

НАБЛЮДЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В SNS-ПЕРЕХОДЕ

М.В.Карцовник, В.В.Рязанов, В.В.Шмидт

Наблюдалось появление конечного напряжения на джозефсоновском переходе Та – Си – Та при пропускании через переход потока тепла, что связывается с проявлениями нестационарного эффекта Джозефсона, вызванного протеканием термотока. Возможность индуцирования, сравнимых с I_C , термотоков обусловлена низким значением V_C ($\sim 10^{-13}$ В) переходов.

Среди возможных способов наблюдения термоэлектрических явлений в сверхпроводящих системах обратил на себя внимание метод Кларка и Фрика [1], которые наблюдали асимметрию критических значений сверхпроводящих транспортных токов разных направлений в джозефсоновских точечных контактах при наличии градиента температуры. Независимо, Аронов и Гальперин [2] теоретически показали возможность наблюдения аналога нестационарного эффекта Джозефсона, вызванного протеканием термотока. Шмидт [3] теоретически рассмотрел эффекты, возникающие в распределенном джозефсоновском SNS' (сверхпроводник – нормальный металл – сверхпроводник) – переходе, когда его электроды находятся при разных температурах.

Поведение джозефсоновского перехода в присутствии градиента температуры легко понять на основе его резистивной модели. Наличие разности температур $T_1 > T_2$ на переходе приведет к появлению нормальной компоненты, термотоку I_T . Однако, накопления зарядов на электродах изолированного перехода не происходит, так как через "слабое звено" идет компенсирующий сверхпроводящий ток [1]

$$I_S = -I_T = -\alpha (T_1 - T_2) / R_N. \quad (1)$$

Здесь α и R_N – соответственно, абсолютная дифференциальная термоэдс и сопротивление металла перехода в нормальном состоянии. При разности температур на переходе выше значения

$$(T_1 - T_2)_C = I_C R_N / \alpha = V_C / \alpha \quad (2)$$

термоток I_T превысит критическое значение I_C и на переходе должна возникнуть разность электрохимических потенциалов V , приводящая к джозефсоновской генерации с частотой $\omega_0 \approx (2e/\hbar)\alpha (T_1 - T_2)$ для значений $(T_1 - T_2) > V_C / \alpha$ [2].

В упомянутом эксперименте [1] не удалось достичь близких к I_C значений термотока I_T , вследствие слишком высокого значения V_C точечных контактов ($\sim 10^{-5}$ В). Целью данной работы явилось наблюдение термоэлектрических эффектов на джозефсоновских SNS-сандвичах, значения V_C которых составляют всего $\sim 10^{-13}$ В, что позволило ожидать в новой системе значительно более высоких термотоков при относительно небольших градиентах температуры.

