

АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ДЖОЗЕФСОНОВСКОМ SNS-ПЕРЕХОДЕ

А.П.Володин¹⁾, Г.Ю.Логвенюв, В.В.Рязанов, И.В.Фальковский¹⁾

Экспериментально наблюдался нелинейный акустоэлектрический эффект в джозефсоновском SNS-переходе Ta – Cu – Ta при пропускании через него бегущей низкочастотной звуковой волны. Периодическая амплитудная модуляция звуковой волны приводила к возникновению ступеней постоянного напряжения на вольт-амперной характеристике (ВАХ) перехода.

Бегущая звуковая волна, взаимодействуя с нормальными возбуждениями сверхпроводника, передает им импульс, вызывая ток нормальной компоненты I_n . Это акустоэлектрическое явление родственно термоэлектрическим эффектам в металлах, обусловленным фононным увлечением электронов^{1,2}. Нормальный ток всюду в объеме сверхпроводника должен компенсироваться током сверхпроводящей компоненты I_s ³. При прохождении звука через джозефсоновский SNS-переход возникающий ток I_s может превысить критический ток перехода I_c и тогда, как в термоэлектрическом случае⁴⁻⁶, должны наблюдаться джозефсоновская генерация и нелинейное возрастание среднего во времени напряжения на переходе при увеличении мощности звукового потока через него. Наблюдению подобных явлений и посвящена данная работа.

Впервые акустоэлектрический эффект в металлах был рассмотрен Парменгером⁷; Завацкий наблюдал увлечение звуком электронов в нормальных металлах²; Гальперин, Гуревич, Козуб рассмотрели акустоэлектрические явления в сверхпроводящих кольцах³. В работах Шмидта с сотрудниками⁴⁻⁶ осуществлено экспериментальное наблюдение, сходного с обсуждаемым, термоэлектрического эффекта в джозефсоновском переходе.

В качестве джозефсоновских SNS-переходов в нашей работе использовались сэндвичи Ta – Cu – Ta, приготовленные методом совместной горячей прокатки⁴. Толщины танталовых обкладок сэндвича превышали 0,03 см; толщина медной прослойки составляла 4 – 5 мкм. Переход имел площадь $\sim 0,04$ см².

При температуре эксперимента $T \approx 0,9 T_c^s$ типичные параметры перехода были следующие: критический ток перехода $I_c \approx 100$ мкА, нормальное сопротивление $R_n \approx 10^{-8}$ Ом, характерное джозефсоновское напряжение $V_c = I_c R_n \approx 10^{-12}$ В, характерная джозефсоновская частота $f_c \approx 500$ Гц. Для записи вольт-амперных и вольт-звуковых характеристик переходов использовался вольтметр на основе ВЧ-сквида с обратной связью по магнитному потоку. Эксперименты проводились в экранированном от магнитного поля криостата с остаточным полем $\lesssim 10^{-3}$ Гс.

Через переход, помещенный между кварцевым и медным участками звукопровода, пропусклась бегущая звуковая волна. Источником звука служил магнитострикционный преобразователь с рабочей частотой ≈ 43 кГц, закрепленный на кварцевом участке звукопровода снаружи криостата. За образцом на медном участке звукопровода располагался пьезоэлемент из пьезокерамики ЦТС-19 для контроля проходящей звуковой мощности, которая лежала в пределах 0,01 – 0,5 Вт. Акустическая система с длинным звукопроводом обеспечивала минимальную величину электромагнитных наводок в область SNS-перехода.

На рис. 1 приведены три характеристики одного из переходов, снятые при одинаковой температуре образца $T \approx 0,9 T_c^s$: кривая 1 – обычная вольт-амперная характеристика SNS-перехода, кривая 2 – вольт-тепловая характеристика перехода, подробно обсуждаемая в^{4,6}, кривая 3 – исследуемая зависимость акустоэлектрического напряжения на переходе от проходящей звуковой мощности S . Легко видеть, что все кривые подобны по форме, однако акустоэлектрическое и термоэлектрическое напряжения имеют противоположные знаки при одном направлении теплового и звукового потоков через переход. При пропускании допол-

нительного переменного тока с частотой $f \approx 0,5$ кГц на всех трех кривых наблюдались ступени постоянного напряжения при $V_n = nf\Phi_0$ (Φ_0 — квант магнитного потока, n — целое число).

Было обнаружено также появление ступеней постоянного напряжения на обычной вольт-амперной характеристике перехода в отсутствие внешнего переменного тока при амплитудной модуляции, идущей через переход звуковой волны, с частотами модуляции $f \lesssim 1,2$ кГц. На рис. 2 показана серия ВАХ перехода, снятая при прохождении звукового потока фиксированной мощности $\sim 0,1$ Вт с различными частотами модуляции $f \approx 520$ Гц, 670 Гц, 970 Гц, 1100 Гц. Стрелками показаны рассчитанные с помощью джозефсоновского соотношения значения положений ступенек V_n . На рис. 3 показаны ВАХ того же перехода, полученные при пропускании через переход звукового потока с фиксированной частотой модуляции $f \approx 510$ Гц, но различной мощности.

