

ДВИЖЕНИЕ ВИХРЕЙ В МОСТИКОВЫХ СТРУКТУРАХ ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

*Л.Э.Аматуни, А.А.Ахумян, К.И.Константинян,
Р.М.Мартиросян, Г.А.Овсянников¹⁾*

Обнаружено когерентное движение вихрей в мостиковых структурах из высокотемпературных сверхпроводников при протекании транспортного тока и внешнем СВЧ воздействии в миллиметровом диапазоне длин волн.

Проявление джозефсоновских свойств в мостиковых структурах (МС) из металлооксидных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с размерами сужения значительно превышающем длину когерентности (ξ) объясняется рядом авторов ^{1–3} наличием слабых связей между гранулами ВТСП. При этом предполагается, что в МС "работает" лишь одна межгранулярная джозефсоновская связь.

В настоящей работе экспериментально показано, что в МС из ВТСП явления, характерные для джозефсоновских переходов (ДП), например, появление ступенек тока на ВАХ, обусловленных синхронизацией собственного джозефсоновского излучения перехода внешним сигналом, могут возникать также из-за другого физического механизма возникновения переменного тока в переходе, а именно, из-за когерентного движения квантов магнитного потока (вихрей) под действием транспортного тока I и внешнего СВЧ воздействия. Отметим, что на МС из традиционных сверхпроводников (In, Sn и др.) эти явления хорошо известны ^{4,5}. Спецификой МС из ВТСП является возможность возникновения и движения не только абрикосовских вихрей ^{4,5}, но и других видов: джозефсоновских вихрей и гипервихрей ⁶.

¹⁾ ИРЭ АН СССР, Москва.

Исследуемые образцы представляли собой бруски прямоугольной формы из керамики Y-Ba-Cu-O размерами $6 \times 2,5 \times 0,5$ мм, в центре которых вырезалось сужение — МС с размерами: длина $L = 150\text{--}200$ мкм, ширина $W = 150\text{--}200$ мкм, толщина $d \lesssim 100$ мкм. Размеры гранул керамики составляли $a \approx 1$ мкм. ВАХ образцов измерялись четырехконтактным методом как в автономном режиме, так и при СВЧ внешнем воздействии на различных частотах в широком интервале температур T от 300 К до 4,2 К.

На рис. 1 представлены ВАХ одного из исследованных образцов для различных значений температуры. Видно, что ВАХ МС имеет вид, характерный для слабых связей с непосредственной проводимостью: в широком интервале T отсутствует гистерезис, а при достаточно высоких напряжениях $V \gtrsim 1$ мВ наблюдается значительный по величине избыточный ток, то есть ВАХ выходит на прямую, смещенную относительно зависимости $V = IR_N$ на величину $I_{ex} \gtrsim I_c$. При низких температурах $T \lesssim 17$ К на ВАХ наблюдается ряд наклонных плато по току. Следует отметить, что ВАХ МС, в отличие от классических ДП, асимметричны относительно $I = 0$ (на рис. 1 не показано), причем, степень асимметрии меняется с изменением температуры.

На вставке к рис. 1 приведена зависимость критического тока I_c МС от T . Сплошной линией показана теоретическая зависимость $I_c(T)$ туннельного ДП⁷, полученная в рамках теории БКШ. Видно, что экспериментальная зависимость $I_c(T)$ существенно отличается от теоретической. Отличие эксперимента еще более сильно по сравнению с теоретическими результатами Кулика и Омельянчука⁸ для ДП с непосредственной проводимостью. В ряде экспериментальных работ (см., например,⁹⁻¹¹) подобные зависимости $I_c(T)$ исследуемых образцов объясняются гранулированной структурой материалов ВТСП.

