

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.216.2:537.62

ХАРАКТЕР, СТРУКТУРА КОЛЕБАНИЙ КОМПОНЕНТ НАМАГНИЧЕННОСТИ И УПРУГОГО СМЕЩЕНИЯ ПЛЕНКИ ПРИ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

© 2022 г. Д. А. Плешев^а, *, В. С. Власов^б, Ф. Ф. Асадуллин^а, Л. Н. Котов^б,
И. А. Чупров^б, В. И. Щеглов^с

^аСПбГЛТУ им. С.М. Кирова, Институтский переулок, 5 Литер У, Санкт-Петербург, 192021 Россия

^бСГУ им. Питирима Сорокина, Октябрьский проспект, 55, Сыктывкар, 167001 Россия

^сИРЭ им В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая 11, корп. 7, Москва, 125009 Россия

*e-mail: dpleshev@gmail.com

Поступила в редакцию 08.07.2021 г.

После доработки 07.11.2021 г.

Принята к публикации 12.11.2021 г.

Рассмотрены колебания магнитоупругой подсистемы ферритовой пленки, возбужденные амплитудно-модулированным переменным магнитным полем. Рассмотрена возможность детектирования колебаний на частоте модуляции за счет магнитострикционных свойств магнитной пленки. Определена зависимость возбуждения магнитной и упругой динамики от материальных параметров и параметров возбуждения, в том числе типа поляризации переменного магнитного поля.

Ключевые слова: детектирование колебаний, магнитные пленки, магнитоакустика, композитные пленки, магнитострикция, нелинейные колебания

DOI: 10.31857/S0015323022030068

ВВЕДЕНИЕ

Применение тонких магнитных периодических структур, композитных и однокомпонентных пленок с минимальными массогабаритными параметрами находят применение в широком спектре радиотехнических устройств [1–3]. Одним из перспективных материалов для изучения возможностей подобных устройств является железоиттриевый гранат (ЖИГ).

Значительное внимание исследователей привлекает возбуждение спиновых волн за счет магнитоупругости при воздействии на магнитные пленки мощным импульсом света от фемтосекундного лазера в схеме “накачки-зонда” [4–7]. Достаточно полный обзор представлен в работах [7, 8]. Однако открытым остается вопрос приема таких волн и выделения из СВЧ-сигнала материалов сообщения.

Для приема и регистрации высокочастотных сигналов в традиционной радиотехнике используется метод детектирования на нелинейном элементе, но в СВЧ-диапазоне его применение имеет низкую эффективность вследствие высокой междуэлектродной емкости. Использование магнитоупругих детекторов сигналов позволяет обойти данное ограничение, а использование геометрии тонкой нормально намагниченной пленки позво-

ляет избежать влияния обменных спиновых волн при их параметрическом возбуждении [3].

Общая схема эффекта детектирования в рамках описанной задачи подробно описана в работе [9]. Однако зависимость динамики магнитной и упругой подсистемы от типа поляризации возмущающего переменного магнитного поля, характер параметрических портретов намагниченности и упругого смещения описаны лишь частично.

Настоящая работа посвящена рассмотрению характера и структуры возбуждения колебаний компонент намагниченности и упругого смещения переменным амплитудно-модулированным магнитным полем, а также развитию во времени и анализу параметрических портретов колебаний намагниченности и упругого смещения в различных режимах возбуждения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача решается в декартовой системе координат, центр которой совпадает с центром пленки. Магнитная пленка толщиной d с магнитными, упругими и магнитоупругими свойствами обладает кубической кристаллографической симметрией (рис. 1). Пленка помещена в постоянное магнитное поле \mathbf{H}_0 , ориентированное вдоль поло-

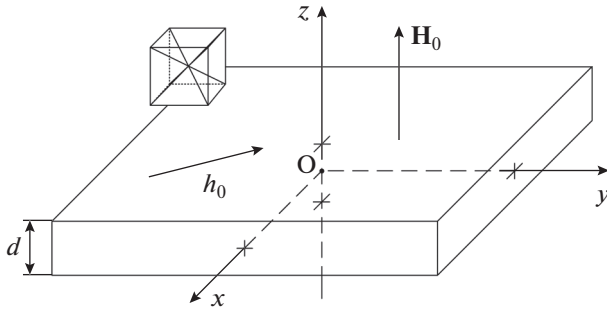


Рис. 1. Геометрия задачи.

