

УДК 537.63:537.9

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МАГНИТНОЙ И УПРУГОЙ ПОДСИСТЕМ ПЛЕНКИ ЖЕЛЕЗО-ИТТРИЕВОГО ГРАНАТА ПРИ ДЕТЕКТИРОВАНИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В РЕЖИМЕ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ

© 2022 г. Д. А. Плешев<sup>1, 2, \*</sup>, Ф. Ф. Асадуллин<sup>1</sup>, И. А. Чупров<sup>2</sup>,  
В. С. Власов<sup>2</sup>, Л. Н. Котов<sup>2</sup>, В. И. Щеглов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова”,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина”, Сыктывкар, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
“Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук”, Москва, Россия  
\*E-mail: dpleshev@gmail.com

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 24.12.2021 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

Рассмотрены колебания намагниченности и упругие колебания в пленке железо-иттриевого граната. Приведены параметрические портреты колебаний намагниченности и развертки во времени упругих колебаний, их спектры, а также зависимости от глубины модуляции и амплитуды напряженности переменного поля. Определены условия эффективного детектирования колебаний внешнего магнитного поля.

DOI: 10.31857/S0367676522050192

### ВВЕДЕНИЕ

Использование магнитоотрицательных преобразователей для возбуждения колебаний в СВЧ диапазоне используется в различных областях техники: от дефектоскопии до ультразвуковой техники обработки информации [1–3]. Особый интерес исследователей вызывает возбуждение колебаний намагниченности мощным импульсом фемтосекундного лазера за счет магнитоупругих свойств магнитной пленки [4–6]. При этом значительное внимание уделяется вопросу регистрации таких волн и выделению данных из СВЧ сигнала. Реализация детектирования принимаемого СВЧ сигнала на магнитоотрицательном преобразователе может быть реализована за счет резонансных магнитоакустических свойств пленок в линейном и нелинейном режимах возбуждения.

В связи с высокой добротностью широкое применение получили магнитоотрицательные СВЧ преобразователи на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ), используемые для построения генераторов гиперзвука и линий задержки [6]. Однако при этом на спектре преобразуемого сигнала возникает широкополосный шум за счет параметрического возбуждения обменных спиновых волн, которого можно избежать, используя для преоб-

разователя геометрию нормально намагниченной тонкой пластины. Это также позволит увеличить угол раскрытия конуса прецессии намагниченности и мощность возбуждаемых гиперзвуковых колебаний [6–8].

Программная работа [8], несмотря на детальную проработку процесса детектирования модулированных магнитных полей на упругой подсистеме магнитной пленки, оставила много вопросов для дальнейшего исследования.

В нашей работе исследуются зависимости динамики вектора намагниченности и упругого смещения от глубины модуляции и амплитуды напряженности переменного амплитудно-модулированного магнитного поля.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом исследования служит магнитоупругая ферритовая пленка с кубической кристаллографической симметрией, помещенная во внешнее постоянное подмагничивающее и переменное магнитные поля. Пленка имеет толщину  $d$ . Оси декартовой системы координат  $Ox$ ,  $Oy$  и  $Oz$ , применяемой для решения задачи, направлены вдоль кристаллографических осей [100], [010] и

[001]. Плоскость пленки совпадает с плоскостью  $Oxy$ . Постоянное магнитное поле  $\vec{H}$  ориентировано в положительном направлении оси  $Oz$ , а амплитудно-модулированное переменное магнитное поле  $\vec{h}_0$  направлено параллельно оси  $Ox$ .

