

05

## Аномально низкий токовый шум в наноструктурной керамике NdFeBC

© О.В. Геращенко

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН,  
Гатчина, Ленинградская обл.  
E-mail: gerashch@npfi.spb.ru

Поступило в Редакцию 6 июля 2007 г.

Впервые проведены измерения спектральной плотности токового шума в новом типе наноматериалов — керамическом проводящем ферромагнетике NdFeBC. Обнаружено, что по сравнению с другими пространственно неупорядоченными материалами эти образцы обладают аномально малым уровнем флуктуаций сопротивления. Получена верхняя оценка спектральной плотности флуктуаций.

PACS: 72.70.+m, 72.80.Tm, 72.80.Ng

В последнее время большой интерес вызывают исследования наноструктурных аморфных композитных материалов, в частности, в связи с возможностью получения мощных постоянных магнитов, конкурирующих с редкоземельными постоянными магнитами на основе Sm–Co [1,2]. Тот факт, что эти материалы обладают относительно большой проводимостью, делает возможным их использование и в качестве токопроводящих материалов. В работе методом фликкер-шумовой спектроскопии исследованы шумовые характеристики наноструктурной керамики NdFeBC, полученные в ПИЯФ РАН в лаборатории Ю.С. Грушко и представляющие собой ферромагнетик, находящийся в углеродной матрице. Образцы изготавливались методом дугового распыления, спрессовывались в таблетки и отжигались в атмосфере аргона при температуре 900°C в течение двух часов. Плотность полученного материала составила 1.6 g/cm<sup>3</sup>.

Для исследования электропроводности и шумовых свойств материала был изготовлен прямоугольный образец с размерами 9.0 × 3.5 × 1.3 mm. На широкую сторону образца наносились контакты из индий-галлиевой эвтектики. Образец располагался в двойном медно-

пермалроевом экране. Все измерения проводились при комнатной температуре. Проводимость и спектральная плотность флуктуаций сопротивления измерялись стандартным четырехконтактным методом. Изучаемое напряжение с потенциальных контактов через согласующий повышающий трансформатор подавалось на усилитель, фильтр низких частот и плату сбора данных в составе персонального компьютера. Приведенное к входу усиление составило  $8.1 \cdot 10^6$ .

Стационарное неравновесное (токовое) состояние устанавливалось при пропускании через образец постоянного тока, задаваемого от аккумуляторной батареи с ограничивающим проволочным резистором, сопротивление которого многократно превышало сопротивление образца и токовых контактов. Сила тока определялась максимальным допустимым входным напряжением, приложенным к первичной обмотке согласующего трансформатора, и составляла 26 мА.

Поскольку при такой схеме измерений могут иметь место флуктуации сопротивления токовых контактов, которые на сопротивлении образца трансформируются в шумы измеряемого напряжения, то для оценки этого эффекта в измерительную цепь включался последовательно проволочный резистор  $0.21 \Omega$ . Измерения на таком эквиваленте образца показали, что контактные шумы пренебрежимо малы.

Время набора реализации составляло двадцать минут при частоте дискретизации 6600 1/s и соответствовало 1933 спектрам, полученным методом быстрого преобразования Фурье. Усреднение по спектрам позволило измерять каждую точку в спектральной плотности с точностью 2.3%. Поскольку оказалось, что на частотах, превышающих 50 Hz, спектральная плотность флуктуаций равномерна, то для повышения чувствительности измерений в высокочастотной части спектра проводилось дополнительное усреднение в спектральной полосе 266 Hz. Таким образом, относительная ошибка измерений в частотно-независимой части спектра составила 0.2%, а абсолютная чувствительность установки определялась тепловым шумом сопротивления первичной обмотки согласующего трансформатора ( $10 \Omega$ ) и составила величину порядка  $10^{-19} \text{ V}^2/\text{Hz}$  с разрешением порядка  $10^{-12} \text{ V}^2/\text{Hz}$ , что позволило достоверно измерять вклад тепловых шумов образца.

Как известно, неупорядоченные проводящие системы в стационарном неравновесном состоянии, созданном протекающим постоянным электрическим током, демонстрируют флуктуации, избыточные по отношению к тепловым и имеющие, как правило, характерную частотную

зависимость вида  $1/f^\alpha$ , где параметр  $\alpha \approx 1$  [3–6]. В этом случае спектральную плотность флуктуаций, например напряжения, можно представить в виде

$$S_V(f) = 4kT\bar{R} + G_V(f), \quad G_V(f) = C\bar{V}^2/f,$$

где первый член описывает равновесные флуктуации напряжения образца со средним сопротивлением  $\bar{R}$ ,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура (тепловой шум), а второе слагаемое — избыточные флуктуации напряжения, связанные с шумами сопротивления образца. При этом для относительных флуктуаций  $S_N(f)$  имеет место равенство