жительного направления оси Oz . Магнитная и упругая подсистемы возбуждаются приложенным в плоскости пленки переменным магнитным полем \mathbf{h}_0 .

Пусть полная плотность энергии пластины U в поле $\mathbf{H} = \{h_x; h_y; H_0\}$ равна сумме магнитной, магнитоупругой и упругой энергий:

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

где $\mathbf{m} = \mathbf{M}/M_0$ – нормированный вектор намагниченности, M_0 – намагниченность насыщения; c_{44} – константа (модуль) упругости; B_2 – константа магнитоупругого взаимодействия.

Компоненты тензора деформаций равны:

$$u_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right), \quad (2)$$

где u_i – компоненты упругого смещения при $i = x, y, z$, x_i – координаты x, y, z .

Для снижения сложности решения задачи введем два упрощения:

- прецессия намагниченности однородна в объеме пленки и не зависит от координат;
- продольные колебания упругого смещения вдоль оси Oz не связаны с колебаниями намагниченности, т.е. $u_z = 0$.

При принятых предположениях система уравнений для намагниченности и упругих смещений имеет вид (3)–(4) и решается численно методом Рунге–Кутты 7–8 порядка с контролем точности на каждом шаге [10, 11]:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma [\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{эфф}}] + \frac{\alpha}{M} \left[\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right], \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 u_{x,y}}{\partial t^2} = -2\beta \frac{\partial u_{x,y}}{\partial t} + \frac{c_{44}}{\rho} \frac{\partial^2 u_{x,y}}{\partial z^2}, \quad (4)$$

где γ – гиромангнитная постоянная, α – параметр магнитного затухания, ρ – плотность материала пластины, β – параметр упругого затухания.

Граничные условия выглядят следующим образом:

$$c_{44} \frac{\partial u_{x,y}}{\partial z} \Big|_{z=\pm d/2} = -B_2 m_{x,y} m_z. \quad (5)$$

Амплитудная модуляция для возмущающего переменного магнитного поля вводится в классическом виде:

$$h_x = h_{0x} [1 + A_m \sin(2\pi Ft)] \sin(2\pi ft), \quad (6)$$

где A_m – коэффициент (глубина) модуляции. Для неискаженной передачи сигнала $A_m \leq 1$.

Материальные параметры пленки выбраны характерными для ЖИГ: $M_0 = 139$ Гс, $H_0 = 2750$ Э, параметр диссипации магнитной и упругой подсистемы равны соответственно $\alpha = 0.02$ и $\beta = 2 \times 10^8$ с⁻¹, константа магнитоупругого взаимодействия $B_2 = 6.96 \times 10^6$ эрг см⁻³, константа (модуль) упругости $c_{44} = 7.64 \times 10^{11}$ эрг см⁻³, напряженность переменного магнитного поля составила $h_{0x} = h_{0y} = (0-2) \times 10^3$ Э. Частота ФМР равна несущей частоте амплитудно-модулированного поля и составляет 2800 МГц, а частота модуляции равна частоте акустического резонанса при толщине пленки 6.865 мкм, что соответствует 280 МГц. Глубина модуляции $A_m = 1$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим развитие колебаний вектора намагниченности в зависимости от поляризации и амплитуды переменного амплитудно-модулированного магнитного поля (рис. 2).

При амплитудах магнитного поля до $h_0 = 20$ Э параметрические портреты колебаний вектора намагниченности представляют собой аттрактор, состоящий из внешней круговой окружности и нескольких вложенных (рис. 2а, 2б, 2и, 2к).

