

МИКРОВОЛНОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

В.И.Александров, А.Г.Бадалян ¹⁾, П.Г.Баранов ¹⁾,
В.С.Вихнин ¹⁾, В.В.Осико, В.Т.Удовенчик

В сверхпроводящих керамиках и монокристаллах в диапазоне частот 1 – 38 ГГц обнаружены и исследованы интенсивные микроволновые сигналы в низких магнитных полях, а также новые анизотропные сигналы ЭПР, появляющиеся при температурах ниже 40 К, интенсивность, ширина и g -фактор которых возрастает с понижением температуры.

Микроволновые исследования являются одними из наиболее информативных методов изучения природы возбуждений в твердых телах, что делает их весьма перспективными для выяснения механизма высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), открытой в ¹. В настоящей работе проведены микроволновые исследования керамик и монокристаллов $Y_1Ba_2Cu_3O_x$, а также керамик $Eu_1Ba_2Cu_3O_x$, $Sm_1Ba_2Cu_3O_x$, $Y_1Ba_2Cu_2O_x$, $Y_{1,85}Ba_{0,15}CuO_x$, $Gd_{1,85}Ba_{0,15}CuO_x$ ($x = 6,5 + \delta$) в диапазоне частот 1 – 38 ГГц и в интервале температур 4 – 300 К ²⁾. ВТСП не наблюдалась в последних двух керамиках. Образцы готовились путем твердофазного синтеза при температуре 950 С. При получении прессованных поликристаллов в качестве исходных материалов использовались нитраты меди, бария, иттрия и т. д. в необходимом стехиометрическом соотношении, а соответствующие монокристаллические образцы толщиной 50 – 100 мкм и поперечными размерами ~ 2 мм² готовились из смесей окислов по методике, аналогичной описанной в ³. Использовались стандартные ЭПР спектрометры диапазонов 10 и 35 ГГц, а также специально изготовленный микроволновый безрезонаторный спектрометр, позволяющий проводить микроволновые исследования с плавной перестройкой частоты до 38 ГГц, в котором магнитное поле создавалось катушками Гельмгольца.

Во всех исследованных образцах, в которых наблюдалась ВТСП в области температур близких к критической ($T_c \approx 93$ К) появлялся интенсивный сигнал в низких магнитных полях. Отметим, что подобный низкополевой сигнал (НПС) наблюдался в ² и независимо в ⁴⁻⁷, однако лишь в настоящей работе НПС был обнаружен в монокристаллах и изучен в широком диапазоне частот 1 – 38 ГГц. В керамиках и монокристаллах, в которых наблюдалась ВТСП (за исключением $Eu_1Ba_2Cu_3O_x$), в области температур много меньших T_c появлялись новые анизотропные сигналы ЭПР, амплитуда, ширина и g -фактор которых резко возрастали с понижением температуры. На рис. 1 а представлен НПС, зарегистрированный при разных температурах на стандартном ЭПР спектрометре (9,3 ГГц). Видно, что с понижением температуры максимум НПС смещается в высокие магнитные поля и линии уширяются. Сдвиг линий обусловлен более эффективным захватом магнитного потока при низких температурах. Наиболее наглядно эффект захвата магнитного потока демонстрируется на рис. 1 б, где показан типичный сигнал, зарегистрированный в безрезонаторном спектрометре на одной из частот (26 ГГц) при 77 К. Благодаря использованию катушек Гельмгольца направление магнитного поля могло симметрично изменяться. Величина гистерезиса соответствует величине захваченного потока. НПС наблюдался во всех перечисленных керамиках и монокристаллах, в которых зарегистрирована ВТСП, при этом фаза НПС была противоположна фазе линий ЭПР. Не было обнаружено изменений интенсивности НПС вплоть до предельных исследованных частот 38 ГГц.

¹⁾ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе АН СССР, Ленинград.

²⁾ Предварительные результаты работы докладывались на Совещании по проблемам ВТСП, Свердловск, 7 – 9 июля 1987 г ².

На рис. 2 показаны новые сигналы ЭПР, зарегистрированные в монокристаллах $Y_1Ba_2Cu_3O_x$ в ориентации $H \perp c$ (сплошные линии) и $H \parallel c$ (пунктир). Видно, что вместо сигнала ЭПР Cu^{2+} , наблюдавшегося при высоких температурах, при температуре ниже 30 К появляются новые линии. На вставке показан рост интенсивности (I) и ширины (ΔH) сигнала ЭПР при понижении T , то есть интегральная интенсивность сигнала резко возрастает в узком температурном интервале. Видна анизотропия сигналов ЭПР (при $T = 5$ К $g_{\perp} = 2,27$, $g_{\parallel} = 2,18$; при $T = 20$ К $g_{\perp} = 2,15$, $g_{\parallel} = 2,13$). На рис. 2 для двух ориентаций при $T = 6,5$ К показан усиленный НПС.

