

ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

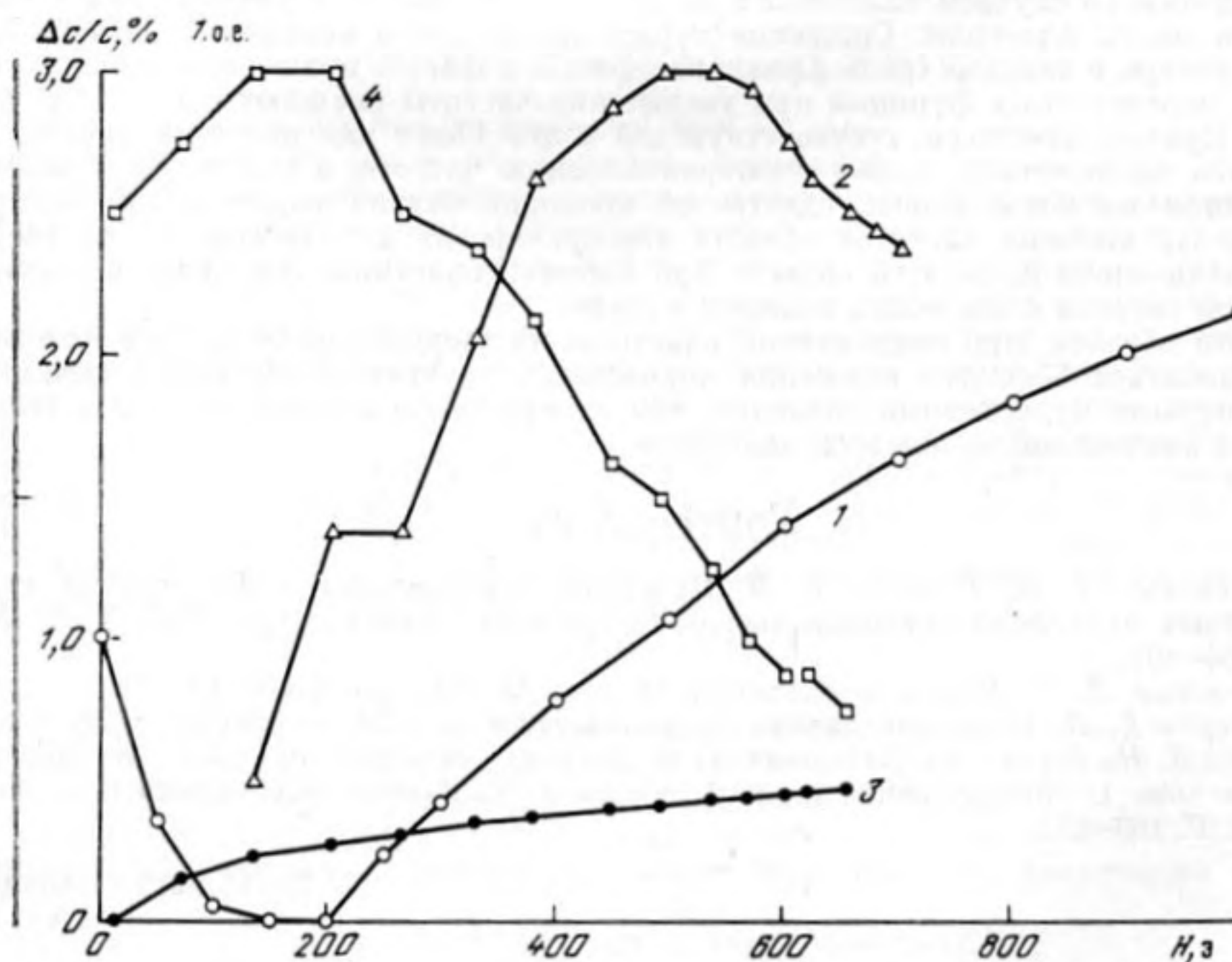
УДК 534.222.2

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОБРАЩЕНИЕ ФРОНТА
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В ФЕРРИТЕ