Дальнейшее увеличение амплитуды переменного поля в случае круговой поляризации не вызывает значительных изменений в структуре параметрических портретов и характере колебаний вектора намагниченности, амплитуда которых монотонно возрастает с полем (рис. 2в, 2д, 2ж).

При линейной поляризации ситуация кардинально меняется. При амплитуде переменного поля $h_0 > 20$ Э параметрический портрет колебаний вектора намагниченности начинает испытывать существенные искажения, вызванные модуляцией и сильной нелинейностью при больших амплитудах переменного магнитного поля. Колебания вектора намагниченности приобретают форму эллипса, ориентированного вдоль оси Ox , т.е. вдоль направления поляризации поля.

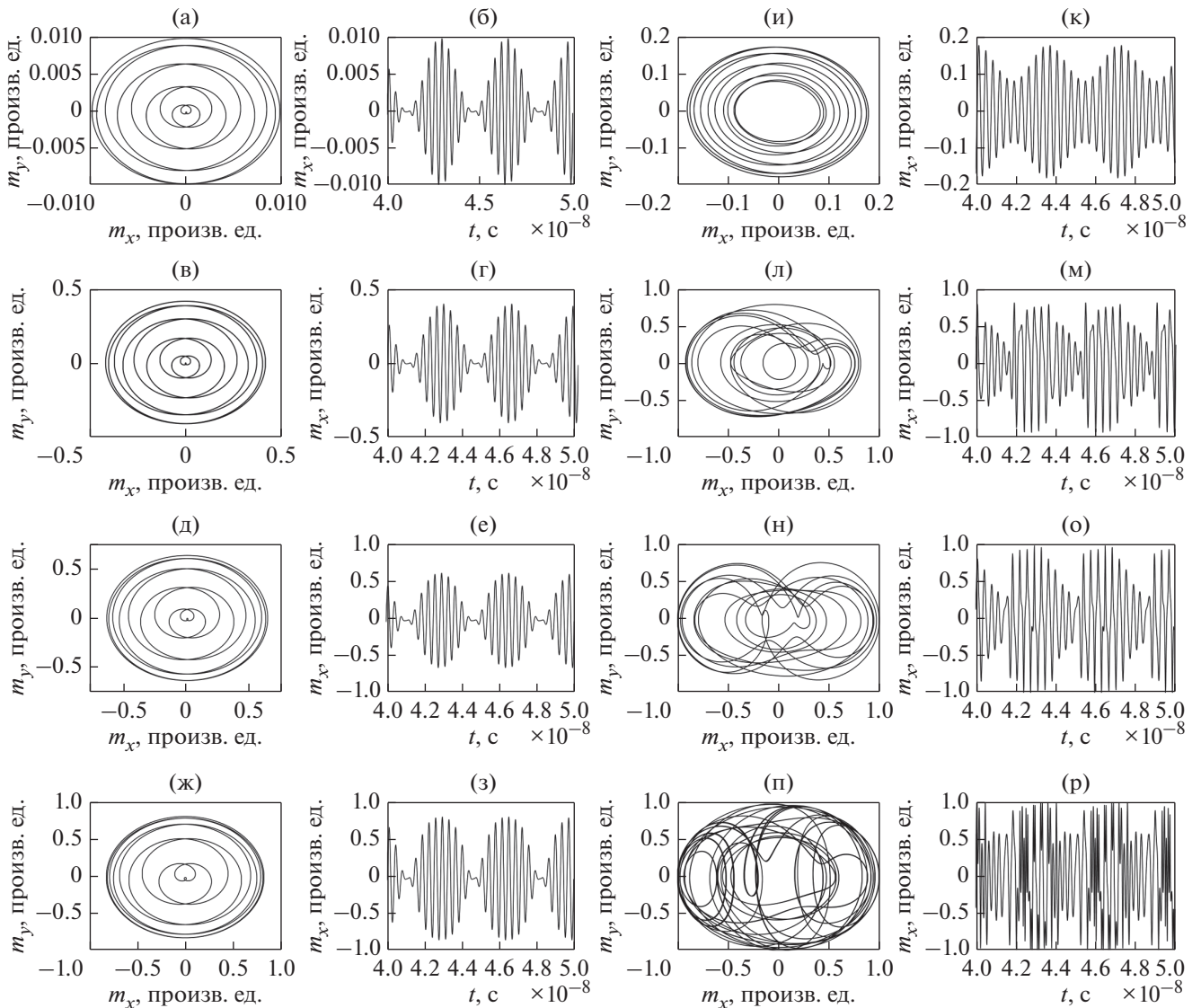


Рис. 2. Параметрические портреты и развитие колебаний намагниченности во времени при круговой поляризации переменного магнитного поля (а–з) и при линейной поляризации (и–р). Напряженность переменного магнитного поля $h_0 = 10$ Э – а, б, и, к; $h_0 = 500$ Э – ж, з, п, р; $h_0 = 1000$ Э – в, г, л, м; $h_0 = 2000$ Э – д, е, н, о.

