

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ПРОВОДИМОСТИ ПЕРМАЛЛОЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ МАГНИТНОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

А.А. Шульгинов, С.Ю. Гуревич

Зарегистрированы флуктуации сопротивления пермаллоевой ленты при различных температурах, вплоть до температуры магнитного фазового перехода. Отмечено резкое увеличение амплитуды фликкер-шума сопротивления при достижении температуры магнитного фазового перехода. Это явление связано с процессом разрушения и перестройки доменов ферромагнетика.

Введение

Шум всегда рассматривался как помеха при передаче информации, но в настоящее время в науке происходит пересмотр взглядов на шум. Среди шумов различной природы выделяют шумы, которые могут нести информацию как о его источнике, так и о внешних воздействиях. В данной работе сделана попытка применить эти идеи к физике металлов. Была поставлена цель исследовать шумы сопротивления металлов и связать их параметры с внутренним состоянием образцов.

Особый интерес в этом плане представляют собой шумы сопротивления ферромагнетиков. Электроны внутри ферромагнетика находятся в сильно неоднородном магнитном поле, вызванном наличием многочисленных областей намагниченности (доменов) в нём. Магниторезистивный эффект, обусловленный собственным неоднородным магнитным полем ферромагнетика, по нашему предположению, должен вызвать значительно больший уровень флуктуаций сопротивления по сравнению с неферромагнитными проводниками [1]. Если повысить температуру ферромагнетика, то можно предположить, что уровень флуктуаций сопротивления образца резко повысится вблизи температуры магнитного фазового перехода вследствие неустойчивости состояния. В нём непрерывно должны возникать и разрушаться доменные структуры. Это порождает фликкер-шум магнитного поля и проводимости ферромагнетика, имеющий спектр $1/f$. Фликкер-шум выступает как спутник необратимых процессов и несёт информацию о них [2]. Цель нашего исследования состояла в том, чтобы проверить эту гипотезу о фликкер-шуме ферромагнетика.

Эксперимент

В качестве образца для исследования флуктуаций выбрана нелегированная пермаллоевая лента (никель – 70%, остальное – железо) толщиной 0,014 мм, шириной 1 мм. Точка Кюри образца – 560 °С. Сопротивление образцов находилось в пределах 30...60 Ом. При увеличении температуры до точки Кюри сопротивление ленты возрастало примерно в 2 раза. Её температурный коэффициент сопротивления α_t оказался равным $2,6 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹. Лента намотана спирально на стержень длиной 5 см из чистого оксида алюминия, чтобы исключить ионную проводимость при высоких температурах. Четыре таких сопротивления соединены и установлены внутри муфельной печи одно рядом с другим вокруг длинного стержня из того же материала. Обмотка соседних сопротивлений произведена в противоположных направлениях. Это сделано для уменьшения влияния магнитных помех. Температура внутри печи контролировалась в разных точках с помощью трёх термпар. В процессе нагрева разность температур внутри не превышала 10 °С. Для уменьшения влияния внешних электромагнитных помех вся установка помещена в шкаф с металлическими стенками. Пермаллоевое сопротивление включено в мост Уитстона двумя разными способами:

1) пермаллоевое сопротивление включено в одно из плеч уравновешенного моста (в этом случае регистрировались флуктуации пермаллоевого сопротивления);

2) два пермаллоевых резистора с близкими сопротивлениями включались в соседние плечи моста (в этом случае регистрировалась разность флуктуаций в соседних пермаллоевых резисторах). При такой схеме подключения проще было поддерживать баланс с помощью других сопротивлений моста, которые находились вне печи в металлической коробке вместе с инструментальным усилителем (ИУ) AD623 (фирма «Analog Device») с очень низким уровнем собственных шумов

(менее 1 мкВ на входе). Коэффициент усиления – 500. Внутри этой коробки температура контролировалась с точностью до 1 °С. Вся схема получала питание от аккумулятора +12 В (фирма «Coslight»), чтобы уменьшить уровень электрических шумов. Для регистрации и обработки сигнала от ИС, а также от термопар создана система на основе персонального компьютера с использованием 32-канальной платы сбора данных L-154 (производство ЗАО «Лкард»). Для обработки данных создано программное обеспечение, включающее в себя программу для регистрации и записи данных, программы для анализа гистограмм и спектра.

На первом этапе эксперимента изучены флуктуации, которые даёт вся система регистрации. Для этого вместо пермаллового сопротивления в плечо моста было впаяно прецизионное сопротивление такой же величины. Затем вместо него было включено пермалловое сопротивление таким образом, что механические контакты находились вне печи и имели одинаковую температуру, чтобы исключить контактный термоэлектрический эффект Зеебека. Амплитуда шумов возросла примерно в 20–30 раз, хотя все сопротивления находились при комнатной температуре. Следовательно, были зарегистрированы преимущественно флуктуации сопротивления пермаллоя, которые составили $\sigma_R/R \sim 10^{-5}$, причём эта величина оказалась примерно одинаковой при разных способах включения сопротивления. Спектральный анализ проводился в диапазоне от 0,1 до 100 Гц. Он показал, что, если в плечо моста включено прецизионное сопротивление, то система генерирует белый шум в диапазоне 1...100 Гц. Когда в состав моста входит пермалловое сопротивление, то в спектре флуктуаций явно проявляются шумы различной природы (рис. 1): найквистовский белый шум (1), фликкер-шум (2) и магнитный шум (3), вызванный переменными низкочастотными магнитными полями. Аппаратными методами не удалось избавиться полностью от этих магнитных шумов, но это удалось сделать математически путём выделения спектрального диапазона, в котором они отсутствуют (0,1...5 Гц).