Полная свободная энергия магнитного слоя  $U$  в поле  $\vec{H} = \{h_x; h_y; H_0\}$  будет состоять из магнитной, упругой и магнитоупругой энергий:

$$U = -M_0 h_x m_x - M_0 h_y m_y - M_0 H_0 m_z + 2\pi M_0^2 m_z^2 + \frac{1}{2} c_{11} (u_{xx}^2 + u_{yy}^2 + u_{zz}^2) + c_{12} (u_{xx} u_{yy} + u_{yy} u_{zz} + u_{zz} u_{xx}) + 2c_{44} (u_{xy}^2 + u_{yz}^2 + u_{zx}^2) + B_1 (m_x^2 u_{xx} + m_y^2 u_{yy} + m_z^2 u_{zz}) + 2B_2 (m_x m_y u_{xy} + m_y m_z u_{yz} + m_z m_x u_{zx}), \quad (1)$$

где  $\vec{m} = \vec{M}/M_0$  – нормализованный вектор намагниченности,  $M_0$  – намагниченность насыщения пленки,  $u_{ij}$  – компоненты тензора деформации,  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$  – константы (модули) упругости,  $B_1$ ,  $B_2$  – константы магнитоупругого взаимодействия.

Использование уравнения движения для намагниченности и упругих колебаний, получаемых из уравнения (1), проблематично в силу большого объема и сложности вычислений. Задачу можно упростить, введя два предположения:

- намагниченность в объеме пленки однородна;
- продольные колебания вдоль оси  $Oz$  с намагниченностью не связаны, т.е.  $u_z = 0$ .

Исходными уравнениями системы являются уравнение Ландау–Лифшица–Гильберта и уравнение для компонент вектора упругих смещений  $u_{x,y}$ :

$$\frac{\partial \vec{m}}{\partial t} = -\gamma [\vec{m} \times \vec{H}_{eff}] + \alpha \left[ \vec{m} \times \frac{\partial \vec{m}}{\partial t} \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 u_{x,y}}{\partial t^2} = -2\beta \frac{\partial u_{x,y}}{\partial t} + \frac{c_{44}}{\rho} \frac{\partial^2 u_{x,y}}{\partial z^2}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение,  $\vec{H}_{eff}$  – эффективное магнитное поле,  $\rho$  – плотность материала пленки.

Граничные условия на поверхности пленки выглядят следующим образом:

$$c_{44} \frac{\partial u_{x,y}}{\partial z} \Big|_{z=\pm d/2} = -B_2 m_{x,y} m_z. \quad (4)$$

Сильная нелинейность задачи и необходимость эффективной накачки магнитной и упругой подсистем требуют для возбуждения колебаний намагниченности и упругого смещения использования линейно-поляризованного переменного поля [10, 11]. Поэтому амплитудная модуляция для

внешнего переменного магнитного поля вводится в виде:

$$h_x = h_{0x} [1 + A_m \sin(2\pi f_m t)] \sin(2\pi f_0 t), \quad (5)$$

где  $A_m$  – коэффициент (глубина) модуляции,  $f_m$  – частота модуляции,  $f_0$  – несущая частота переменного поля [12].

Полученная система уравнений, определяющая динамику вектора намагниченности и упругих колебаний, решается при помощи метода Рунге–Кутты–Фельберга 7–8 порядка.

