

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ  
СВОЙСТВА

УДК 539.216.2:537.622

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА НАМАГНИЧЕННОСТИ  
И УПРУГОГО СМЕЩЕНИЯ ПЛЕНКИ ЖИГ  
ПРИ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ  
ПЕРЕМЕННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

© 2023 г. Д. А. Плешев<sup>a, b, \*</sup>, Ф. Ф. Асадуллин<sup>a</sup>, В. С. Власов<sup>b</sup>, Л. Н. Котов<sup>b</sup>  
<sup>a</sup>СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, Институтский переулок, 5 Литер У, Санкт-Петербург, 192021 Россия  
<sup>b</sup>СГУ им. Питирима Сорокина, Октябрьский просп., 55, Сыктывкар, 167001 Россия

\*e-mail: dpleshev@gmail.com

Поступила в редакцию 26.09.2022 г.

После доработки 17.11.2022 г.

Принята к публикации 30.11.2022 г.

Исследуется нелинейная динамика магнитной и упругой подсистем пленки железо-иттриевого граната, возбуждаемая переменным частотно-модулированным магнитным полем. Рассмотрена возможность детектирования частотно-модулированного сигнала на СВЧ пленочном магнитоотрицательном преобразователе. Определена зависимость возбуждения колебаний вектора намагниченности и упругого смещения от материальных параметров и параметров возбуждения.

*Ключевые слова:* детектирование колебаний, магнитоотрицательные преобразователи, магнитные пленки, магнитоакустика, нелинейные колебания

DOI: 10.31857/S0015323022601362, EDN: KWBMBS

## ВВЕДЕНИЕ

Традиционными инструментами возбуждения мощных ультразвуковых колебаний являются магнитоотрицательные преобразователи, которые применимы для обработки сигналов СВЧ, тогда как эффективность полупроводниковых устройств в данном диапазоне ограничивается высокой межэлектродной емкостью [1].

Появление магнитоотрицательных преобразователей на основе железоиттриевого граната (ЖИГ) со значительной механической добротностью открыло ряд перспектив для применения в широком спектре радиотехнических устройств на их основе [2, 3].

В последнее время значительное внимание обращено как на проблематику возбуждения и исследования динамики магнитоупругих колебаний, генерируемых сверхкороткими импульсами [4, 5], так и на традиционную обработку сигналов в СВЧ-диапазоне [6].

Однако открытым остается вопрос приема сверхкоротких волн и выделения из СВЧ-сигнала передаваемой в нем информации.

Использование магнитоупругих детекторов частотно-модулированных сигналов позволяет снять большинство ограничений по эффективности приема, а использование детектором геометрии тонкой нормально намагниченной пленки

позволяет избежать влияния обменных спиновых волн при их параметрическом возбуждении [7].

Общая схема детектирования частотно-модулированного сигнала на магнитоотрицательном детекторе подробно описана в работах [8, 9]. Однако зависимость динамики магнитной и упругой подсистемы от типа поляризации возмущающего переменного магнитного поля, характер параметрических поретров намагниченности и упругого смещения и анализ АЧХ этих колебаний приведены лишь частично, а процесс детектирования при амплитуде переменных магнитных полей свыше  $1 \text{ Э}$  не рассматривали.

Настоящая работа посвящена исследованию динамики колебаний компонент намагниченности и упругого смещения при возбуждении переменным модулированным по частоте магнитным полем, а также выявлению режимов и анализу различных характеристик этих колебаний в различных условиях возбуждения.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Изображение плоскопараллельной однослойной монокристаллической пленки железо-иттриевого граната, помещенной в направленное по нормали к плоскости пленки постоянное магнитное поле  $\mathbf{H}_0$ , представлено на рис. 1. Задача решается в декартовой системе координат, и на-

правление поля  $\mathbf{H}_0$  совпадает с положительным направлением оси  $Oz$ . Переменное частотно-модулированное магнитное поле  $\mathbf{h}_0$  лежит в плоскости пленки. Поверхности пленки имеют координаты  $x = \pm d/2$ , где  $d$  – толщина пленки.

Пусть полная плотность энергии ферромагнитной пленки  $U$  в магнитном 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 параметрах модели 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]:

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

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

где  $\gamma$  – гиромагнитная постоянная,  $\alpha$  – параметр магнитного затухания,  $\rho$  – плотность материала пластины,  $\beta$  – параметр упругого затухания.

