

10

Магнитоакустические эффекты композитных пленок $\text{CoFeB}/\text{SiO}_2$ с разной магнитной структурой, возбуждаемых наносекундными лазерными импульсами

© Л.Н. Котов¹, Ю.В. Судьенков², М.П. Ласёк¹, С.А. Чертищева², Ю.Е. Калинин³, А.В. Ситников³

¹ Сыктывкарский государственный университет, Сыктывкар, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

E-mail: kotovln@mail.ru

Поступило в Редакцию 22 июля 2024 г.

В окончательной редакции 25 октября 2024 г.

Принято к публикации 12 ноября 2024 г.

Проведены эксперименты по возбуждению упругих импульсов наносекундными импульсами лазера и исследовано их распространение в композитных пленках $\text{CoFeB}/\text{SiO}_2$ с разной магнитной структурой. Наибольшая амплитуда возбуждаемых упругих импульсов наблюдалась в пленках с полосовой магнитной структурой. Обнаружены максимумы амплитуды и мощности составляющих спектра упругих импульсов на частотах 61 и 72 МГц для пленок с полосовой магнитной структурой, которые связаны с колебаниями магнитных полос структуры, возбуждаемыми лазерным наносекундным импульсом. Показано, что двухслойная пленка лавсан–композит может играть роль акустического резонатора для возбуждаемых упругих импульсов на исследованных частотах.

Ключевые слова: упругие и лазерные импульсы, композитные металл-диэлектрические пленки, магнитная структура, магнитное поле.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.06.59923.20065

В последние годы акустооптические методы все чаще стали применяться в физических исследованиях различных магнитных материалов [1–5]. Акустооптические методы по сравнению с традиционно применяемыми ультразвуковыми методами имеют неоспоримые преимущества: бесконтактное возбуждение импульсов упругих колебаний и их значительная широкополосность [4]. Исследования механизмов возбуждения ультракоротких упругих импульсов оптическими импульсами в магнитных пленках вызывают большой интерес как в плане развития теоретических представлений нелинейной физики, так и в плане решения прикладных задач акустомагнитоэлектроники с использованием современной лазерной и акустической техники [1,5]. При оптическом возбуждении обычно учитывают несколько основных процессов генерации импульсов упругих колебаний, из которых наиболее предпочтительным является термический механизм, обуславливающий одновременную генерацию импульсов магнитных и упругих колебаний и их взаимодействие [1,3,5]. Особое внимание в этих исследованиях учеными уделяется взаимодействию и возбуждению сверхкоротких упругих импульсов с магнитными структурами [1,5]. Интерес к исследованиям композитных металл-диэлектрических пленок обусловлен тем, что в этих пленках в зависимости от концентрации металлического сплава могут реализоваться различные магнитные структуры [6]. В работе [6] был обнаружен минимум модуля импеданса для композитных пленок $\text{CoFeB}/\text{SiO}_2$ с полосовой магнитной структурой на частоте

около 2.3 GHz, на амплитуду и положение которого значительное влияние оказывало магнитное поле. Наличие минимума СВЧ-импеданса и зависимость положения и амплитуды минимума от магнитного поля для пленок $\text{CoFeB}/\text{SiO}_2$ с полосовой магнитной структурой должны оказывать существенное влияние и на магнитоупругие свойства этих пленок, что должно было проявиться и в запланированных нами экспериментах. В настоящей работе мы исследовали влияние магнитного поля на параметры упругих импульсов, распространяющихся в композитных пленках $\text{CoFeB}/\text{SiO}_2$ на полимерной подложке с различной магнитной структурой.

В качестве объекта исследований были использованы композитные металл-диэлектрические пленки $\text{CoFeB}/\text{SiO}_2$ на лавсановой подложке толщиной 30 μm . Композитные пленки были получены в вакууме 1.5 μPa бомбардировкой ионами аргона мишеней из металлического сплава $\text{Co}_{0.44}\text{Fe}_{0.36}\text{B}_{0.2}$ и диэлектрика SiO_2 . Элементные составы и толщины пленок определялись с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LMH [6]. Толщина пленок определялась по фотографиям торцов кусков композитных пленок, соскобленных с лавсановой подложки. Композитная пленка D толщиной 0.69 μm имела следующий элементный состав (в атомных долях): Co — 0.25, Fe — 0.23, B — 0.16, Si — 0.12, O — 0.24. Вторая композитная пленка G толщиной 0.86 μm имела следующий состав: Co — 0.29, Fe — 0.26, B — 0.12, Si — 0.11, O — 0.23. Изображения магнитного фазового контраста

