

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ МАГНИТОМЕТР, РАБОТАЮЩИЙ ПРИ АЗОТНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Н.В.Заварицкий, В.Н.Заварицкий, С.В.Петров

Описан интерференционный сверхпроводящий магнитометр из $YBa_2Cu_3O_7$ -керамики для измерения слабых магнитных полей до 10^{-6} Гс, работающий при азотных температурах. Слабый участок интерферометра по своим характеристикам оказался подобен одиночному джозефсоновскому контакту. Предложены возможные объяснения этого сходства.

Многочисленными опытами показано, что керамические образцы оксидных сверхпроводников представляют собой систему гранул, объединенных джозефсоновскими контактами. Вследствие этого, в частности, в резистивном состоянии у них наблюдается периодическая зависимость напряжения на образце от внешнего поля, которая, как и опыты Литтла – Паркса¹ объясняется интерференционными явлениями. Период этих осцилляций в образцах из высокотемпературных сверхпроводников (ВТС) может достигать $10^{-1} \div 10^{-2}$ Гс², что соответствует площади квантования магнитного потока $\sim 10^{-6}$ см², по порядку величины совпадающей с характерными размерами составляющих образец частиц. Более того, нами было показано³, что интерференционные явления могут наблюдаться при площади квантования 10^{-2} см², что указывало на возможность создания из ВТС-керамики магнитометра, работающего при азотных температурах. Интерферометр на пленочной системе с площадью квантования $\sim 10^{-5}$ см² был изготовлен в ИВМ⁴.

Чувствительным элементом нашего ВЧ-интерферометра являлось кольцо из $YBa_2Cu_3O_7$ -керамики с отверстием $\approx 2,2 \cdot 10^{-2}$ см² со слабым участком. Слабым участком являлось утоньшение сечения кольца до $10^{-3} \div 10^{-4}$ см² на длине $\sim 10^{-2}$ см. Измерения производились со стандартной СКМПП-аппаратурой⁵. Катушка резонансного ВЧ-контурa была расположена в отверстии кольца из керамики. Ток через контур задавался генератором ВЧ (частота ≈ 20 МГц). Рис. 1а. Поскольку сверхпроводящее кольцо индуктивно связано с резонансным контуром, измеряя характеристики последнего, можно определить температуру перехода слабого участка в сверхпроводящее состояние. (В частности, для интерферометра, характеристики которого приведены на вставке к рис. 2, этот переход имел ширину 0,7 К и завершался при 79,5 К). Ниже этой температуры, увеличивая напряжение на выходе генератора $V_{вч}$, можно было перевести слабый участок в резистивное состояние. При этом возникала периодическая зависимость ВЧ-напряжения на контуре от внешнего магнитного поля, для выявления которой, как обычно, использовалась низкочастотная модуляция магнитного поля. Отношение полезный сигнал/шум, составляло для большинства исследованных образцов 3 ÷ 5, а для трех из дюжины исследованных 10 ÷ 20, т. е. значения близкие к тем, которые типичны для ВЧ-интерферометра, работающего на точечном контакте при 4,2 К⁶.

Величина $V_{вч}$, при которой исследуемая система реагирует на изменение внешнего магнитного поля, сложным образом зависит от температуры. Вблизи T_c , $V_{вч}$, соответствующее максимальному значению отношения сигнал/шум, возрастает при увеличении $T_c - T$. Одновременно при этом возрастает и рабочая область напряжений, где еще заметно влияние магнитного поля (рис. 2). При дальнейшем понижении температуры могут возникнуть несколько рабочих областей, которые разделены интервалами, в которых отсутствует отклик на магнитное поле (см. рис. 2 при $T \lesssim 72$ К). В близлежащих рабочих областях фаза отклика на переменное низкочастотное поле отличается на π ¹⁾. В этой области температур харак-

¹⁾ При 77 К в одном из интерферометров ($T_c \approx 85$ К) удалось наблюдать в интервале $V_{вч} = 0,06 \div 0,3$ мВ до 8 таких областей.

теристики ВЧ-интерферометра из керамики очень похожи на обычно наблюдаемые в ВЧ-СКВИД'ах с одним точечным контактом (см., например, ⁶).

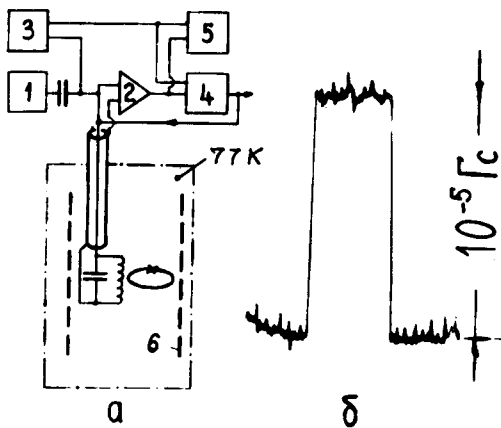


Рис. 1. а – Измерительная схема: 1 – ВЧ генератор, 2 – ВЧ усилитель с детектором, 3 – НЧ генератор модуляции поля, 4 – НЧ-усилитель, фазовый детектор, 5 – осциллограф, 6 – соленоид для определения чувствительности к магнитному полю, магнитные экраны не показаны; б – пример записи изменения выходного сигнала магнитометра при включении импульса магнитного поля (тока в соленоид)