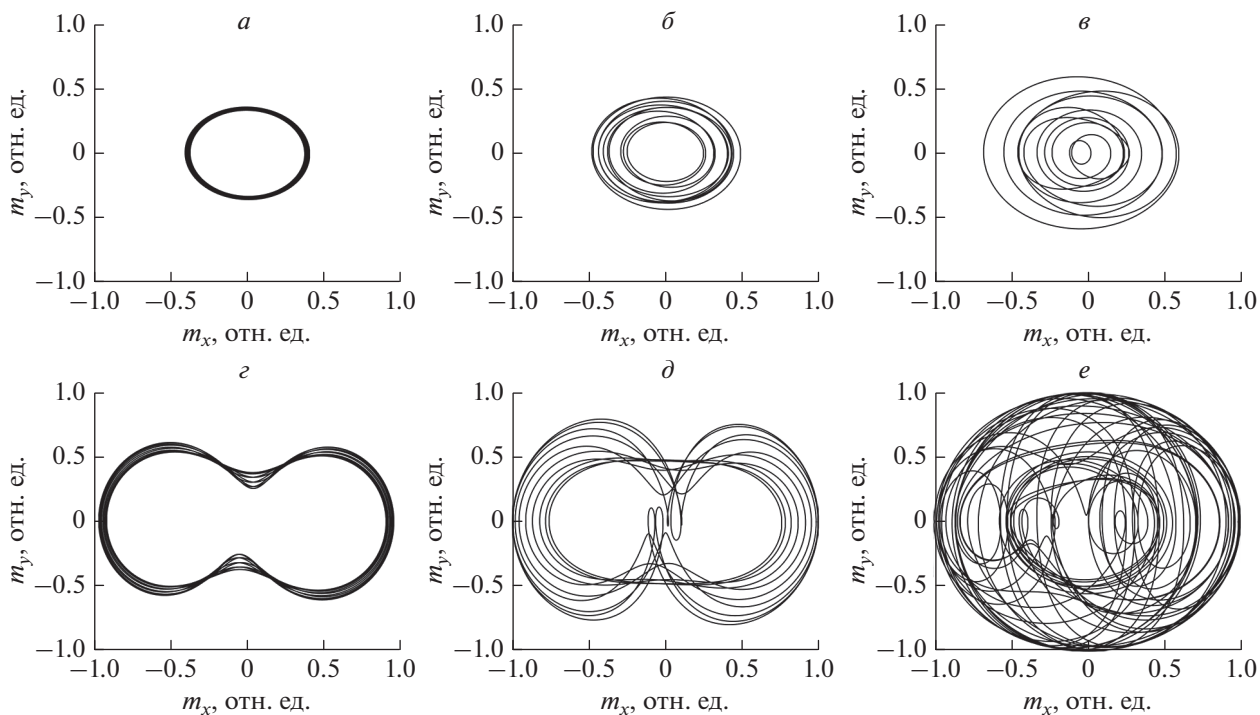
При численном решении брались следующие параметры материала слоя ЖИГ [8, 10, 13]: намагниченность насыщения пленки  $M_0 = 139.26$  Гс; магнитоупругая константа  $B_2 = 6.96 \cdot 10^6$  эрг · см<sup>-3</sup>; модуль упругости  $c_{44} = 7.64 \cdot 10^{11}$  эрг · см<sup>-3</sup>; плотность  $\rho = 5.17$  г · см<sup>-3</sup>. Значение констант магнитной и упругой диссипации взяты равными:

$\alpha = 0.02$  и  $\beta = 2 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup>. Эти значения больше реальных, но позволяют процессам релаксации колебаний магнитной и упругой подсистем завершиться за более короткое время. Напряженность постоянного магнитного поля  $H_0 = 2750$  Э, а переменного амплитудно-модулированного магнитного поля была  $h_{0x} = (0-2) \cdot 10^3$  Э. Частота ФМР пленки ЖИГ в постоянном поле  $\vec{H}_0$  равна несущей частоте амплитудно-модулированного переменного поля  $f_0 = 2.8 \cdot 10^9$  Гц, а частота модуляции равна частоте акустического резонанса для пленки толщиной  $d = 6.865$  мкм и составляет –  $f_m = 2.8 \cdot 10^8$  Гц.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При амплитуде напряженности переменного поля, не превышающего  $h_{0x} \leq 10$  Э, колебания вектора намагниченности пленки происходят в линейном режиме, колебания упругого смещения следуют за колебаниями намагниченности в квазистационарном режиме. В таком режиме возбуждения магнитной и упругой подсистем величина коэффициента модуляции не оказывает существенного влияния на динамику колебаний намагниченности и упругого смещения. Отличие развития колебаний магнитной и упругой подсистем сводится к тому, что амплитуда колебаний вектора намагниченности монотонно возрастает в диапазоне значений коэффициента модуляции от  $A_m = 0.1$  до  $A_m = 1$  при шаге 0.1 в пределах 0.003–0.004 величины нормированного вектора намагниченности, а величина упругого смещения в пределах  $(7-8) \cdot 10^{-12}$  см.

