

Электромагнитное возбуждение продольных и сдвиговых ультразвуковых колебаний тонкими пленками железо-иттриевого граната

И. Е. Господчикова,* В. М. Сарнацкий†

*Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет,
кафедра физики твердого тела. Россия, 198504, Санкт-Петербург*
(Статья поступила 12.06.2013; подписана в печать 30.10.2013)

Работа посвящена исследованию бесконтактного возбуждения ультразвуковых колебаний тонкими пленками железо-иттриевого граната (ЖИГ) на подложке галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) при приложении суперпозиции постоянного подмагничивающего и переменного внешних магнитных полей.

Исследовано влияние на эффективность возбуждения ультразвука геометрических размеров пленки (толщины), интенсивностей и геометрии внешних магнитных полей.

В ходе работы наблюдались не находящие объяснения в рамках существующих теорий размерно-резонансные эффекты в зависимостях эффективности возбуждения ультразвука от параметров пленок ЖИГ и внешних магнитных полей. Было выдвинуто предположение об обусловленности явления участием в возбуждении ультразвука колебаний доменных границ.

PACS: 75.60.Ch

УДК: 534.143

Ключевые слова: ультразвуковые колебания, железо-иттриевый гранат, доменная структура.

ВВЕДЕНИЕ

Преобразователи ультразвуковых колебаний на основе явления магнитострикции находят широкое применение в различных областях науки и техники [1]. В значительной степени они используются при силовых воздействиях на вещество (режим кавитации, очистка изделий, мелкозернистая кристаллизация металлов, дробление и т. д.) с возбуждением продольных колебаний. Высокая проводимость широко известных ферромагнитных материалов (кобальт, никель и сплавы на их основе) ограничивает частотный диапазон их применения в качестве излучателей и приемников ультразвука частотами до 100 КГц из-за больших потерь на вихревые токи на более высоких частотах и из-за конструктивных особенностей.

В данной работе приводятся результаты исследования эффективности электромагнитного возбуждения ультразвука на основе измерений амплитуды A высокочастотных ультразвуковых колебаний, генерируемых пленкой ЖИГ, помещенной в комбинацию переменного и постоянного магнитных полей.

Методика возбуждения звука тонкими пленками и порошками магнитострикционных материалов подробно описана в работе [2]. При угле между направлениями полей равным 0° эффективно возбуждается продольная ультразвуковая волна, распространяющаяся вдоль оси звукопровода, на торце которого располагается пленка ЖИГ, а при 90° — сдвиговая с вектором поляризации, совпадающим с направлением постоянного магнитного поля.

Предпосылками к нашим исследованиям послужили

ли в первую очередь большие значения магнитоупругих постоянных ЖИГ, высокая добротность, малые магнитные потери (ширина линии ФМР ~ 1 Э) отсутствие потерь на токи Фуко в высокочастотной области, возможность выращивать пленки ЖИГ больших размеров со скоростью 1 мкм/мин и перспективы их практического применения.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

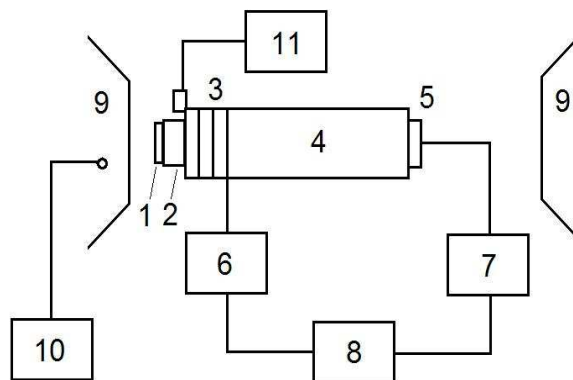


Рис. 1: Блок-схема экспериментальной установки

Эксперименты по исследованию эффективности электромагнитного возбуждения продольных и сдвиговых ультразвуковых колебаний проводились нами на установке, блок-схема которой приведена на рис. 1 (1 — пленка ЖИГ, 2 — подложка ГГГ, 3 — катушка для создания импульса переменного поля, 4 — звукопровод, 5 — пьезопреобразователь, 6 — генера-

