

Физическая аппаратура

УДК 621.315.57:337.622.2

Установка для изучения нелинейных магнитных свойств ВТСП с помощью третьей гармоники намагниченности

В. В. Славкин, Э. А. Тищенко

Установка для измерения синфазной и квадратурной составляющих высших гармоник ЭДС-сигнала отклика ВТСП позволяет исследовать нелинейные магнитные свойства сверхпроводников в переменных магнитных полях до 1 кЭ и в постоянных магнитных полях до 10 Тл в интервале температур от 5 до 300 К. Исследованы синфазная и квадратурная составляющие первой и третьей гармоник ЭДС-сигнала отклика текстурированного поликристалла $YBa_2Cu_3O_7$.

PACS: 75.30.Cr

Ключевые слова: нелинейность, необратимость, псевдощель, синфазная и квадратурная составляющие гармоник, компенсационный метод.

Введение

Магнитные свойства высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) широко изучаются, чтобы понять механизмы, ответственные за проникновение в них магнитного потока и расширить практическое применение этих материалов.

В керамических ВТСП в слабых полях, а именно, в полях меньше первого критического поля самих гранул интенсивно изучается большой класс необратимых и нелинейных явлений. Причину такой нелинейности связывают со слабыми связями, участвующими в установлении макроскопического когерентного состояния в ВТСП. Поэтому непосредственное изучение нелинейности отклика существенно для ясного понимания картины процессов, происходящих в слабой (джозефсоновской) среде при воздействии на них переменных и постоянных магнитных полей. Для описания этих свойств используют модель критического состояния [1], модель крипа магнитного потока [2], модель сверхпроводящего стекла [3, 4], модель гипервихрей [5] и др. К сожалению, эти существенно различающиеся модели недостаточно адекватно описывают экспериментальные данные. Особенно ярко недостатки моделей проявляются при описании гармоник намагниченности ВТСП.

В экспериментах по диамагнитному отклику ВТСП, в основном, измеряют температурную зависимость синфазной $\chi_1'(T)$ (действительной) и квадратурной $\chi_1''(T)$ (мнимой) частей магнитной восприимчивости образца при различных значениях переменного и постоянного магнитных полей.

При исследовании влияния на магнитный отклик ВТСП термоактивированных процессов используют метод, основанный на комбинированном анализе зависимостей $\chi_1'(T)$, $\chi_1''(T)$, $\chi_3'(T)$, $\chi_3''(T)$, позволяющий определить различные режимы вихревой динамики, доминирующие в различных температурных областях [6—8]. Измерение третьей гармоники квадратурного сигнала $\chi_3''(T)$ связано с большей ее чувствительностью к особенностям гистерезисной петли при перемагничивании образца и динамическим режимам потока, управляющим магнитным откликом образца. Несмотря на все это, физическая интерпретация третьей гармоники магнитной восприимчивости остается предметом дискуссии. Сильные различия вида кривых $\chi_3'(T)$ и $\chi_3''(T)$, измеренных во внешнем магнитном поле, также требуют объяснения. Детальное сравнение экспериментальных результатов $\chi_3'(T)$, $\chi_3''(T)$ и теоретических моделей не проведено, хотя именно в этих экспериментах показания разных моделей могут заметно различаться. Это, отчасти, обусловлено недостаточным набором экспериментальных данных в этой области, а также связано со сложностью техники подобных измерений и, кроме того, с большим разбросом результатов экспериментов на различных образцах, что зависит от их качества.

Славкин Владимир Владимирович, доцент.

Саранский кооперативный институт —

филиал Российского университета кооперации.

Россия, 430027, г. Саранск, ул. Транспортная, 17.

Тел. 8 (342) 32-43-64. E-mail: SlavkinVV@mail.ru

Тищенко Эдуард Афанасьевич, ведущий научный сотрудник.

Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН.

Россия, 119334, Москва, ул. Косыгина, 2.

