

© 1992

НЕМАГНИТНЫЕ ПОТЕРИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗО-ИТТРИЕВОМ ГРАНАТЕ И НИКЕЛЬ-КОБАЛЬТОВОЙ ШПИНЕЛИ

Г. Д. Мансфельд, М. К. Родионова, А. Д. Фрейк

На основе разработанной резонаторной методики, позволяющей измерять поглощение до 100 дБ/см в широком частотном диапазоне для железо-иттриевого граната и никель-кобальтовой шпинели в полосе частот 20—400 МГц, изучены зависимости немагнитных потерь акустических волн от пористости материалов. Полученные данные доказывают, что немагнитные потери определяются рэлеевским рассеянием на порах.

В последнее время существенно возрос интерес к поликристаллическим магнитным материалам, который объясняется обнаружением в таких материалах интересных для использования в электронике эффектов свертки, долговременной памяти и параметрического усиления [1—4], а также появлением магнитных поликристаллов с малыми потерями [5]. В этой связи становится актуальным вопрос о выяснении природы потерь на распространение акустических волн (АВ) в поликристаллических ферритах.

В работе [6] было показано предположение о том, что немагнитное поглощение АВ в поликристаллических ферритах связано с рэлеевским рассеянием на порах. Однако в этих опытах измерения проводились для материалов с одинаковой пористостью, а рэлеевский характер частотной зависимости (зависимость f^4) только начинал проявляться, так как измерения проводились лишь в узком диапазоне частот (40—70 МГц) вблизи частотной области, где еще доминировали дифракционные потери. Поэтому для строгого доказательства высказанного предположения было необходимо измерить немагнитное поглощение АВ в материалах с различной концентрацией и размерами пор и в существенно более широком частотном диапазоне. Этому и посвящена настоящая работа.

1. Методика эксперимента

Измерения проводились на образцах из поликристаллических алюмозамещенного железо-иттриевого граната (ЖИГ) и никель-кобальтовой шпинели. Для этих материалов средний размер зерен составлял 3 мкм. Для ЖИГ средний размер пор измерялся в пределах $d = 0.8 \div 1.3$ мкм, а пористость (относительный объем пор) $\delta = 0.6 \div 2.0\%$, для никель-кобальтового феррита размер пор и пористость варьировались в пределах $d = 1.1 \div 2.5$ мкм, $\delta = 0.6 \div 5\%$.

Размеры пор и зерен в образцах исследовавшихся ферритов оценивались с использованием шлифов (во втором случае и их травления) по стандартной методике с последующей статистической обработкой данных. Концентрация пор оценивалась из данных измерений плотности керамики.

Для исключения магнитной составляющей потерь образцы, как и в [6], помещались в магнитное поле, существенно превышающее поле насыщения.

Для измерения потерь использовались две различные методики: хорошо известный эхо-метод и оригинальная методика, заключающаяся в том, что на

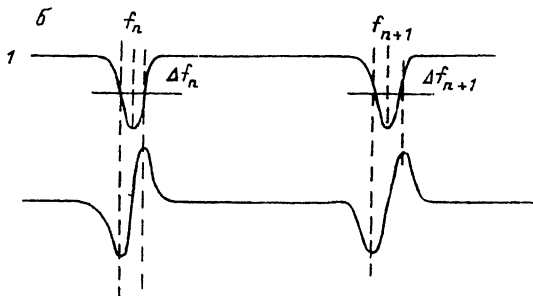
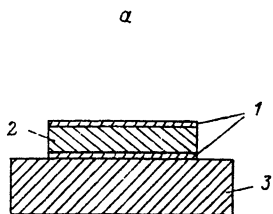


Рис. 1. Составной акустический резонатор.

a — структура акустического резонатора. 1 — алюминиевые пленки, 2 — пленки ZnO, 3 — ферритовая пластинка; *b* — амплитудная и фазовая характеристики вблизи резонанса.

основе тонкой пластины феррита с плоскопараллельными гранями изготавливался составной акустический резонатор. Для этого на ее поверхность наносился тонкопленочный преобразователь из ZnO с напыленными электродами из Al.

