

05;10

Электромагнитное возбуждение ультразвуковых колебаний пленками железо-иттриевого граната на подложке галлий-гадолиниевого граната

© В.М. Сарнацкий, И.О. Мавлоназаров, Л.В. Луцев

Санкт-Петербургский государственный университет
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: sarnatsky42@mail.ru

Поступило в Редакцию 24 апреля 2014 г.

Приведены результаты исследований бесконтактного возбуждения ультразвуковых колебаний тонкими пленками железо-иттриевого граната на подложке галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) при приложении суперпозиции постоянно-го подмагничивающего и переменного внешних магнитных полей. Обнаружены не находящие объяснения в рамках существующих теоретических представлений размерно-резонансные эффекты в зависимостях амплитуды возбуждения продольных ультразвуковых колебаний от толщины пленки ГГГ, частоты ультразвука, степени однородности и величины напряженности подмагничивающего поля. Выдвинуто предположение об обусловленности явления резонансным участием в возбуждении ультразвука собственных колебаний доменных границ.

Система пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ) на подложке галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) широко применяется в радиоэлектронике и магнитооптике [1,2]. Вследствие высоких значений коэффициентов магнитоупругого взаимодействия и малого затухания ультразвука она является идеально согласованной системой для возбуждения и регистрации высокочастотных ультразвуковых колебаний. В данной работе проведены исследования эффективности электромагнитного возбуждения ультразвука на основе измерений амплитуды A ультразвуковых колебаний, генерируемых пленкой ЖИГ, помещенной в комбинацию переменного и постоянного магнитных полей. Данная методика предложена и подробно описана нами в работе [3]. При этом было обнаружено, что при параллельной ориентации приложенных полей эффективно возбуждается продольная волна, а при перпендикулярной

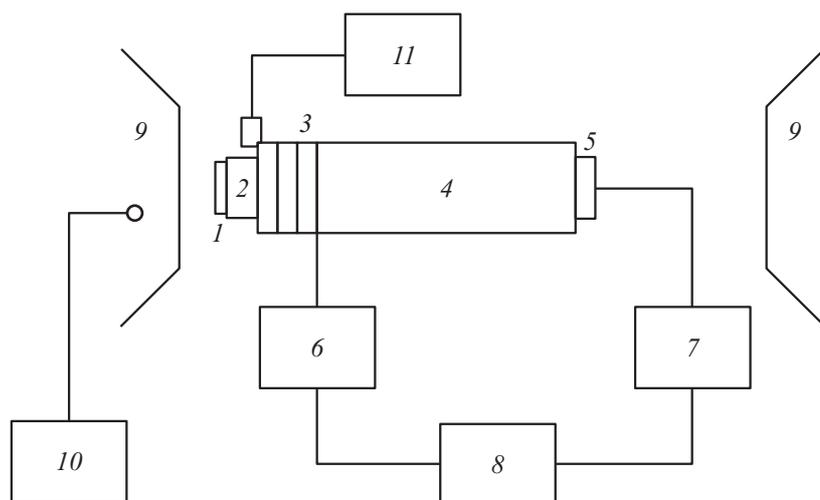


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

ориентации — сдвиговая, с вектором поляризации, совпадающим с направлением постоянного магнитного поля.

Исследования эффективности электромагнитного возбуждения продольных и сдвиговых ультразвуковых колебаний проводились на установке, блок-схема которой приведена на рис. 1. Обозначения на рис. 1: 1 — пленка ЖИГ, 2 — подложка ГГГ, 3 — катушка для создания импульса переменного поля, 4 — звукопровод, 5 — пьезопреобразователь, 6 — генератор радиоимпульсов, 7 — приемник, 8 — осциллограф, 9 — электромагнит, 10 — блок питания электромагнита, 11 — измеритель напряженности магнитного поля с холловским датчиком. Звукопровод выполнен в виде цилиндра диаметром 15 мм и длиной 30 мм с плоскопараллельными полированными торцами. Точность обработки торцов $0.2\ \mu\text{m}$. Назначение звукопровода — формирование звукового пучка и передача его на пьезопреобразователь. Исследования проводили при комнатной температуре на монокристаллических пленках ЖИГ толщиной 83, 64, 16, 10 и $4.5\ \mu\text{m}$ на подложке ГГГ толщиной $500\ \mu\text{m}$, плоскость которой перпендикулярна кристаллографическому направлению [111]. Пленка ЖИГ на подложке ГГГ выполнена в форме

