

05:09

Расчет времени релаксации на основе частотных спектров ферритов

© К.Ю. Бажуков, Ю.В. Гольчевский, Л.Н. Котов

Сыктывкарский государственный университет,
167001 Сыктывкар, Россия
E-mail: kotov@ssu.edu.komi.ru

(Поступило в Редакцию 27 июля 1999 г.)

Предложен метод определения времен релаксации магнитных моментов ферритов с помощью обратного преобразования Фурье. На его основе проведено исследование влияния амплитуды внешнего переменного магнитного поля на времена релаксации. Выявлено, что области дисперсии и абсорбции магнитных спектров в значительной мере обусловлены изменением времен релаксации магнитных моментов ферромагнетиков.

Определение времени релаксации

Одной из важных характеристик ферромагнитных материалов является время релаксации, которое влияет на частотные свойства: меняет угол наклона частотных зависимостей проницаемости, изменяет ширину области абсорбции и т.д. Как известно, наиболее распространенный (стандартный) метод определения времени релаксации τ — по ширине пика частотной зависимости мнимой компоненты проницаемости μ'' : $\tau = 2\pi/\Delta\omega$, где $\Delta\omega$ — ширина пика на половине максимального значения μ'' . Этот метод используется для намагниченных до насыщения магнетиков (однодоменных кристаллов и поликристаллов). Однако наиболее остро стоит вопрос о нахождении времен релаксации при малых и нулевых намагничивающих полях, поскольку именно в этой области постоянных полей ферромагнетики широко используются в технике. Для большого числа ферритов экспериментальные данные для μ'' могут быть измерены только в области частот, меньших, чем частота резонанса, что может быть связано с увеличением потерь (характеризуемых отношением μ''/μ' , где μ' — действительная компонента магнитной проницаемости) на более высоких частотах. В связи с этим возникает необходимость в методе, с помощью которого могут быть преодолены эти трудности.

В данной работе предложен метод определения времен релаксации τ магнитных моментов ферритов с помощью обратного преобразования Фурье частотной зависимости проницаемости $\mu(\omega) = \mu'(\omega) - i\mu''(\omega)$

$$\mu(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} (\mu'(\omega) - i\mu''(\omega)) \exp(i\omega t) d\omega. \quad (1)$$

Так как при обратном преобразовании Фурье подынтегральная функция должна быть определена на $(-\infty, +\infty)$, а функции $\mu'(\omega)$ и $\mu''(\omega)$ определены на участке $[0, +\infty)$, то положим функции $\mu'(\omega)$ и $\mu''(\omega)$ четными, чтобы определить их на участке $(-\infty, +\infty)$. Тогда в результате обратного преобразования Фурье получается временная функция $\mu(t)$, которая является вещественной [1]. Время релаксации магнитных

моментов τ оценивается как время, за которое $\mu(t)$ уменьшается в e раз по сравнению с $\mu(t=0)$. Для вычисления τ по предложенному методу необходимо использовать $\mu'(\omega)$ и $\mu''(\omega)$ в виде непрерывных функций, аппроксимирующих экспериментальные данные. Так как функции аппроксимации подвергаются обратному преобразованию Фурье, то необходимо наложить на них ограничения, связанные как с удобством интегрирования, так и с физическим смыслом: 1) $\mu''(\omega=0) = 0$ и $\mu''(\omega \rightarrow \infty) = 0$; 2) $\mu'(\omega \rightarrow \infty) = 0$. Эти условия помогают решать и проблему, связанную с уширением пика естественного ферромагнитного резонанса (ФМР) за счет вклада движения доменных стенок при нулевых постоянных полях, которое затрудняет вычисление τ . При таких полях τ может быть определено только для ферритов, в которых этот вклад в области частот ФМР мал. При использовании данных условий вклад доменных стенок отсекается аппроксимирующими кривыми.

