

СВЕРХПРОВОДЯЩЕЕ СЛАБОЕ ЗВЕНО ИЗ КЕРАМИКИ С $T_c \approx 90$ К В СВЧ ПОЛЕ

Н.В.Заварицкий, В.Н.Заварицкий

Создано слабое звено из керамики с $T_c \approx 90$ К обладающее в СВЧ поле от 25 до 40 ГГц характеристиками одиночного перехода Джозефсона. Показано, что при 77 К слабое звено реагирует на СВЧ поле вплоть до $3,5 \cdot 10^{12}$ Гц.

Проблемы "слабой" сверхпроводимости после открытия эффекта Джозефсона стали одними из центральных в сверхпроводимости как из-за интереса к исследованию макроскопических квантовых систем, так и из-за возможности создания новых устройств. В этой проблеме основной задачей является осуществление надежного перехода Джозефсона.

Создание высокотемпературных сверхпроводников, в первую очередь (Y-Ba-Cu-O) композита с устойчивой критической температурой выше 77 К — температуры кипения азота, поставило задачу освоения методики изготовления переходов Джозефсона из этого вещества. Использование керамических объектов, полученных спеканием из шихты оказалось наиболее перспективным, поскольку этот способ позволял осуществлять контролируемую сверхпроводящую связь вдоль образца. Действительно, используя керамические мостики размерами

$\sim (10^{-2} \text{ см})^3$, удалось получить стабильные звенья обладающие в интерференционном контуре характеристиками одиночного перехода Джозефсона ¹.

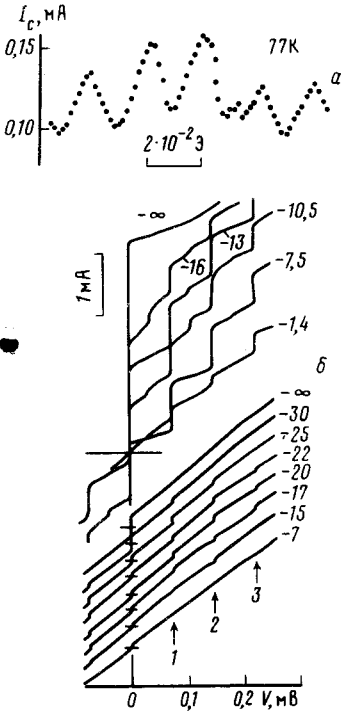


Рис. 1

Рис. 1. а – Зависимость критического тока мостика из керамики от внешнего магнитного поля; б – вольт-амперные характеристики слабого звена из керамики в СВЧ-поле, $\omega = 35,5$ ГГц. Цифры на кривых – ослабление сигнала СВЧ в дБ. Вверху – копии записей при 4,2 К, внизу – при 77 К. Нули кривых (для $T \approx 77$ К) смещены и отмечены линиями