Ограниченность применимости стандартного эхо-метода для наших целей состояла в том, что из-за относительно небольшого динамического диапазона с его помощью можно было надежно проводить измерения потерь не более чем 20 дБ/см даже при использовании тонких образцов (~2 мм) и коротких радиоимпульсов (0.2—0.5 мкс). На высоких же частотах (>100 МГц), где ожидаемое поглощение должно расти как f^4 (f — частота звука), этого было недостаточно.

При резонаторном методе измерения исследуемые образцы представляли собой тонкие ферритовые пластины толщиной $b = 100 \div 400$ мкм, оптически отполированные с обеих сторон по 14 классу с параллельностью плоскостей $8''$. На одну из отполированных плоскостей поверх слоя алюминия толщиной 1000 Å (нижний электрод) наносился пленочный преобразователь из ZnO (с толщиной пленок от 5 до 20 мкм в зависимости от частоты; рис. 1, *a*). Затем наносился верхний электрод. Electroдами служили напыленные на феррит и поверх пленки слой алюминия толщиной 1000 Å. Образец включался в электрическую цепь в качестве нагрузки радиочастотного измерителя комплексного коэффициента отражения, на экране которого в полосе частот порядка сотен мегагерц наблюдались резонансные пики, соответствовавшие резонансам многочастотного составного резонатора слой феррита—пленка ZnO, отстоящие друг от друга приблизительно на частоту основного резонанса. Зная ширину каждого резонансного пика, а она особенно надежно измерялась по фазово-частотной характеристике как частотный интервал Δf_n между экстремумами, соответствующими выбранному резонансному пику f_n (рис. 1, *b*), можно было определить коэффициент поглощения на частоте резонанса по формуле

$$\alpha = 8.68 \frac{\pi \Delta f}{v_s} \text{ дБ/см.} \quad (1)$$

Таким образом, измеряя ширину резонансных пиков, можно было в широком диапазоне частот измерять α . Как показали анализ и численные расчеты, приведенная формула верна при $kb \gg 1$ и $ab \ll 1$, где k — волновой вектор OAB, b — толщина пластины. Резонаторный метод позволил проводить измерения в ферритовых образцах на частотах до 400 МГц. Заметим, что ранее звук столь высокой частоты в поликристаллах ЖИГ и Ni—Co шпинели вообще не наблюдался. По результатам измерения частотных интервалов между пиками модуля

коэффициента отражения можно легко найти скорость звука (для точных измерений при этом необходимо исходить из решения дисперсионного уравнения для многочастотного составного резонатора).

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2, 3 приведены экспериментальные частотные зависимости немагнитных потерь для продольных АВ, полученных соответственно с помощью эхо-методики и методом составного резонатора. Параметры образцов (№ 1—6), для которых измерены экспериментальные точки, указаны в таблице.

Параметры исследуемых материалов

Номер образца	Материал	Размер пор d , мм	Концентрация пор n , 10^{10} см $^{-3}$
1	Ni—Со-феррит	1.24	8.2
2	Ni—Со-феррит	2.5	1.27
3	Ni—Со-феррит	1.12	8.1
4	Ni—Со-феррит	1.72	5.1
5	ЖИГ	1.23	2.1
6	ЖИГ	1.22	8.3

Видно, что с ростом частоты коэффициент затухания вначале уменьшается, достигает минимума и далее растет по закону $\alpha \sim f^4$.

Увеличение коэффициента поглощения в области низких частот, по-видимому, связано с дифракционными потерями. Штриховые кривые в области низких частот на рис. 2, 3 — это оценка дифракционных потерь, выполненная в соответствии с [7].

Как видно, экспериментальные точки на низких частотах удовлетворительно согласуются с расчетными дифракционными потерями. Прямые сплошные линии на высоких частотах — это ожидаемые (рис. 2) и реально наблюдаемые (рис. 3) в области высоких частот зависимости вида $\alpha \sim f^4$, характерные для рэлеевского механизма рассеяния [8—10].

