

ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ ЗВУКА В АНТИФЕРРОМАГНЕТИКЕ

А.Ю.Лебедев, В.И.Ожогин, А.Ю.Якубовский

Впервые для магнетиков наблюдался эффект параметрического возбуждения звука звуком. Пороговая амплитуда деформаций в волне накачки практически достижима для монокристаллического гематита — благодаря легко реализуемой в антиферромагнетиках большой величины эффективного ангармонизма упругой подсистемы.

Нелинейность низкочастотных магнитоупругих (МУ) волн в магнетиках удобно описывать в терминах эффективного ангармонизма упругой подсистемы [1]. Простейшие проявления этой нелинейности обнаруживаются сравнительно легко, особенно в антиферромагнетиках [2, 3]. Мы сообщаем о первом наблюдении более сложного нелинейного динамического МУ эффекта, теоретически рассмотренного в [1а], параметрического возбуждения звука звуком. Эффект этот представляет собой полный аналог вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) света в нелинейной оптике и состоит в том, что ультразвуковая волна с частотой ω_p и волновым вектором \mathbf{k}_p при достаточно большой амплитуде деформаций u_p (выше пороговой u_p^c) должна порождать две комбинационные квазиупругие волны (ω_1, \mathbf{k}_1) и (ω_2, \mathbf{k}_2) — таких, что

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_p \quad \text{и} \quad \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_p \quad (1a, b)$$

Первое наблюдение ВКР звука в немагнитных кристаллах выполнено недавно на парателлурите [4]. Эксперимент на магнетике принципиально интересен благодаря возможности влиять на МУ связь магнитным полем.

Измерения проведены при комнатной температуре на вырезанном из монокристаллического гематита (α -Fe₂O₃) образце длиной $L = 4$ мм вдоль оси C_3 и квадратного сечения со стороной $a = 2,5$ мм. Постоянное магнитное поле \mathbf{H} прикладывалось вдоль кристаллической оси U_2 , параллельной ребру a . Поперечно поляризованный звук ("накачка") с частотой $\omega_p / 2\pi \equiv f_p = 43$ МГц и поляризацией $\mathbf{e}_p \perp U_2$ возбуждался на одном из торцов образца и распространялся вдоль C_3 . Для создания режима бегущей волны на противоположном торце имелся акустический демпфер в виде медной пластинки толщиной 1 мм, связанной с образцом микронным слоем индия. Мощность отраженного от демпфера сигнала не превышала 1/4 мощности падающего. Прошедший через демпфер поперечный ($\mathbf{e} \parallel U_2$) звук принимался широкополосным акустическим преобразователем из ниобата лития и регистрировался анализатором спектра. Измерения проводились в режиме длинных ($\tau = 1$ мсек) импульсов. При достижении в волне накачки пороговой амплитуды деформаций $u_p^c = (8 \pm 4) \cdot 10^{-7}$ (для $H = 0,1 + 0,4$ кЭ) на экране анализатора одновременно возникали сигналы на частотах f_1 и f_2 , удовлетворяющих условию (1а), (см. рис.1), а также более слабые сигналы их высших гармоник. При превышении пороговой мощности на 3 дБ амплитуды сигналов с частотами f_1 и f_2 достигали $\sim 30\%$ от амплитуды волны накачки.

Зависимости f_2 и f_1 от H позволяют определить МУ модуль $B_{14} = (13,6 \pm 0,2) \cdot 10^6$ ЭрГ/см³ на порядок точнее, чем из статических измерений (см. ссылки в [1с]). При этом используется следующее из (1) соотношение (обозначения см. в [1с]):

$$f_2 = (1 - \sqrt{1 - \alpha}) f_p / 2, \text{ где } \alpha = 4 B_{14}^2 H_E^2 \gamma^2 / M_o C_{44} \omega_{f_0}^2. \quad (2)$$

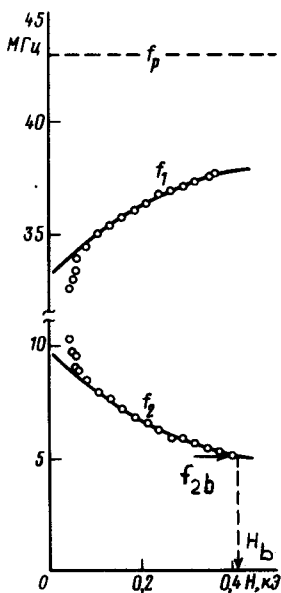


Рис.1.