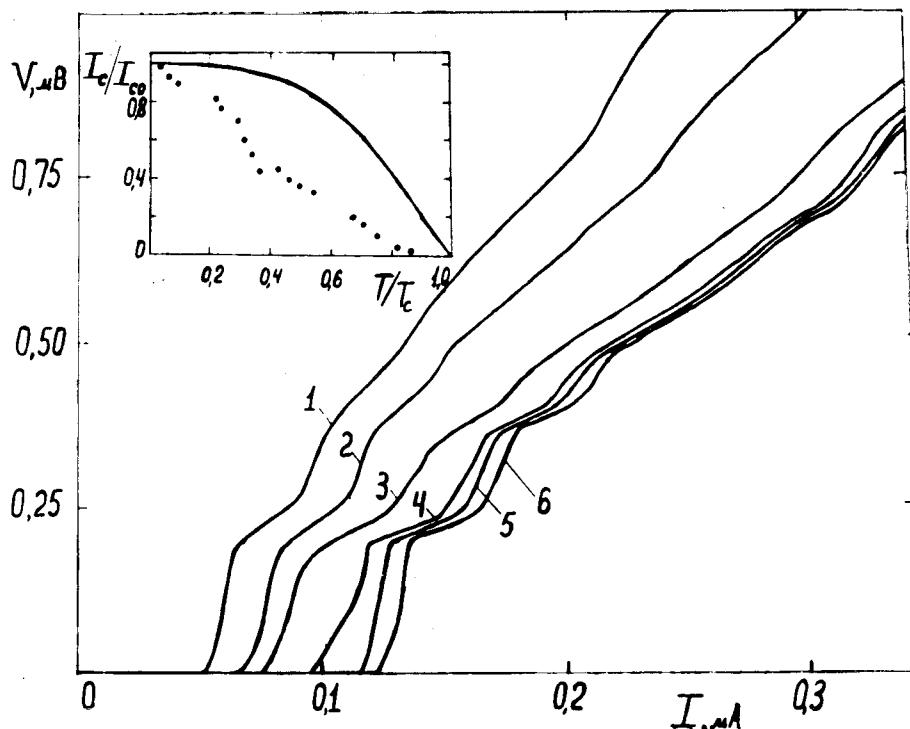


Рис. 1. Семейство ВАХ мостиковых структур при различных значениях температуры T : 1 — 25,1, 2 — 23,5, 3 — 22,6, 4 — 17,3, 5 — 5,0, 6 — 4,2 К. На вставке представлена экспериментальная зависимость $I_c(T)$, нормированная относительно $I_{c0}(T = 4,2$ К), сплошной линией показана теоретическая зависимость для туннельных джозефсоновских переходов

На рис. 2 представлены ВАХ той же МС для различных значений мощности внешнего СВЧ воздействия P_e частотой $f_e = 36$ ГГц при $T = 4,2$ К. Как видно из рисунка увеличение P_e приводит к уменьшению I_c и к появлению на ВАХ особенностей в виде горизонтальных ступеней тока. Величины напряжений, соответствующих ступеням тока на ВАХ, связаны с частотой f_e джозефсоновским соотношением $V_{n,m} = \frac{n}{m} \frac{hf}{2e}$, где n – целые числа, соответствующие синхронизации собственного излучения МС n -ой гармоникой внешнего сигнала, а m – синхронизации m -ой субгармоники собственного излучения. В отличие от "идеального" ДП на ВАХ исследованных МС при СВЧ воздействии появляются субгармонические ступени,

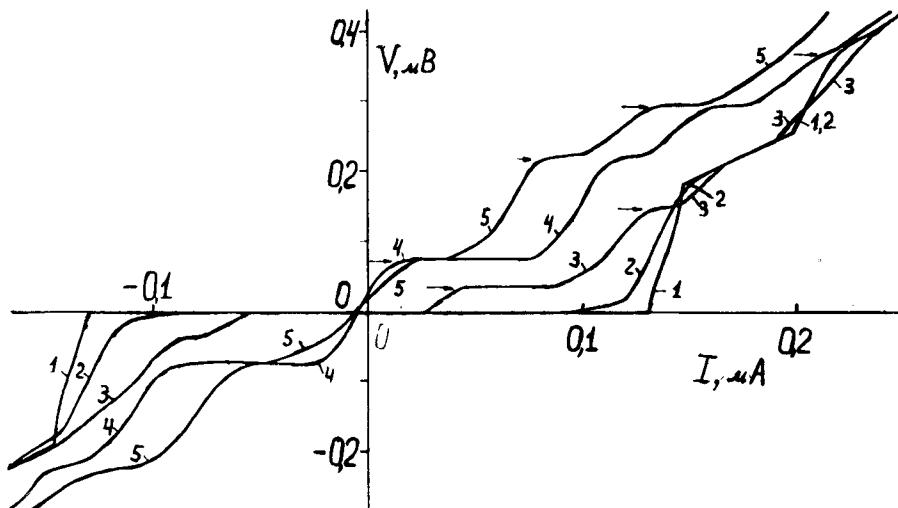


Рис. 2. ВАХ мостиковой структуры при $T = 4,2$ К для различных уровней мощности СВЧ воздействия частотой $f_e = 36$ ГГц (1 – без СВЧ, $2-5$ в СВЧ поле с ослаблениями): $2 - 40$, $3 - 35$, $4 - 26$, $5 - 15$ дБ; стрелками отмечены ступени тока $n/m = 1/2, 1, 2, 3, 4, 5$

