

05

Упругие колебания в пластинчатом образце ортоферрита иттрия, индуцированные движущейся доменной границей

© А.П. Кузьменко, Е.А. Жуков

Хабаровский государственный технический университет
E-mail: kap@mail.khstu.ru

Поступило в Редакцию 7 июля 2005 г.

Экспериментально впервые обнаружены упругие колебания, вызванные движением доменной границы в пластине ортоферрита иттрия толщиной 10^{-4} м. Проведенные расчеты свидетельствуют об их соответствии изгибным волнам Лэмба.

PACS: 75.60.-d

В материалах со слабоферромагнитным упорядочением основным механизмом перемещения является движение доменной границы (ДГ), скорость которой для ортоферрита иттрия может достигать $20 \cdot 10^3$ м/с, что значительно выше скорости поперечного звука — $4 \cdot 10^3$ м/с. Окно прозрачности ортоферритов в видимом диапазоне позволило исследовать нелинейную динамику ДГ и по рассеянию света обнаружить динамическую деформацию [1,2], возникновение которой обусловлено возбуждением магнитоупругих волн в момент преодоления ДГ звукового барьера [3]. В [4] показано, что ДГ выступает как динамический микрозонд, позволяющий исследовать квазичастичные взаимодействия, которым на полевой зависимости скорости ДГ соответствуют определенные интервалы постоянных скоростей. Ранее такие зависимости исследовались на сверхзвуковых скоростях движения ДГ. В настоящей работе исследована динамика ДГ в ортоферрите иттрия на дозвуковых скоростях, впервые измерены амплитуды колебаний пластины, возбуждаемые границей, проведены расчеты, подтверждающие их соответствие изгибным волнам Лэмба.

Исследования возбуждаемых ДГ упругих колебаний проводились на пластинчатом образце ортоферрита иттрия толщиной 10^{-4} м, вырезан-

ном перпендикулярно оптической оси, с формой, близкой к прямоугольной, с поперечными размерами $(4 \div 6) \cdot 10^{-3}$ м. По методике, описанной в [1,4], в образце создавалась двухдоменная структура с одиночной прямолинейной ДГ. Переменным магнитным полем с помощью катушек Гельмгольца ДГ отклонялась от равновесного положения. Динамика ДГ исследовалась на основе магнитооптического эффекта Фарадея. Смещения ДГ регистрировались визуально, с помощью цифровой камеры или фотоэлектронного умножителя. Сигнал с фотоэлектронного умножителя записывался на запоминающем осциллографе TDS5054. По смещениям ДГ на разных частотах переменного поля и амплитудах прямоугольных биполярных импульсов определялись скорости движения. В полях до $5 \cdot 10^3$ А/м скорость ДГ достигала скорости поперечного звука.

Для исследования упругих колебаний, вызываемых движением ДГ, был применен интерферометрический метод [5]. Образец ортоферрита иттрия с движущейся ДГ помещался в одно из плеч интерферометра Майкельсона. Качество любой из поверхностей образца и коэффициент отражения позволяли получать интерференционную картину с контрастом не ниже 30%. Опорное зеркало интерферометра крепилось на пьезокерамике. Нестабильность частоты применяемого для формирования интерференционной картины гелий-неонового лазера мощностью 25 мВт компенсировалась предварительным выравниванием плеч интерферометра с точностью 10^{-4} м. Юстировкой интерферометра устанавливали наибольшее расстояние между нулевым (размером 10^{-2} м) и первым максимумами. Диаметр лазерного пучка на образце с движущейся ДГ составлял $5 \cdot 10^{-4}$ м. Регистрация выходного излучения, прошедшего через длительную пластину и отраженного от нее, осуществлялась двумя фотодиодами. Один из них фиксировал мощность излучения в направлении, перпендикулярном опорному зеркалу, а другой — мощность излучения в направлении, перпендикулярном образцу. С помощью пьезокерамического элемента сдвиг фазы между опорной и отраженной от образца волнами подбирался таким, чтобы изменение интенсивности в интерференционной картине в двух перпендикулярных направлениях было линейным и противоположным по знаку. Фотодиоды были включены по схеме дифференциального усиления. Это позволяло отделить сигнал, вызванный сдвигом фаз в интерференционной картине от помех, обусловленных нестабильностью мощности лазера. Сигнал с дифференциального усилителя подавался на один из каналов запоминающего осциллографа TDS5054 либо непосредственно, либо после