Тел. 8 (499) 137-28-06. E-mail: tishchenko@kapitza.ras.ru

Статья поступила в редакцию 3 марта 2012 г.

© Славкин В. В., Тищенко Э. А., 2012

Одним из наиболее активно изучаемых свойств ВТСП является псевдощелевая структура, которая наблюдается в недопированных и оптимально допированных ВТСП при $T_c < T < T^*$ (T_c — температура перехода в сверхпроводящую фазу, а T^* — псевдощелевое состояние) [9—11]. Несмотря на большие усилия экспериментаторов и теоретиков, природа этого состояния на сегодня до конца не выяснена. Основные трудности здесь связаны с необычными свойствами материала ВТСП в нормальном (несверхпроводящем) состоянии.

В настоящее время для определения величины T^* используют как прямые (например, измерения фотоэмиссионных, туннельных спектров при различных температурах), так и косвенные методы, с помощью которых можно идентифицировать не саму псевдощель, а лишь свойства ее предполагаемых проявлений, особенностей на температурных зависимостях магнитных, транспортных и некоторых других свойств. Исследования нелинейности намагниченности ВТСП-соединений выше T^* позволяют определить температурный интервал возникновения псевдощелевого состояния, основанный на измерении гармоник намагниченности [12, 13].

Изучение нелинейности в области температур T^* ($T^* > T_c$) с помощью измерения гармоник является чувствительным методом. Выбор третьей гармоники при исследовании нелинейности связан с тем, что при работе в небольших магнитных полях целесообразно использовать нечетные гармоники, амплитуды которых значительно превосходят амплитуды четных гармоник. Амплитуда третьей гармоники при этом максимальна (из нечетных).

Цель данной работы — разработка экспериментальной установки для исследования действительной и мнимой составляющих третьей гармоники ЭДС-сигнала отклика ВТСП при разных значениях амплитуды и частоты переменного магнитного поля и напряженности приложенного постоянного поля, причем при температурах выше и ниже температуры перехода в сверхпроводящую фазу.

Методика эксперимента

Использовался компенсационный ("двухкатушечный") метод измерения магнитной восприимчивости [14, 15]. Схема показана на рис. 1. Синусоидальный сигнал определенной величины подавался на входную катушку 1. Катушки индуктивности 2 и 3 были включены встречно друг другу и имели одинаковое число витков, а также были индуктивно связаны с входной катушкой 1. При прохождении через катушку 1 переменного тока в

катушках индуктивности 2 и 3 наводилась ЭДС, которая, в свою очередь, компенсировалась одинаковым числом витков и встречным включением катушек 2 и 3. При отсутствии образца в какой-либо из компенсационных катушек 2 или 3 сигнал на выходе отсутствовал. При помещении сверхпроводника 4 в катушку 2 на выходе появлялся сигнал-отклик.

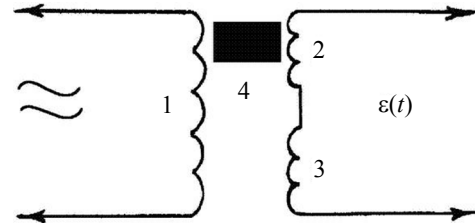


Рис. 1. Блок-схема компенсационного метода измерения магнитной восприимчивости:

1 — входная катушка индуктивности; 2, 3 — компенсационные катушки; 4 — сверхпроводник

Выходной сигнал, снимаемый с выхода компенсационных катушек 2 и 3 при нахождении в одной из них сверхпроводника, имел форму, отличную от синусоидальной формы входного сигнала, что свидетельствует о наличии гармоник [16, 17]. Такая форма сигнала-отклика обусловлена сильной нелинейностью намагниченности ВТСП в слабых синусоидальных магнитных полях, которая обнаруживается в наличии большого числа высших гармоник [17, 18].