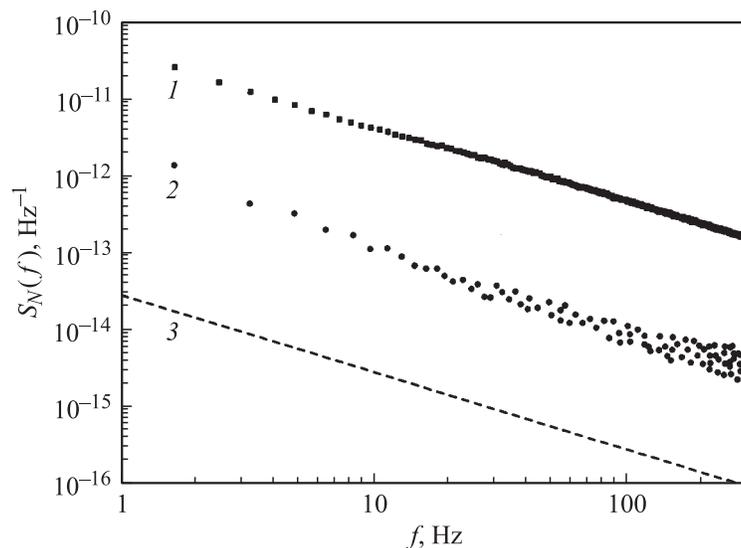
$$S_N(f) = G_V(f)/\bar{V}^2 = G_1(f)/I^{-2} = G_R(f)/\bar{R}^2,$$

где  $\bar{V}$ ,  $\bar{I}$ ,  $\bar{R}$  — среднее напряжение, ток и сопротивление исследуемого образца, а  $C_V(f)$ ,  $G_1(f)$ ,  $G_R(f)$  — спектры шума напряжения, тока и сопротивления соответственно. Избыточный низкочастотный шум пренебрежимо мал в металлических проволочных проводниках и, как правило, является определяющим в полупроводниках и пространственно неоднородных материалах типа углеродных резисторов.

Основной результат работы состоит в следующем: пропускание через образец наноразмерной керамики постоянного тока не привело к появлению флуктуаций, избыточных над тепловыми, соответствующими измеренному сопротивлению образца  $0.155 \Omega$  (удельное сопротивление материала  $36.3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$ ). Исходя из достигнутой в эксперименте точности и разрешающей способности можно дать верхнюю оценку нормированной спектральной плотности флуктуаций сопротивления в предположении, что они носят характерный для неупорядоченных систем  $1/f$ -вид (см. рисунок):

$$S_N(f) < 2.8 \cdot 10^{-14}/f \text{ (V}^2/\text{Hz)}.$$

Так как исследуемая керамика является ферромагнитной, то представляет интерес изучение влияния магнитного поля на ее резистивность и шумовые свойства. Измерения, проведенные в магнитном поле напряженностью  $0.13 \text{ T}$ , показали, что такое магнитное поле не оказывает влияния на сопротивление и его флуктуации.



Частотная зависимость относительной спектральной плотности флуктуаций: 1 — углеродистый резистор ТВО, 2 — YBaCuO ВТСП керамика, 3 — верхняя оценка уровня шума в NdFeBC нанокерамике. Все зависимости имеют вид  $1/f$ .

Для сравнения с некоторыми другими структурно неупорядоченными материалами были проведены измерения спектра шумов напряжения  $S_V(f)$  в токовом состоянии в высокоомном объемном углеродистом резисторе ТВО-1 М33 и в образце из YBaCuO высокотемпературной сверхпроводящей керамики с размерами  $13 \times 5 \times 0.6$  mm и сопротивлением  $0.027 \Omega$  при комнатной температуре. В этих объектах наблюдались характерная для неупорядоченных систем  $1/f$  зависимость спектральной плотности шума (см. рисунок) и квадратичная зависимость ее интенсивности от среднего напряжения.

Таким образом, изученные нами образцы наноструктурной керамики NdFeBC демонстрируют очень низкий для керамических материалов уровень избыточного  $1/f$ -шума, что связано, по-видимому, с очень малым размером пространственных неоднородностей материала.

Автор выражает благодарность Ю.С. Грушко за предоставленные образцы.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 05-02-17626), Государственными программами „Квантовая макрофизика“, „Сильно коррелированные электроны в полупроводниках, металлах, сверхпроводниках и магнитных материалах“ и „Нейтронные исследования конденсированного состояния“.

## Список литературы

- [1] *Fastenau H.J., van Loenen E.J.* // J. Magn. Magn. Matter. 1996. V. 1. P. 157.
- [2] *Jiles D.C.* // Acta Materialia. 2003. V. 51. P. 5907.
- [3] *Hooge F.N.* // Phys. Lett. A. 1969. V. 29. P. 139.
- [4] *Hooge F.N., Kleïpenning T.G.M., Vandamme L.K.J.* // Rep. Prog. Phys. 1981. V. 44. P. 479.
- [5] *Коган Ш.М.* // УФН. 1985. V. 145. P. 285.
- [6] *Жигальский Г.П.* // УФН. 2003. V. 173. P. 465.