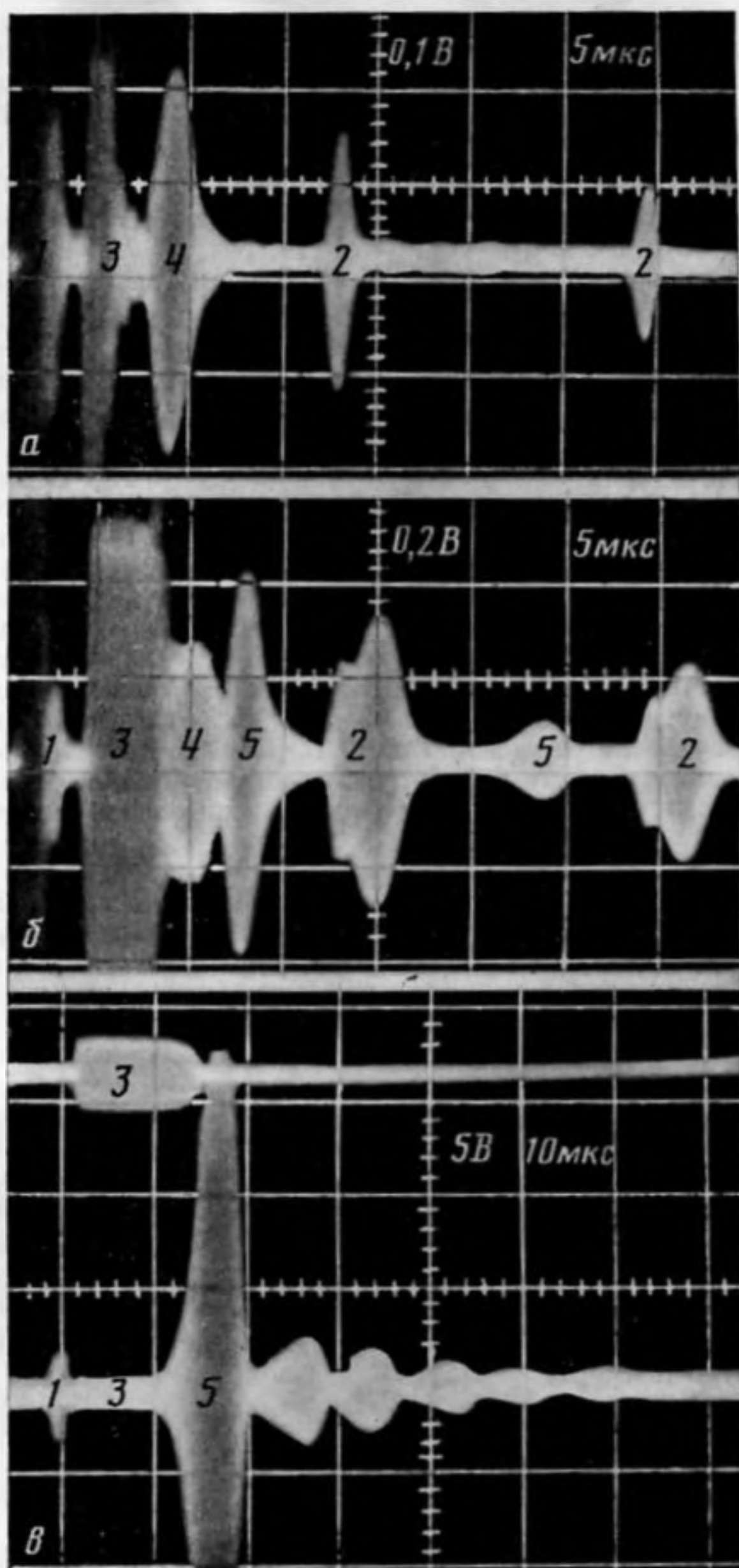
Брысев А. П., Бункин Ф. В., Власов Д. В., Крутянский Л. М.,
Преображенский В. Л., Стаховский А. Д.