Увеличение напряженности переменного магнитного поля больше  $h_{0x} > 10$  Э приводит к тому,



**Рис. 1.** Параметрические портреты колебаний вектора намагниченности при амплитуде переменного магнитного поля:  $h_{0x} = 100$  (а, б, в) и 1500 Э (г, д, е); при глубине модуляции:  $A_m = 0.1$  (а, д), 0.5 (б, г), 1 (в, е).

что магнитоупругая система переходит в нелинейный режим возбуждения.

При коэффициенте амплитудной модуляции  $A_m < 0.1$  траектории движения вектора намагниченности накладываются друг на друга как показано на рис. 1а, образуя правильную окружность. Однако уже при глубине модуляции  $A_m \approx 0.2$  и больше, центры окружностей траекторий вектора намагниченности начинают растягиваться вдоль оси абсцисс  $Ox$ , а параметрический портрет приобретает сложную по структуре эллипсоидальную форму (рис. 1б, 1в). Необходимо отметить, что увеличение глубины модуляции приводит к монотонному росту угла раскрытия прецессии вектора намагниченности, что можно объяснить ударным возбуждением магнитоупругой подсистемы, как показано в работе [14]. При этом механизм ударного возбуждения реализуется с каждым щугом модулированных колебаний, т. к. длительность последнего соответствует по порядку времени релаксации магнитной подсистемы.

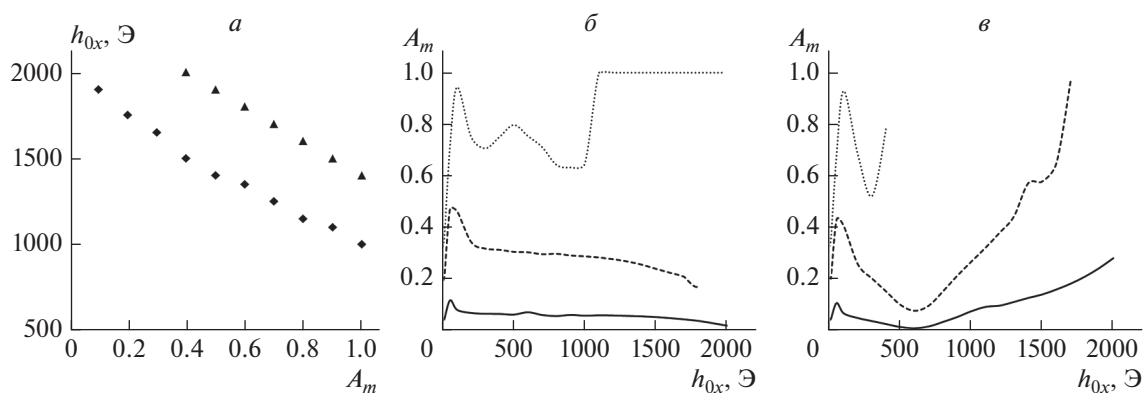
При амплитуде напряженности  $h_{0x} > 700$  Э и коэффициенте модуляции  $A_m < 0.8$  конец вектора намагниченности движется по эллипсоидальной траектории, на которой по оси  $Oy$  образуется горловина (рис. 1г). При этом компонента вектора намагниченности  $m_z$  осциллирует на несущей частоте с биениями, соответствующими частоте модуляции  $f_m$ .

Дальнейшее увеличение амплитуды напряженности переменного магнитного поля приводят к тому, что края горловины формируют перетяжку, как показано на рис. 1д. Необходимо указать, что напряженность переменного магнитного поля, соответствующая смыканию горловины и образованию перетяжки, монотонно убывает с ростом коэффициента модуляции. Так при  $A_m \approx 0.1$  величина напряженности поля образования перетяжки  $h_{0x} \approx 1900$  Э, а при  $A_m \approx 1$  горловина смыкается при достижении полем значения  $h_{0x} \approx 1000$  Э (рис. 2а).

