

## НАБЛЮДЕНИЕ БЫСТРЫХ МАГНИТОУПРУГИХ ВОЛН В ТОНКИХ ПЛАСТИНАХ И ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНКАХ ЖЕЛЕЗО-ИТТРИЕВОГО ГРАНАТА

Ю.В.Гуляев, П.Е.Зильберман, Г.Т.Казаков,  
В.Г.Сысоев, В.В.Тихонов, Ю.А.Филимонов,  
Б.П.Нам, А.С.Хе

В пластинах и пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ), насыщенных во внешнем магнитном поле  $H$ , впервые экспериментально обнаружена тонкая структура полос интерференции магнитостатической и обыкновенной электромагнитной волн, которая интерпретирована как следствие магнитоупругого резонанса при фазовых скоростях на порядок и более превосходящих скорости звука в неограниченном кристалле.

Исследовалось возбуждение и распространение прямых объемных магнитостатических волн – (ПОМСВ) в образцах ЖИГ. Образцы представляли собой плоскопараллельные оптически полированные пластины и эпитаксиальные пленки с типичными размерами соответственно:  $5,5 \times 4 \times 0,35 \text{ мм}^3$  и  $7 \times 4 \times 0,004 \text{ мм}^3$ , имеющие ширину линий ФМР  $\sim 19$ .

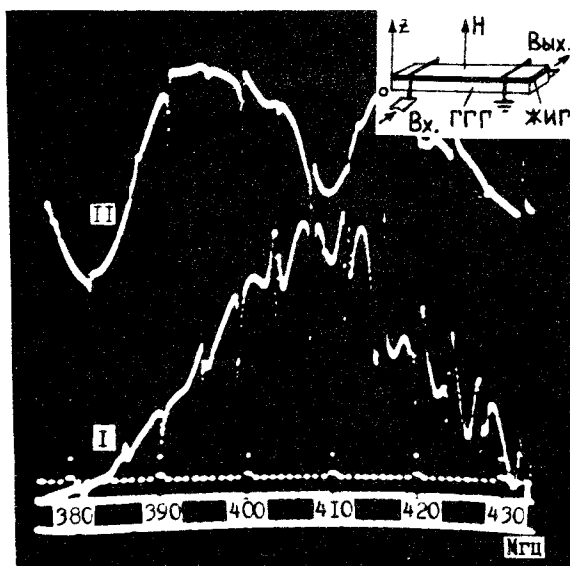


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики: I – сигнала на выходной антенне, II – сигнала, отраженного от входной антенны; по вертикали – амплитуда в произвольных единицах, по горизонтали – частота в МГц (таков же смысл кривых I и II на рис. 2 и рис. 3)

Пленки были на подложке из гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) [111] толщиной 430 мкм; ориентация пластин бралась различной и не влияла принципиально на результаты. Образцы помещались в нормальное к большим поверхностям и регулируемое по величине поле  $H$ . К поверхностям прикладывались проволочные антенны (медь, диаметр  $w \approx 70 \text{ мкм}$ ), одним концом заземленные, а другим через отрезок линии передачи, соединенные либо с СВЧ генератором, либо с СВЧ приемником (см. вставки к рис. 1 и рис. 2). Использовались генераторы качающейся частоты

ты в диапазонах 50 – 1250 МГц и 2 – 4 ГГц. Приемник представлял собой измеритель амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и позволял одновременно выводить на экран характеристики отраженного от образца и прошедшего через образец сигнала.

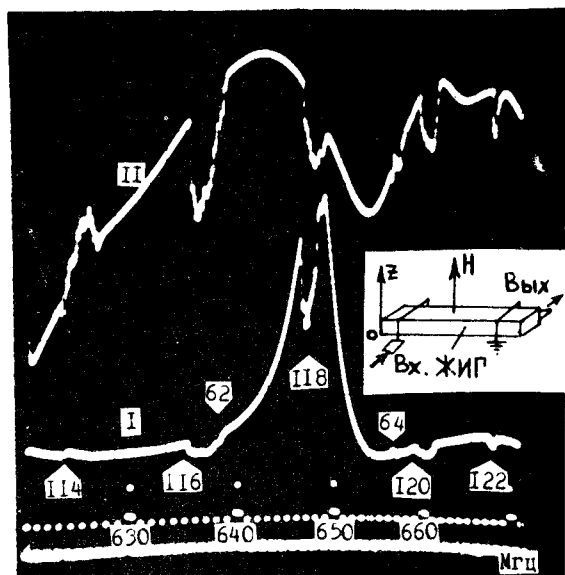


Рис. 2. Магнитоупругие резонансы ферритовой пластины — показаны номера продольных и поперечных упругих волн

