

УДК 538.945

НЕЛИНЕЙНОСТЬ НАМАГНИЧЕННОСТИ ВЫШЕ T_c И ПСЕВДОЩЕЛЬ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

А. И. Головашкин, Н. Д. Кузьмичев¹, В. В. Славкин²

Выполнены предварительные экспериментальные исследования температурной зависимости третьей гармоники намагниченности текстурированного поликристалла $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ выше T_c . Обнаружено, что нелинейность намагниченности $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ наблюдается вплоть до температуры $T = 102$ К, значительно превосходящей температуру перехода в сверхпроводящее состояние этого соединения. Наблюдаемая особенность намагниченности $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ связывается с возникновением в этом соединении псевдощелевого состояния при $T = 102$ К.

В настоящее время активно обсуждается псевдощелевая структура высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [1 – 6]. В различных экспериментах наблюдаются особенности физических свойств ВТСП, связанные с существованием псевдощели выше температуры перехода в сверхпроводящее состояние T_c [7]. В ВТСП соединении $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ псевдощель ранее наблюдалась в измерениях оптической проводимости [8], в экспериментах по неупругому рассеянию нейтронов [9], методами ЯМР и ЯКР [10], по отклонению температурной зависимости сопротивления от линейной [11, 12].

Нами проведены предварительные экспериментальные исследования температурной зависимости третьей гармоники намагниченности текстурированного поликристалла $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ при температурах T , превышающих T_c . Выбор третьей гармоники связан с тем, что при работе в небольших магнитных полях целесообразно использовать нечетные гармоники.

¹Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, Саранск, Россия.

²Саранский кооперативный институт Центросоюза РФ, Саранск, Россия.

Сверхпроводящие образцы были вырезаны из текстурированной заготовки так, что ось "с" находилась в плоскости пластины. Образцы имели размеры $16 \times 8 \times 2.5 \text{ мм}^3$, $T_c = 89 \text{ K}$ и ширину перехода в сверхпроводящее состояние $\Delta T = 0.5 \text{ K}$.

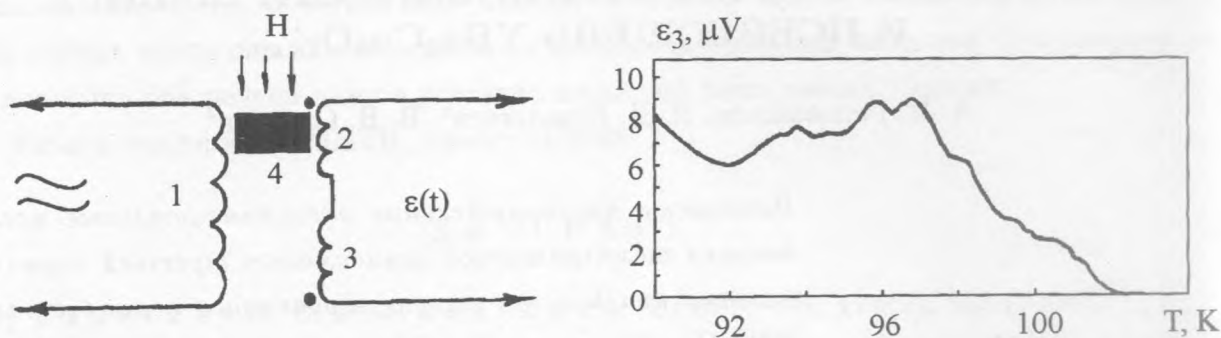


Рис. 1. Схема измерения гармоники намагниченности двухкатушечным компенсационным методом. 1 – первичная (входная) катушка индуктивности, 2 и 3 – две одинаковые, встречно намотанные выходные катушки индуктивности, находящиеся внутри катушки 1, 4 – образец $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, находящийся в катушке 2. Стрелками указано направление магнитного поля H , создаваемого входной катушкой. Сигнал отклика $\epsilon(t)$ с выходных катушек подается на резонансный усилитель.

Рис. 2. Температурная зависимость амплитуды третьей гармоники ЭДС ϵ_3 (пропорциональной третьей гармонике намагниченности) поликристалла $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ при $T > T_c$ в переменном магнитном поле $H = 20 \text{ Э}$ (частота переменного поля $f = 120 \text{ Гц}$).

Измерение гармоники намагниченности проводилось двухкатушечным компенсационным методом [13]. Синусоидальный сигнал частотой ω с генератора (коэффициент гармоник 0.005%) подавался на входную катушку, внутри которой были расположены две одинаковые, встречно намотанные выходные катушки индуктивности (рис. 1). Сигнал отклика $\epsilon(t)$ с выходных катушек подавался на вход селективного вольтметра. Величина сигнала отклика выражается формулой [14]

$$\epsilon(t) = -\mu_0 N S \frac{dM}{dt}. \quad (1)$$

Здесь M – намагниченность образца, S – сечение образца, N – число витков приемной катушки, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$. Система, состоящая из катушек с образцом и платиновым термометром, помещалась в массивную медную “бомбу”. Измерения проводились в парах азота.