Параметрическое усиление прямой и обратной звуковых волн в твердом теле впервые наблюдалось в пьезоэлектрике LiNbO_3 [1]. Факт обращения волнового фронта (ОВФ) звука в подобных [1] условиях был позднее продемонстрирован в работе [2]. Эффект параметрического ОВФ звука был в разное время реализован также в ряде пьезоэлектрических веществ для различных типов акустических волн (поверхностных и объемных, см. [3]). Возможность управления скоростью звука с помощью внешнего магнитного поля позволяет реализовать параметрическое ОВФ и в магнитных диэлектриках. Благодаря сравнительно невысокому затуханию и относительно высокой чувствительности модулей упругости ряда магнетиков к изменению магнитного поля ОВФ в них может сопровождаться заметным усилением акустической волны. Такой эффект наблюдался в антиферромагнитном кристалле $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ в работе [4]. Возможность достижения значительной глубины модуляции скорости звука в этом веществе вплоть до порога параметрической неустойчивости упругих волн была продемонстрирована в работе [5]. Ряд параметрических ультразвуковых эффектов, в частности параметрическая генерация звука переменным полем [6] и магнитоакустическое эхо [7], наблюдались и в ферритах.

В настоящей работе сообщается о результатах экспериментального наблюдения усиления ультразвука при ОВФ в поликристаллическом магнитострикционном феррите на основе NiFe_2O_4 .



Фиг. 1. Зависимость относительного изменения скорости звука (1, 3) и коэффициентов усиления $K_a^{обп}$ обратной волны (2, 4) от напряженности постоянного магнитного поля: 1, 2 – сдвиговая, 3, 4 – продольная волны, $K_a^{обп} \sim U_{о.в}/U_{вх}$, где $U_{о.в}$ – амплитуда напряжения импульса ОВФ, $U_{вх}$ – амплитуда входного импульса



Фиг. 2. Осциллограммы эхосигналов: 1 – входной импульс, 2 – отражения от торцов образца, 3 – импульс накачки, 4 – импульс ОВФ, 5 – аномальный эхоимпульс

В образце феррита с размерами $3,5 \times 7 \times 30$ мм³ с помощью пьезопреобразователя, приклеенного к торцу, возбуждалась сдвиговая ультразвуковая волна с частотой $f=28$ МГц и направлением распространения, параллельным длинной стороне образца. Параллельно этому направлению ориентировались постоянное подмагничивающее поле H и переменное магнитное поле накачки h . Последнее создавалось катушкой индуктивности, намотанной на среднюю часть образца (длина катушки $l=5$ мм). Прием эхосигналов осуществлялся тем же преобразователем, который использовался в качестве излучателя.

Полевая зависимость скорости сдвиговой волны в феррите, измеренная фазоимпульсным методом, приведена на фиг. 1. При подаче на катушку импульсного сигнала накачки частотой $2f$, задержанного на время, необходимое для прохождения звуком расстояния от излучателя до катушки, наблюдался обращенный эхосигнал (фиг. 2, а). Время прихода этого эхосигнала соответствовало временному интервалу τ между моментом излучения импульса звука и моментом включения импульса накачки. Форма обращенного сигнала соответствовала функции свертки огибающих импульсов звука и накачки. Удавалось также осуществить ОВФ на временах, превосходящих время пробега звука по образцу после нескольких отражений исходной волны от торцов. В экспериментах отчетливо наблюдался связанный с обращением

волнового фронта эффект обращения времени: передний фронт исходного сигнала становился задним фронтом эхоимпульса, а задний — передним, что легко идентифицировать при изменении длительности исходного сигнала. Зависимость коэффициента усиления обращенного сигнала от напряженности подмагничивающего поля H приведена на фиг. 1. Его максимальное значение (с учетом потерь на двойное электроакустическое преобразование ~ 35 дБ) составила $K_a^{обр} \approx 2$, при этом амплитуда напряжения на катушке была равна $U=2$ кВ, что соответствовало амплитуде поля $h \approx 50$ Э. Наличие ненулевого эффекта в области, где $\partial c_a / \partial H = 0$, может быть связано с неоднородностью реального внутреннего поля, обусловленной размагничивающим фактором образца неэллиптической формы.