При  $H = 0$  АЧХ прошедшего и отраженного сигналов состояла из серии гладких пиков — ширина каждого  $\sim 50 - 100$  МГц. Положение по частоте и высота этих пиков могли регулироваться изменением условий согласования образца с генератором и приемником. Такая АЧХ описывала прохождение в системе обыкновенных электромагнитных волн ("наводки"). При включении достаточно большого поля  $H$  ( $\gg 2$  кЭ для пленочного образца) в спектре отраженного сигнала наблюдался провал шириной  $\sim 200$  МГц, на фоне которого по-прежнему были видны пики наводки. По мере увеличения  $H$  провал перемещался в сторону больших частот. Положение провала при фиксированном  $H$  соответствовало диапазону существования ПОМСВ [1]. Это показывало, что сам провал возник из-за возбуждения таких волн и вызванного этим уменьшения отраженной от образца СВЧ мощности. При этом в спектре прошедшего сигнала внутри пиков наводки появились полосы интерференции между наводкой и задержанным по фазе сигналом ПОМСВ. Если теперь расширить масштаб по оси частот, оставив на экране только один из пиков наводки (см. рис. 1), то обнаруживается тонкая структура полос интерференции — узкие пики с шириной  $\sim 1 - 2$  МГц. Полосы интерференции наблюдались и ранее ([2] и др.). Однако о наблюдении их тонкой структуры до сих пор, по-видимому, нигде не сообщалось. Узкие пики обнаруживаются также и в отраженном сигнале (рис. 1), причем на тех же частотах, что и пики в прошедшем сигнале. По нашему мнению, наблю-

даемые узкие пики возникают вследствие магнитоупругого резонансного взаимодействия упругих волн Рэлея – Лэмба или Лява [3] с ПОМСВ. Такое резонансное взаимодействие ранее изучалось теоретически в работах [4, 5]. Однако, насколько нам известно, до сих пор оно не обнаруживалось в экспериментах.

Тот факт, что в нашем эксперименте наблюдается именно указанный резонанс, подтверждается совпадением частот узких пиков со значениями частот отсечки продольных ( $f_l$ ) и поперечных ( $f_t$ ) упругих волн [3]

$$f_l = \frac{v_{sl}}{4h} m, \quad f_t = \frac{v_{st}}{4h} n, \quad (1)$$

где  $v_{sl}$  и  $v_{st}$  – скорости продольного и поперечного звука,  $h$  – полутолщина упругого слоя, а  $m$  и  $n$  – номера типов волн. Убедимся в этом сначала на примере ферритовой пластины, которая имеет плоскость симметрии  $z = h$  (рис. 2). Согласно [5], симметрия приводит к правилам отбора ("сохранению четности") – волны с четным (нечетным) магнитным потенциалом взаимодействуют лишь с нечетными (четными) упругими волнами. В (1) упругой четной волне отвечают номера:  $m$  – нечетные,  $n$  – четные; нечетной волне:  $m$  – четные,  $n$  – нечетные [3].

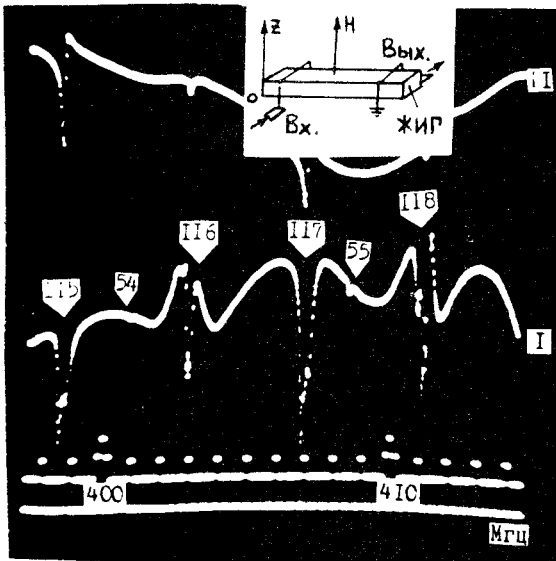


Рис. 3. Магнитоупругие резонансы тонкопленочной структуры

Исходя из этого, магнитоупругий резонанс должен наблюдаться при частотах, отстоящих друг от друга на  $\Delta f_l = v_{sl}/2h$  или  $\Delta f_t = v_{st}/2h$  ( $\Delta n = \Delta m = 2$ ). Подставляя сюда экспериментальные  $\Delta f_l \approx 21$  МГц и  $\Delta f_t \approx 10,8$  МГц, получаем  $v_{st} = (3,78 \pm 0,73) \cdot 10^5$  см/сек,  $v_{sl} = (7,36 \pm 0,73) \cdot 10^5$  см/сек, что согласуется с известными скоростями звука в ЖИГ (согласно [6],  $v_{sl} = 7,21 \cdot 10^5$  см/сек,  $v_{st} = 3,85 \cdot 10^5$  см/сек). Наоборот, пользуясь известными  $v_{sl}$  и  $v_{st}$  ([6], ошибка < 1%), вычислим по (1) номера  $m$  и  $n$ . Для пиков на рис. 2 получаем:  $m = 62,64$  и  $n = 114, 116, 118, 120, 122$ . Видно, что номера типов