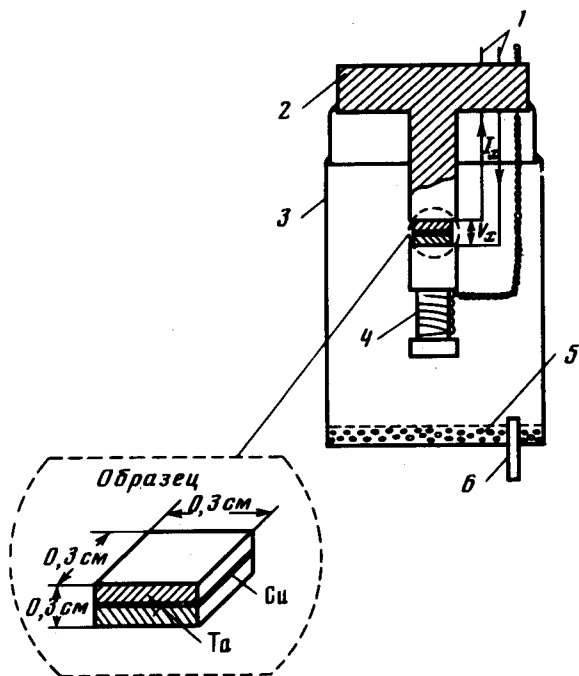


Рис.1. Вакуумируемый стакан с образцом

SNS-сэндвичи Ta - Cu - Taготавливались методом совместной горячей прокатки в вакууме. В дальнейшем полученные толстые пластины дополнительно раскатывались с тем, чтобы первоначально диффузионно-сваренные NS-поверхности раздела растянулись в несколько раз; это обеспечило чистоту NS-границ. Отсутствие окислов на подавляющей части площадей NS-поверхностей перехода подтверждается результатами измерений избыточного сопротивления и джозефсоновских свойств таких сэндвичей [4]. Толщина медной прослойки в разных образцах составляла 7 и 10 мкм. Образцы вырезались электроискровым способом и затем травились в смеси кислот для устранения образовавшихся при резке перемычек тантала, что контролировалось с помощью сканирующего электронного микроскопа.

На рис.1 показан вакуумируемый стакан (3), в который во время эксперимента помещался образец, надежно приклеенный клеем БФ-2 между двумя медными теплопроводами. Один из теплопроводов (2) имел контакт с гелиевой ванной, на другой - наматывался безындукционный нагреватель (4). Сверхпроводящие выводы (1) крепились к образцу точечной сваркой и служили для задания тока I_X от внешнего источника и измерения напряжения V на переходе. Стакан откачивался при комнатной температуре через свинцовую трубку (6) и герметизировался. Внутри стакана помещался активированный уголь (5). Напряжение на образце ($\sim 10^{-13} - 10^{-12}$ В) измерялось по компенсационной схеме, в качестве нуль-детектора в которой использовался ВЧ-сквид [5]. Ошибка не превышала $\pm 5\%$.

На рис.2 показаны две характерные зависимости напряжения для одного из образцов: от внешнего тока через образец I_X и от мощности нагревателя P , измеренные при температуре 4,2 К ($T/T_C = 0,97$). Масштабы I_X и P приведены путем совмещения точек появления обнару-

живаемого напряжения ($\sim 3 \cdot 10^{-14}$ В). Вольт-амперная характеристика $V(I_X)$, ($P = 0$) хорошо соответствует зависимости [6] $V = R_N \sqrt{I_X^2 - I_C^2}$ для $R_N \approx 3 \cdot 10^{-9}$ Ом. Измеренная зависимость критического тока от температуры удовлетворительно соответствует зависимости [7] $I_C \sim (1 - T/T_C)^2$ для SNS-перехода вблизи T_C . Все это свидетельствует о том, что образец, действительно, представляет собой SNS-переход с однородным распределением внешнего тока по площади перехода (джозефсоновская глубина проникновения $\lambda_J \approx 0,16$ см), что позволяет сравнивать показанные на рис.2 зависимости [3]. Кривые $V(P)$, ($P \sim 10^{-4}$ Вт) и $V(I_X)$ удовлетворительно совмещаются, причем знаки V противоположны при одном направлении токов I_X и I_T (для a джозефсоновской прослойки получен положительный знак). Это полностью согласуется с рассмотрением в рамках резистивной модели, которая в "тепловом" случае дает зависимость $V \approx R_N \sqrt{I_T^2 - I_C^2}$.