*E-mail: irina_gospodchikova@mail.ru

†E-mail: sarnatsky42@mail.ru

тор 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 20–40 мм с плоскопараллельными полированными торцами. Точность обработки торцов 0.2 мкм. Назначение звукопровода — формирование звукового пучка и передача его в исследуемый объект. Кроме того, на звукопроводе вблизи пленки ЖИГ помещается катушка, содержащая несколько витков медной проволоки для возбуждения импульса переменного магнитного поля. При наших исследованиях образец помещается дополнительно в зазор электромагнита, в котором можно менять поле подмагничивания.

Оценка эффективности возбуждения ультразвуковых колебаний проводилась по величине амплитуды A первого акустического импульса, регистрируемого на противоположном торце звукопровода пьезоэлектрическими преобразователями соответствующего среза.

2. ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследований выбраны тонкие пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), выращенные методом жидкофазной эпитаксии с изотермическим погружением на подложке галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) [3]. Образцы для исследования получены в НИИ «Домен». Образцы имели форму квадрата со стороной $L = 6$ мм и толщиной d .

Плоскость пленки перпендикулярна направлению [111]. Толщина исследуемых пленок d удовлетворяла условию: $d \ll L$. При этом условии для всех пленок находящихся в постоянном магнитном поле, приложенном перпендикулярно плоскости пленки, фактор размагничивания имел одинаковое значение. Кроме чистых образцов исследовались примесные пленки ЖИГ с примесями Ga , In , Sc . Для исключения влияния размерных эффектов примесные образцы были одинаковой толщины 13 мкм. Толщина пластины ГГГ составляла 0.5 мм. Ультразвуковые колебания возбуждались на частотах 16 и 36 МГц. Исследования проводились при комнатной температуре в импульсном режиме. Длина продольной звуковой волны на частоте 36 МГц равна 200 мкм, сдвиговой — 108 мкм.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 для иллюстрации эффективности возбуждения сдвиговых ультразвуковых колебаний показана серия эхо-импульсов, распространяющихся в звукопроводе, при частоте возбуждения 36 МГц. На рис. 3 показаны полевые зависимости амплитуды A продольных ультразвуковых колебаний с частотой 36 МГц. Из рисунка видно, что для пленок толщиной

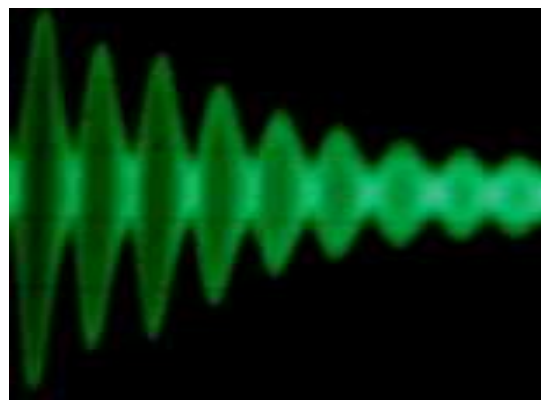


Рис. 2: Серия эхо-импульсов сдвиговых колебаний (толщина пленки ЖИГ равна 64 мкм в магнитном поле 800 Э. Длительность импульса 1 мкс

4.5–16 мкм отчетливо наблюдается квазирезонансная зависимость амплитуды колебаний от величины внешнего магнитного поля, приложенного параллельно переменному магнитному полю перпендикулярно плоскости пленки.

Уменьшение толщины пленки с 16 мкм до 4.5 мкм приводит к значительному смещению в сторону малых полей значений магнитного поля, соответствующих максимуму амплитуды ультразвуковых колебаний, от 530 Э до 350 Э. В то же время для толстой пленки (64 мкм) характер полевой зависимости носит монотонный характер с достижением насыщения в поле 1200 Э.