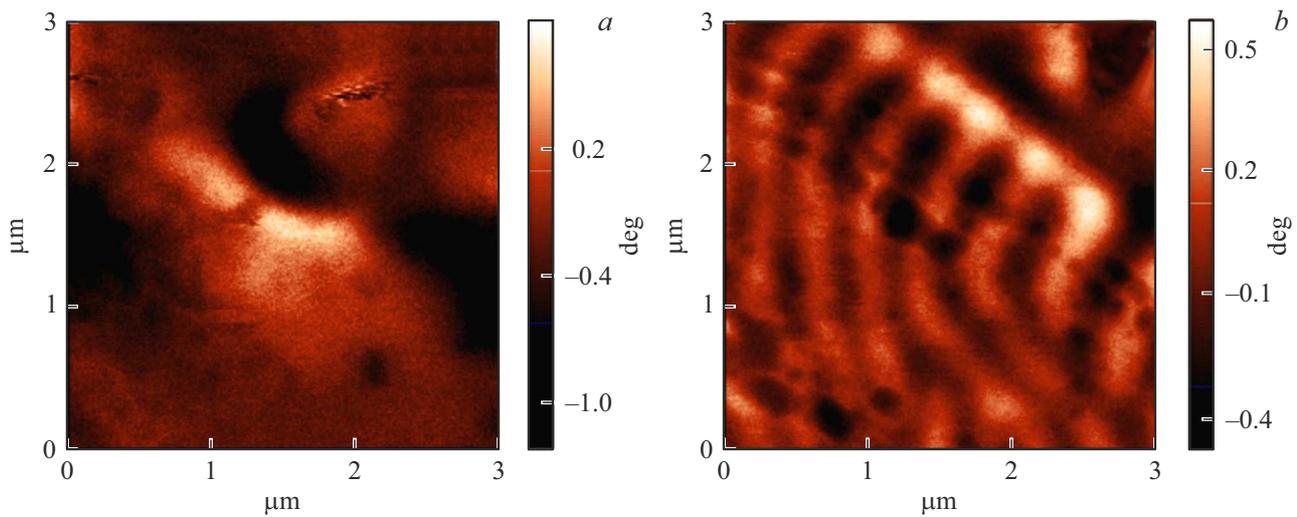


Рис. 1. Изображения магнитного фазового контраста пленок *D* (*a*) и *G* (*b*). Справа на вертикальной цветовой шкале приведены значения сдвига фаз колебаний кантилевера с магнитным зондом в градусах. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

поверхности пленок были получены с помощью атомно-силового микроскопа NTEGRA PRIMA (NT-MDT, Россия) [6]. В микроскопе использовался силиконовый зонд, покрытый магнитным сплавом CoCr с толщиной 40 nm. Разрешение разных магнитных однородных областей составляло 20 nm. В процессе съемки регистрировался сдвиг фазы колебаний кантилевера с магнитным зондом, расположенным над участком поверхности пленок, который определяется силой взаимодействия магнитного зонда с этим участком. Анализ полученных изображений магнитного фазового контраста поверхности пленок показал, что гранулярно-перколяционная структура для пленки *D* представляла собой неупорядоченные области слабой и сильной намагниченности различных размеров и формы (рис. 1, *a*). Для пленки *G* гранулярно-перколяционная структура включала в себя полосовую магнитную структуру с соседними полосами противоположной намагниченности с периодом $0.4 \mu\text{m}$ и длиной полос более $2 \mu\text{m}$ (рис. 1, *b*).