При амплитуде поля более 300 Э растягивание эллипса вдоль оси поляризации приводит к образованию двух эллиптических траекторий движения вектора намагниченности, соединенных перемычкой, формирование которой завершается к $h_0 > 800$ Э. При этом режим колебаний становится сильно нелинейным, а раскрытие конуса прецессии колебаний намагниченности приближается к 90 град., т.е. прецессия намагниченности происходит в плоскости пленки (рис. 2л, 2м, 2н, 2о).

Дальнейшее увеличение амплитуды переменного поля приводит к усложнению траектории колебаний вектора намагниченности, которые становятся неустойчивыми и переходят в квазигармонический режим (рис. 2п, 2р).

Анализ спектров колебаний намагниченности, представленных на рис. 3, показал, что в случае круговой поляризации переменного поля колебания намагниченности возбуждаются на частоте возбуждения и боковых частотах модуляции, а при линейной поляризации поля уже при амплитудах переменного магнитного поля $h_0 > 20$ Э отмечается появление большого количества комбинационных частот.

Отметим, что согласно данным, представленным на рис. 2 и 3, можно сделать вывод о том, что амплитуда колебаний компонент вектора намагниченности при возбуждении магнитной подсистемы пленки линейно поляризованным магнитным полем больше (более 40%), чем в случае круговой поляризации.