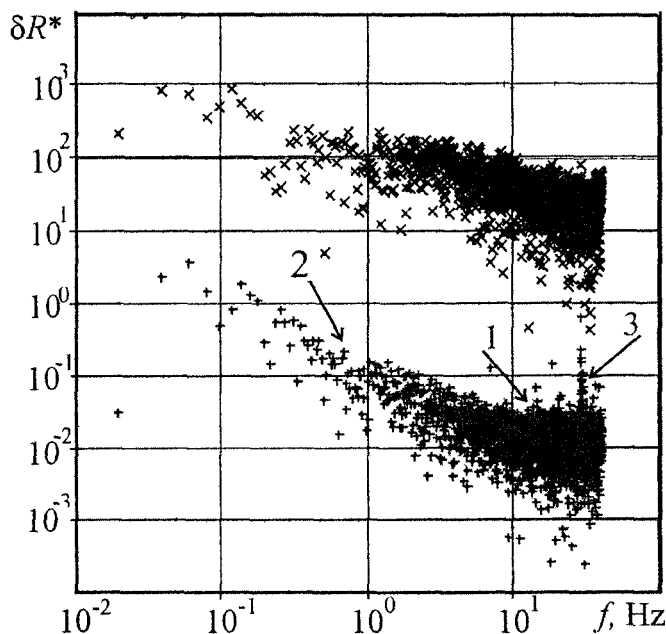


Рис. 1. Спектр флуктуаций сопротивления пермаллоя в отн. ед. при $t=20^\circ\text{C}$ (+) и при $t=560^\circ\text{C}$ (x)

Отметим, что в предыдущих экспериментах зарегистрированы пики в спектре флуктуаций проводимости пермалловой ленты на отдельных частотах. Детальные исследования показали, что эти пики есть магнитные шумы, и они имеют частоты кратные основным тонам 50 и 60 Гц. Были зарегистрированы гармоники этих магнитных шумов вплоть до одиннадцатой. Приближение ферромагнетика к детектору, естественно, их усиливает. Но нас интересует информативный фликкер-шум, вызванный внутренними процессами перестройки и разрушения магнитных доменов в ленте. Поэтому весь дальнейший анализ проводился только в диапазоне 0,1...5 Гц. Регистрация шумов на более низких частотах не проводилась, так как они вызваны нестабильностью температуры.

Цель следующего этапа эксперимента состояла в исследовании температурной зависимости амплитуды и других характеристик фликкер-шума. Включение нагревателя не вызвало мгновенного роста амплитуды флуктуаций. Нагрев производился на 2–4 °С в минуту. При этом наблюдался медленный рост амплитуды флуктуаций. Флуктуации фиксировались как при нагреве, так и при охлаждении печи. Заметных отличий в уровне и спектре шумов не обнаружено. В этих экспериментах использовались разные образцы ленты и разные схемы включения. На рис. 2а,б отобразён результат всех экспериментов по нагреву и охлаждению пермалловых лент. В процессе записи флуктуаций температура ленты изменялась, поэтому наблюдался дрейф среднего сопротивления. Перед тем как сигнал обрабатывался с помощью процедуры быстрого Фурье-преобразования, сначала он подвергался вейвлет-анализу для исключения влияния дрейфа температуры. Полученный спектр флуктуаций относительного сопротивления

$$\frac{\delta R^*(f)}{R} = \left| \frac{1}{2\pi} \int_0^T \frac{\delta R(t)}{R} \exp(-i2\pi ft) dt \right| \quad (1)$$

был аппроксимирован степенной функцией

$$\frac{\delta R^*(f)}{R} = \frac{A}{f^n}, \quad (2)$$

где T – длительность одной записи ($T = 51,5$ с), A , n – амплитуда и степень шума.

Основные результаты

Зарегистрирован фликкер-шум сопротивления пермаллоя, который во много раз превосходит шумы сопротивления ферромагнитных проводников. Это подтверждает гипотезу, что фликкер-шум проводимости ферромагнетиков связан с существенной неоднородностью магнитного поля внутри ферромагнетиков. Разработанный алгоритм анализа шумов, который состоит в последовательном применении вейвлет-анализа и быстрого Фурье преобразования, позволил выделить фликкер-шум проводимости ферромагнетика при нагреве и при охлаждении и определить его основные характеристики. Показано, что при температуре магнитного фазового перехода пермаллоя (560 °С) наблюдается резкое увеличение амплитуды фликкер-шума примерно в 100 раз (рис. 2б). Относительные флуктуации сопротивления σ_R/R также возрастают от 10^{-5} до 10^{-2} . Это связано с процессами разрушения и формирования доменов. У фликкер-шума степень n находится в пределах 0,8...1,2, а белый (найквистовский) шум имеет степень $n=0$. На рис. 3 показана температурная зависимость степени шума, полученная в этих экспериментах. Фликкер-шум преобладает в выбранном диапазоне частот (0,1–5 Гц) при температурах ниже точки Кюри. В области температуры магнитного фазового перехода наблюдается снижение степени шума, что указывает на то, что белый шум растёт гораздо быстрее фликкер-шума с увеличением температуры. Следовательно, разрушение доменов создаёт, в основном, белый шум.