В эксперименте исследуемые образцы размещались в зазоре электромагнита шириной 30 mm, в котором создавалось магнитное поле с индукцией от 0 до 0.26 T. Магнитное поле было направлено параллельно плоскости пленки. Возбуждение упругих импульсов в композитных пленках на лавсановой подложке осуществлялось оптическими импульсами лазера с длиной волны 532 nm, длительностью 1.5 ns и частотой повторения 1 Hz [4]. Плотность энергии облучения образцов в импульсе не превышала $E \leq 10^{-2} \text{ J/cm}^2$. Область облучения ограничивалась диафрагмой с диаметром 4 mm [7]. Импульс лазера направлялся на исследуемую пленку, которая размещалась на пьезокерамической пластине ЦТС-19 толщиной 2 mm. Акустический контакт между пленкой и пьезокерамической пластиной обеспечивался с помощью трансформаторного масла путем прижатия пленки к

пластине оптическим стеклом [4,7]. Электрический сигнал снимался с пьезопреобразователя и регистрировался осциллографом LECROY с шириной полосы пропускания 300 MHz. Для уменьшения электромагнитных помех и согласования с осциллографом пьезопреобразователь нагружался на сопротивление 50 Ω . Амплитуда упругих импульсов была пропорциональна амплитуде электрических импульсов, снимаемых с пьезопреобразователя. Погрешность определения амплитуды и длительности электрических сигналов составляла не более 5%. Синхронизация осциллографа осуществлялась электрическими импульсами с фотоприемника, которые создавались лазерными импульсами. Все исследования проводились при комнатной температуре.

На рис. 2 показаны временные зависимости амплитуд электрического сигнала $U(t)$, снимаемого с пьезопреобразователя, наводимого упругими импульсами, прошедшими композитные пленки *D* и *G* в нулевом магнитном поле и магнитном поле $B = 0.2 \text{ T}$. Как видно из рис. 2, *a*, амплитуда упругого импульса, возбуждаемого лазерным импульсом, в пленке *G* в нулевом магнитном поле в 3 раза больше амплитуды аналогичного импульса для пленки *D*, что свидетельствует о том, что возбуждение упругих импульсов лазерным импульсом в пленке *G* с полосовой магнитной структурой происходит намного эффективнее, чем для пленки *D* с разупорядоченной магнитной структурой. На зависимости $U(t)$ в большем временном масштабе для пленки *G* с полосовой магнитной структурой, находящейся в нулевом магнитном поле и в поле 0.2 T, видна серия из четырех упругих импульсов (рис. 2, *b*). Второй и последующие упругие импульсы в этой серии представляют собой переотраженные акустические импульсы от границ композитной пленки *G* и лавсановой пленки (подложки). Оценка продольной ультразвуковой скорости в этой двухслойной

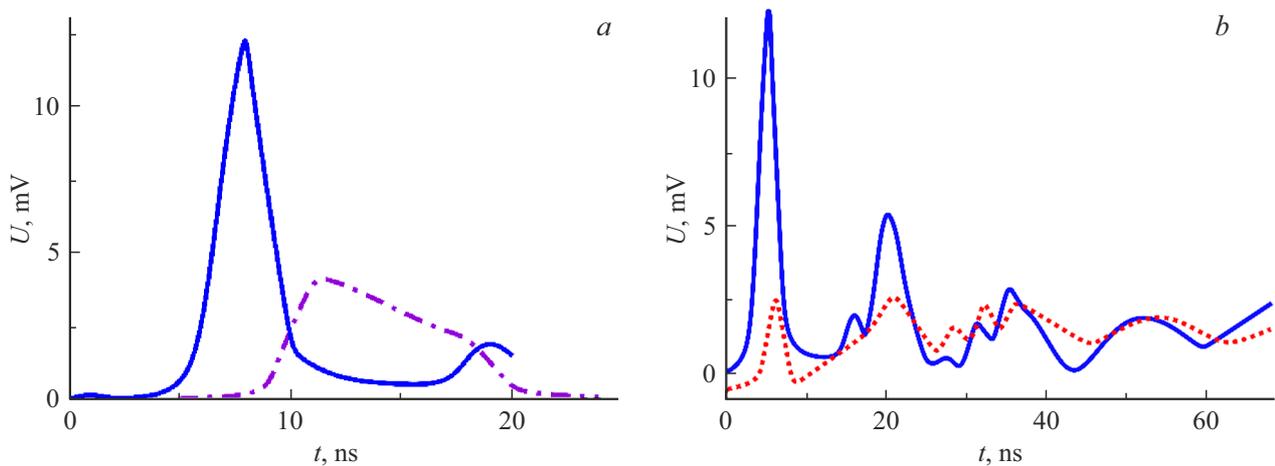


Рис. 2. *a* — временные зависимости амплитуды электрического импульса, снимаемого с пьезопреобразователя, для пленок D (штрихпунктирная кривая) и G (сплошная кривая), находящихся в нулевом магнитном поле; *b* — временные зависимости амплитуды электрического импульса для пленки G без магнитного поля (сплошная кривая) и в магнитном поле 0.2 Т (пунктирная кривая).

