

05.2;05.4

## Нелинейные эффекты иттриевой керамики в нестационарном магнитном поле

© В.Е. Милошенко, И.М. Голев, А.А. Воронов

Воронежский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 7 июня 1999 г.

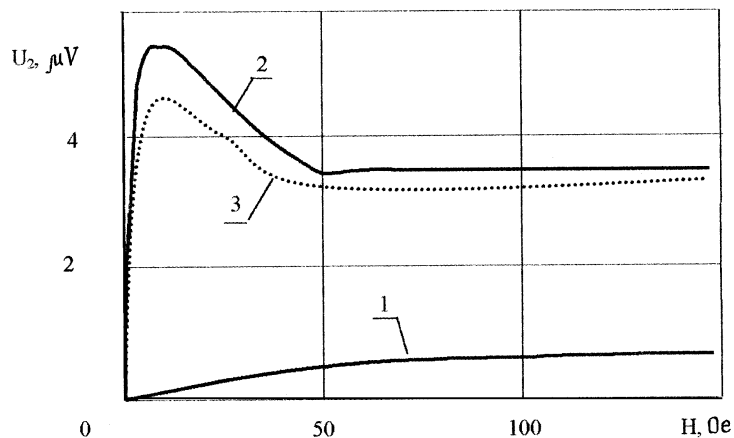
Проведены исследования нелинейных электродинамических свойств в гранулированных сверхпроводниках на примере иттриевой керамики в нестационарном магнитном поле и в токовом состоянии. Обнаружен эффект существенного увеличения амплитуды их четных гармоник. Показано, что нелинейные свойства определяются динамикой ансамбля вихрей в приповерхностном слое сверхпроводника и зависят от внешних воздействий.

Известно, что высокотемпературным сверхпроводникам свойственны нелинейные эффекты [1,2], которые обуславливают заметный интерес к применению этих материалов в приборах криоэлектроники и навигационной техники.

В данной работе для исследований нелинейных свойств иттриевой керамики использовался индуктивный метод. Проводились измерения гармонических составляющих сигнала-отклика сверхпроводника на низкочастотное переменное магнитное поле.

Нами были выбраны образцы керамики состава  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ , приготовленной методом твердофазного синтеза, с критической температурой 93 К, имеющие размеры  $3 \times 5 \times 15$  mm. На них воздействовало переменное поле амплитуды  $h \leq 10^{-2}$  Oe и частоты  $f = 10^2 - 10^4$  Hz в диапазоне постоянных магнитных полей  $H = 0 - 500$  Oe при температуре кипения жидкого азота. При этом постоянное магнитное поле могло увеличиваться или уменьшаться.

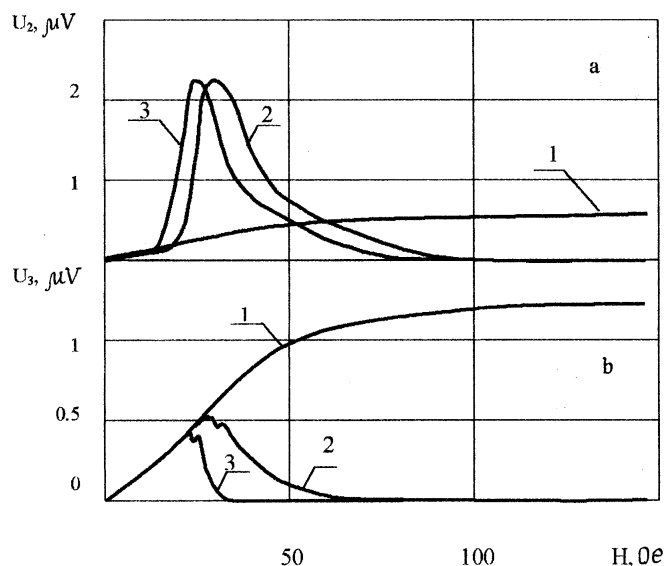
Установлено, что в поле  $H$ , увеличивающемся со скоростью  $V = dH/dt$  более 10 Oe/s (назовем его нестационарным), происходит существенное искажение формы сигнала отклика в виде ограничения по амплитуде в одном из полупериодов. Коэффициент гармоник сигнала отклика в этом случае достигает 30%. При медленном же изменении поля  $H$  ( $V < 1$  Oe/s) он не превышал 4%. Амплитуды четных гармоник (особенно второй  $U_2$ ) в нестационарном поле существенно увеличива-



**Рис. 1.** Влияние скорости развертки постоянного поля на магнитополевою зависимость второй гармоники: 1 — 0.8 Oe/s, 2 — 25 Oe/s для иттриевой керамики; 3 — 25 Oe/s для иттриевой керамики, покрытой индием;  $h = 0.008$  Oe,  $f = 1$  kHz.