Сигнал отклика сверхпроводника, помещенного в систему компенсационных катушек, описывается выражением:

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

Здесь $M = \frac{1}{V} \int_V \mathbf{M}(x, y, z) dS dz$ — усредненная

намагниченность образца; S — ориентированное сечение образца; $\mathbf{M}(x, y, z)$ — вектор намагниченности (магнитный момент единицы объема) образца в разных точках сечения S ; N — число витков приемной катушки; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; z — координата в направлении S ; V — объем образца.

Далее мы будем оперировать с z -компонентами соответствующих векторных величин, а именно, намагниченности M и напряженности магнитного поля H , т. е. будем использовать обозначения, соответственно, M и H . Рассмотрим случай однозначной, но нелинейной зависимости функции $M(H)$, т. е. безгистерезисный случай. Допустим, что внешнее магнитное поле (напряженность) меняется по закону $H = H_+ + h \cdot \cos \omega t$, тогда $M(H) = M(H_+ + h \cdot \cos \omega t)$ будет периодической функцией времени и ее можно разложить в ряд

Фурье и в области сходимости в ряд Тейлора [19, 20]. Следуя соотношению (1), получаем, в результате, следующую последовательность выражений для определения $\varepsilon(t)$:

$$M(H_- + h \cdot \cos \omega t) = \frac{M'_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} M'_n \cdot \cos(n\omega t), \quad (2)$$

$$M'_n = 2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!(m+n)!} \left(\frac{h}{2}\right)^{2m+n} M^{(2m+n)}(H_-), \quad (3)$$

$$\varepsilon(t) = -2\mu_0\beta NS_K \omega \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left[n \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!(m+n)!} \left(\frac{h}{2}\right)^{2m+n} \times M^{(2m+n)}(H_-) \right] \sin(n\omega t) \right\}, \quad (4)$$

где $M^{(2m+n)}(H_-)$ — производная намагниченности $(2m + n)$ -го порядка в точке $H = H_-$. Кроме того, в выражении (4) введено обозначение S_K — площадь сечения катушки, а значение $\beta = \frac{S}{S_K}$. Отметим,

что выражение (2) содержит только члены ряда с $\cos(n\omega t)$, т. е. синфазные (действительные) составляющие, квадратурные (мнимые) составляющие ряда (т. е. члены с $\sin(n\omega t)$) отсутствуют.

Из выражения (4) следует, что величины ЭДС-гармоник сигнала отклика пропорциональны амплитудам гармоник намагниченности.

Теперь рассмотрим гистерезисную (неоднозначную) функцию намагниченности $M(H)$. При разложении намагниченности M в ряд Фурье имеем:

$$\varepsilon(t) = -\mu_0\beta NS_K \omega \sum_{n=1}^{\infty} \left[nM'_n \sin(n\omega t) - nM''_n \cos(n\omega t) \right], \quad (5)$$

$$M'_n = 2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!(m+n)!} \left(\frac{h}{2}\right)^{2m+n} \bar{M}^{2m+n}(H_-), \quad (6)$$

$$M''_n = \frac{2}{\pi} \sum_p \left(\frac{h^p}{p!}\right) S(p, n) \Delta M^{(p)}(H_-), \quad (7)$$

для $n = 2k$ индекс $p = 2m+1$, а для $n = 2k+1$ имеем $p = 2m$ ($k = 0, 1, 2, \dots$). Кроме того,

$$S(p, n) = \sum_{j=0}^{n-1} \frac{p!(p+n-2j-2)!!}{(p-j)!(p+n)!!},$$

где введены обозначения $n!! = 1 \times 3 \times 5 \times \dots \times k$ для нечетных k и $n!! = 2 \times 4 \times 6 \times \dots \times k$ для четных k , M^+ — намагниченность образца в возрастающем поле, M^- — намагниченность в убывающем поле, $\bar{M}(H_-) = (M^+(H_-) + M^-(H_-)) / 2$ — средняя намагниченность в точке $H = H_-$, $\bar{M}^{(2m+n)}(H_-)$ — производная порядка $(2m + n)$ от \bar{M} в точке H_- , $\Delta M^{(p)}(H_-)$ — производная порядка p от ΔM в точке H_- .