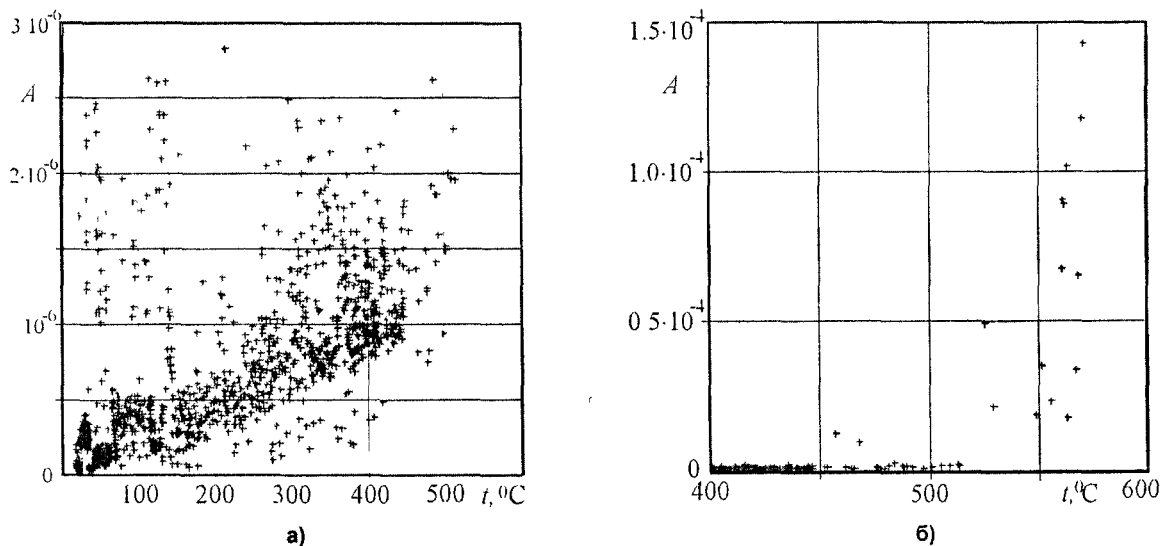


Рис. 2. Зависимость амплитуды фликкер-шума от температуры пермаллоя
а) до 500 °С; б) 400...600 °С

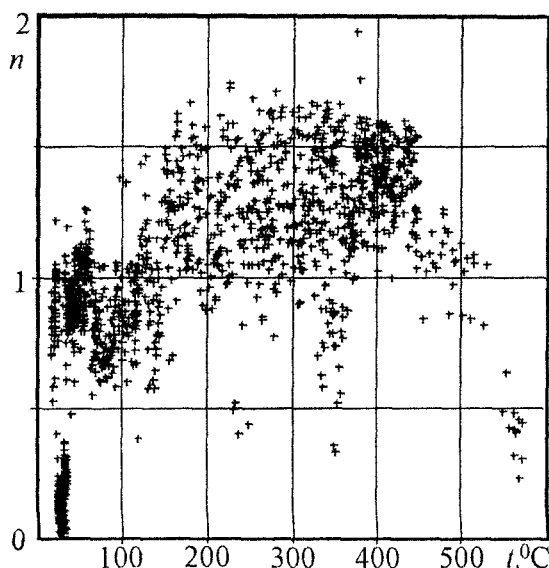


Рис. 3. Зависимость степени фликкер-шума от температуры

Проводился анализ функции распределения флуктуаций после проведённого вейвлет-преобразования. Он показал, что шум имеет распределение Гаусса во всём диапазоне температур, а коэффициенты асимметрии и эксцесса не зависят от температуры.

Благодарности

Шульгинов А.А выражает благодарности Петрову Ю.В., Прокопьеву К.В., Забейворота Н.С. за помощь в подготовке эксперимента и Пархомову А.Г. за полезные замечания к работе.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования РФ (грант № Е00-3.4-346), РФФИ и Администрации Челябинской области (грант № 01-02-96469).

Литература

1. Шульгинов А.А. Разработка источника фликкер-шума для целей неразрушающего контроля // Вестник ЮУрГУ. Серия «математика, физика, химия». – Вып.1. – 2001. – №7(07). – С. 60–61.
2. Жигальский Г.П. Шум вида $1/f$ и нелинейные эффекты в тонких металлических плёнках // УФН. – 1997. – Т. 167. – Вып. 6. – С. 623–648.

Поступила в редакцию 20 марта 2003 г.