}(r_0)}. \quad (5)$$

Уравнение (5) можно привести к виду, аналогичному уравнению для ϕ в отсутствие облучения. Интегрируя его, определим вид вольт-амперной характеристики :

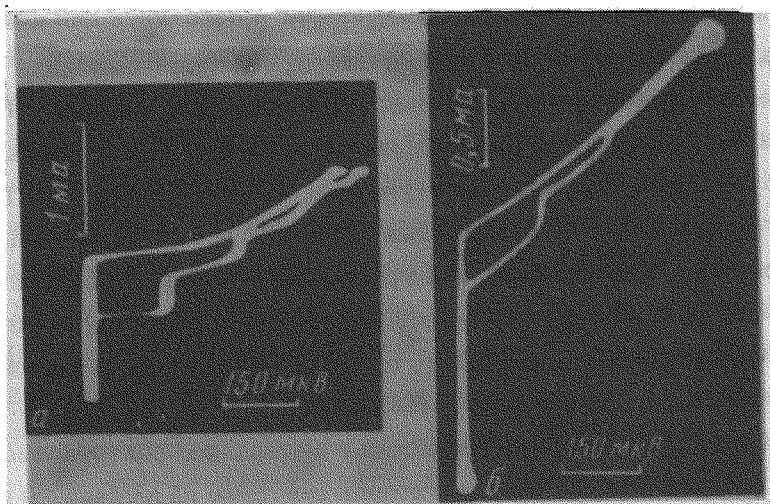
$$i = \begin{cases} i_0(v) + \sqrt{(v - \Omega)^2 + (i_1/2\Omega)^2}, & v \neq \Omega \\ i_0(\Omega) - (i_1/2\Omega) \cos \theta, & v = \Omega \end{cases} \quad (6)$$

Где θ – разность фаз между вынужденными и собственными колебаниями напряжения, $i_0 = \Omega + 1/2 v$. Видно, что вольт-амперная характеристика вблизи ступеньки имеет такой же вид, как и при $v = 0$ в отсутствие облучения, т. е. и вблизи ступеньки $v(i)$ – однозначная функция. На некотором удалении от ступеньки, при $|v - \Omega| \gg i_1/\Omega$ выражение (6) переходит в соотношение (2), если $|v - \Omega| \ll \Omega$. Аналогичным образом можно вычислить критический ток при любых интенсивностях облучения. Оказывается, что $I_k(i_1) = I_k |J_0(i_1/\Omega)|$, а амплитуда ступеньки $\Delta I = 2I_k |J_1(i_1/\Omega)|$, где J_0 и J_1 функции Бесселя нулевого и первого порядка, соответственно.

Экспериментально измерялась вольт-амперная характеристика точечных контактов Nb-Nb, подвергаемых действию облучения, в разных режимах : при заданном токе и при заданном напряжении на контакте. Степень прижатия контакта регулировалась снаружи гелиевого криостата, что позволяло получать вольт-амперной характеристики различного вида. В данном исследовании нас интересовали вольт-амперные характеристики, соответствующие резистивному состоянию при $I > I_k$ с сопротивлением ~ 1 ом. По нашим оценкам радиус контактов в этом случае составлял $\leq 3 \cdot 10^{-6}$ см. Контакты облучались 2- и 4-миллиметровым излучением мощностью $10^{-5} + 10^{-8}$ см при температуре 4,2°K. Режим заданного напряжения осуществлялся включением перехода в низкоомную цепь с внутренним сопротивлением источника напряжения 10^{-2} ом и последовательно включенным сопротивлением для измерения тока в цепи величиной 10^{-1} ом.

Основные результаты эксперимента представлены на рисунке, где приведены осциллограммы вольт-амперной характеристики точечного контакта в двух режимах : рис. 1, а – задается ток, рис. 1, б – задается напряжение. На каждом из рисунков видны две вольт-амперные характеристики : без облучения – плавная кривая и при воздействии 4-миллиметрового излучения – кривая со ступеньками. Качественно вид вольт-амперной характеристики не зависел ни от частоты излучения, ни от

величин I_k и R . Отметим следующее. Во-первых, действие СВЧ излучения мощностью 10^{-5} вт на точечный контакт приводит не только к появлению ступенек на его вольт-амперную характеристику, соответствующих основной частоте и ее гармоникам, но и к опусканию всей кривой $I(V)$ относительно ее положения в отсутствие излучения, т. е. относительно $I_0(V)$. При больших мощностях вольт-амперная характеристика была близка к омической, а амплитуда ступенек уменьшалась до нуля.



Осциллограммы вольт-амперной характеристики точечного контакта Nb-Nb при 4,2°K без облучения и при воздействии 4-миллиметрового излучения: *a* – режим заданного тока, *b* – режим заданного напряжения

Однако при малых мощностях излучения ($\sim 10^{-8}$ вт) опускание $I(V)$ было мало и кривая $I(V)$ в соответствии с теорией проходила ниже $I_0(V)$ при $V < \frac{\hbar\omega}{2e}$ и выше при $V > \frac{\hbar\omega}{2e}$. Во-вторых, вид вольт-амперной характеристики в обоих режимах качественно не отличался.

Таким образом, на основе предложенной в [5] модели вычислена вольт-амперная характеристика точечного сверхпроводящего контакта при наличии облучения и зависимость ее от интенсивности излучения. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчетом, что свидетельствует о применимости предложенной в [5] модели к исследованной системе.

Литература

- [1] J.E.Zimmerman, A.H.Silver. Phys. Rev., 141, 367, 1966.
 - [2] И.Я.Краснополин, М.С.Хайкин. Письма в ЖЭТФ, 6, 633, 1967.
 - [3] И.М.Дмитриенко, С.И.Бондаренко, Т.П.Нарбут. Препринт ФТИНТ АН УССР, 1969.
 - [4] V.N.Taylor. J.Appl. Phys., 39, 2490, 1968.
 - [5] Л.Г.Асламазов, А.И.Ларкин. Письма в ЖЭТФ, 9, 150, 1969.
-