Для случая малых амплитуд модуляции h получаем, что вклад $\varepsilon(t)$ будет определяться первым членом в разложении M'_n (1.5), т. е. членом $M^{(1)}(H_-)$. В итоге получаем следующее выражение:

$$\varepsilon'_1(t) \approx -\mu_0\beta NS_K \omega h \left(\frac{dM}{dH}\right)_{H=H_-} \times$$

$$\times \cos \omega t = -\mu_0\beta NS_K \omega h \chi'(H_-) \cos \omega t,$$

где χ' — дифференциальная (динамическая) магнитная восприимчивость образца, т. е. $\chi' = (dM/dH)$. Из вышесказанного следует, что сигнал отклика сверхпроводника в случае очень малых амплитуд модуляции поля фактически пропорционален χ' .

Техника эксперимента

Блок-схема экспериментальной установки для измерения действительной и мнимой составляющих третьей гармоники ЭДС-сигнала отклика ВТСП при различных значениях переменного и постоянного магнитных полей и температуры представлена на рис. 2.

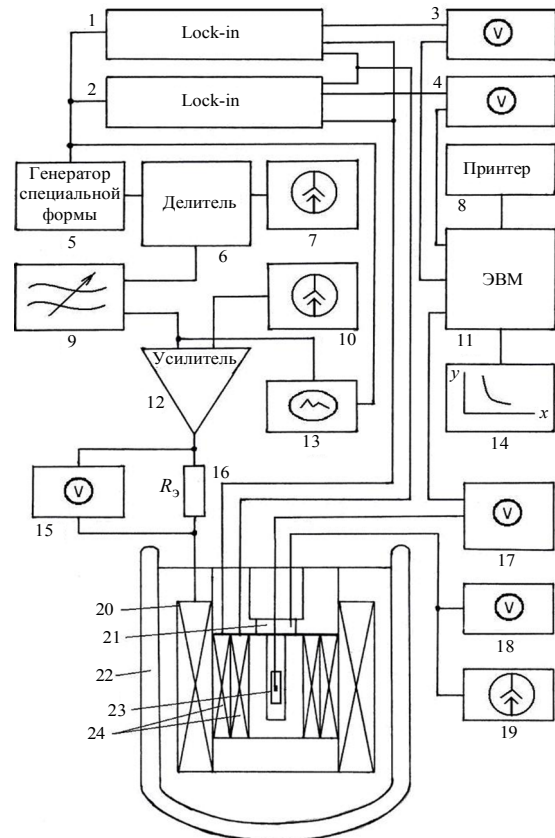


Рис. 2. Схема установки для измерения действительной и мнимой составляющих третьей гармоники ЭДС-сигнала отклика образца ВТСП:

- 1, 2 – приборы lock-in; 3, 4, 17, 18 – вольтметры; 5 – генератор специальной формы; 6 – делитель частоты; 7, 10 – блоки питания; 8 – принтер; 9 – генератор синусоидальной формы; 11 – компьютер; 12 – усилитель; 13 – осциллограф; 14 – монитор; 15 – вольтметр; 16 – эталонный резистор; 19 – источник постоянного тока для питания электрической печи; 20 – катушка возбуждения (соленоид); 21 – электрическая печь; 22 – гелиевый дьюар; 23 – образец с терпарой; 24 – приемные катушки индуктивности

Исследуемый образец ВТСП помещался в специальную вставку. Вставка состояла из приемных катушек индуктивности 24, катушки возбуждения (соленоид) 20, электрической печки 21, кварцевой подложки, на которой крепился образец и термопара 23. С помощью форвакуумного насоса внутри вставки создавался вакуум определенной степени. Стабильность температуры была не хуже 0,1 К. Для изменения температуры в интервале от 5 до 300 К использовалась нагревательная печка 21. Скорость изменения температуры не превышала 0,2 К/мин. В зависимости от условий эксперимента вставка помещалась внутри гелиевого криостата или внутри сосуда Дьюара с азотом.