Одновременно с усилением обращенной волны наблюдалось усиление прямой волны с максимальным коэффициентом усиления $K_a^{пр} \approx 2$. При увеличении длительности накачки свыше 20 мкс наблюдался пороговый процесс параметрической генерации звука.

При длительности накачки более 3 мкс непосредственно за первым ОВФ-сигналом наблюдался второй эхоимпульс (фиг. 2, в), амплитуда которого при увеличении длительности импульса накачки резко нарастала до «гигантских» значений (соответствующая интенсивность звука ~ 800 Вт/см²). При этом звуковые волны оказывали заметное обратное влияние на импульс магнитной накачки, существенно уменьшая его амплитуду (фиг. 2, с). «Коэффициент усиления», соответствующий данному эхо-сигналу, аномально высок. В области малых амплитуд входного звукового импульса он превосходит величину $K_e=320$ на электрической стороне, что соответствует усилению звука по амплитуде $K_a=2 \cdot 10^4$ (или 86 дБ). Максимальная выходная амплитуда сигнала на нагрузке $R=50$ Ом достигала 18 В. По времени задержки аномальный эхоимпульс не связан с какими-либо отражениями от торцов образца. Специальные эксперименты показали, что второй аномальный эхоимпульс имеет фазовый фронт, сопряженный исходному.

Эксперименты, аналогичные описанным, были проведены и для продольных волн. На фиг. 1 представлены зависимости скорости продольных волн и коэффициента усиления обращенной волны от постоянного подмагничивающего поля. Так же, как и для сдвиговых волн, при увеличении длительности накачки свыше некоторого значения наблюдалось появление аномального эхоимпульса значительной амплитуды (3 В на 50 Ом). Однако длительность накачки, необходимая для достижения аномальным эхоимпульсом своей максимальной амплитуды, оказывается примерно вдвое большей, чем для сдвиговых волн.

Таким образом, приведенные результаты показывают, что поликристаллический феррит на основе $NiFe_2O_4$ представляет собой весьма перспективный материал для целей ОВФ как поперечных, так и продольных ультразвуковых волн.

Авторы признательны Е. Д. Власову и Н. Н. Рыжову за помощь в подготовке экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thompson R. B., Quate C. F. Nonlinear interaction of microwave electric fields and sound in $LiNbO_3$ // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. P. 907–919.
2. Брысев А. П., Бункин Ф. В., Власов Д. В., Кравцов Ю. А. ПОФУЗ — параметрический обращающий фазу усилитель звука // Исследования по гидрофизике // Тр. ФИАН. Т. 156. М.: Наука, 1984. С. 19–30.
3. Fossheim K., Holt R. M. Two-Pulse phonon Echoes in Solid — State // Acoustics. 1982. V. 16. P. 217–294.
4. Красильников В. А., Маматова Т. А., Прокошев В. Г. Параметрическое усиление при обращении волнового фронта магнитоупругой волны в гематите // ФТТ. 1986. Т. 28. В. 2. С. 615–617.
5. Ожогин В. И., Преображенский В. Л. Эффективный ангармонизм упругой подсистемы антиферромагнетиков // ЖЭТФ. 1977. Т. 73. В. 39. С. 988–1000.
6. Comstock R. L., Le Crow R. C. Instability of elastic waves by time varying elastic moduli in ferromagnets // Phys. Rev. Letters. 1963. V. 10. № 6. P. 219–220.
7. Kupca S., Scerle C. W. Magnetomechanically excited echoes in ferrites // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. № 10. P. 4612–4613.

Московский институт
радиоэлектроники и автоматики

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
14.VI.1988