Граничные условия выглядят следующим образом:

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

Частотная модуляция для возмущающего переменного магнитного поля вводится в классическом виде [2, 3]:

$$h_x = h_0 \sin[2\pi f_0 t + C_m \sin(2\pi f_m t)], \quad (6)$$

$$h_y = -h_0 \cos[2\pi f_0 t + C_m \sin(2\pi f_m t)], \quad (7)$$

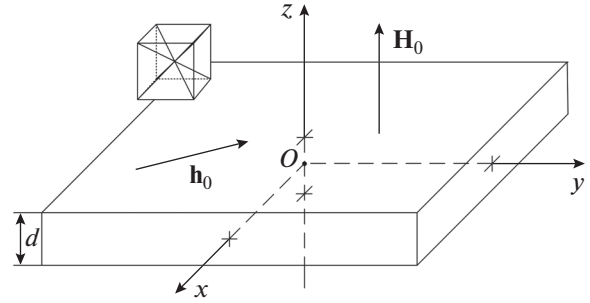


Рис. 1. Геометрия задачи.

где  $C_m$  – коэффициент модуляции или, по аналогии с амплитудной модуляцией, глубина модуляции,  $f_0$  – несущая частота,  $f_m$  – частота модуляции. При этом

$$\Delta f = C_m f_m, \quad (8)$$

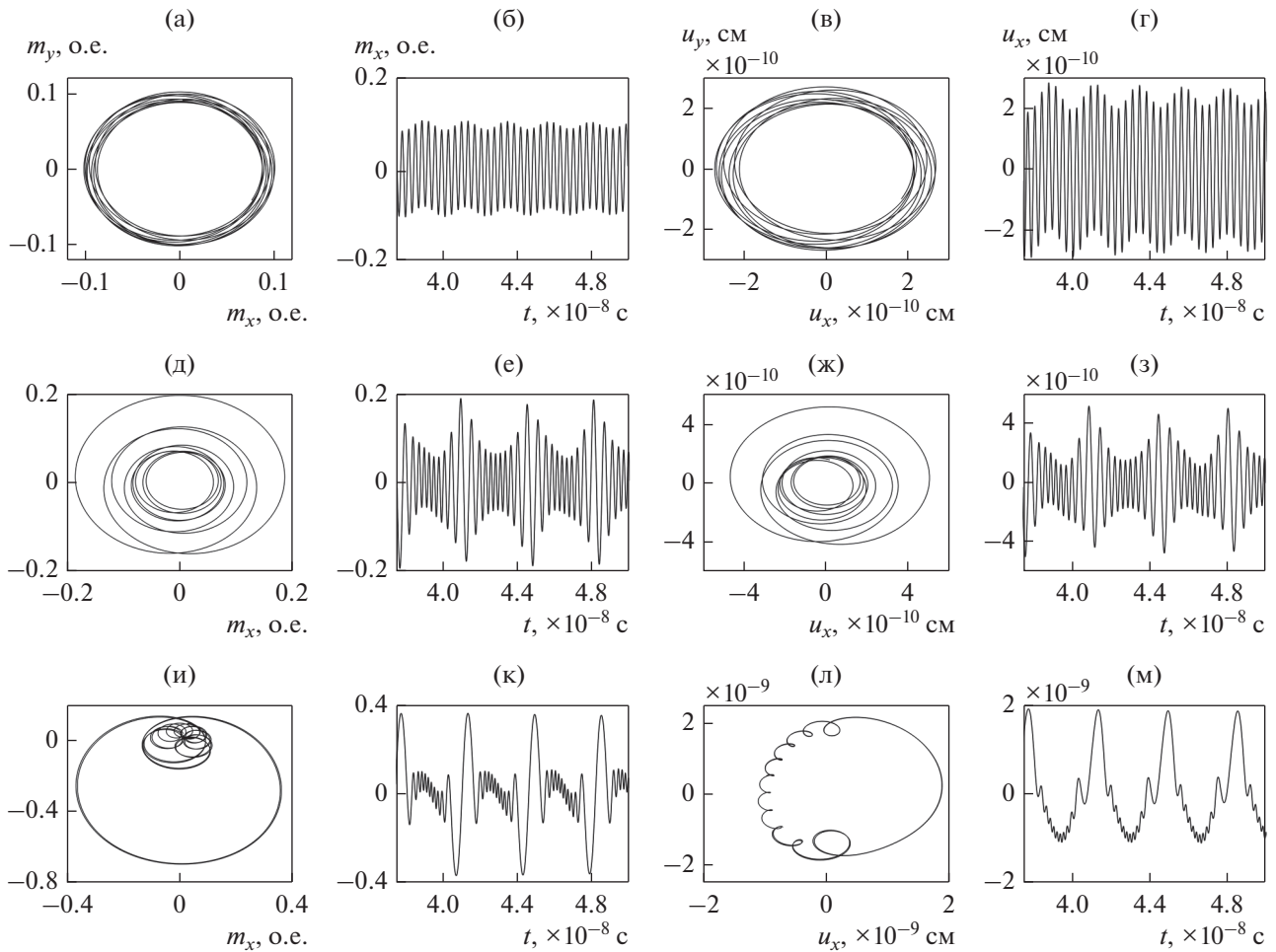
где  $\Delta f$  – частотное отклонение, или девиация частоты.