С генератора специальной формы 5 на приборы lock-in 1 и 2 подавался опорный сигнал прямоугольной формы (например, с частотой $f = 720$ Гц). Другими словами, приборы lock-in были настроены на частоту генератора 5, который являлся источником опорного сигнала. С данного генератора 5 также через делитель частоты 6 прямоугольный сигнал поступал на генератор синусоидальной формы 9 с частотой в три раза меньшей ($f_1 = 240$ Гц) частоты опорного сигнала. С генератора 9 синусоидальный сигнал ($f_1 = 240$ Гц) подавался на вход усилителя мощности 12, и затем усиленный сигнал через эталонный резистор питал соленоид 20, который создавал внешнее переменное магнитное поле. Амплитудное значение переменного поля определялось по напряжению на эталонном резисторе 16 с помощью вольтметра 15. Для сравнения и контроля формы опорного сигнала, идущий на приборы lock-in и синусоидального сигнала, подаваемого на усилитель мощности 12, использовался осциллограф 13.

При исследовании гармоник ЭДС-сигнала отклика ВТСП частота переменного магнитного поля выбиралась таким образом, чтобы влияние высших гармонических составляющих промышленного тока было наименьшим, и минимальной с учетом соображений чувствительности. Частота приложенного переменного магнитного поля менялась от 40 Гц до 1 кГц. Создаваемое соленоидом переменное магнитное поле величиной до 1 кЭ во всех экспериментах было направлено вдоль длинной грани образца.

Сигнал с приемных катушек индуктивности подавался на два прибора lock-in, настроенных на частоту генератора опорного сигнала 5 ($f = 720$ Гц) и синхронизированных так, что один прибор lock-in (1) детектирует сигнал, синфазный с переменным магнитным полем, а второй прибор lock-in (2) — сигнал с фазой, смещенной на $\pi/2$, т. е. квадратурной. Установка позволяла проводить измерения действительной и мнимой составляющих третьей гармоники ЭДС-сигнала отклика сверхпроводника. Чувствительность применяемых

приборов lock-in позволяла детектировать сигнал на уровне 10 нВ. Фаза сигнала синхронизировалась с точностью до $0,2^\circ$.

Чувствительность экспериментальной установки определяется чувствительностью приборов lock-in и величиной раскомпенсации приемных катушек индуктивности, которая определяется значением

$$\Delta\varepsilon = (N/l)(dI/dt)(S_1N_1 - S_2N_2),$$

где N и l — число витков и длина соленоида 20, I — ток соленоида, S_1 , N_1 и S_2 , N_2 — площадь и число витков приемных катушек индуктивности 24, соответственно. При определенном значении тока I , которое создает переменное магнитное поле соленоида, величина $\Delta\varepsilon$ остается постоянной при измерении $\varepsilon'_n(T)$ и $\varepsilon''_n(T)$ для $n = 1, 2, 3, \dots$. Поэтому значение $\Delta\varepsilon$ можно вычесть из полученных экспериментальных данных. Следовательно, чувствительность данной установки определяется в основном чувствительностью приборов lock-in.

С приборов lock-in значения синфазной ε'_3 и квадратурной ε''_3 составляющих третьей гармоники ЭДС-сигнала отклика образца подавались на вольтметры 3 и 4, которые также регистрировали величины ε'_3 и ε''_3 . Сигналы с аналоговых выходов этих вольтметров и сигнал с термопары 23 подавались в многоканальный аналого-цифровой преобразователь, подключенный к компьютеру 11. Разработанное программное обеспечение позволяло проводить измерение синфазных ε'_n и квадратурных ε''_n составляющих ЭДС-сигнала отклика образца при разных значениях амплитуды и частоты переменного магнитного поля, температуры и напряженности приложенного постоянного магнитного поля с помощью данного АЦП, а также наблюдать получаемые результаты в режиме реального времени 14.