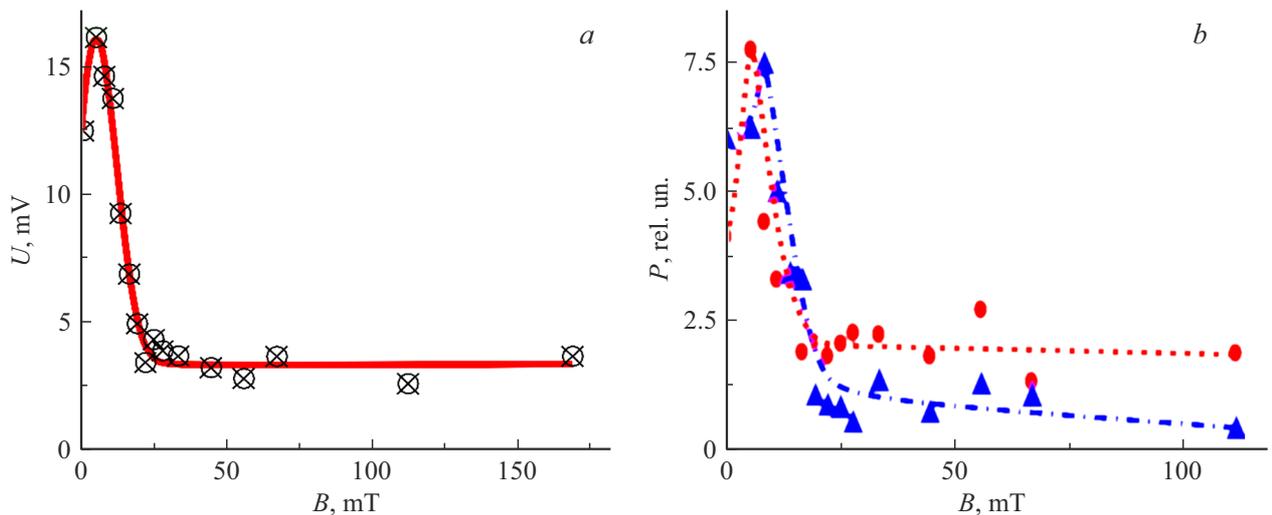


Рис. 3. *a* — зависимость амплитуды электрического импульса от индукции магнитного поля B для пленки G ; *b* — зависимости мощности составляющих спектра на частотах 61 МГц (пунктирная кривая) и 72 МГц (штрихпунктирная кривая) для пленки G .

пленке лавсан–композит, сделанная с учетом интервала времени между переотраженными импульсами, равного 15.2 ns (рис. 2, *b*), дает значение 4060 м/с. При такой скорости упругой волны толщина лавсановой пленки, составляющая 30 μm , равна половине длины волны упругих колебаний на частоте 67 МГц, которая входит в спектр упругого импульса, возбуждаемого лазерным наносекундным импульсом. Следовательно, двухслойная пленка, состоящая из толстой лавсановой пленки и напыленного на нее слоя из тонкой пленки CoFeB/SiO_2 , может играть роль акустического резонатора для возбуждаемых упругих волн.

На рис. 3 показаны магнитопольевые зависимости амплитуды электрического импульса $U(B)$, снимаемого с пьезопреобразователя, и мощности составляющих

спектра электрического импульса $P(B)$ на частотах 61 и 72 МГц для композитной пленки G с полосовой магнитной структурой. На зависимостях $U(B)$ и $P(B)$ наблюдаются максимумы амплитуды и мощности составляющих спектра электрического импульса на частотах 61 и 72 МГц. Положения максимумов на зависимостях $P(B)$ составляющих спектра на частотах 61 и 72 МГц находятся при разных магнитных полях (5 и 7 мТ), что свидетельствует о резонансном характере возбуждаемых магнитоупругих колебаний в пленке G с полосовой магнитной структурой. Зависимости $U(B)$ и $P(B)$ при больших магнитных полях $B > 30$ мТ имеют вид слабо спадающих кривых, на которых видны незначительные осцилляции. Это означает, что в больших магнитных полях возбуждение упругих импульсов лазерными им-