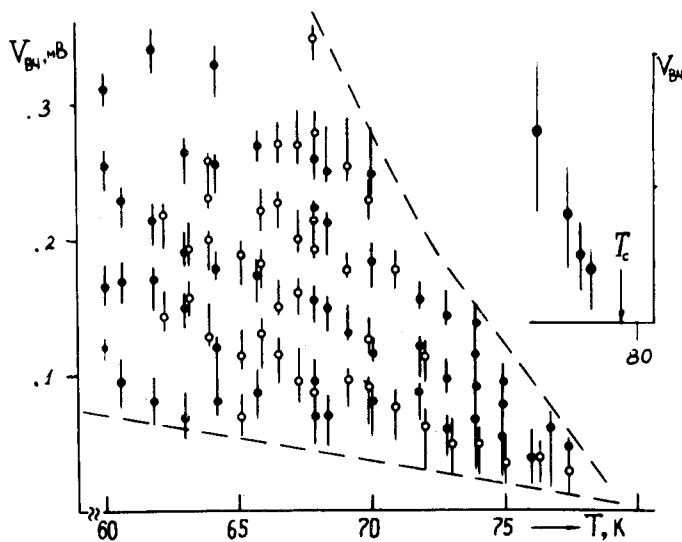


Рис. 2. Температурная зависимость $V_{ВЧ}$, при которых есть отклик ВЧ-интерферометра из керамики на магнитное поле. Точки и кружки – наилучшее отношение сигнал/шум (два независимых опыта), вертикальные линии – области, где еще видно влияние поля. Пунктир – границы вне которых нет влияния поля. На вставке – характеристики второго интерферометра

Функции слабого участка в интерферометре из керамики в настоящее время до конца не выяснены. По своим геометрическим размерам слабый участок на много порядков превосходит длину когерентности использованного сверхпроводника и в нем содержится, по-видимому, множество джозефсоновских контактов между отдельными гранулами. Если это так, то факт наличия в ВЧ-интерферометре из керамики большого отношения сигнал/шум и изменение с величиной уровня высокочастотного поля $V_{ВЧ}$ фазы отклика на внешнее магнитное поле можно объяснить, лишь предположив, что все множество переходов Джозефсона реагирует на внешнее воздействие так же, как один переход. Это может быть обусловлено следующими причинами:

- а) спецификой технологии приготовления керамики, которая обеспечивала идентичность характеристик контактов между гранулами;
- б) проявлением мезоскопических эффектов, обусловленных недостаточным числом контактов в области слабого участка для полного усреднения их характеристик (см., например, ⁷ раздел II, 3);
- в) возникновение у множества связанных джозефсоновских контактов при изменении $V_{ВЧ}$ среди хаоса реакций на внешнее воздействие областей (по $V_{ВЧ}$) взаимной синхронизации ансамбля, подобно тому, как это происходит в нелинейных динамических системах ⁸.

Из перечисленных выше возможностей, последние две нам кажутся наиболее вероятными. Выбор между ними требует дополнительных исследований.

Возможность использования исследованного нами прибора для магнитных измерений изучалась в системе, состоящей из двух интерферометров, подобных вышеописанному и различающихся по площади отверстия в 1,77 раза, которые были замкнуты общим слабым участком. Внешнее магнитное поле было направлено перпендикулярно площади интерферометров. В меньшее отверстие, площадью $\approx 2,2 \cdot 10^{-2}$ см², была вставлена катушка резонансного контура СКИМПа, измерения проводились в режиме обратной связи по полю. Пример записи изменения выходного сигнала магнитометра при включении импульса магнитного поля, длительностью ~ 2 мин приведен на рис. 1 б. Видно, что уровень шумов установки составляет $\sim 10^{-6}$ Гс. Мы полагаем, что в значительной степени эти шумы обязаны флуктуациям лабораторного магнитного поля, которые были (еще недостаточно) уменьшены внешними экранами. Есть основания считать, что магнитометр может быть использован и в измерениях полей существенно меньших 10^{-6} Гс.

Исследованный в настоящей работе сверхпроводящий ВЧ-интерферометр из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -керамики обладает стабильными в течение длительного (несколько месяцев) времени его хранения в жидком азоте, выдерживает многократное термоциклирование ($77 \div 300$ К) при минимальных предосторожностях, неделями может находиться при 300 К. Однако даже кратковременный (~ 30 мин) его нагрев в парах воды до 340 К приводит к исчезновению при 77 К сверхпроводимости слабого участка. Этот результат согласуется с исследованиями^{9, 10} разложения $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -керамики в воде.

Авторы благодарны Н.А.Никитину за изготовление слабых участков, В.Петричек за содействие в исследовании интерферометра на частоте 40 МГц.

Литература

1. Little W.A., Parks R.D. Phys. Rev. Lett., 1962, 9, 9.
2. Заварицкий Н.В., Заварицкий В.Н., Петров С.В., Юргенс А.А. Письма в ЖЭТФ, 46, приложение, 1987, 23.
3. Zavaritsky N.V., Zavaritsky V.N., Petrov S.V. Novel Mechanisms of Superconductivity, Ed. S. Wolf, V. Kresin, Plenum P., N.Y. 1987, 871.
4. Kock R.H., Umbach C.P., Clark G.J., Chaudhari P., Lailowitz R.B. Appl. Phys. Lett., 1987, 51, 200.
5. Заварицкий Н.В., Ветчинкин А.Н. ПТЭ, 1974, 1, 247.
6. Barone A., Paterno G. Physics and Application of Josephson Effect, J. Witley, 1982.
7. Aronov A.G., Sharvin Yu.V. Rev. Mod. Phys., 1987, 59, № 3.
8. Рабинович М.И. УФН, 1978, 125, 123.
9. Nakada I., Sato S., Oda Y., Kohara I. Jap. J. Appl. Phys., 1987, 26, 697.
10. Yan M.F., Barns K.L. et al. Appl. Phys. Lett., 1987, 51, 532.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
11 ноября 1987 г.