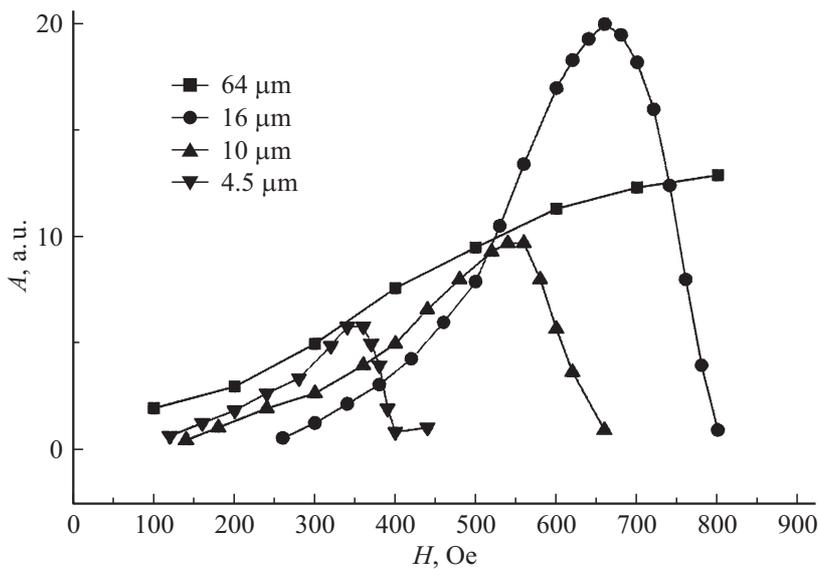


Рис. 2. Полевая зависимость амплитуды продольных ультразвуковых колебаний, возбуждаемых пленками ЖИГ разной толщины.

квадрата со сторонами 6×6 мм. Магнитное поле от 0 до 1200 Ое создавали с помощью электромагнита с полюсными наконечниками диаметром 120 мм в зазоре 50 мм. Ультразвуковые колебания соответствующей поляризации детектировались пьезоэлектрическими преобразователями на частоте 36 и 16 МГц.

Для толстых пленок толщиной 83 и $64 \mu\text{m}$ полевая зависимость величины A представляет собой монотонную кривую с достижением насыщения в поле 1200 Ое как для продольных, так и для сдвиговых колебаний. При этом для амплитуды сдвиговых колебаний в области малых полей (4–20 Ое) проявляются особенности осцилляционного характера, связанные, по-видимому, со сложной структурой внутреннего поля, определяемые одновременным вкладом нескольких факторов — поля анизотропии, формы пластины ГГГ с нанесенной пленкой ЖИГ, размагничивающего фактора и доменной структуры.

На рис. 2 приведены полевые зависимости амплитуды A для продольных ультразвуковых волн с частотой 36 МГц, возбуждаемых пленками

ЖИГ толщиной от 4.5 до 64 μm . Для тонких пленок до 16 μm отчетливо наблюдается квазирезонансная зависимость амплитуды колебаний от величины внешнего магнитного поля, приложенного параллельно переменному магнитному полю перпендикулярно плоскости пленки. Уменьшение толщины пленки с 16 до 4.5 μm приводит к значительному смещению в сторону малых полей значений магнитного поля, соответствующих максимуму амплитуды ультразвуковых колебаний — от 530 до 260 Ое. В то же время для толстой пленки (толщиной 64 μm) полевая зависимость $A(H)$ носит монотонный характер и близка к наблюдаемым ранее зависимостям в порошкообразных образцах ЖИГ [3]. Изменение частоты возбуждаемого ультразвука с 36 до 16 МГц приводит к пропорциональному сдвигу наблюдаемых максимумов в сторону меньших полей.