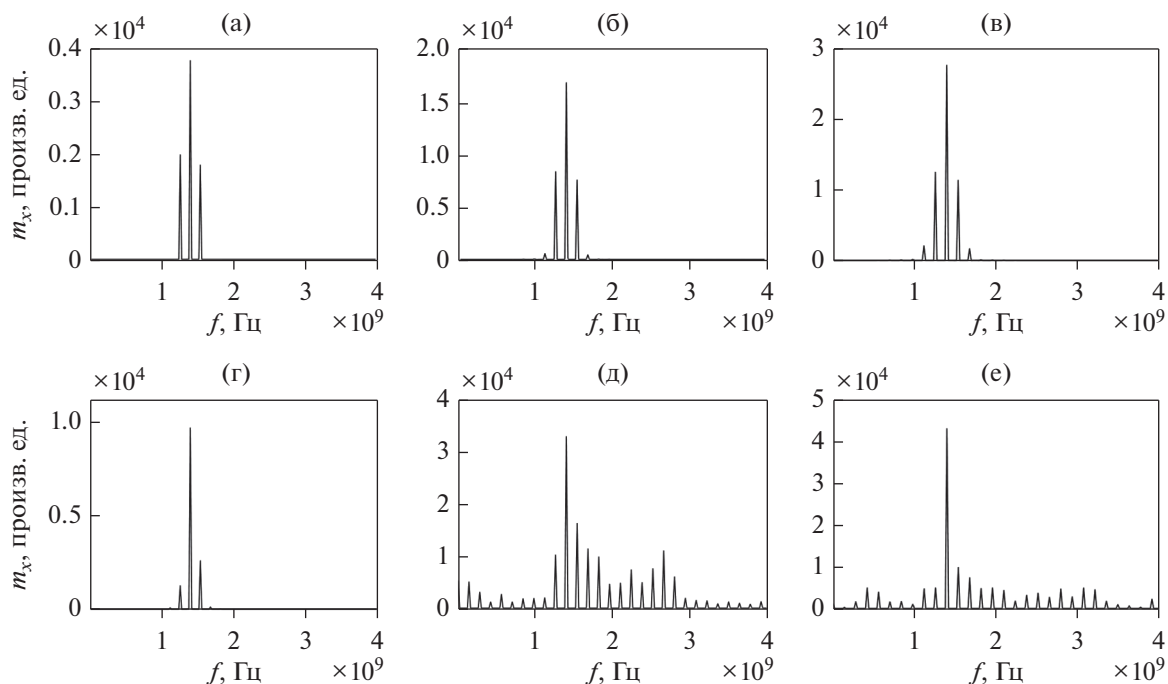


Рис. 3. Спектры колебаний намагниченности при круговой поляризации переменного магнитного поля – а, б, в и при линейной поляризации – г, д, е. Напряженность переменного магнитного поля $h_0 = 10$ Э – а, г, $h_0 = 500$ Э – б, д, $h_0 = 1000$ Э – в, е.

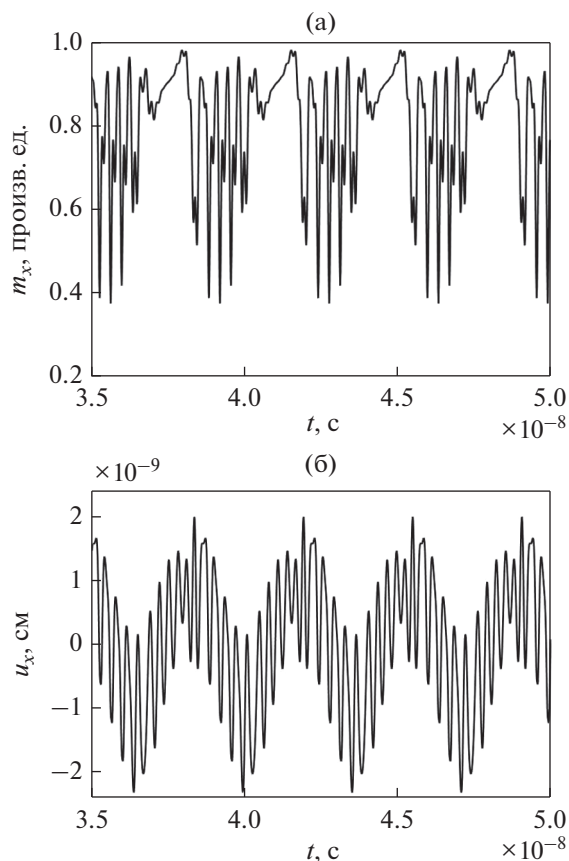


Рис. 4. Колебания намагниченности m_z (а) и упругого смещения u_x (б) при амплитуде переменного поля $h_0 = 500$ Э.

Рассмотрим динамику колебаний упругого смещения магнитной пленки при возбуждении амплитудно-модулированным переменным магнитным полем. При этом ограничимся случаем линейной поляризации поля, как наиболее эффективным для накачки магнитной подсистемы.

В первую очередь необходимо обратить внимание на то, что колебания компоненты вектора намагниченности m_z имеют четко выраженную составляющую на частоте модуляции (рис. 4а), что с учетом (5) позволяет предположить наличие существенного вклада продольных колебаний намагниченности в поперечные упругие смещения. Таким образом, продольная компонента намагниченности, осциллируя на частоте модуляции, возбуждает поперечные колебания компоненты упругого смещения.

Представленные на рис. 5 графики демонстрируют развитие колебаний упругого смещения с увеличением амплитуды переменного поля.