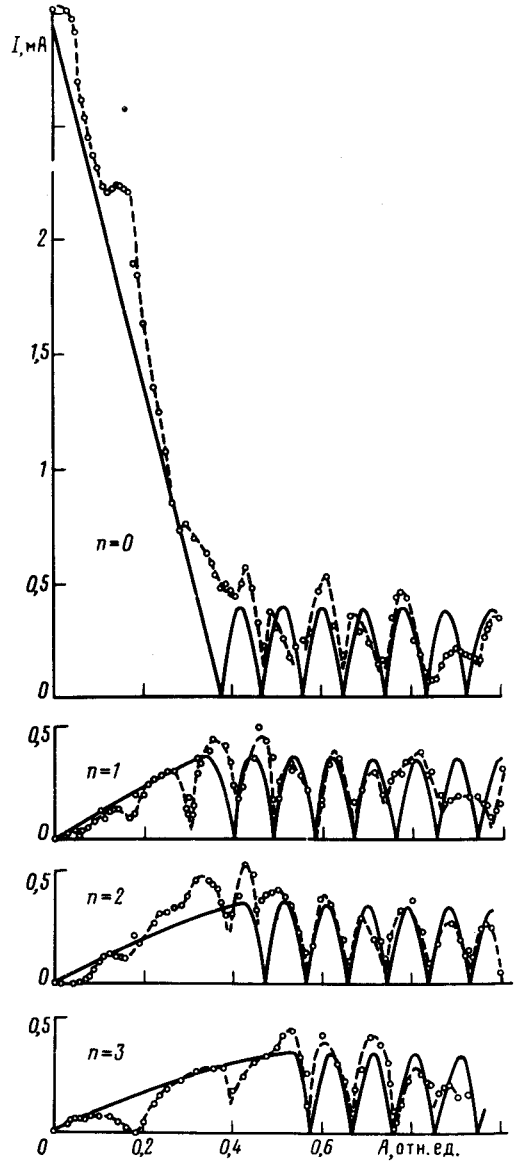


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость амплитуды ступенек тока от амплитуды СВЧ-поля. Сплошная линия – расчет из ⁹, пунктирная кривая проведена по экспериментальным точкам

Ранее было известно, что характеристики керамики хорошо описываются моделью сверхпроводящего стекла, которое состоит из многих сверхпроводящих гранул шихты объединенных джозефсоновскими переходами. Было известно, что при облучении микроволновым из-

лучением различных контактов изготовленных из керамики можно наблюдать типичные для перехода Джозефсона скачки тока, однако за счет каких участков контактов в керамике они возникают существовали лишь противоречивые мнения ²⁻⁷.

Для решения этой проблемы нами были исследованы мостики размерами $\sim (10^{-2} \text{ см})^3$, выделенные из интерферометров, обладающих долговременной стабильностью характеристик ¹. Для измерения $J-V$ -характеристик использовался четырехконтактный метод.

Критический ток J_c для шести исследованных образцов составлял $(5 \div 50) \cdot 10^{-5} \text{ А}$ при 77 К и возрастал до $(3 \div 300) \cdot 10^{-3} \text{ А}$ при 4,2 К. Наблюдалась периодическая зависимость величины критического тока от внешнего поля (рис. 1а), что позволило оценить сечение сверхпроводящих квантующих петель $\sim 10^{-6} \text{ см}^2$, что близко к сечению гранул шихты.

При облучении звена микроволновым излучением $\omega = 25 \div 40 \text{ ГГц}$ при всех температурах измерения от 4,2 до 77 К на кривых $J(V)$ появляются скачки тока при напряжениях $V_n = n(h\omega/2e)$, где n — целое число (рис. 1б). Величина V_n изменяется прямо пропорционально ω , расчетные и определенные в опыте значения V_n совпадали с точностью измерений $3 \cdot 10^{-4}$. Полученное значение указывает на точность утверждения, что перенос зарядов в ВТС осуществляется парами.

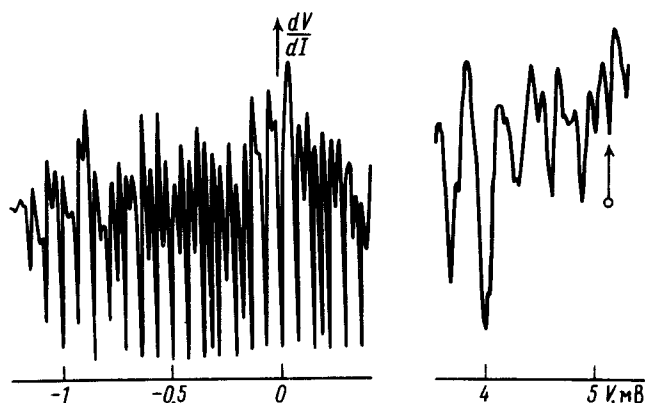


Рис. 3. Зависимость dV/dJ от напряжения на мостике из керамики при облучении его СВЧ на частоте $\omega = 35,5 \text{ ГГц}$. Слева — запись при $T = 4,2 \text{ К}$, справа — часть записи при 77 К (стрелкой отмечено положение особенности с $n = 70$)

Помимо основных токовых ступенек при $V = V_n$ на кривых $J(V)$ видны особенности при $V = V_{n/2}$, которые часто наблюдаются на различных типах джозефсоновских переходов из обычных сверхпроводников ⁸.