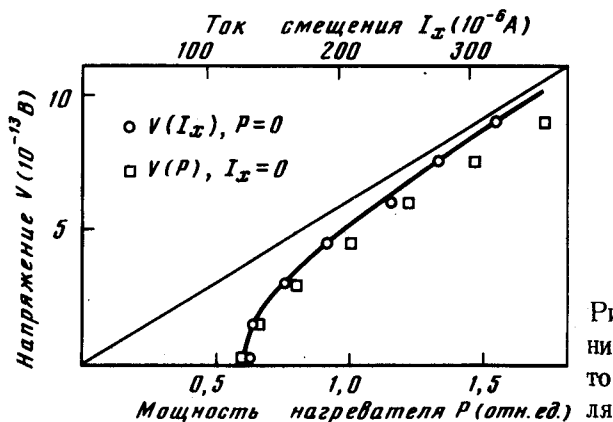


Рис.2. Зависимости напряжения на образце от внешнего тока и мощности нагревателя

На рис.3 показана, измеренная на том же образце "асимметрия [1]" критических значений транспортного тока I_X^C при коммутации тока I_X для разных значений потока тепла одного направления. Верхняя ветвь в верхней половине графика соответствует параллельному течению сверхпроводящего термотока $I_S = -I_T$ и тока внешнего источника I_X^C . Часть верхней ветви в отрицательной половине графика соответствует случаю $|I_S| \geq I_C$, но встречный ток I_X^C уменьшает это значение до критической величины. Нижняя ветвь соответствует случаю $|I_X| \geq I_C$, но I_S течет навстречу I_X , так что $I_X - I_S = I_C$. Такая интерпретация результатов, показанных на рис.3, справедлива, для $a > 0$ джозефсоновской прослойки.

Полагая $a \approx 10^{-8}$ В/К (типичное для чистой меди значение), для $V_C \approx 4 \cdot 10^{-13}$ В можно получить следующую оценку для "критической" разности температур на джозефсоновской прослойке (2): $(T_1 - T_2)_C \approx 4 \cdot 10^{-5}$ К. Однако, необходимо отметить, что в термоэлектрических процессах, происходящих в области джозефсоновского слабого звена, возможно принимает участие не только медная прослойка (верхняя оценка ее сопротивления дает $\sim 5 \cdot 10^{-10}$ Ом), но и близлежащие неравновесные слои сверхпроводящего тантала, вносящие вклад в избыточное сопротивление NS-границы [8].

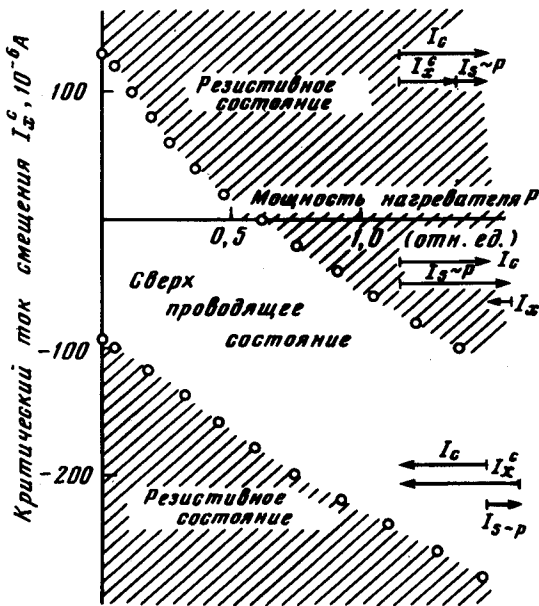


Рис.3. Влияние потока тепла через переход на величину критического транспортного тока

Авторы признательны Ю.М.Гальперину, В.Л.Гуревичу, В.И.Козубу, А.Л.Шеланкову за полезные дискуссии, а также Н.В.Заварицкому за сделанные замечания.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
24 февраля 1981 г.

Литература

- [1] J.Clarke, S.M.Freake. Phys. Rev. Lett., 29, 588, 1972.
- [2] А.Г.Аронов, Ю.М.Гальперин. Письма в ЖЭТФ, 19, 281, 1974.
- [3] В.В.Шмидт. Письма в ЖЭТФ, 33, 104, 1981.
- [4] В.В.Шмидт, В.В.Рязанов, Л.А.Ермолаева. Направлено в J. Low Temp Phys.,
- [5] Дж. Кларк. Сб, "Слабая сверхпроводимость", М.; изд. Мир, 1980, стр. 57.
- [6] Л.Г.Асламазов, А.И.Ларкин, Ю.Н.Овчинников. ЖЭТФ, 55, 323, 1958.
- [7] J.Clarke. Proc. Roy. Soc., A308, 447, 1969.
- [8] С.Н.Артеменко, А.Ф.Волков. ЖЭТФ, 70, 1051, 1976.