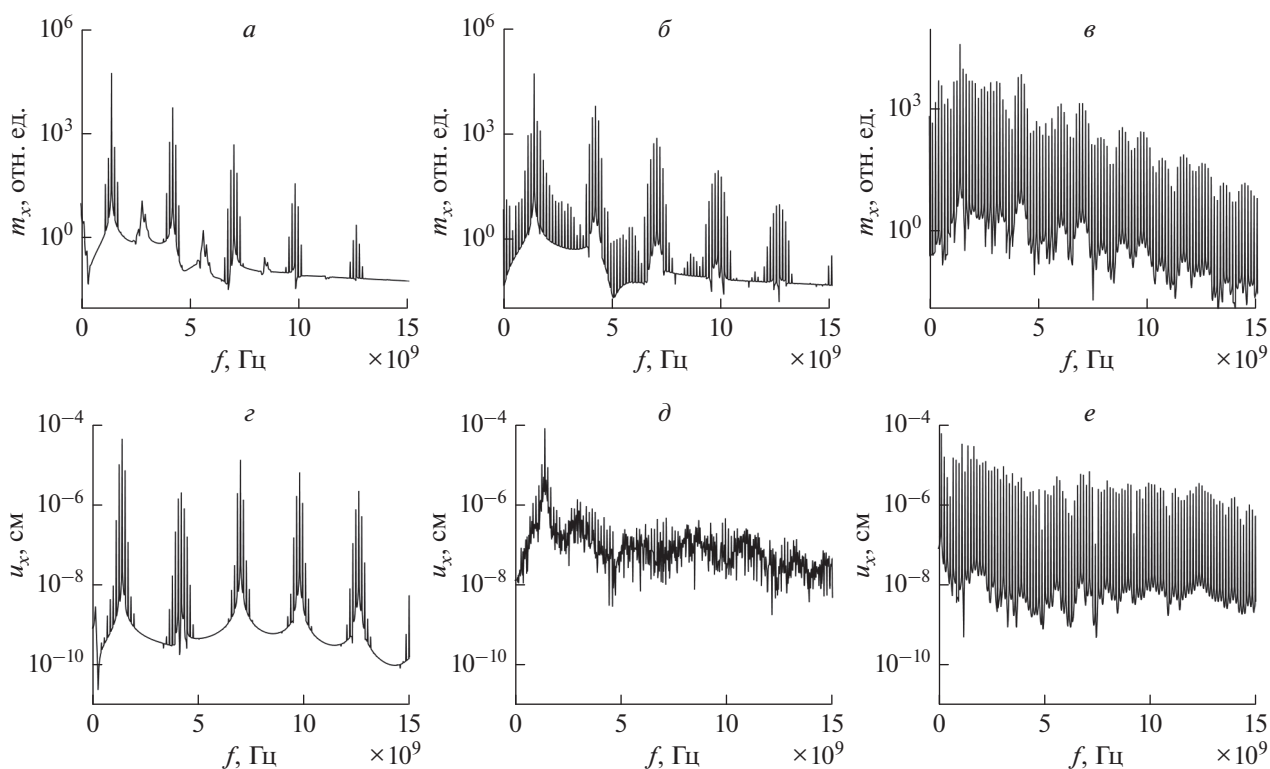
При глубине амплитудной модуляции  $A_m > 0.8$  и значениях амплитуды напряженности переменного поля  $h_{0x} > 1000$  Э угол развертки конуса прецессии вектора намагниченности достигает  $90^\circ$  вдоль оси  $Ox$ , что снижает глубину модуляции для колебаний компонент намагниченности и приводит к росту амплитуды колебаний упругого смещения, за счет эффективной накачки упругой подсистемы (рис. 2б, 2в).

При глубине амплитудной модуляции  $A_m \rightarrow 1$  и значениях напряженности переменного поля  $h_{0x} \approx 1500-2000$  Э колебания компонент вектора намагниченности становятся квазигармонического характера (рис. 1е).