Результаты приведены на рис. 2. На рисунке показана температурная зависимость амплитуды третьей гармоники ЭДС ϵ_3 (пропорциональной амплитуде третьей гармоники намагниченности) поликристалла $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ в переменном магнитном поле $H(t) = H \cdot \cos(\omega t)$, где $H = 20$ Э, $\omega = 2\pi f$ и $f = 120$ Гц. Из рисунка видно, что величина $\epsilon_3(T)$ выше температуры T_c в интервале от 92 до 102 К отлична от нуля и ее температурная зависимость имеет особенности. Таким образом, нелинейность намагниченности образца $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ наблюдается до температур $T \approx 102$ К. Отметим, что в этой области температур наблюдаются и следующие нечетные гармоники с уменьшающейся амплитудой. Особенности, наблюдаемые на зависимости $\epsilon_3(T)$, возможно, связаны с неидеальностью образца.

На рис. 3 показаны результаты измерения температурной зависимости амплитуды третьей гармоники ϵ_3 при температурах ниже T_c . Отметим, что амплитуда третьей гармоники ниже T_c существенно превышает амплитуду этой гармоники в “псевдощелевой” области температур. Так отношение амплитуд третьей гармоники при температурах 84 К и 97 К $\epsilon_3(84 \text{ К})/\epsilon_3(97 \text{ К}) \approx 20$.

На рис. 4 приведены результаты измерения температурной зависимости третьей гармоники ϵ_3 при амплитуде магнитного поля 100 Э. Хотя измерения выполнены только до температуры $T = 97$ К, результаты аналогичны предыдущему случаю: нелинейность намагниченности наблюдается при температурах, заметно превышающих T_c . Видно, что увеличение амплитуды магнитного поля подавляет третью гармонику намагниченности, связанную с псевдощелью, то есть выше T_c , сильнее, чем ту же гармонику ниже T_c . Отношение максимальных амплитуд третьей гармоники при температурах ниже и выше T_c составляет в этом случае примерно 35.

В рамках существующих моделей магнитных свойств сверхпроводников полученные результаты объяснить затруднительно. По нашему мнению, эти данные объясняются псевдощелевой структурой ВТСП. В этом случае температура возникновения псевдощели T^* в нашем образце $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ составляет 102 К. Это значение температуры T^* хорошо согласуется с данными [11, 12]. В работе [11] авторы наблюдали резкий спад сопротивления (отклонение от линейного хода) в образце керамики $YBaCuO$ при $T = 102$ К. Какие-либо литературные данные об измерении температуры возникновения псевдощели по гармоникам намагниченности нам не известны.

Существует два основных подхода к вопросу о происхождении псевдощели [5 – 7]: 1) ее источником являются флуктуации “диэлектрического” типа (т.е. возникает “диэлектрическая” псевдощель); 2) псевдощель имеет сверхпроводящую природу, т.е. ее

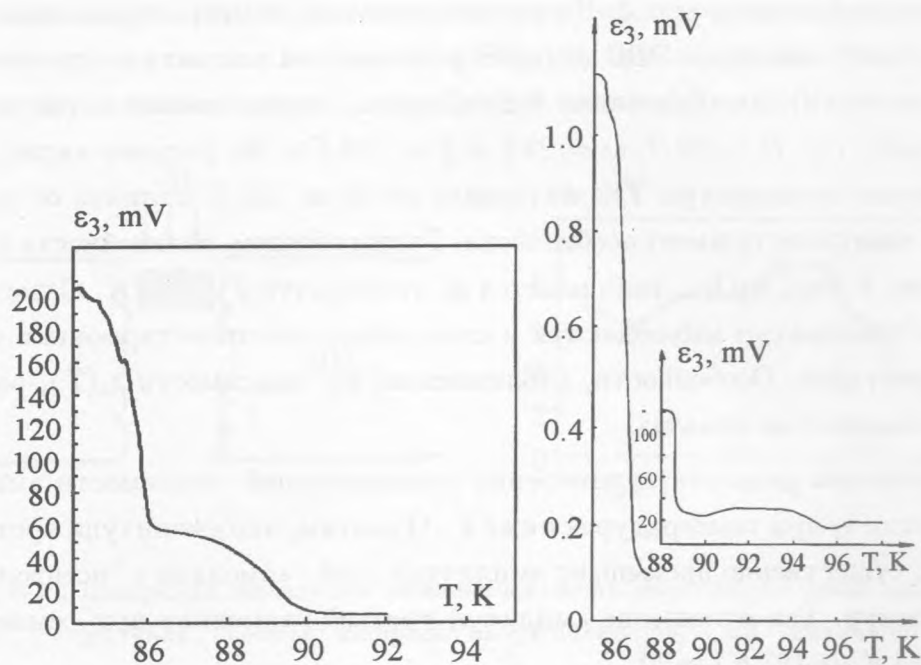


Рис. 3. Температурная зависимость амплитуды третьей гармоники ϵ_3 при температурах ниже T_c .