дополнительного усиления широкополосным усилителем. Наблюдаемые деформации поверхности образца на исследуемом участке определялись из: $U = \lambda \Delta i / (2\pi i)$, где λ — длина волны, i — ток фотодиода. Как показано в [5], порог чувствительности этого метода составляет $5 \cdot 10^{-10}$ м.

Исследование упругих колебаний проводилось на разных частотах продвигающего магнитного поля, амплитуда которого поддерживалась на одном уровне. При этом смещения ДГ от положения равновесия не выходили за диаметр лазерного пучка на образце, что способствовало наибольшему воздействию упругих колебаний на интерференционную картину. В этих условиях на частотах f , представленных в таблице, было обнаружено возникновение упругих колебаний, явно обусловленное движением ДГ. При уменьшении амплитуды продвигающего магнитного поля наблюдалось уменьшение амплитуды упругих колебаний.

Опыт	0.9	1–1.7	2.2–2.6	3–5	7–10	24–28	58	72
Расчет	0.9	1.3	2.5	4.2	8.3	25	56	70
n, p, q	27–31,1,1	15–25,1,1	9–13,1,1	5–7,1,1	3,1,1	1,1,1	1,1,2	1,2,1

На рис. 1 приведены осциллограммы (с усреднением за 100 проходов) амплитуд магнитного поля (биполярный прямоугольный сигнал) и упругих колебаний, вызванных движением ДГ на частотах 5.3 kHz (*a*) и 26.4 kHz (*b*). На всех наблюдаемых частотах до 10 kHz присутствует составляющая с частотой, изменяющейся в диапазоне 24–28 kHz и кратная наблюдаемой (рис. 1, *a*). Наибольшая деформация, вызванная движением ДГ, была зарегистрирована в этом диапазоне на частоте $f_R = 26.4$ kHz (рис. 1, *b*). Упругие колебания на этой частоте приобретают гармонический характер. Амплитуда деформаций на этой частоте составила $U = 7 \cdot 10^{-9}$ м. Оценка плотности энергии [7] $E = 2\rho(\pi f_R U)^2$ дает величину 0.004 J/m³. Здесь и далее для расчетов были использованы упругие константы ортоферрита иттрия из [3]. При исследовании на более высоких частотах (вплоть до 10 МГц) были обнаружены упругие деформации аналогичной природы на частотах 58 и 72 kHz.

При синусоидальном изменении частоты магнитного поля вблизи частот, приведенных в таблице, по осциллограммам исследовался также фазовый сдвиг между полем и упругим колебанием. В частотном диапазоне от 24.7 до 29 kHz наблюдалось изменение фазы в пределах π , как это показано на рис. 2.

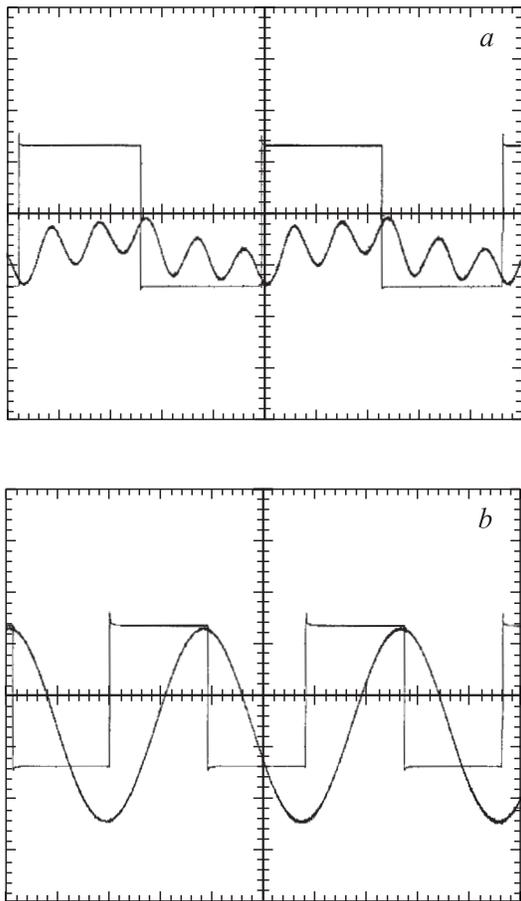


Рис. 1. Продвигающее поле и колебания пластины.