Анализ амплитудно-частотных характеристик колебаний намагниченности позволяет подтвердить квазигармонический характер колебаний



**Рис. 2.** Зависимость динамики намагниченности от напряженности переменного поля (*a*): ромб – граница образования перетяжки; треугольник – граница перехода в квазигармонический режим. Зависимость глубины модуляции компоненты намагниченности  $m_x$  (*b*) и упругого смещения  $u_x$  (*v*) от коэффициента амплитудной модуляции переменного поля:  $A_m = 0.1$  – сплошная линия,  $A_m = 0.5$  – штриховая линия и  $A_m = 1$  – пунктирная линия.



**Рис. 3.** Амплитудно-частотные характеристики колебаний намагниченности (*a*, *б*, *в*) и упругого смещения (*г*, *д*, *е*) при глубине модуляции переменного магнитного поля:  $A_m = 0.1$  (*a*, *д*),  $0.5$  (*б*, *г*),  $1$  (*в*, *е*).

намагниченности. Из рис. 3а–3в видно, что с ростом глубины модуляции динамика магнитной подсистемы обогащается сателлитными частотами, обусловленными как возникновением комбинационных частот, так и взаимодействием магнитной и упругой подсистем. При этом на рис. 3в представлен спектр колебаний намагниченности, обогащенный значительным количеством сател-

литных составляющих и соответствующий возбуждению квазигармонических колебаний при  $A_m = 1$ , что коррелирует с зависимостью на рис. 2а.

На рис. 2б показана зависимость глубины модуляции колебаний вектора намагниченности от напряженности переменного поля и глубины его модуляции. Данная зависимость позволяет утверждать, что диапазон значения напряженности пе-