Согласно теории рассеяния АВ на порах [8, 9], коэффициент поглощения продольных волн определяется соотношением

$$\alpha_l = \frac{4\pi}{9} g_l a^2 (k_l a)^4 n, \quad (2)$$

где k_l и k_t — модули волновых векторов продольной и поперечной АВ, n — концентрация пор, a — средний радиус пор,

$$g_l = \frac{4}{3} + 40 \frac{2 + k_t/k_l}{4 - 9(k_t/k_l)^2} - \frac{3}{2} \left(\frac{k_t}{k_l}\right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{k_t}{k_l}\right)^3 + \frac{9}{16} \left(\frac{k_t}{k_l}\right)^4.$$

Расчитанные по формуле (2) зависимости потерь в каждом из образцов от частоты приведены на рис. 2, 3 сплошными линиями, цифрами обозначен номер образца. Как видно, в области высоких частот расчетные значения и экспериментальные данные для обеих методик в пределах погрешности эксперимента совпадают. Для образцов № 5 и 6 из ЖИГа концентрации пор различаются в 4 раза, при этом размеры пор одинаковы. Экспериментальные значения коэффициентов поглощения за вычетом дифракционных потерь (рис. 2) также отличаются примерно в 4 раза. Таким образом, видно, что величина затухания хорошо коррелирует с концентрацией пор.

Для Ni—Со образцов № 1, 3 (рис. 2) концентрации пор одинаковы, а их средний размер отличается в 1.2 раза, шестая степень отношения размеров пор равна 2.98. Измеренные значения коэффициентов поглощения с учетом поправки на

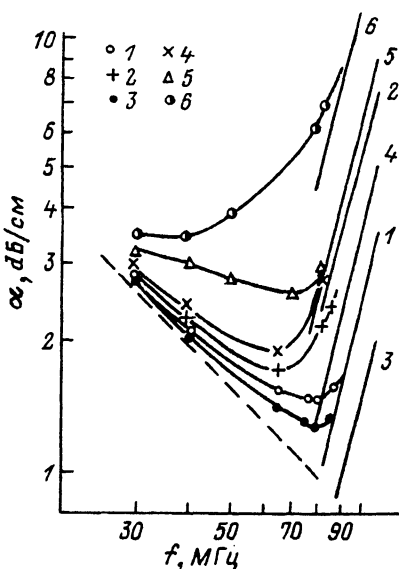


Рис. 2. Частотная зависимость поглощения продольных волн в (1—4) и ЖИГ (5, 6) в ферритах с разными размерами пор и концентрациями. d (мкм), n (см^{-3}): 1—1,24, $8,2 \cdot 10^{10}$; 2—2,5, $1,27 \cdot 10^{10}$; 3—1,2, $8,1 \cdot 10^{10}$; 4—1,52, $5,1 \cdot 10^{10}$; 5—1,23, $2,1 \cdot 10^{10}$; 6—1,22, $8,3 \cdot 10^{10}$. Данные получены эхо-методом. Точки — экспериментальные значения, прямые линии — теоретические кривые для рэлеевского рассеяния, штрихи — расчетные дифракционные потери.

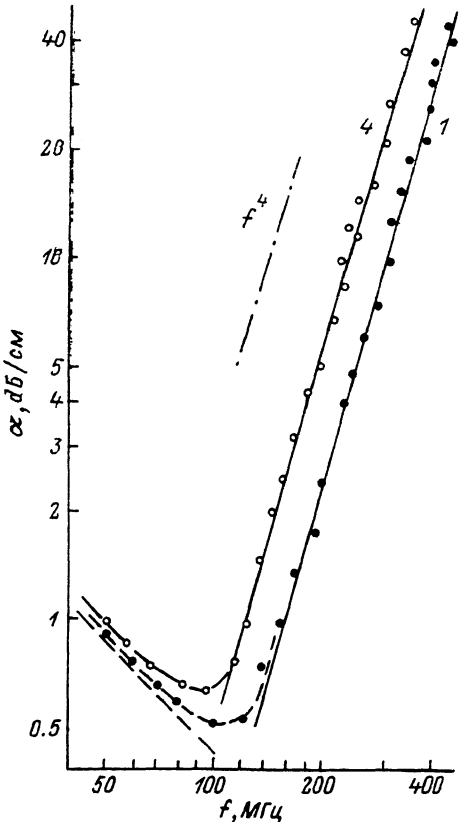


Рис. 3. Частотная зависимость поглощения продольных волн в Ni—Со в ферритах с разными размерами пор и концентрациями. d (мкм), n (см^{-3}): 1—1,24, $8,2 \cdot 10^{10}$; 4—1,72, $5,1 \cdot 10^{10}$. Данные получены резонаторным методом. Штрихи — дифракционные потери.