Материальные параметры пленки выбраны характерными для железиттриевого граната (ЖИГ):  $M_0 = 139$  Гс,  $H_0 = 2750$  Э. Параметры диссипации магнитной и упругой подсистемы взяты равными  $\alpha = 0.02$  и  $\beta = 2 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$  соответственно, что больше реальных значений, но обеспечивает быструю релаксацию магнитной и упругой подсистем. Константа магнитоупругого взаимодействия  $B_2 = 6.96 \times 10^6 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3}$ , константа (модуль) упругости  $c_{44} = 7.64 \times 10^{11} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3}$ , напряженность переменного магнитного поля принимает значения от 1 до  $10^3$  Э. Частота ФМР равна несущей частоте частотно-модулированного поля и составляет 2800 МГц, а частота модуляции равна частоте акустического резонанса при толщине пленки 6.865 мкм, что соответствует 280 МГц. Коэффициент модуляции  $C_m$  принимает значения от 0.5 до 12 с шагом 0.5.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим динамику магнитной и упругой подсистем на примере колебаний компонент вектора намагниченности и упругого смещения точки на верхней плоскости пленки в зависимости от поляризации и амплитуды переменного частотно-модулированного магнитного поля.

Как показал анализ результатов исследования, изменение напряженности модулированного по частоте переменного магнитного поля в диапазоне значений от 1 до  $10^3$  Э не оказывает существенного влияния на характер колебаний намагниченности и упругого смещения. Происходит исключительно увеличение угла прецессии намагниченности и амплитуды колебаний упру-



**Рис. 2.** Параметрические портреты и развертки во времени колебаний намагниченности (а, б, д, е, и, к) и упругого смещения (в, г, ж, з, л, м) при круговой поляризации переменного магнитного поля при различной глубине модуляции. Напряженность переменного магнитного поля  $h_0 = 500$  Э, глубина модуляции  $C_m = 0.5$  (а–г),  $C_m = 4$  (д–з),  $C_m = 12$  (и–м). Режимы: Режим I (а–г); Режим II (д–з); Режим III (и–м).

го смещения, что соответствует результатам исследования для магнитных полей с амплитудами напряженности до 1 Э [8].

При этом существенное влияние на характер колебаний и нелинейность системы оказывает не высокая амплитуда возбуждения, а большая глубина модуляции  $C_m$ .

При малых значениях глубины модуляции до  $C_m = 1.5$  при круговой поляризации магнитного поля параметрические портреты колебаний намагниченности (рис. 2а) и упругого смещения (рис. 2в) представляют собой окружность, при этом нулевые линии этих колебаний испытывают периодическое смещение по гармоническому закону с частотой модуляции (рис. 2б, 2г). Данный режим колебаний упругого смещения нулевой линии назовем Режим I.