Подобная частотная зависимость и одинаковое значение фактора размагничивания для всех пленок в геометрии приложенных полей при возбуждении продольных ультразвуковых колебаний свидетельствуют о возможном проявлении в процессе возбуждения звука вынужденных колебаний доменных границ. Наиболее ярко размерно-резонансные эффекты проявляются при возбуждении продольных ультразвуковых колебаний тонкими пленками ЖИГ (от 4.5 до 16 μm) в неоднородном подмагничивающем поле.

На рис. 3 показаны полевые зависимости (по оси абсцисс отложена величина магнитного поля, приложенного перпендикулярно пленке ЖИГ) амплитуды продольных ультразвуковых колебаний с частотой 36 МГц, возбуждаемых пленкой толщиной 4.5 μm при дополнительном наложении магнитного поля, направленном касательно плоскости пленки. Для получения неоднородного магнитного поля пленка вместе с подложкой и звукопроводом перемещалась в направлении, перпендикулярном направлению поля подмагничивания на различные расстояния x от центра электромагнита. При таких перемещениях возникает составляющая магнитного поля, лежащая в плоскости пленки. Из рис. 3 видно, что величина магнитного поля, соответствующая максимуму амплитуды возбуждаемого ультразвука, смещается в сторону меньших полей при увеличении смещения образца и добротность „резонансной“ кривой увеличивается. Наиболее вероятным фактором, определяющим квазирезонансный характер полевой зависимости эффективности возбуждения ультразвука, является участие в процессе возбуждения вынужденных колебаний доменных границ. Этот эффект был предсказан в работе [4], наблюдался нами впервые [5] и подтверждается смещением максимума

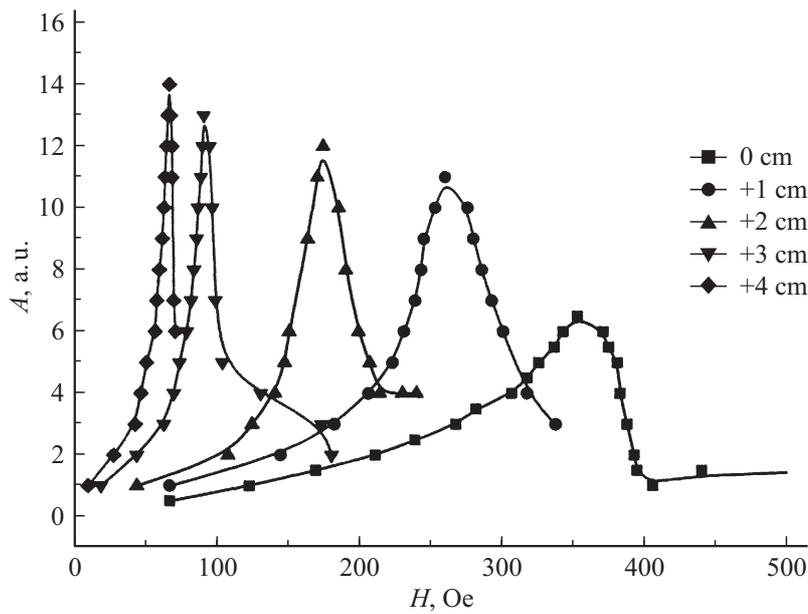


Рис. 3. Возбуждение продольных ультразвуковых волн пленкой ЖИГ толщиной $4.5\mu\text{m}$ в условиях неоднородного поля подмагничивания (кривые относятся к смещениям x образца от оси магнита на расстояния от 0 до 4 см).

квазирезонансных кривых в область меньших полей и увеличением их добротности при наложении на пленку дополнительного магнитного поля, лежащего в плоскости пленки.