Следует заметить, что с помощью установки, представленной на рис. 2, можно также измерить модули ЭДС-гармоник сигнала отклика сверхпроводника, т. е. $|\varepsilon_n| = ((\varepsilon'_n)^2 + (\varepsilon''_n)^2)^{1/2}$, где $n = 1, 2, 3, \dots$.

Для создания внешнего постоянного магнитного поля использовался соленоид 20. При этом в цепь возбуждающего соленоид переменного поля включался разделительный конденсатор. Это позволяло получать постоянные магнитные поля напряженностью до 200 Э в центре соленоида, где располагался исследуемый образец.

Конструкция вышеописанной вставки допускала помещение ее внутрь сверхпроводящего магнита, что давало возможность проводить исследования в области внешних постоянных магнитных полей от 0 до 10 Тл.

Экспериментальные результаты

В данной работе проведены исследования температурной зависимости первой и третьей гармоник намагниченности текстурированного поликристалла $YBa_2Cu_3O_7$. Измерения выполнены в области температур $77 < T < 220$ К. В статье экспериментальные данные представлены для третьей гармоники. Исследуемые образцы имели форму пластин размером $16 \times 13 \times 8$ мм (образец № 1), $14 \times 10 \times 2$ мм (№ 2), $16 \times 8 \times 2,5$ мм (№ 3) и $3,8 \times 3,5 \times 3,6$ мм (№ 4) и $T_c = 88-89$ К. Они имели поверхностную плотность, примерно, 6 г/см². В работе использовался, как уже было сказано, двухкатушечный компенсационный метод измерения намагниченности [14—16, 18]. Величины ϵ_n пропорциональны амплитудам гармоник намагниченности M_n (см. выше). В экспериментах по исследованию температурных зависимостей высших гармоник ϵ_n , кроме синфазной и квадратурной составляющих, измерялся модуль этих гармоник, равный $\epsilon_n = [(\epsilon_n')^2 + (\epsilon_n'')^2]^{1/2}$, где ϵ_n' и ϵ_n'' — синфазная и квадратурная составляющие n -й гармоники, $n = 1, 3, 5, \dots$. Измерения проводились в режиме ZFC. Направление переменного и постоянного магнитных полей было перпендикулярно плоскости **ab**.

На рис. 3—5 представлены экспериментальные данные для образца № 4. Анализ полученных температурных зависимостей ЭДС третьей гармоники позволяет сделать следующие выводы:

при $T < T_c$ третья гармоника $\epsilon_3(T)$, $\epsilon_3'(T)$ и $\epsilon_3''(T)$ демонстрирует немонотонное поведение до температуры сверхпроводящего перехода;

амплитуда третьей гармоники в области $T < T_c$ существенно превышает амплитуду этой же гармоники в "псевдощелевой" области температур ($T > T_c$). Так, отношение амплитуд третьей гармоники при температурах 78 и 94 К равно $\epsilon_3(78)/\epsilon_3(94) \approx 1200$;

нелинейность намагниченности исследуемых образцов выше T_c начинает четко наблюдаться при $h \geq 80$ Э;

нелинейность намагниченности выше T_c наблюдается там же, где возникает отклонение сопротивления от линейной зависимости от температуры;

вид зависимостей $\epsilon_3(T)$, $\epsilon_3'(T)$ и $\epsilon_3''(T)$ для всех исследуемых образцов зависит от величины и частоты переменного магнитного поля, а также от напряженности постоянного магнитного поля.