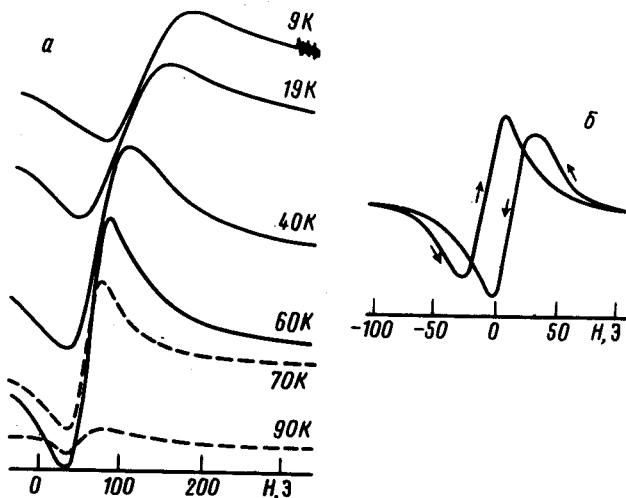


Рис. 1. *a* – Температурная зависимость НПС. Условно показаны флуктуации сигнала при $T = 9$ К. Частота 9,3 ГГц; *б* – НПС при 77 К, частота 26 ГГц, стрелками указано направление изменения поля H (керамика $Y_1Ba_2Cu_3O_x$).

Спектры ЭПР, представленные на рис. 2, не наблюдались в исследованных образцах, в которых не была обнаружена ВТСП.

Перед теоретическим рассмотрением перечислим основные свойства НПС: сигнал наблюдается как в керамиках, так и в монокристаллах в сверхпроводящем состоянии; существует в широком частотном интервале и не имеет границы вплоть до 38 ГГц; с понижением температуры увеличивается его интегральная интенсивность и линия уширяется; фаза НПС противоположна фазе сигналов ЭПР. Большая интенсивность НПС, позволяющая регистрировать его в малых образцах с помощью нерезонансной методики, а также противоположная фаза сигналов по сравнению с линиями ЭПР может быть связана с действием электрической компоненты микроволнового поля (E). Рассмотрим возможный механизм формирования НПС, а именно, рассмотрим дырочные пары, которые находятся в условиях действия пространственных флуктуаций состава сверхпроводника и неоднородностей его структуры. В результате для дырочных пар возникает многоамный случайный потенциал, в минимумах которого энергии пар не совпадают и характеризуются распределением с шириной $\langle (\Delta U)^2 \rangle^{1/2}$, где ΔU – разность энергий пары в соседних минимумах многоамного потенциала. В этом случае возникают условия для внутреннего эффекта Джозефсона, когда дырочные пары туннелируют сквозь барьеры между минимумами такого потенциала. Туннелирование становится возможным, когда дырка поглощает или излучает квант энергии микроволнового излучения $h\nu = \Delta U$. При этом вероятность переходов под действием E -компоненты превосходит вероятность переходов под действием магнитной компоненты. Поглощение E -компоненты является следствием эффективной модуляции энергетического зазора между состояниями пар в различных ямах случайного потенциала, которое приводит к возможности джозефсоновского туннелирования. Фактически эта ситуация соответствует паразлектрическому резонансу (ПЭР) туннелирующих пар в условиях внутреннего эффекта Джозефсона. Разброс величин ΔU по образцу приводит к существованию подобного резонанса в широком частотном диапазоне, причем, из эксперимента следует, что $\langle (\Delta U)^2 \rangle^{1/2} > 1$ см $^{-1}$. Величина мнимой

части диэлектрической восприимчивости χ'' джозефсоновского перехода в резистивной модели и тем самым интенсивности НПС определяется выражением $\chi'' \sim (RI_c)^2 \text{th}(\Delta U/2kT) \times \delta(h\nu - \Delta U)$, где I_c – максимальный бездиссипативный ток через переход, R – сопротивление перехода в нормальном состоянии. Рост интенсивности НПС при понижении $T < T_c$ объясняется ростом числа дырочных пар, участвующих в ВТСП, вкладом температурного фактора $\text{th}(\Delta U/2kT)$, а также возможным увеличением туннельных матричных элементов. Реализация прохождения рассматриваемого ПЭР дырочных пар внешним магнитным полем, H обязана магнитолевой зависимости максимального бездиссипативного туннельного тока через переход. В условиях распределения потенциальных барьеров в джозефсоновских контактах с различными характеристиками мы приходим к результирующей зависимости $\chi''(H)$ в виде колоколообразной кривой с максимумом при $H = 0$ и медленно спадающими крыльями. Отметим, что захват магнитного потока в сверхпроводящем состоянии, приводит к сдвигу максимума НПС из точки $H = 0$. Наконец, то обстоятельство, что НПС виден и в монокристаллах позволяет предположить, что рассматриваемый потенциал в основном связан с пространственными флуктуациями состава сверхпроводника, а именно, флуктуациями концентрации ионов кислорода.