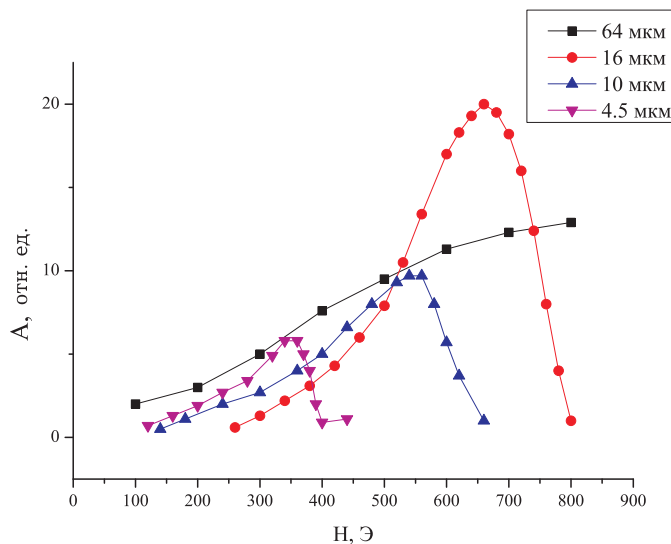


Рис. 3: Полевая зависимость эффективности возбуждения продольных ультразвуковых волн пленками ЖИГ разной толщины. Частота колебаний 36 МГц

На рис. 4 представлены зависимости значений напряженности магнитного поля, соответствующих мак-

симуму амплитуды продольных ультразвуковых колебаний, от толщины пленки ЖИГ для разных частот ультразвука. В связи с одинаковым значением фактора размагничивания для всех пленок наблюдаемые зависимости свидетельствуют о возможном вкладе вынужденных колебаний доменных границ в процесс возбуждения звука. Наиболее ярко размерно-резонансные эффекты проявились при возбуждении продольных ультразвуковых колебаний тонкими пленками ЖИГ (от 4.5 до 16 мкм) при помещении их в неоднородное магнитное поле.

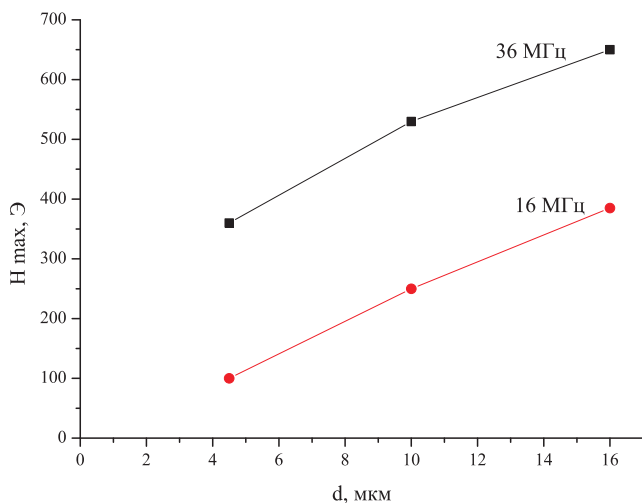


Рис. 4: Зависимость H_{\max} от толщины пленки ЖИГ для ультразвуковых продольных колебаний с частотами 36 и 16 МГц

На рис. 5 показаны полевые зависимости амплитуды продольных ультразвуковых колебаний с частотой 36 МГц, возбуждаемых пленкой толщиной 4.5 мкм при дополнительном наложении магнитного поля, направленном касательно плоскости пленки (за счет смещения образца относительно оси магнита). 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. На рис. 5 отчетливо обнаруживаются максимумы резонансного вида, при этом с увеличением расстояния X от 0 до 4 см максимумы смещаются в сторону меньших полей, величина максимума возрастает и добротность «резонансной» кривой увеличивается. Возможно, объяснение наблюдаемых эффектов связано с образованием в пленках ЖИГ полосовых доменов и вынужденными резонансными колебаниями доменных границ. Этот эффект был предсказан в теоретической работе [4] и наблюдался нами впервые.