пульсами осуществляется в основном за счет прямого термического эффекта при незначительном вкладе магнитных колебаний. Также следует отметить, что для пленки G с полосовой магнитной структурой максимальная амплитуда первого упругого импульса при малых магнитных полях больше в 4 раза амплитуды в больших полях $B > 30$ мТ. Малая амплитуда первого упругого импульса для пленки D при разных магнитных полях и для пленки G в большом магнитном поле свидетельствует о значительном вкладе в амплитуду упругого импульса колебаний полосовой магнитной структуры, возбуждаемых лазерными наносекундными импульсами.

Таким образом, в настоящей работе исследовано влияние магнитного поля с индукцией 0–0.26 Т на амплитуду и мощности составляющих спектра на частотах 61 и 72 МГц упругих импульсов, возбуждаемых в композитных пленках CoFeB/SiO₂ с разной магнитной структурой. Возбуждение упругих импульсов в композитных магнитных пленках при действии на них лазерного наносекундного импульса осуществляется за счет возбуждения в них импульсов магнитоупругих колебаний. Наиболее сильное влияние магнитного поля на амплитуду и спектр упругих импульсов и наибольшая возбуждаемая амплитуда упругих импульсов наблюдаются для композитных пленок CoFeB/SiO₂ с полосовой магнитной структурой. Толстая лавсановая пленка с толщиной 30 мкм, близкой к половине длины упругой волны на частоте 67 МГц, может играть роль акустического резонатора на исследованных частотах. При проведении дополнительных исследований при воздействии на пленки нано- и фемтосекундными импульсами лазеров перспективно использовать обнаруженные нами магнитоакустические эффекты в композитных пленках CoFeB/SiO₂ для изучения магнитной структуры в тонких магнитных пленках и для создания усилителя акустических импульсов и устройств обработки информации.

Финансирование работы

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-20048).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.С. Власов, А.В. Голов, Л.Н. Котов, В.И. Щеглов, А.М. Ломоносов, В.В. Темнов, Акуст. журн., **68** (1), 22 (2022). DOI: 10.31857/S0320791922010075 [V.S. Vlasov, A.V. Golov, L.N. Kotov, V.I. Shcheglov, A.M. Lomonosov, V.V. Temnov, Acoust. Phys., **68** (1), 18 (2022). DOI: 0.1134/S1063771022010079].
- [2] M. Mattern, J.-E. Pudell, K. Dumesnil, A. von Reppert, M. Bargheer, Photoacoustics, **30**, 100463 (2023). DOI: 10.1016/j.pacs.2023.100463
- [3] M. Deb, E. Popova, S. Zeuschner, M. Hehn, N. Keller, S. Mangin, G. Malinowski, M. Bargheer, Phys. Rev. B, **103** (2), 024411 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevB.103.024411
- [4] В.М. Сарнацкий, Ю.В. Судьенков, Изв. РАН. Сер. физ., **84** (6), 819 (2020). DOI: 10.31857/S0367676520060241 [V.M. Sarnatskii, Y.V. Sud'enkov, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., **84** (6), 673 (2020). DOI: 10.3103/S1062873820060210].
- [5] O. Matsuda, M.C. Larciprete, R. Li Voti, O.B. Wright, Ultrasonics, **56**, 3 (2015). DOI: 10.1016/j.ultras.2014.06.005
- [6] Л.Н. Котов, М.П. Ласёк, В.С. Власов, А.А. Уткин, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, В.В. Темнов, Изв. РАН. Сер. физ., **86** (5), 701 (2022). DOI: 10.31857/S0367676522050131 [L.N. Kotov, M.P. Lasek, V.S. Vlasov, A.A. Utkin, Yu.E. Kalinin, A.V. Sitnikov, V.V. Temnov, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., **86** (5), 588 (2022). DOI: 10.3103/S1062873822050136].
- [7] В.Э. Гусев, А.А. Карабутов, *Лазерная оптоакустика* (Наука, М., 1991).