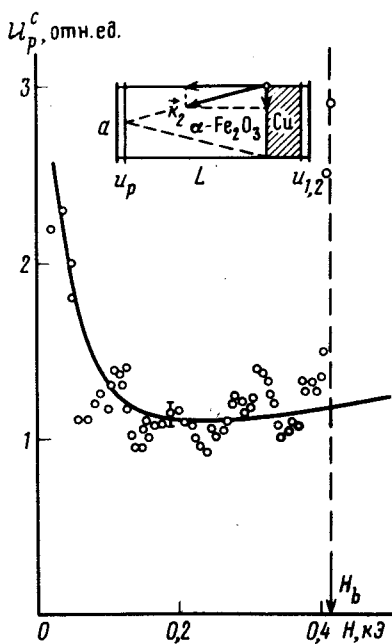


Рис.2.

Рис.1. Зависимости частот f_1 и f_2 параметрически возбуждаемого квазизвука от магнитного поля H . Погрешность измерения частоты $\pm 0,1$ МГц, поля ± 1 Э. Пунктиром показана частота накачки. Сплошные линии — расчет по формулам (2) и (1)

Рис.2. Зависимость пороговой амплитуды деформаций u_p^c от магнитного поля H . Сплошная линия — расчет по формуле (3). Вверху приведена схема, иллюстрирующая распространение в образце низкочастотной (f_2) комбинационной волны при $H = H_b$, когда эта волна просто "не попадает" на приемный преобразователь. В неограниченной среде k_1 и k_2 антипараллельны

В приближении более общем, чем в [1], а именно без использования упрощенного уравнения (6) из [1с], мы получили следующее выражение

для пороговой амплитуды деформаций u_p^c (затухание звука не учитывалось):

$$u_p^c \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_y}{\partial z} \right)_{\text{ампл}}^c = \frac{\pi M_0^2 C_{44}^{3/2} (1 - \kappa)^{3/2} (\omega_{f_0} / \gamma)^4}{4 \gamma \rho^{1/2} H H_E^2 B_{14}^2 B_{44} L}. \quad (3)$$

В области полей $0,1 \div 0,4$ кЭ формула (3) предсказывает слабую зависимость $u_p^c(H)$, что в целом согласуется с экспериментом (рис.2). Оценка дает значение $u_p^c(H = 0,2 \text{ кЭ})$ в пределах $(2 \div 5) \cdot 10^{-7}$, так как константа B_{44} известна с невысокой точностью. При учете затухания вычисленное значение u_p^c может увеличиться в несколько раз (см. [1с]), приближаясь к измеренному $(8 \pm 4) \cdot 10^{-7}$.

Указанная на рис.1, 2 верхняя граница H_b магнитных полей, в которых наблюдается эффект, обусловлена особенностями волноводного распространения звука в образце. Из-за конечности поперечных размеров образца волновой вектор звуковой волны имеет поперечную компоненту k_{\perp} , что наиболее существенно сказывается на распространении звука с низкой частотой f_2 . В нашем случае граничная частота $f_{2b} \approx v_{\text{ЗВ}} \cdot 2L/a^2$ составляет ~ 5 МГц в хорошем соответствии с экспериментом. Контрольные измерения в диапазоне частот $f_p = 37 \div 46$ МГц подтвердили, что наблюдаемая зависимость $H_b(f_p)$ согласуется с рассчитанной из этих предположений.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что в магнетике звуковая волна может параметрически возбуждать пару квазизвуковых волн, удовлетворяющих условиям (1) временного и пространственного синхронизма.

Авторы глубоко признательны И.К.Кикоину за интерес к этой работе и В.Д.Воронкову за предоставление монокристалла гематита.

Поступила в редакцию
22 мая 1981 г.

Литература

- [1] В.И.Ожогин, В.Л.Преображенский. а) Intern. Conf. Magn., Abstracts, 3С-9, Amsterdam, 1976; б) Physica 86-88В, 979, 1977; в) ЖЭТФ, 73, 988, 1977.
- [2] В.И.Ожогин, А.Ю.Лебедев, А.Ю.Якубовский. а) Письма в ЖЭТФ, 27, 333, 1978; б) "INTERMAG-81", Digests, №11 - 10, Grenoble, 1981.
- [3] В.Л.Преображенский, М.А.Савченко, М.А.Экономов. Письма в ЖЭТФ, 28, 93, 1978.
- [4] Л.Н.Ильченко, Ю.Л.Обозненко. ФТТ, 21, 1648, 1979.