лись и превышали аналогичные для случая медленно увеличивающегося поля примерно в 4–5 раз (рис. 1). Амплитуды же нечетных гармоник практически не изменялись, наблюдалось лишь незначительное их увеличение в полях напряженностью меньше 50 Oe.

Обнаруженные особенности нелинейных свойств иттриевой керамики связаны с возникновением (в нестационарном случае) движения сорванных вихрей в глубь сверхпроводника. Если уменьшать это поле (обратный ход), то вихри движутся в другую сторону. Наблюдаемая генерация четных гармоник определяется процессами, происходящими в приповерхностном слое, а движение вихрей в нем — поверхностным барьером [3]. Величину барьера можно уменьшить, например, за счет нанесения на поверхность сверхпроводника нормального металла. В этом случае должно наблюдаться изменение амплитуды четных гармоник. Проведенные эксперименты на образцах, покрытых индием, выявили уменьшение амплитуды четных гармоник (например  $U_2$ , рис. 1, кривая 3). Амплитуды же нечетных гармоник практически не изменились.



**Рис. 2.** Влияние величины транспортного тока на магнитополевые зависимости  $U_2$ ,  $U_3$  сигнала отклика при скорости  $V = 0.8 \text{ Oe/s}$ : 1 —  $I_T = 0$ ; 2 —  $0.3 \text{ A}$ ; 3 —  $0.4 \text{ A}$ ;  $h = 0.008 \text{ Oe}$ ,  $f = 1 \text{ kHz}$ .

Таким образом, установив связь отклика с движением вихрей, мы воздействовали на них транспортным током  $I_T$  разных направлений. В одном случае пропускали ток только по одной грани образца, а в другом — по обеим, но одного направления. Обнаружили, что при определенных значениях  $I_T$  и  $H$  также генерируются вторая  $U_2$  и третья  $U_3$  гармоники (рис. 2). Положения их определяются величиной тока; с увеличением плотности тока максимумы сдвигаются в область меньших значений магнитного поля (кривые 2 и 3), а изменение направления транспортного тока на противоположное, как и следовало ожидать, приводит к вращению фазы четных гармоник на  $180^\circ$ , как это наблюдалось нами в случае изменения направления поля. Таким образом, в обеих экспериментальных ситуациях движение вихрей стимулирует генерацию четных гармоник.

Для дополнительного подтверждения этой идеи были поставлены эксперименты, в которых по противоположным граням образца пропускали токи, равные по величине, но одного направления, т.е. транспортный ток в этом случае инициирует движение вихрей; вблизи одной из граней они движутся вглубь, а на другой — к поверхности. Сигналы четных гармоник находятся в противофазе и, естественно, не должны обнаруживаться с помощью измерительной катушки. Действительно, в данной ситуации четные гармоники не были обнаружены, хотя при отсутствии тока зависимость  $U_2(H)$  была аналогична предыдущей. Характер же зависимостей  $U_3(H)$ , как и ожидалось, не изменился.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования нелинейных свойств сверхпроводников на примере иттриевых металлооксидов показывают, что генерация четных гармоник в сигнале-отклике на переменное магнитное поле связана с динамикой ансамбля вихрей в приповерхностном слое сверхпроводника. Фаза этих гармоник определяется направлением коллективного движения вихрей. Изменяя внешние воздействия, например, скорость развертки магнитного поля, величину и направление транспортного тока и др., можно управлять величиной нелинейных эффектов сверхпроводников.

## Список литературы

- [1] Ацаркин В.А., Васнева Г.А., Демидов В.В. и др. // СФХТ. 1990. Т. 3. В. 8. С. 1643–1653.
- [2] Ji L., Sohn R.H., Spalding G.C. et al. // Phys. Rev. 1989. V. 40. N 16. P. 10936–10945.
- [3] Милошенко В.Е., Шушлебин И.М., Дынин А.Н. и др. // СФХТ. 1990. Т. 3. В. 11. С. 2587–2595.