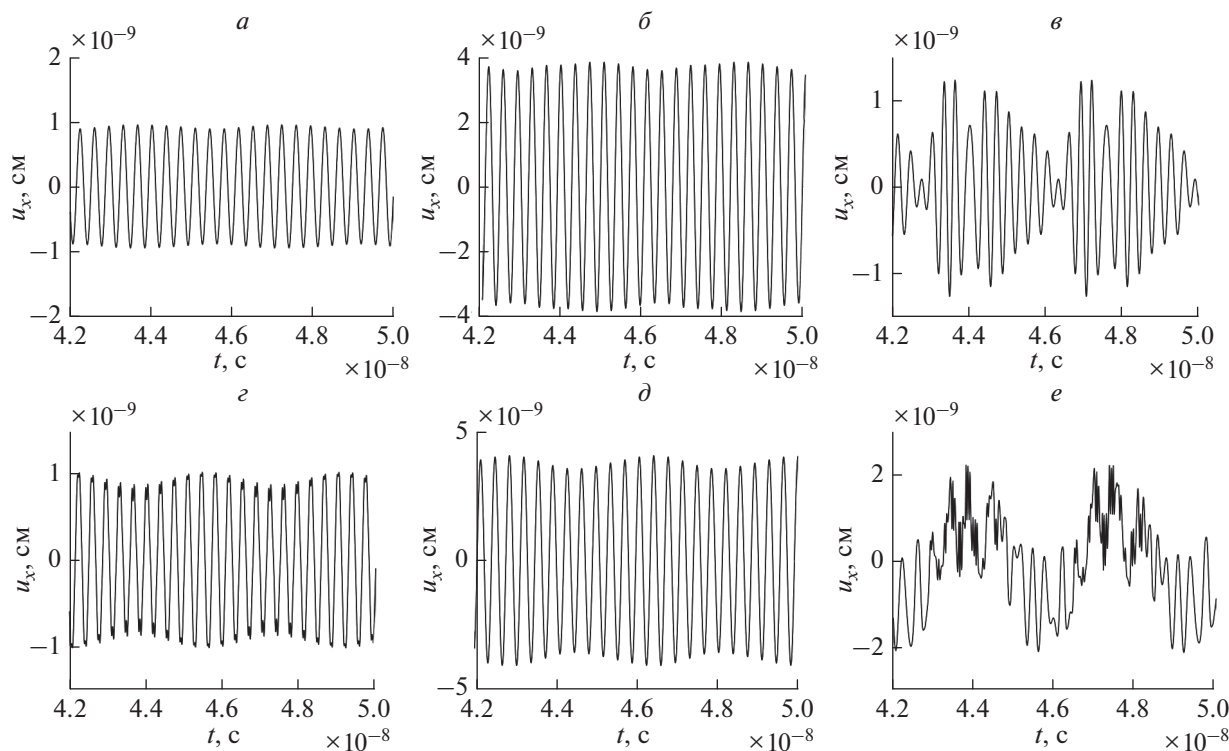


Рис. 4. Развертка во времени колебаний компоненты упругого смещения  $u_x$  при амплитуде напряженности переменного поля:  $h_{0x} = 100$  (а, б, в) и 1500 Э (з, д, е); при глубине модуляции:  $A_m = 0.1$  (а, д), 0.5 (б, з), 1 (в, е).

ременного поля, соответствующий переходу в нелинейный режим  $10 \leq h_{0x} \leq 100$  Э, является наиболее эффективным, т.к. глубина модуляции колебаний намагниченности равна глубине модуляции возмущающего поля. Также отметим, что колебания намагниченности при  $A_m = 0.5$  и  $h_{0x} > 1800$  Э нельзя отнести к модулированным колебаниям (рис. 2б, штриховая линия). Они представляют собой гармонически осциллирующее с частотой модуляции положение равновесия вектора намагниченности, траектория которого служит нулевой линией для колебаний вектора намагниченности в виде малых колец на несущей частоте переменного поля, аналогично режиму прецессии положения равновесия без охвата центра [15, 16]. Подобная динамика вектора намагниченности характерна для насыщения как магнитной, так и упругой подсистем, когда их взаимное влияние друг на друга является доминирующим фактором.

Перейдем к рассмотрению динамики упругой подсистемы. Рисунок 2в показывает, что модуляция колебаний упругого смещения, аналогично колебаниям намагниченности, наиболее эффективна при переходе в нелинейный режим, которому соответствуют значения напряженности переменного магнитного поля  $10 \leq h_{0x} \leq 100$  Э. Минимум глубины модуляции колебаний упругого смещения, наблюдающийся при значениях на-

пряженности переменного поля  $500 < h_{0x} < 600$  Э, обусловлен насыщением упругой подсистемы и выходом колебаний компоненты упругого смещения  $u_x$  на максимальные амплитуды, что и продемонстрировано на развертках по времени колебаний упругого смещения для  $A_m = 0.1$  и  $A_m = 0.5$ , представленных на рис. 4а, 4б.

Дальнейший рост напряженности переменного поля  $h_{0x} > 1000$  Э приводит глубину модуляции колебаний упругого смещения к соответствию с коэффициентом модуляции переменного поля (рис. 2в, рис. 4з, 4д).

При значениях коэффициента модуляции  $A_m \approx 1$  уже при напряженности поля  $h_{0x} > 500$  Э происходят значительные изменения в характере колебаний упругого смещения, увеличивается глубина модуляции (рис. 4в, 4е) и возбуждается широкий спектр спутниковых составляющих (рис. 3е). При этом осевая линия колебаний на несущей частоте переменного амплитудно-модулированного магнитного поля осциллирует синхронно с сигналом модуляции по гармонической траектории. Таким образом, в подобном режиме детектирование колебаний на частоте модуляции представляется возможным только в случае значений амплитуд напряженности переменного магнитного поля более 500 Э.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены колебания намагниченности в пленке ЖИГ, помещенной в линейно-поляризованное амплитудно-модулированное переменное магнитное поле. В качестве главного предмета рассмотрения избрано выявление особенностей зависимостей динамики магнитной и упругой подсистем пленки от напряженности и глубины модуляции переменного магнитного поля.