Амплитуда ступенек тока существенно зависит от амплитуды микроволнового поля. Зависимость заметно отличается от бесселевой, поскольку все измерения проводились в режиме заданного тока ⁸. Сравнение с результатами аналогового расчета ⁹ для этого случая, которые приведены сплошной кривой на рис. 2, показывает на вполне удовлетворительное согласие. Для исследуемого образца безразмерная частота $\Omega = (h\omega/2eRdJ_c) \approx 2 \cdot 10^{-2}$. Совмещение экспериментальных данных с расчетом проведено по линейной экстраполяции I_c от амплитуды СВЧ поля — A и четвертому нулю. Некоторое отличие расчетных кривых от экспериментальных наблюдается только в области $A < 0,4$ и возможно обусловлено приближениями в расчетах ⁹.

Если при 4,2 К отчетливо видно до 20 ступенек тока, то при 77 К их число уменьшалось до 3 – 5. Здесь в силу тепловых флуктуаций ⁸ в случае, если $(\hbar I_c / 2e) \ll 5 kT$ ступеньки тока размываются, превращаясь в изломы на кривой $J(V)$, которые легко идентифицируются $(dV/dI) - V$ -зависимостях (рис. 3). Используя модуляционную методику, удавалось фиксировать индуцированные СВЧ особенности на кривых $dV/dI(V)$ до 100 ступеньки при частоте облучения 35,5 ГГц. Учитывая, что для регистрации сигнала была использована простейшая аппаратура и дополнительное согласование слабого звена с волноводным трактом не проводилось, полученное значение частоты $3,5 \cdot 10^{12}$ Гц является фактически нижней оценкой интервала частот, в которых исследуемое слабое звено можно рассчитывать использовать в качестве смесителя или детектора излучения.

Полученные результаты свидетельствуют, что характеристики исследуемого звена из керамики в СВЧ поле так же как в интерференционном контуре существенно не отличаются от характеристик одиночного перехода Джозефсона, например, типа мостика Дайма. В то же время в сечении звена из керамики находятся сотни сверхпроводящих гранул шихты и, как следствие вышесказанного, лишь одиночные из них являются эффективными. Воспользовавшись данными о критической плотности тока у $YBa_2Cu_3O_7$ при 4,2 К 10^7 А/см² ¹⁰ получаем, что наблюдаемую величину критического тока слабого звена может обеспечить сверхпроводящая "нить" с эффективным сечением всего лишь $(3 \cdot 10^{-8} \div 3 \cdot 10^{-10})$ см², то есть меньшим, чем размер гранулы. Мы полагаем, что необходимым условием для возможности создания слабого звена из керамики является получение в процессе твердофазной реакции химического синтеза образца разреженной сетки сверхпроводящих "нитей". Это предположение было подтверждено в результате дополнительных опытов по термической обработке различных образцов.

Авторы благодарны Н.А.Никитину за содействие в экспериментах, А.И.Ларкину за полезные дискуссии, А.И.Смирнову за любезно предоставленную СВЧ-технику.

Литература

1. Заварицкий Н.В., Заварицкий В.Н., Петров С.В. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 469.
2. Tsai J.S., Kubo Y., Tabuchi J. Phys. Rev. Lett., 1987, 58, 1979.
3. Варлашкин А.В., Васильев А.Л., Головашкин А.И. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, Приложение, 59.
4. Веркин Б.И., Бондаченко С.И., Дмитриев В.М. и др. ФНТ, 1987, 13, 995.
5. Moreland J., Goodrich L.F., Ekin J.W. et al. Appl. Phys. Lett., 1987, 51, 540.
6. Kita S., Tanabe H., Takahashi T. et al. Jap. J. Appl. Phys., 1987, 26, 1353.
7. Higashino Y., Takahashi T., Kawai T., Naito S. Jap. J. Appl. Phys., 1987, 26, 1211.
8. Бароне А., Патерно Дж. Эффект Джозефсона. М.: Мир, 1984, гл. 6, 11.
9. Russer P. J. Appl. Phys., 1972, 43, 2008.
10. Worthington T.K., Gallagher W.J., Dinger T.R., Sandstrom R.L. Novel Superconductivity Plenum, 1987, 781.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
27 января 1988 г.