В наших экспериментах по электромагнитному возбуждению ультразвуковых колебаний пленками ЖИГ постоянное магнитное поле модулируется переменным высокочастотным магнитным полем. Колебательная система доменных границ между полосовыми доменами может быть описана на основе модели Деринга [6] дифференциальным уравнением

$$m d^2 X / dt^2 + C dX / dt + DX = M(H_0 + h_1 \sin \omega t),$$

где X — смещение доменной границы, m и D — ее эффективная масса и квазиупругий коэффициент, C — коэффициент трения, h_1 и

ω — амплитуда и частота переменного магнитного поля, H_0 — напряженность внешнего магнитного поля, M — намагниченность единицы объема. При этом собственная резонансная частота колебаний границ доменов f_0 с учетом магнитных характеристик ЖИГ и приложенного магнитного поля составляет величину 25–75 Hz [6], что согласуется с частотой продольных колебаний, примененной в наших экспериментах. Амплитуда вынужденных продольных ультразвуковых колебаний, связанных с колебаниями доменных границ, определяется величиной коэффициента магнитоупругой связи B_1 , значением h_1 , степенью близости частоты переменного поля f к частоте f_0 и добротностью системы Q . При наложении магнитного поля с вектором напряженности в плоскости пленки ЖИГ происходит смещение максимума величины A в сторону меньших значений поля, приложенного перпендикулярно плоскости пленки, а уменьшение значений резонансного поля приводит к увеличению добротности колебательной системы вследствие увеличения подвижности доменных границ, что и наблюдается в наших экспериментах.

Доменная структура в пленках ЖИГ и ее динамика при наложении слабого магнитного поля в плоскости пленки изучалась нами на основе эффекта Фарадея с помощью поляризационного микроскопа ПОЛАМ Р-312. В исследованных образцах наряду с лабиринтной структурой наблюдалась регулярная полосовая доменная структура с шириной доменов (2–16 μm), которая зависит от толщины пленки и от магнитного поля, приложенного касательно плоскости пленки. Подобные закономерности при формировании доменной структуры в пленках ЖИГ были установлены в работе [7] при исследованиях распространения магнитостатических волн. Отметим, что в образцах пленок с лабиринтной структурой доменов нам не удалось возбудить ультразвуковые колебания.

Потери на двойное преобразование ультразвукового преобразователя на основе пленок ЖИГ на порядок больше по сравнению с широко используемыми на практике пьезоэлектрическими преобразователями, однако этот недостаток компенсируется следующими преимуществами: а) исследователь получает возможность изменять эффективность преобразования и поляризацию излучаемой ультразвуковой волны путем изменения величины и направления подмагничивающего поля; б) появляется возможность резонансного возбуждения колебаний доменных границ за счет приложения магнитного поля, касательного к плоскости пленки;

в) имеется возможность одновременно возбуждать продольные и сдвиговые ультразвуковые колебания и разделять их при детектировании путем изменения угла между направлениями переменной и постоянной составляющей магнитного поля.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность возбуждения продольных и сдвиговых ультразвуковых колебаний тонкими пленками ЖИГ на подложке ГГГ. Обнаружены размерно-резонансные эффекты в полевой и частотной зависимости эффективности возбуждаемого ультразвука. Показана обусловленность выявленных закономерностей участием в процессе возбуждения ультразвука вынужденных колебаний доменных границ.

Авторы благодарны сотрудникам ресурсного центра СПбГУ „Оптические и лазерные методы исследования вещества“ за предоставленную возможность изучения доменной структуры пленок ЖИГ.

Список литературы

- [1] *Зависляк И.В., Сохацкий В.П.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 4. С. 31–38.
- [2] *Тихонов В.В., Литвиненко А.Н., Никитов С.А., Сучков С.Г.* // Радиоэлектроника. 2013. Т. 58. В. 1. С. 83–90.
- [3] *Sarnatsky V.* // Sensors and actuators. A. 2004. V. 116. P. 173–180.
- [4] *Туров Е.А., Луговой А.А.* // ФММ. 1980. Т. 50. В. 5. 903–912.
- [5] *Сарнацкий В.М., Луцев Л.В.* // Сб. трудов конференции НМММ-21. Москва, 2009. С. 174–175.
- [6] *Гуревич А.Г.* // Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 591 с.
- [7] *Вашковский А.В., Локк Э.Г., Щеглов В.И.* // ЖЭТФ. 1997. Т. 111. В. 3. С. 1016–1030.