С учетом вида экспериментальных исследуемых кривых были выбраны следующие функции: для аппроксимации реальной компоненты магнитной проницаемости $\mu'(\omega) = A_1 \exp(-B_1/\omega) + A_2 \exp(-B_2/\omega)$, а для мнимой компоненты $\mu''(\omega) = A\omega \exp(-B\omega^n)$, где n — положительное рациональное число. Они достаточно просты для интегрирования и довольно хорошо описывают экспери-

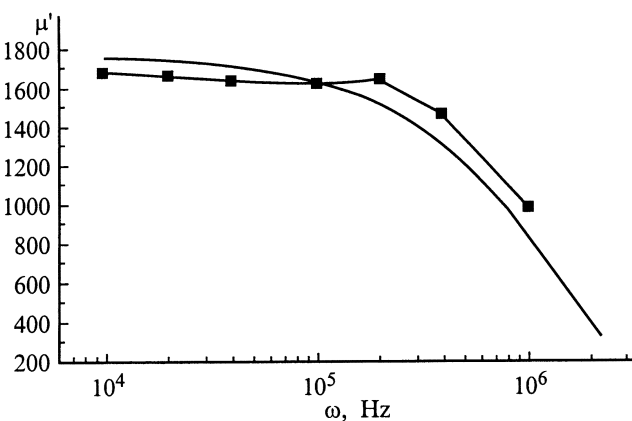


Рис. 1. Зависимость μ' от частоты для монокристалла МЦШ. Плоскость ориентации (211), $h_0 = 1$ мОе.

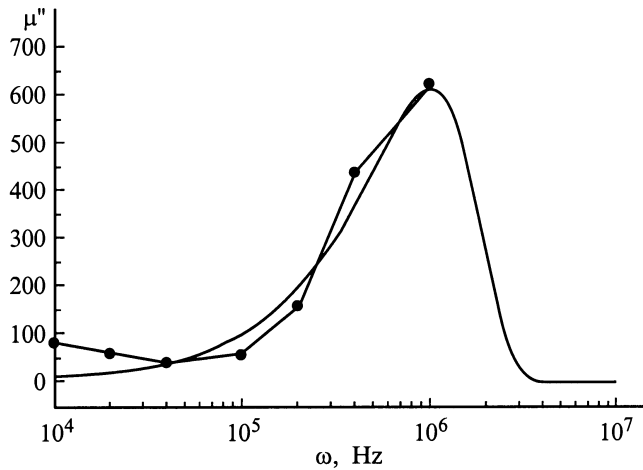


Рис. 2. Зависимость μ'' от частоты для монокристалла МЦШ (211), $h_0 = 1$ мОе.

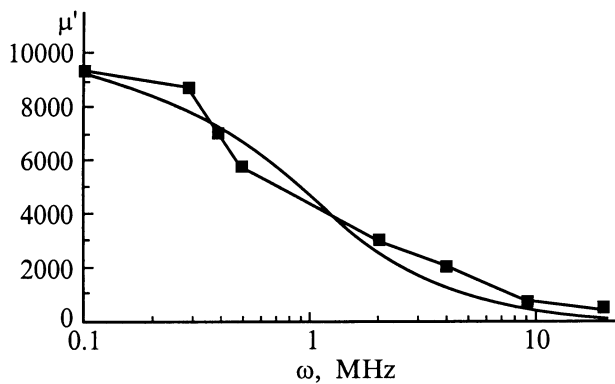


Рис. 3. Зависимость μ' от частоты для поликристалла, $h_0 = 20$ мОе.

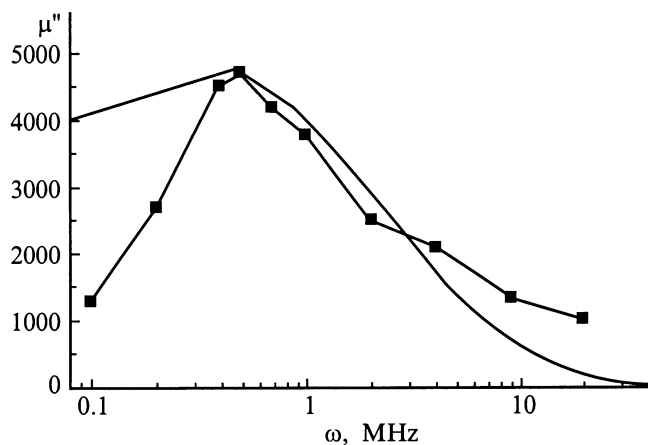


Рис. 4. Зависимость μ'' от частоты для поликристалла, $h_0 = 20$ мОе.