Температура возникновения нелинейности в образцах $YBa_2Cu_3O_7$ составляет $T^* = 103-112$ К. Эти температуры совпадают с температурами появления псевдощели, полученными другими методами в работах [21, 22]. Нелинейность в области

температур $T_c < T < T^*$ является довольно слабой (см. рис. 3), как это следует из сравнения амплитуд высших гармоник в этой области и вблизи T_c . Поэтому экспериментальная установка и метод исследования эффекта нелинейности при температурах, превышающих T_c , должны быть достаточно чувствительными.

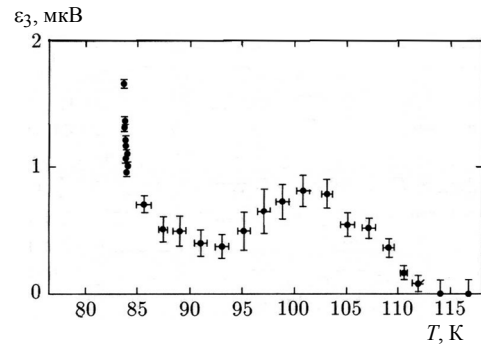


Рис. 3. Температурная зависимость величины модуля третьей гармоники ϵ_3 образца № 4 в переменном магнитном поле $h = 89$ Э с частотой $f = 239$ Гц

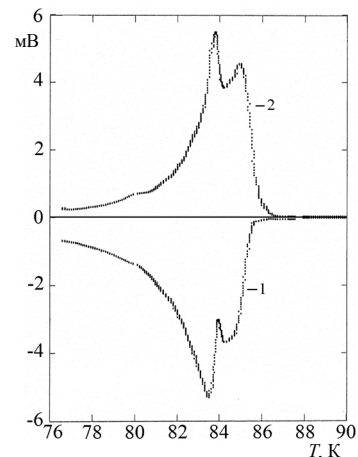


Рис. 4. Температурные зависимости величин синфазной ϵ_3' и квадратурной ϵ_3'' составляющих третьей гармоники образца № 4 в переменном магнитном поле $h = 162$ Э с частотой $f = 244$ Гц: кривая 1 — синфазная ϵ_3' и кривая 2 — квадратурная ϵ_3'' составляющие третьей гармоники образца

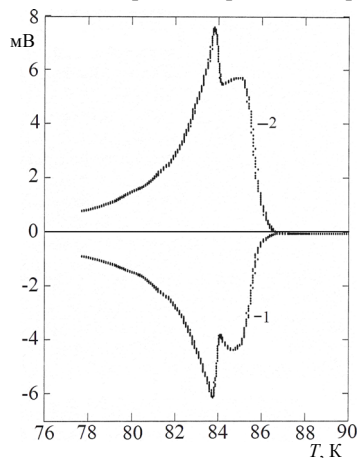


Рис. 5. Температурные зависимости величин синфазной ϵ_3' и квадратурной ϵ_3'' составляющих третьей гармоники образца № 4 в переменном магнитном поле $h = 166$ Э с частотой $f = 244$ Гц и напряженности постоянного магнитного поля $H_c = 29$ Э: кривая 1 — синфазная ϵ_3' и кривая 2 — квадратурная ϵ_3'' составляющие третьей гармоники образца

Более полная физическая интерпретация экспериментальных данных представлена в работах [8, 12, 13, 18, 20, 23].

Заключение

Разработанная экспериментальная установка для измерения синфазной и квадратурной составляющих высших гармоник ЭДС-сигнала отклика образца позволяет исследовать нелинейные магнитные свойства ВТСП в переменных магнитных полях до 1 кЭ и постоянных магнитных полях до 10 Тл в интервале температур от 5 до 300 К. Исследованы синфазная и квадратурная составляющие первой и третьей гармоник ЭДС-сигнала отклика текстурированного поликристалла $YBa_2Cu_3O_7$. Результаты проведенных исследований показали, что измерение синфазной и квадратурной составляющих высших гармоник ЭДС-сигнала отклика ВТСП является чувствительным и информативным методом исследования природы нелинейности намагниченности ВТСП при температуре ниже T_c и в области псевдощелевого состояния ВТСП-соединений.