что свидетельствует об отличие соотношения ток–фаза от синусоидального^{1,2}. Причем, половинная ступень ($n = 1, m = 2$) появляется при существенно меньших значениях P_e , чем основные ступени ($m = 1$). С увеличением P_e наблюдается более значительная асимметрия ВАХ по току, чем при изменении температуры. Зависимости I_c и величин гармонических ступеней от P_e существенно отличается от квазиосцилляционных зависимостей, характерных для ДП^{1,2}, но в целом аналогичны наблюдавшимся ранее для случая движения абрикосовских вихрей в длинных МС из олова⁵.

Вихревой характер нелинейности МС на гранулированных ВТСП не противоречит зависимостям I_c от постоянного магнитного поля H_e , полученной нами. При увеличении H_e критический ток резко уменьшается до $H_e = 10$ Э, затем имеет место слабая немонотонность в $I_c(H)$. Однако, зависимости типа $\sin H_e / H_e$, характерной для ДП^{1,2} не наблюдалось. При обратном изменении H_e наблюдался значительный гистерезис. Такое поведение $I_c(H)$, а также асимметрия ВАХ указывают на наличие вихрей в МС даже в отсутствие I_c ввиду малости нижнего критического магнитного поля H_{c1} , которое по оценке $H_{c1} = 2\pi I_c/cW$ составляет 0,45 Э. Наклонные плато на ВАХ связаны с движением фиксированного числа строчек вихрей в МС⁵.

Таким образом, представленные экспериментальные результаты свидетельствуют о неоднородной структуре МС на ВТСП и существовании в них вихрей магнитного поля. Структура вихря зависит от соотношения между ξ , глубиной проникновения λ_L и джозефсоновской глубиной проникновения магнитного поля λ_J . При типичных для данного ВТСП значений $\xi = 1,5$ нм, $\lambda_L = 150$ нм и плотности сверхпроводящего тока $j = 10^4$ А/см², определяющего значение $\lambda_J = 10$ мкм, согласно классификации⁶ имеем случай гипервихря в МС, у которого отсутствует область подавления параметра порядка, как в джозефсоновских вихрях, а глубина проникновения магнитного поля существенно превышает размер одиночного ДП (порядка a). В результате все неоднородности структуры материала МС слабо скрываются на движении вихрей (слабый пиннинг) и в МС будет иметь место вязкое течение вихрей под действием транспортного тока¹³. Слабое внешнее электромагнитное воздействие вызывает синхронизацию вихрей и приводит к появлению на ВАХ джозефсоновских ступеней тока. На таких ВТСП МС возможно непосредственное наблюдение собственного электромагнитного излучения.

Авторы благодарны М.Е.Гершензону, А.В.Зайцеву, Н.Г.Погосяну, М.И.Фалею за полезные обсуждения результатов работы.

Литература

1. Заварцкий Н.В., Заварцкий В.Н. Письма в ЖЭТФ, 1988, 47, 334.
2. Головашкин А.И. и др. Письма в ЖТФ, 1988, 14, 1286.
3. Yamashita T. et al. Jap. J. Appl. Phys., 1988, 27, L1107.
4. Лихарев К.К. ЖЭТФ, 1971, 61, 1700.
5. Губанков В.Н. и др. Письма в ЖЭТФ, 1973, 18, 292.
6. Сонин Э.Б. Письма в ЖЭТФ, 1988, 47, 415.
7. Ambegaokar V., Baratoff A. Phys. Rev. Lett., 1936, 10, 486.
8. Кулик И.О., Омельянчук А.И. Письма в ЖЭТФ, 1975, 21, 216.
9. Аминов Б.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1988, 47, 581.
10. Ogale S.B., Dijkamp D. Phys. Rev. B, 1987, 36, 7210.
11. Chaudari P., Mawhart J. et al. Phys. Rev. Lett., 1988, 60, 1653.
12. Лихарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. Москва.: Наука, 1985.
13. Волков А.Ф. Письма в ЖЭТФ, 1989, 49, 86.

Поступила в редакцию
13 января 1989 г.

После переработки
5 апреля 1989 г.