При значениях амплитуды переменного поля менее 20 Э, колебания упругого смещения следуют за колебаниями намагниченности в установившемся режиме, а их спектры соответствуют рис. 3г.

Дальнейшее увеличение амплитуды колебаний магнитного поля приводит к возникновению нелинейных режимов колебаний, и при значениях поля $h_0 > 200$ Э увеличивается амплитуда колебаний упругого смещения в области неустойчивости

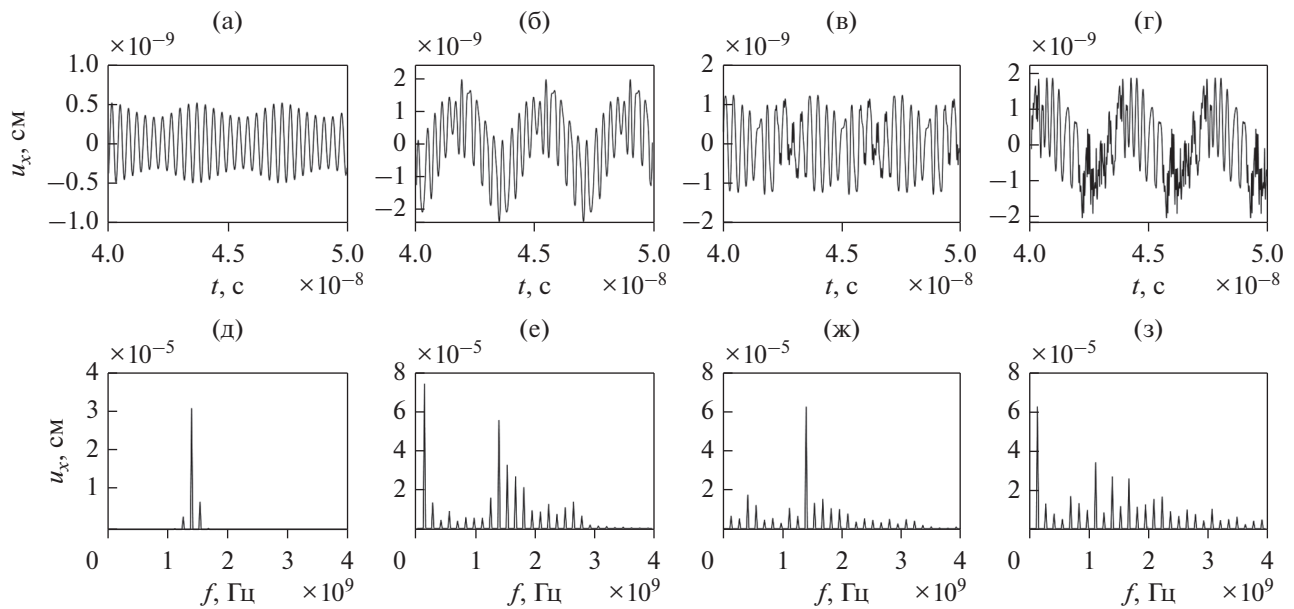


Рис. 5. Развитие колебаний упругого смещения при линейной поляризации переменного магнитного поля (а–г) и спектры этих колебаний (д–з). Напряженность переменного магнитного поля $h_0 = 10$ Э (а, д), $h_0 = 500$ Э (б, е), $h_0 = 1000$ Э (в, ж), $h_0 = 2000$ Э (г, з).

на частоте модуляции, соответствующей частоте акустического резонанса пленки (рис. 5е).

При значениях переменного магнитного поля в диапазоне $h_0 = 700\text{--}1000$ Э в спектре колебаний компонент вектора намагниченности происходит увеличение количества комбинационных составляющих в области верхней боковой частоты (рис. 2е), что приводит к перераспределению энергии в спектре колебаний упругого смещения: уменьшению амплитуды колебаний на частоте акустического резонанса, равной частоте модуляции, и росту амплитуды на несущей частоте возбуждения (рис. 5в, 5ж).