Рис. 4. Температурная зависимость амплитуды третьей гармоники ЭДС ϵ_3 поликристалла $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ в переменном магнитном поле $H = 100$ Э (частота переменного поля $f = 120$ Гц).

источником являются флуктуации “сверхпроводящих” пар (возникает “сверхпроводящая” псевдощель). Однозначного ответа по этому вопросу пока нет. Рассматривались также модели, в которых в кристалле ВТСП по разным направлениям импульсного пространства возникают обе псевдощели – и “диэлектрическая” и “сверхпроводящая” [5].

Во втором подходе считается, что при некоторой температуре $T^* > T_c$ образуются некогерентные “сверхпроводящие” пары, а когерентность в объеме образца и, соответственно, “настоящее” сверхпроводящее состояние устанавливается при T_c . В этом случае наличие “сверхпроводящих” пар при $T_c < T < T^*$ должно отражаться на температурной зависимости намагниченности образца. Намагниченность будет нелинейной вследствие влияния магнитного поля на фазовую когерентность, образование и взаимодействие таких пар. Например, в такой системе возможно образование вихрей при

температурах ниже T^* . При этом на эксперименте должны наблюдаться гармоники намагниченности в области $T < T^*$.

В первом подходе “диэлектрическая” псевдощель в таких ВТСП соединениях, как $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, возникает из-за антиферромагнитных флуктуаций. По-видимому, это также должно приводить к нелинейной намагниченности при температурах $T < T^*$. Для окончательного выяснения природы псевдощели в ВТСП соединениях необходимо использовать различные эксперименты.

Таким образом, состояние ВТСП систем при $T < T_c < T^*$ является необычным нормальным состоянием, состоянием с псевдощелью. И фазовый переход из сверхпроводящего в такое “нормальное” состояние не является переходом типа БКШ. Поэтому исследование этого фазового перехода, этого состояния выше T_c методом гармоник намагниченности позволит получить новые данные о природе как самого перехода, так и псевдощелевого состояния ВТСП.

Заключение. Нами предложен новый метод определения температуры возникновения псевдощели T^* в ВТСП соединениях, основанный на измерении гармоник намагниченности. Проведены предварительные экспериментальные исследования температурной зависимости третьей гармоники намагниченности текстурированного поликристалла $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ выше T_c . Результаты работы были доложены на конференции “Научная сессия МИФИ-2006” [15].

Авторы выражают благодарность А. В. Калинову и В. В. Александрову (Всероссийский электротехнический институт) за предоставление образцов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект N 04-02-16455), РАН и Минобрнауки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ding H., Yoko ya T., Campruzano J. C., et al. Nature, **382**, 51 (1996).
- [2] Timusk T. and Statt B. Rep. Prog. Phys., **42**, 61 (1999).
- [3] Tallon J. L. and Loram J. W. Physica C: Superconductivity, **349**, N 1 – 2, 53 (2001).
- [4] Norman M. R. and Pe rin C. Rep. Prog. Phys., **66**, 1547 (2003).
- [5] Аншук ова Н. В., Голова шкин А. И., Ива нова Л. И., Ру са ков А. П. ЖЭТФ, **123**, N 6, 1188 (2003).
- [6] Бе льявский В. И., Ко па ев Ю. В. УФН, **174**, 457 (2004).
- [7] Са довский М. В. УФН, **171**, N 5, 539 (2001).

- [8] Homes C. C., Timusk T., Liang R., et al. Phys. Rev. Lett., **71**, 1645 (1993).
- [9] Rossat-Mignod J., Regnault L. P., Bourges P., et al. Physica B: Condensed Matter, **186 – 188**, 1 (1993).
- [10] Warren W. W., Walstedt R. E., Brenner G. F., et al. Phys. Rev. Lett., **62**, 1193 (1989).
- [11] Головашкин А. И., Иваненко О. М., Мицен К. В., Храменков Н. Е. Препринт ФИАН N 298, М., 1987.
- [12] Ito T., Takenaka K., and Uchida S. Phys. Rev. Lett., **70**, 3995 (1993).
- [13] Прокофьев Д. Д., Волков М. П., Бойков Ю. А. ФТТ, **45**, 1168 (2003).
- [14] Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Левченко И. С. и др. ФТТ, **32**, 1374 (1990).
- [15] Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В., Головашкин А. И. Научная сессия МИФИ – 2006. Сборник научных трудов, **4**, 124 (2006).

Поступила в редакцию 21 февраля 2006 г.