волн идут через два, т. е. четность сохраняется, причем четная ПОМСВ взаимодействует с нечетной продольной упругой волной, а нечетная ПОМСВ — с четной поперечной волной. Для тонкопленочной структуры (рис. 3) плоскость симметрии отсутствует. Поэтому магнитоупругое взаимодействие должно идти без сохранения четности. Действительно, считая, что номера соседних пиков отличаются на единицу, получаем из (1)  $v_{sl} = (6,7 \pm 1,0) \cdot 10^5$  см/сек,  $v_{st} = (3,6 \pm 0,3) \times 10^5$  см/сек, что согласуется с известными скоростями звука в ГГГ (согласно [6],  $v_{sl} = 6,36 \cdot 10^5$  см/сек,  $v_{st} = 3,57 \cdot 10^5$  см/сек). Аналогичный предыдущему расчет номеров  $n$  и  $m$  дает результаты, показанные на рис. 3 — номера не обладают определенной четностью. Точность наших оценок  $v_{sl}$  и  $v_{st}$  ( $\sim 10\%$ ) ограничивается наблюдаемой шириной узких пиков, которая значительно ( $\sim$  в 30 раз) превышает оцененную из теории [5]. Наблюдаемая ширина объясняется неоднородностями  $h$ , которые в наших образцах  $\lesssim 1$  мкм. В соответствии с теорией [5]: 1) пики продольных волн имеют гораздо меньшую интенсивность, чем пики поперечных; 2) с ростом частоты пики не пропускания сигнала могут сменяться пиками пропускания — рис. 1. Капли спирта на поверхности пластины приводили к исчезновению пиков продольных волн и их появлению вновь по мере высыхания спирта. При увеличении  $H$ , когда частотный диапазон существования ПОМСВ смещается и выходит за пределы рассматриваемого пика наводки, одновременно исчезают полосы интерференции и звуковые пики, как это и должно быть для связанных магнитоупругих волн. Фазовая скорость  $v_{\Phi}$  таких волн близка к таковой для ПОМСВ [5]. Это позволяет оценить  $v_{\Phi}$  по картине интерференции на рис. 2 и рис. 3. Если  $f_1, q_1$  и  $f_2, q_2$  — частоты и волновые числа двух соседних интерференционных максимумов, а  $l$  — расстояние между антеннами, то из соотношения

$$\frac{2\pi}{l} = |q_2 - q_1| \approx \frac{2\pi |f_1 - f_2|}{|v_{\text{Гр}}|}, \quad (2)$$

получаем групповую скорость  $|v_{\text{Гр}}| \sim 10^7$  см/сек для пластины и  $|v_{\text{Гр}}| \sim 1,5 \cdot 10^6$  см/сек для пленки. Именно такое убывание  $|v_{\text{Гр}}|$  при уменьшении толщины (при переходе от пластины к пленке) характерно для безобменных ПОМСВ [1]. Безобменный характер ПОМСВ ясен и из способа возбуждения — антенна с диаметром провода  $w$  возбуждает лишь волны с  $q \lesssim \pi/w \sim 450$  см $^{-1}$ . Из законов дисперсии безобменных ПОМСВ [1] следует  $|v_{\Phi}| > |v_{\text{Гр}}|$ . Поэтому в наших опытах  $|v_{\Phi}|$  на порядок и более превосходит  $v_{sl}$  и  $v_{st}$ .

Таким образом, в насыщенных во внешнем магнитном поле слоях ЖИГ распространяются весьма быстрые безобменные магнитоупругие волны, для которых  $|v_{\Phi}| > |v_{\text{Гр}}| \gtrsim (10^6 - 10^7)$  см/сек  $\gg v_{sl}, v_{st}$ . Обнаружение таких волн расширяет представления о спектре возбуждений, существующих в упругом ферромагнетике, и демонстрирует новую возможность преобразования электромагнитной энергии в упругую.

Институт радиотехники  
и электроники  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
25 сентября 1981 г.

## Литература

- [1] *Daman R.W., Eshbach J.R.* J.Phys. Chem. Sol., 1961, 19, 308.
  - [2] *Collins J.H., Pizzarello F.A.*, J. Electronics, 1973, 34, 319.
  - [3] *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973, стр.44.
  - [4] *Mathews H., Van de Vaart H. v.* Appl. Phys. Lett., 1969, 15, 978.
  - [5] *Бугаев А.С., Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Филимонов Ю.А.* ФТТ, 1981, 23, 9,
  - [6] *Gamley R.E.* J. Appl. Phys., 1977, 48, 2857.
-