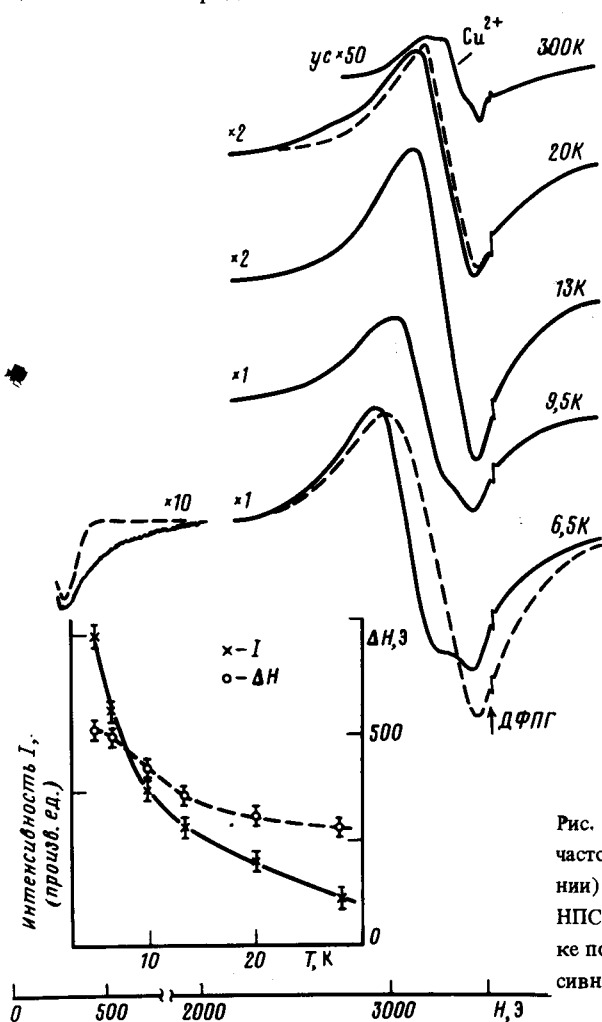


Рис. 2. Спектры ЭПР монокристаллов $Y_1Ba_2Cu_3O_x$, частота 9,3 ГГц, ориентация $H \perp c$ (сплошные линии), $H \parallel c$ (пунктир). Для $T = 6,5$ К показан НПС. Узкий сигнал принадлежит ДФПГ. На вставке показаны температурные зависимости интенсивности и ширины линий для $H \perp c$ от T

Наблюдаемый спектр ЭПР в сверхпроводящей фазе, интенсивность которого возрастает при понижении T , может быть связан с локализованными электронными состояниями ферромагнитных пар $O^- - Cu^{2+}$. При понижении T растет населенность триплетного основного состояния пары, которое активно в ЭПР. Уширение же как сигнала ЭПР, так и НПС при по-

нижении T , возможно, обусловлено влиянием сверхструктуры вихрей в промежуточном состоянии, амплитуда которых возрастает с уменьшением T .

Авторы благодарны Р.А.Бабунцу за проведение некоторых экспериментов.

Литература

1. *Bednorz J., Muller K.A.* Z. Phys. B, 1988, 64, 189.
2. *Александров В.И., Бадалян А.Г., Баранов П.Г. и др.* Проблемы ВТСП, тезисы, Свердловск, 1987, 2, 140.
3. *Takekawa Sh., Jyi N.* J. of Appl. Phys. Jap., 1987, 26, L851.
4. *Кведер В.В., Мчедлидзе Т.Р., Осипьян Ю.А., Шалынин А.И.* Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, Приложение, 176.
5. *Лыфарь Д.Л., Мусеев Д.П., Мотуз А.А. и др.* ФНТ, 1987, 13, 876.
6. *Мастеров В.Ф., Егоров А.И., Герасимов Н.П. и др.* Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 289.
7. *Bhat S.V., Ganguly P., Ramkrishnan T.V., Rao C.N.R.* J. Phys. C., 1987, 20, L559.

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
19 августа 1987 г.
После переработки
29 декабря 1987 г.