дифракционные потери отличаются примерно в 3 раза. Согласно теории затухания акустических волн в пористой среде (формула (2)), коэффициент поглощения α пропорционален na^6 . Как видно, это соотношение хорошо описывает полученные результаты. Данные для образцов никель-кобальтовой шпинели № 2 и 4 (рис. 2) также хорошо описываются этим соотношением. Они имеют отношение концентраций 0,25, а шестая степень отношения радиусов 1,67 равна 21,4, произведение отношений na^6 равно 5,4. Как видно, экспериментальные значения отличаются также примерно в 5 раз.

Также хорошо коррелируют с теорией экспериментальные результаты, представленные на рис. 3. Для данных, полученных на частоте 200 МГц, где уже хорошо выполняется закон f^4 , отношение вычисленных значений na^6 для образцов № 1 и 4 равно 2,38, а измеренные значения отличаются в 2,4 раза.

Оценки рассеяния АВ на зернах, которое также должно носить рэлеевский характер и иметь частотную зависимость f^4 [11, 12] как для ЖИГ, так и для Ni—Со шпинели, дали значения на два порядка меньше, чем на порах.

Расчет для ахизеровского механизма поглощения на тепловых фононах (включая термоупругую компоненту для продольных волн) дает квадратичную частотную зависимость и значения, существенно меньшие наблюдаемых экспериментально [10].

Итак, в настоящей работе измерены немагнитные потери в поликристаллическом ЖИГ и Ni—Co шпинели с существенно различающейся пористостью в диапазоне частот 20—400 МГц.

На высоких частотах полученные данные в пределах погрешности эксперимента и удовлетворительно согласуются с расчетными кривыми для рэлеевского рассеяния на порах. Можно поэтому ожидать, что путем уменьшения размеров и концентрации пор удастся создать материал с малыми акустическими потерями, пригодный для СВЧ диапазона.

Авторы выражают признательность С. Г. Абаренковой, И. Н. Андреевой, М. А. Харинской и А. А. Обухову за предоставление образцов с необходимыми параметрами и И. М. Котелянскому за изготовление преобразователей из ZnO.

Список литературы

- [1] Бондаренко В. С., Бочков Б. Г., Громашевский В. Л., Соболев Б. В. Нелинейные акусто-электронные устройства и их применение. М.: Радио и связь, 1985. 160 с.
- [2] Мануйлов М. В., Бондаренко В. С., Криночкин В. В., Соболев Б. В. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. № 10. С. 599—602.
- [3] Kabychenkov A. F., Mansfeld G. D., Manuilov M. V., Rubtsov A. A., Shavrov V. G. // Proc. Int. Conf. INTERMAC. 1989. P. 28—31.
- [4] Брысев А. П., Бункин Ф. В., Власов Д. В., Крутянский Л. М., Преображенский В. Л., Стаховский А. Д. // Акуст. журн. 1988. Т. 34. В. 6. С. 1120—1122.
- [5] Поваренко А. Д., Бондаренко В. С. и др. // Электронная техника. Материалы. 1983. № 6. С. 7—11.
- [6] Кабыченков А. Ф., Мансфельд Г. Д., Нагирняк В. Н., Рубцов А. А. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 3. С. 675—780.
- [7] Papadakis E. P. // J. Acoust. Soc. Am. 1966. V. 4a. N 4. P. 863—876.
- [8] Einspruch N. G., Witterhalt E. D., Truell R. // J. Appl. Phys. 1960. V. 31. N 2. P. 806—821.
- [9] Ying C. F., Truell R. // J. Appl. Phys. 1956. V. 27. N 5. P. 1986—2006.
- [10] Труэл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 307 с.
- [11] Лифшиц И. М., Пархомовский Г. Д. // ЖЭТФ. 1950. Т. 20. № 2. С. 175—182.
- [12] Stanke F. E., Kino G. S. // J. of Acoust. Soc. Am. 1984. V. 75. N 3. P. 667.

Институт радиотехники и электроники РАН
Москва

Поступило в Редакцию
10 февраля 1992 г.