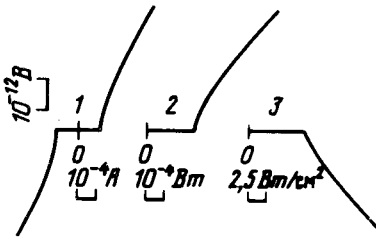


Рис. 1

Рис. 1. Характеристики джозефсоновского SNS-перехода, снятые при $T/T_c^S \approx 0,9$: 1 — вольт-амперная характеристика (ВАХ), критический ток перехода $I_c \approx 100$ мкА, 2 — вольт-тепловая характеристика (ВТХ), критический поток тепла $P_c \approx 0,3$ мВт, 3 — вольт-звуковая характеристика (ВЗХ), критический звуковой поток $S_c \approx 5$ Вт/см²

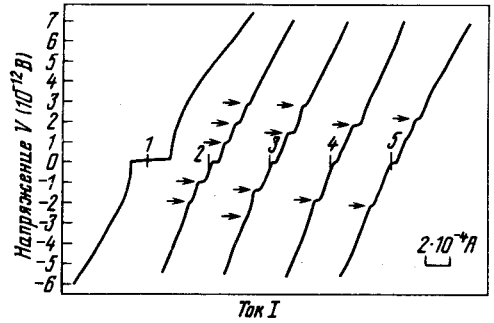


Рис. 2

Рис. 2. Набор ВАХ перехода, через который идет звуковой поток мощности $S \approx 0,1$ Вт, но модулированный по амплитуде с различной частотой: 1 — $f \approx 520$ Гц, 2 — $f \approx 670$ Гц, 3 — $f \approx 970$ Гц, 4 — $f \approx 1100$ Гц.

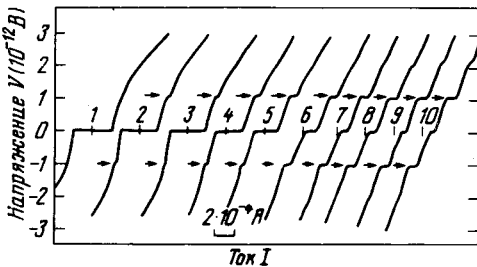


Рис. 3. Набор ВАХ перехода, через который идет звуковой поток с фиксированной частотой модуляции $f \approx 510$ Гц, но с различной мощностью: 1 — 0 Вт/см², 2 — 0,42 Вт/см², 3 — 1,69 Вт/см², 4 — 2,4 Вт/см², 5 — 2,6 Вт/см², 6 — 2,9 Вт/см², 7 — 4,5 Вт/см², 8 — 6,2 Вт/см², 9 — 7,4 Вт/см², 10 — 9,5 Вт/см²

Приведенные выше экспериментальные результаты можно непротиворечиво описать, предположив, что основной вклад в исследуемое акустоэлектрическое напряжение SNS-сэндвича Та — Си — Та вносит медная прослойка. Действительно, экстраполяция литературных данных⁸ в область киллогерцевых частот⁹ показывает, что коэффициент затухания звука Γ_{Ta} не может превышать Γ_{Cu} ; однако, даже при равенстве этих величин вклад сверхпроводника, обязанный возникновению в нем неравновесного электрического поля¹⁰, по нашим оценкам, значительно меньше вклада нормальной прослойки. Таким образом, наблюдаемый эффект (рис. 1, кривая 3) связан с возникновением акустоэлектрического тока в медной прослойке³:

$$I_n = - \frac{A \Gamma_{Cu}}{\rho N e c} S.$$

Здесь A — площадь перехода, e — заряд электрона, N и ρ — плотность электронов проводимости и удельное сопротивление меди, c — скорость звука. Зная критический ток перехода (кривая 1, на рис. 1) и критическую звуковую мощность S_c (кривая 3, на рис. 1) можно оценить коэффициент затухания низкочастотного звука в меди $\Gamma_{Cu} \approx 10^{-2} \text{ см}^{-1}$, что согласуется с литературными данными ⁹.

Необходимо отметить, что паразитные термоэлектрические вклады в наблюдаемый эффект пренебрежимо малы. Выделение тепловой мощности при прохождении звукового потока S_c , по нашим оценкам, создает тепловой поток через переход значительно меньше, чем величина P_c (кривая 2, на рис. 1). Прямым доказательством акустоэлектрического происхождения наблюдаемого эффекта является несовпадение знаков термоэлектрического и акустоэлектрического напряжений при одном направлении теплового и звукового потоков в переходе (кривые 2 и 3 на рис. 1). В соответствии с экспериментальными данными ⁶ в термоэлектрическом эффекте для сэндвича Ta — Cu — Ta при температуре $T \approx 0,9 T_c^S$ преобладает вклад сверхпроводящего тантала, знак термоэдс которого и определяет знак термоэлектрического эффекта.

Авторы признательны Л.Г. Асламазову за помощь в осуществлении данной работы, а также Н.В. Заварицкому за сделанные замечания.

Литература

1. И.М. Суслов, ЖЭТФ, 1983, 85, 1847.
2. Н.В. Заварицкий, ЖЭТФ, 1978, 75, 1873.
3. Ю.М. Гальперин, В.Л. Гуревич, В.И. Козуб, ЖЭТФ, 1973, 65, 1045.
4. М.В. Карцовник, В.В. Рязанов, В.В. Шмидт. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 373.
5. G.I. Panaitov, V.V. Ryzanov, A.V. Ustinov, V.V. Schmidt. Proc. 17-th Intern. Conf. on Low Temp. Physics (LT-17), part II, 1984, DL-19, 823.
6. Г.Ю. Логвенков, В.В. Рязанов, ФНТ, 1987, 13,
7. R.H. Parmenter, Phys. Rev. 1953, 89, 990.
8. Дж. Райн, К. Джонс. Сб. "Физическая акустика" под ред. У. Мэзона и Р. Терстона, М.: изд. Мир, 1974.
9. А. Гранато, К. Люкке. Сб. "Физическая акустика" под ред. У. Мэзона и Р. Терстона, М.: изд. Мир, 1969.
10. С.Н. Артеменко, А.Ф. Волков, ЖЭТФ, 1976, 70, 1051.