Поскольку наблюдаемые аномалии в полевых зависимостях проявляются в слабых полях – далеких

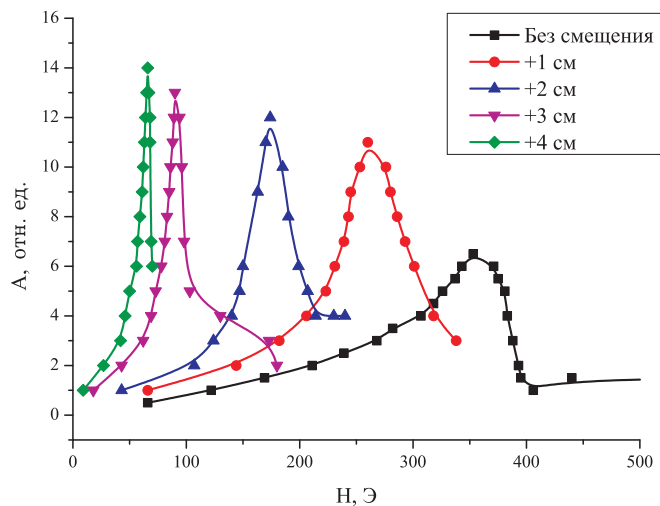


Рис. 5: Полевые зависимости амплитуды продольного ультразвука, для пленки толщиной 4.5 мкм. при наличии поля подмагничивания, лежащего в плоскости пленки

от поля насыщения (для беспримесных ЖИГ намагниченность насыщения равна 1750 Э), то для объяснения квазирезонансного поведения полевой зависимости наряду с магнитоупругим механизмом необходимо учесть и значительное влияние доменной структуры. Доменная структура формируется в ЖИГ как под действием поля подмагничивания, направленного перпендикулярно плоскости пленки, так и лежащего в плоскости пленки. Последнее было наглядно продемонстрировано в экспериментальной работе Вашковского А. В. и Локка Э. Г. [5]

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментах по электромагнитному возбуждению ультразвуковых колебаний 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:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Dx = M(H_0 + h_1 \cos(2\pi f_0 t)), \quad (1)$$

где x — смещение доменной границы, m и D — ее эффективная масса и квазиупругий коэффициент, C — коэффициент трения, h_1 — амплитуда переменного магнитного поля, d — размер полосового домена, 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 МГц, что согласуется с частотой продольных колебаний, примененной в наших

экспериментах. Значение частоты f_0 можно определить по формуле:

$$f_0 = D^{1/2} m^{1/2}. \quad (2)$$

Добротность:

$$Q = D^{1/2} m^{-1/2} C^{-1}. \quad (3)$$

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 . Оценки показывают, что добротность колебательной системы доменных границ в ЖИГ составляет не менее 10. При наложении маг-

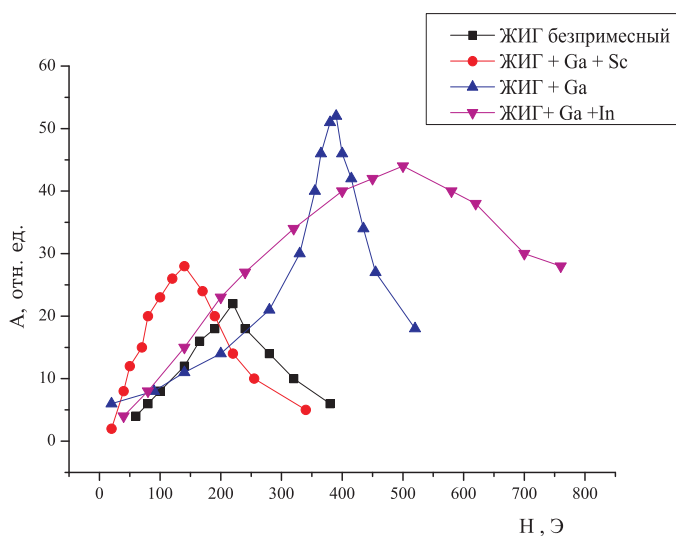


Рис. 6: Полевые зависимости амплитуды продольного ультразвука для пленок ЖИГ одинаковой толщины с различными примесями на частоте 36 МГц