Определены зависимости глубины модуляции колебаний намагниченности от глубины и напряженности амплитудно-модулированного переменного магнитного поля. Выявлено, что при детектировании амплитудно-модулированного сигнала на основе резонансных магнитоакустических свойств пленки значение глубины модуляции  $A_m \rightarrow 1$  положительно влияет на выделение составляющей сигнала на частоте модуляции, но может привести при определенных условиях к возникновению квазигармонических колебаний. При  $A_m \rightarrow 0$  процесс детектирования более стабилен, т.к. возбуждается меньшее количество спутанных составляющих спектра, но реализация детектирования требует больших значений амплитуды напряженности переменного поля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-72-20048).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Biswas A.K., Bandyopadhyay S., Atulasimha J.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. No. 23. P. 2403.
2. *Кукучи Е.* Ультразвуковые преобразователи. М.: Мир, 1972. 424 с.
3. *Comstock R.L., LeCraw R.C.* // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. No. 10. P. 3022.
4. *Yang W.-G., Schmidt H.* // Appl. Phys. Rev. 2021. V. 8. No. 2. Art. No. 021304.
5. *Walowski J., Münzenberg M.* // J. Appl. Phys. 2016. V. 120. No. 14. Art. No. 140901.
6. *Семенов Д.И., Шутый А.М.* // УФН. 2007. Т. 177. № 8. С. 831; *Sementsov D.I., Shuty A.M.* // Phys. Usp. 2007. V. 50. No. 8. P. 793.
7. *Suhl H.* // J. Chem. Phys. 1957. V. 1. No. 4. P. 209.
8. *Власов В.С., Плешев Д.А., Шауров В.Г., Щеглов В.И.* // Журн. радиоэлектрон. 2019. № 3. С. 8.
9. *Власов В.С., Котов Л.Н., Шауров В.Г., Щеглов В.И.* // Радиотехн. электрон. 2009. Т. 54. № 7. С. 863.
10. *Чупров И.А., Асадуллин Ф.Ф., Плешев Д.А. и др.* // Челябинск. физ.-мат. журн. 2021. Т. 6. № 2. С. 237.
11. *Плешев Д.А., Асадуллин Ф.Ф., Оганезова Н.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 7. С. 987; *Pleshchev D.A., Asadullin F.F., Oganезова N.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 7. P. 901.
12. *Гоноровский И.С.* Основы радиотехники. М.: Связьиздат, 1957. 727 с.
13. *Asadullin F.F., Pleshev D.A., Vlasov V.S. et al.* // EPJ Web Conf. 2018. V. 185. Art. No. 02017.
14. *Плешев Д.А., Котов Л.Н., Власов В.С., Щеглов В.И.* Преобразование частоты при акустическом резонансе в ферритах. Сыктывкар: СГУ им. Питирима Сорокина, 2019. 157 с.
15. *Kirushev M.S., Vlasov V.S., Pleshev D.A. et al.* // Solid State Phenom. 2015. V. 233/234. P. 73.
16. *Asadullin F.F., Poleshikov S.M., Pleshev D.A. et al.* // J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys. 2017. V. 10. No. 1. P. 36.

## Study of the yttrium iron garnet film magnetic and elastic subsystems dynamics of the yield film during the magnetic field detection in the amplitude modulation mode

**D. A. Pleshev<sup>a, b, \*</sup>, F. F. Asadullin<sup>a</sup>, I. A. Chuprov<sup>b</sup>, V. S. Vlasov<sup>b</sup>, L. N. Kotov<sup>b</sup>, V. I. Shcheglov<sup>c</sup>**

<sup>a</sup> Saint Petersburg State Forestry University, St. Petersburg, 194021 Russia

<sup>b</sup> Syktyvkar State University, Syktyvkar, 167001 Russia

<sup>c</sup> Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125009 Russia

\*e-mail: dpleshev@gmail.com

Oscillations of magnetization and elastic oscillations in a YIG film are considered. Parametric portraits of oscillations of the magnetization vector, time sweeps of elastic oscillations, as well as their amplitude-frequency characteristics at different modulation depths and ac magnetic field strengths are presented. The dependences of the dynamics of oscillations of magnetization and elastic displacements of a magnetic film on the depth of amplitude modulation of the external field are investigated. The conditions for effective detection of oscillations of an external magnetic field are determined.