Диапазон обнаруженных резонансных частот для существующих геометрических и упругих параметров образца попадает в спектр, характерный для волн Лэмба [6]. Согласно [7], на основании уравнения деформаций U в платинах: $\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + A^2 \Delta^2 U = F \delta(x - x_0 \sin 2\pi ft)$, где A — константа, учитывающая упругие свойства материала, а F совпадает с

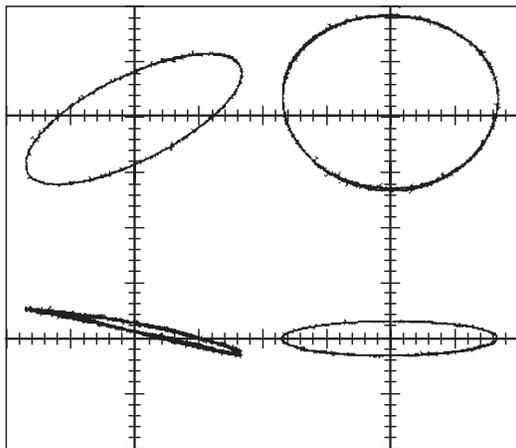


Рис. 2. Прохождение через резонанс.

магнитострикционной силой, обусловленной продвигающим полем, был рассчитан частотный спектр возможных колебаний. Для p -й гармоники:

$$U_p = F_0/2\pi \sum_{n=1}^{\infty} J_n(-pkx_0) \exp(2\pi inf t) / (-(2\pi n f)^2 + A^2(pk)^4),$$

где J_n — функция Бесселя 1-го рода. Граничные условия (оперты края [7]) определяют $k = \pi/a$, где a — поперечный размер пластинчатого образца вдоль направления движения ДГ, и частоты стоячих изгибных волн Лэмба $f_{pn} = A\pi p^2/2na^2$. Учет граничных условий вдоль направления, перпендикулярного движению ДГ, дает частоты: $f_{pqn} = A\pi[(p/a)^2 + (q/b)^2]/2n$. При этом за звуковые колебания отвечают ненулевые целые значения n , p и q . Полученные из этих соображений частоты упругих деформаций согласуются с определенным интерферометрическим методом. В таблице приведены расчетные значения частот изгибных волн Лэмба и номера n , p и q для $a = 0.45$, $b = 0.54$ в соответствии с размерами исследуемого образца. Помимо основной резонансной частоты $f_{1,1,1}$ экспериментально наблюдаются частоты $f_{1,2,1}$, $d_{1,1,2}$, а также некоторые субгармоники $f_{n,1,1}$ с нечетными номерами (свойство симметрии продвигающего поля запрещает четные гармоники).

Список литературы

- [1] *Bar'yakhtar V.G., Chetkin M.V., Ivanov V.A.* et al. // Springer Tracts in Modern Physics. 1994. V. 129. 179 p.
- [2] *Кузьменко А.П., Каминский А.В., Жуков Е.А.* и др. // ФТТ. 2001. Т. 43. В. 4. С. 666–672.
- [3] *Звездин А.К., Попков А.Ф.* // ФТТ. 1979. Т. 21 (5). С. 1334.
- [4] *Четкин М.В., Кузьменко А.П., Булгаков В.К.* // Изв. вузов. Физика. 2001. В. 6. С. 84–89.
- [5] *Бондаренко А.Н., Базылев П.В., Луговой В.А.* // Автометрия. 2002. В. 2. С. 101–107.
- [6] *Викторов В.А.* Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.
- [7] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 7. Теория упругости. М.: Наука, 1987. С. 248–258.