ментальные данные. Примеры аппроксимирующих кривых для некоторых образцов приведены на рис. 1–4. Кривые со значками — экспериментальные данные, кривые без них — аппроксимирующие.

Выбор объектов исследования

Из экспериментальных частотных спектров $\mu(\omega)$ по данной методике было вычислено время релаксации магнитной подсистемы марганец-цинковой шпинели (МЦШ). Выбор МЦШ в качестве объекта исследования обусловлен тем, что область дисперсии и максимум поглощения μ'' определяются в основном процессами вращения вектора намагниченности [2–4], т.е. ФМР. Это связано с тем, что образцы МЦШ обладают малыми полями анизотропии H_A (менее 1 Ое) и ФМР наблюдается в районе (0.1–10) МГц, а резонанс доменных границ соответственно в районе 1–10 кГц [4] и на высоких частотах они не вносят существенного вклада в суммарную проницаемость [5]. Малый вклад смещения доменных границ должен увеличить точность определения истинного времени релаксации магнитных моментов, а не эффективных времен, на величину которых оказывает сильное влияние движение доменных стенок. Кроме того, в данном случае наряду с предлагаемым методом можно использовать и стандартный метод определения времени релаксации.

Расчеты были выполнены для монокристаллов МЦШ состава $Mn_{0.54}Zn_{0.36}Fe_{2.09}O_4$, которые отличались направлением плоскости ориентации кольца (тора) по кристаллографическим осям (111), (110), (211), (100) и амплитудой переменного магнитного поля h_0 (1, 7, 20 мОе), а также для поликристаллов МЦШ состава $Mn_{0.63}Zn_{0.29}Fe_{2.08}O_4$, пористостью 0.003, средним размером зерна $20.2 \mu m$, полем анизотропии $H_A = 0.04$ Ое и разной амплитудой внешнего магнитного поля h_0 (1 и 2 мОе). Экспериментальные зависимости $\mu(\omega)$ были взяты из работ [6,7].

Сравнение методов определения τ

Времена релаксации монокристаллов, полученные с помощью обратного преобразования Фурье, лежат в пределах 10^{-7} с, а оцененные по полуширине — порядка 10^{-6} – 10^{-7} с. Как указано в [3], времена релаксации магнитных моментов МЦШ составляют 10^{-7} – 10^{-8} с, следовательно, оценка с помощью обратного преобразования Фурье более точна. Это обусловлено следующим: при вычислениях с помощью обратного преобразования Фурье используются как реальная компонента проницаемости μ' , так и мнимая μ'' , что повышает точность вычислений за счет использования большого числа экспериментальных точек. Зависимость μ' от частоты легче предсказуема на высоких частотах, так как ее склон, как правило, представлен более полно, что позволяет аппроксимировать μ' гораздо точнее, чем μ'' (рис. 1, 2).

При оценке времени релаксации стандартным методом использовались экспериментальные точки только для мнимой компоненты μ'' . Компонента μ' аппроксимировалась в диапазоне частот 10^4 – 10^7 Гц. В то же время при $h_0 = 1$ мОе μ'' представлена лишь одним

склоном пика экспериментальных данных: диапазон частот 10^4 – 10^6 Hz (рис. 2) и поведение μ'' оценивалось приблизительно из условий $\mu''(0) = 0$ и $\mu''(\infty) = 0$.

Из данных эксперимента для μ'' не видно, где находится максимум мнимой компоненты проницаемости, и значение этого максимума определяется с большой погрешностью. За максимум μ'' принималось значение, соответствующее точке экспериментальных данных с максимальной частотой. Как показали расчеты, в большинстве случаев такое предположение оправдано и времена релаксации, оцененные обоими способами, близки.