Литература

1. Bean C. P. // Rev. Mod. Phys. 1964. V. 36. P. 31.
2. Anderson P. W. // Phys. Rev. Lett. 1962. V. 9. P. 309.
3. Ebner C., Stroud D. // Phys. Rev. B. 1987. V. 31. P. 165.
4. Morgenstern I., Muller K. A., Bednordz J. C. // Physica C. 1988. V. 15. P. 59.

5. Сонин Э. В. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47. С. 415.
6. Polichetti M., Adesso M. G., Pace S. // Physica A. 2004. V. 339. P. 119.
7. Schindler K., Ziese M., Esguinazi P. et al. // Physica C. 2005. V. 417. P. 141.
8. Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В., Тищенко Э. А. // Машиностроение: наука, техника, образование: Сб. науч. тр. 7-й Всерос. науч.-практ. конф. 2009. Рузаевский институт машиностроения (филиал) Морд. гос. университета. С. 137.
9. Vucov D. N., Timusk T. // Rev. Mod. Phys. 2005. V. 77. P. 721.
10. Lee P. A., Nagaosa N., Wen X.-G. // Rev. Mod. Phys. 2006. V. 78. P. 17.
11. Fischer Ø., Kugler M., Maggio-Aprile I., Berthod. // Rev. Mod. Phys. 2007. V. 79. P. 353.
12. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В. // ЖЭТФ. 2008. Т. 134. № 4 (10). С. 679.
13. Славкин В. В., Тищенко Э. А. // ФММ. 2009. Т. 107. № 4. С. 1.
14. Пал Л., Тарноца Т. // Изв. АН СССР. Серия физич. 1957. Т. 21. № 8. С. 1055.
15. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Левченко И. С. и др. // Препринт ФИАН. № 41. 1989.
16. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Левченко И. С. и др. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 4. С. 233.
17. Jeffries C. D., Lam G. H., Kim Y. et al. // Phys. Rev. B. 1989. V. 39. No. 16. P. 11526.
18. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Левченко И. С. и др. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 5. С. 1374.
19. Кузьмичев Н. Д. // ЖТФ. 1994. Т. 64. № 12. С. 63.
20. Kuz'michev N. D., Slavkin V. V. // Physica C. 1994. V. 235—240. P. 2875.
21. Ito T., Takenaka K., Uchida S. // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. P. 3995.
22. Прокофьев Д. Д., Волков М. П., Бойков Ю. А. // ФТТ. 2003. Т. 45. С. 1168.
23. Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В. // Там же. 2007. Т. 49. С. 1549.

The unit for studying of nonlinear magnetic properties of high temperature superconductors by means of the third magnetic harmonic

V. V. Slavkin

Saransk Co-operative Institute, a Branch of Russian University of Co-operation
17 Transportnaya str., Saransk, 430027, Russia
E-mail: SlavkinVV@mail.ru

E. A. Tishchenko

P. L. Kapitza-Institute for Physical Problems of RAS
2 Kosygin str., Moscow, 119334, Russia
E-mail: tishchenko@kapitza.ras.ru

The unit for measuring of in-phase and quadrature components of higher harmonics of emf-response signal in high temperature superconductors is able to research the nonlinear magnetic properties of superconductors in alternating magnetic fields till 1 kOe and in constant magnetic fields till 10 T by the temperature range from 5 till 300 K. The in-phase and quadrature first and third harmonics components of emf-response signal of grain-oriented $YBa_2Cu_3O_7$ polycrystalline are investigated.

PACS: 75.30.Cr

Keywords: nonlinearity, irreversibility, pseudo-slot, in-phase and quadrature harmonics component, compensatory method.

Bibliography — 23 references.

Received March 3, 2012