После насыщения магнитной подсистемы динамика колебаний упругой подсистемы возвращается к увеличению амплитуды колебаний на частоте модуляции. Однако при амплитуде поля более $h_0 = 1600$ Э начинают возникать квазигармонические колебания упругого смещения, обусловленные сильной нелинейностью системы, что приводит к уменьшению амплитуды колебаний упругого смещения на частотах, близких к несущей частоте переменного магнитного поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены колебания магнитной и упругой подсистем магнитной пленки, возбужденные амплитудно-модулированным переменным магнитным полем, а также показана возможность выделения на упругой подсистеме частоты модуляции за счет резонансных магнитоакустических свойств пленки.

Выявлена роль поляризации возмущающего магнитного поля при детектировании. Определено, что эффективное детектирование сигнала на частоте модуляции, совпадающей с частотой акустического резонанса, возможно в нелинейных режимах работы магнитоупругой системы при амплитудах переменного магнитного поля $h_0 > 200$ Э, за исключением диапазона амплитуд магнитного поля, соответствующих насыщению магнитной подсистемы и раскрытию конуса прецессии на угол 90 град.

Показано, что значительное влияние на процесс детектирования оказывает эффективное возбуждение продольной компоненты намагниченности m_z , частота биений которой совпадает с частотой модуляции и частотой акустического резонанса пленки.

Исследование выполнено при поддержке Правительства Республики Коми и Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ и Правительства Республики Коми, № 20-42-110004, p_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kikuchi E.* The ultra-sound converters. M.: Mir, 1972.
2. *Comstock R.L., LeCraw R.C.* Generation of microwave elastic vibrations in a disk by ferromagnetic resonance // *J. Appl. Phys.* 1963. V. 34. № 10. P. 3022–3027.
3. *Sementsov D.I., Shutuy A.M.* Nonlinear regular and stochastic dynamics of magnetization in thin-film structures // *Physics Uspekhi.* 2007. V. 50. № 8. P. 793.
4. *Dreher L., Weiler M., Pernpeintner M., Huebl H., Gross R., Brandt M.S., Goennenwein S.T.B.* Surface acoustic wave

- driven ferromagnetic resonance in nickel thin films: theory and experiment // *Phys. Rev. B*. 2012. V. 86. №13. P. 134415(13).
5. *Bigot J.V., Vomir M.* Ultrafast magnetization dynamics of nanostructures // *Ann. Phys. (Berlin)*. 2013. V. 525. № 1–2. P. 2–30.
 6. *Walowski J., Münzenberg M.* Perspective: Ultrafast magnetism and THz spintronics // *J. Appl. Phys.* 2016. V. 120. № 14. P. 140901(16).
 7. *Wei-Gang Yang, Holger Schmidt.* Acoustic control of magnetism toward energy-efficient applications // *Appl. Phys. Rev.* 2021. V. 8. P. 021304.
 8. *Kim S.-K.* Micromagnetic computer simulations of spin waves in nanometer-scale patterned magnetic elements // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010. V. 43. P. 264004(25).
 9. *Власов В.С., Плешев Д.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И.* Нелинейное детектирование магнитоупругих колебаний в режиме амплитудной модуляции // *Журн. радиоэлектроники*. 2019. № 3. С. 1–68.
 10. *Pleshev D.A., Asadullin F.F., Poleshikov S.M., Vlasov V.S., Kotov L.N., Shavrov V.G., Shcheglov V.I.* Investigation of nonlinear dynamics of magnetoelastic oscillations in normal magnetized ferrite plate // *Solid State Phenomena*. 2015. V. 233–234. P. 471–475.
 11. *Pleshev D., Asadullin F., Poleshchikov S., Vlasov V., Kotov L., Shavrov V., Shcheglov V.* Conditions for division and multiplication of frequencies in ferrite // *EPJ Web of Conferences. Moscow International Symposium on Magnetism, MISM*. 2017, 2018. P. 02004.