Таким образом, для рассматриваемых экспериментальных данных вычисление времен релаксации с помощью обратного преобразования Фурье более предпочтительно, так как позволяет оценивать время релаксации ферритов с большей точностью.

Времена релаксации для поликристаллов, оцененные как с помощью обратного преобразования Фурье, так и стандартным методом, совпадают. В этом случае использовались экспериментальные данные в широком диапазоне частот и пик мнимой компоненты μ'' хорошо выражен, что позволяет достаточно точно оценивать τ стандартным методом (графики аппроксимации для одного образца приведены на рис. 3 и 4).

Обсуждение результатов

Расчеты времен релаксации по экспериментальным частотным зависимостям магнитной проницаемости показали, что на времена релаксации монокристаллов не оказывает влияния на изменение плоскости ориентации и амплитуды внешнего переменного поля h_0 в пределах 1–20 мОе. Оно остается постоянным и составляет примерно $3 \cdot 10^{-7}$ с. Для малой амплитуды внешнего переменного поля h_0 время релаксации для поликристалла составляет $4 \cdot 10^{-7}$ с, что примерно равно времени релаксации монокристаллических образцов. При увеличении амплитуды h_0 картина сильно меняется. Время релаксации магнитных моментов при амплитуде внешнего поля 20 мОе увеличивается примерно в 2 раза. В отличие от монокристалла в поликристалле происходят сильные нарушения внутренней структуры. В этом случае при больших амплитудах может задерживаться возвращение в положение равновесия вектора намагниченности, что должно приводить к увеличению времен релаксации. Похожие результаты для поликристаллов были получены в работах [8–10]. Из данных этих работ следует, что при увеличении энергии, поступающей в магнитную подсистему, время релаксации увеличивается. В [9] исследования проведены для никелевого феррита, а в [10] — для никель-хромовых сплавов. Возможно, в определенных амплитудных диапазонах данная закономерность характерна для всех ферритов со структурой шпинели.

Заключение

Когда оценка с помощью стандартного метода затруднительна, можно использовать метод обратного преобразования Фурье. В случае, когда в частотном диапазоне виден весь пик мнимой компоненты, оба метода дают одинаковые оценки, причем использование стандартного метода предпочтительнее, так как метод обратного преобразования Фурье требует предварительной обработки данных.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что в монокристаллических ферритах время релаксации τ не зависит от взаимной ориентации кристаллографических осей и переменного поля. Амплитуда внешнего переменного магнитного поля влияет на время релаксации только в поликристаллах. Результаты данного исследования показывают, что частотные характеристики многих радиотехнических устройств, изготовленных на основе поликристаллических ферромагнетиков, можно достаточно легко изменять с помощью варьирования амплитуды внешнего переменного магнитного поля.

Список литературы

- [1] *Титчмарш Е.* Введение в теорию интегралов Фурье. М.: Гостехиздат. 1948. 408 с.
- [2] *Тикадзуми С.* Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. Пер. с яп. М.: Мир; ИЛ, 1987. 419 с.
- [3] *Крутичка С.* Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. Пер с нем. М.: Мир, 1976. Т. 2. 504 с.
- [4] *Смит Я., Вейн Х.* Ферриты / Пер. с англ. М.: ИЛ, 1969. 504 с.
- [5] *Гуревич А.Г.* Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 592 с.
- [6] *Абаренкова С.Г., Кочнов С.А., Саенко И.В.* и др. // Электронная техника. Сер. 6. Материалы, 1991. Вып. 8(264). С. 28–32.
- [7] *Харинская М.А., Абаренкова С.Г.* // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1990. Вып. 3(248). С. 23–26.
- [8] *Park D.* // Phys. Rev. 1955. Vol. 97. N 1. P. 60–66.
- [9] *Torres L., Zazo M., Iniguez J.* // IEEE Trans. on Magn. 1993. Vol. 29. N 6. P. 3434–3436.
- [10] *Стеценко Ф.И.* // ФТГ. 1995. Т. 37. Вып. 3. С. 598–607.