нитного поля, касательного к плоскости пленки ЖИГ, происходит изменение частоты f_0 в сторону меньших значений поля, приложенного перпендикулярно плоскости пленки, а при уменьшении значений резонансного поля происходит увеличение добротности колебательной системы вследствие увеличения подвижности доменных границ, что и наблюдается в наших экспериментах.

Для практических целей представлялось интересным и полезным провести исследование влияния различных примесей на эффективность возбуждения звука. Результаты исследования полевой зависимости эффективности возбуждения продольных ультразвуковых колебаний пленками ЖИГ одинаковой толщины с различными примесями показаны на рис. 6. Из рис. 6 можно видеть, что примеси Ga, In, Sc существенно влияют на эффективность возбуждения, положение максимумов и ширину квазирезонансных кривых.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Продемонстрирована высокая эффективность возбуждения высокочастотных ультразвуковых волн продольной и сдвиговой поляризации тонкими пленками ЖИГ на подложке ГГГ
2. Наблюдаются размерно-резонансные эффекты, зависящие от частоты ультразвука и толщины пленки, и усиливающиеся в неоднородном магнитном поле. Эти аномалии объяснены резонансным движением доменных границ.
3. Появляется возможность регулирования амплитуды возбуждаемых колебаний путем изменения величины и направления подмагничивающего поля, и за счет подбора вида и оптимального количества примесей в пленках ЖИГ.

[1] Белов К. П. Магнитострикционные материалы и их применение в науке и технике. (М.: Наука, 1992). 334 с.
 [2] Sarnatsky V. M. Sensors and actuators. **A116**. P.173. (2004).
 [3] Гласс Х. Л. ТИИЭР. **76**, №2. С. 64. (1988).
 [4] Turov Ye. A., Lugovoy A. A. Phys. of Metals and metal-

lography. **50**, № 5. P. 903. (1980).
 [5] Gourevich A. G. Magnetic resonance in ferromagnets and antiferromagnets. (М.: Nauka, 1973). 591 p.
 [6] Vaschkovsky A. V., Lokk E. G., Scheglov V. I. Solid state physics. **41**, №1. P. 2034. (1999).

Electromagnetic excitation of longitudinal and shear ultrasonic waves in thin films of yttrium iron garnet

I. E. Gospodchikova^a, V. M. Sarnatsky^b

¹Department of Solid State Physics, Faculty of Physics, St. Petersburg State University, Saint-Petersburg, 198504, Russia
 E-mail: ^airina_gospodchikova@mail.ru, ^bsarnatsky42@mail.ru

The influence of geometrical dimensions of the yttrium-iron garnet plate (thickness), geometry and intensity of applied

bias and alternating magnetic fields on the efficiency of ultrasound generation is researched. Experiments revealed resonant-dimensional effects, which cannot be described in terms of existing theory. A hypothesis of involvement of domain borders oscillations into ultrasound generation is suggested.

PACS: 75.60.Ch Domain walls and domain structure

Keywords: ultrasonic vibration, yttrium-iron garnet, domain structure.

Received 12.06.2013.

Сведения об авторах

1. Господчикова Ирина Евгеньевна — студентка; тел.: (812) 428-43-30, e-mail: irina_gospodchikova@mail.ru.
2. Сарнацкий Валерий Моисеевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, доцент; тел.: (812) 428-43-30, e-mail: sarnatsky42@mail.ru.