

АНОМАЛЬНО НИЗКИЙ ТОКОВЫЙ ШУМ В НАНОСТРУКТУРНОЙ КЕРАМИКЕ NdFeBC

Геращенко О.В.

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
188300 Гатчина, Ленинградская обл., Россия

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 °С в течение двух часов. Плотность полученного материала составила 1.6 г/см³.

Для исследования электропроводности и шумовых свойств материала был изготовлен прямоугольный образец с размерами 9.0×3.5×1.3 мм³. На широкую сторону образца наносились контакты из индий – галлиевой эвтектики. Образец располагался в двойном медно-пермаллоевом экране. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Проводимость и спектральная плотность флуктуаций сопротивления измерялись стандартным четырех-контактным методом. Изучаемое напряжение с потенциальных контактов через согласующий повышающий трансформатор Unipan 233-7-1 30 dB, подавалось на усилитель, фильтр низких частот и плату сбора данных в составе персонального компьютера. Приведенное ко входу усиление составило 8.1·10⁶. 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 Ом. Измерения на таком эквиваленте образца показали, что контактные шумы пренебрежимо малы.

Время набора реализации составляло двадцать минут при частоте дискретизации 6600 1/с 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 Гц, спектральная плотность флуктуаций равномерна, то для повышения чувствительности измерений в высокочастотной части спектра проводилось дополнительное усреднение в спектральной полосе 266 Гц. 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 Ом) и составила величину порядка 10^{-19} В²/Гц с разрешением порядка 10^{-21} В²/Гц, что позволило достоверно измерять вклад тепловых шумов образца.

Как известно, неупорядоченные проводящие системы в стационарном неравновесном состоянии, созданным протекающим постоянным электрическим током, демонстрируют флуктуации, избыточные по отношению к тепловым, и имеющие, как правило, характерную частотную зависимость вида $1/f^\alpha$, $\alpha \approx 1$ [3-6]. В этом случае спектральную плотность флуктуаций, например, напряжения, можно представить в виде:

$$S_V(f) = 4kTR + G_V(f), \quad G_V(f) = CV^2/f,$$

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

$$S_N(f) = G_V(f)/V^2 = G_I(f)/I^2 = G_R(f)/R^2,$$

где V , I , R - среднее напряжение, ток и сопротивление исследуемого образца. Избыточный низкочастотный шум пренебрежимо мал в металлических проволочных проводниках и, как правило, является определяющим в полупроводниках и пространственно-неоднородных материалах типа углеродных резисторов.

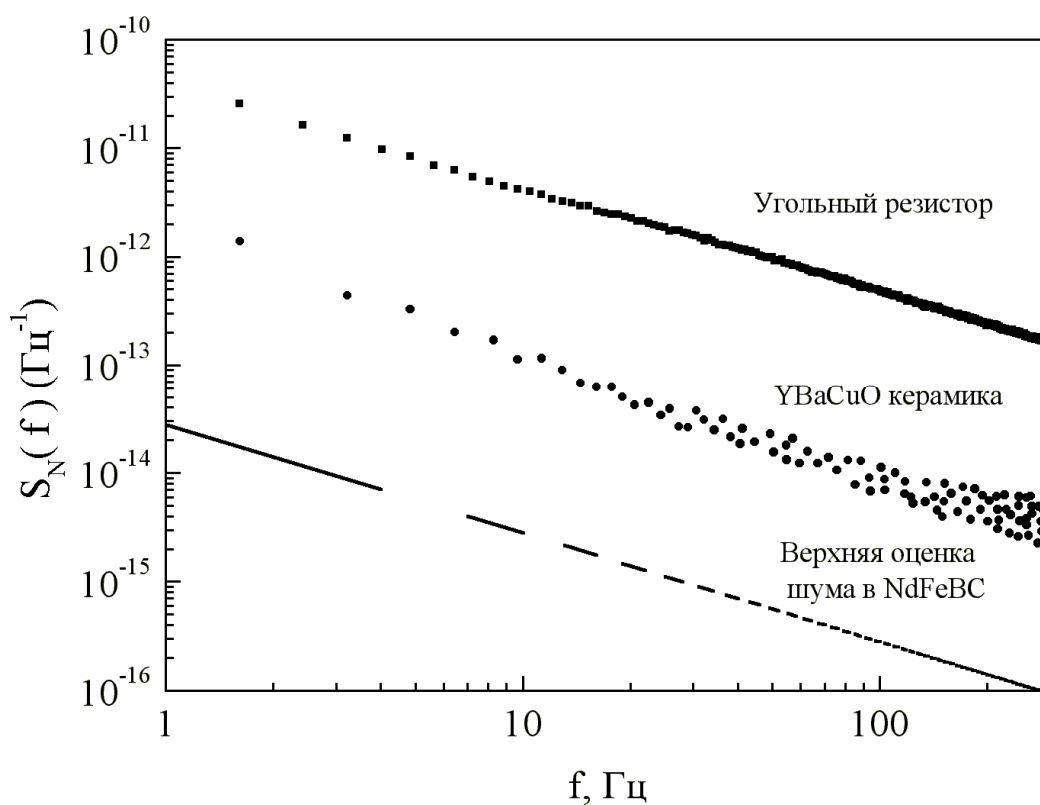
Основной результат работы состоит в следующем: пропускание через образец наноразмерной керамики постоянного тока не привело к появлению флуктуаций, избыточных над тепловыми, соответствующими измеренному сопротивлению образца 0.155 Ом. Исходя из достигнутой в эксперименте точности и разрешающей способности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

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

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 1300 Э показали, что такое магнитное поле не оказывает влияния на сопротивление и его флуктуации.

Для сравнения были проведены измерения спектра шумов напряжения $S_V(f)$ в токовом состоянии в высокоомном углеродном резисторе и в образце YBaCuO высокотемпературной сверхпроводящей керамики с размерами $13 \times 5 \times 0.6$ мм³ и сопротивлением 0.027 Ом при комнатной температуре. В этих объектах наблюдалась характерная для неупорядоченных систем $1/f$ зависимость спектра (см. рис.) и квадратичная зависимость от среднего напряжения $G_V(f) \sim V^2$.

Таким образом, изученные нами образцы наноструктурной керамики NdFeBC демонстрируют аномально малый для керамических материалов избыточный $1/f$ - шум, что связано, по-видимому, с очень малым размером пространственных неоднородностей материала.



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

Литература:

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