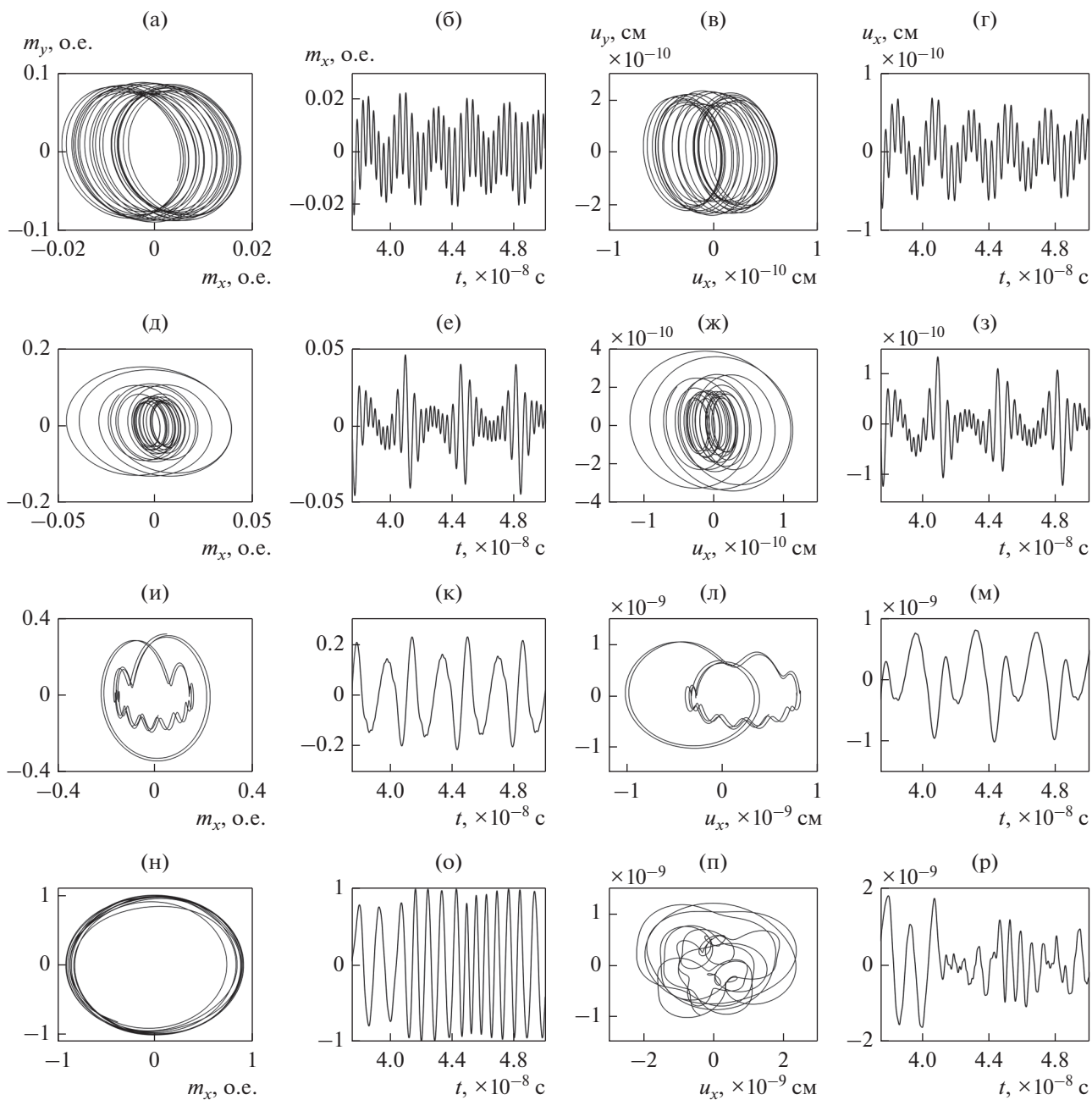
Дальнейшее увеличение глубины модуляции до значений  $C_m = 5$  приводит к смене режима ко-

лебаний, который аналогичен амплитудно-частотной модуляции, т.е. одновременно реализуется изменение амплитуды и фазы — Режим II.

Последующее увеличение глубины модуляции  $C_m > 5$  приводит к установлению режима детектирования — Режим III. В данном режиме составляющая на несущей частоте  $f_0$  резко уменьшается, а составляющая на частоте модуляции  $f_m$  растет по амплитуде. Таким образом, реализуется детектирование модулированного по частоте сигнала, при этом параметрические портреты колебаний намагниченности и упругого смещения принимают фракталоподобный характер (рис. 2и, 2л).

Рассмотрим аналогичную систему, но при возбуждении линейно поляризованным магнитным полем.

Линейная поляризация приводит в Режиме I и II к значительным смещениям нулевой линии колебаний относительно нулевых осей (рис. 3а, 3в,



**Рис. 3.** Параметрические портреты и развертки во времени колебаний намагниченности (а, б, д, е, и, к, н, о) и упругого смещения (в, г, ж, з, л, м, п, р) при линейной поляризации переменного магнитного поля при различной глубине модуляции. Напряженность переменного магнитного поля  $h_0 = 500$  Э (а–м),  $h_0 = 900$  Э (н–р), глубина модуляции  $C_m = 0.5$  (а–г),  $C_m = 4$  (д–з),  $C_m = 12$  (и–р). Режимы: Режим I (а–г); Режим II (д–з); Режим III (и–м); Режим IV (н–р).

Зд, Зж), что обуславливает существенные нелинейные искажения формы колебаний (рис. 3б, 3г, 3е, 3з) и затягивание релаксационных процессов.

Режим детектирования также претерпевает существенные изменения. На рис. 3и, 3к, 3л, 3м видно присутствие гармоники на удвоенной частоте модуляции, что обусловлено сменой направления вектора эффективного магнитного по-

ля  $\mathbf{H}_{\text{eff}}$  при линейной поляризации переменного поля  $\mathbf{h}_0$ .

Отметим, что при сохранении напряженности переменного поля  $h_0 = 500$  Э увеличение значения  $C_m$  приводит к увеличению амплитуды колебаний намагниченности и упругого смещения.

Несмотря на то что нелинейность системы в большей степени обусловлена глубиной модуля-

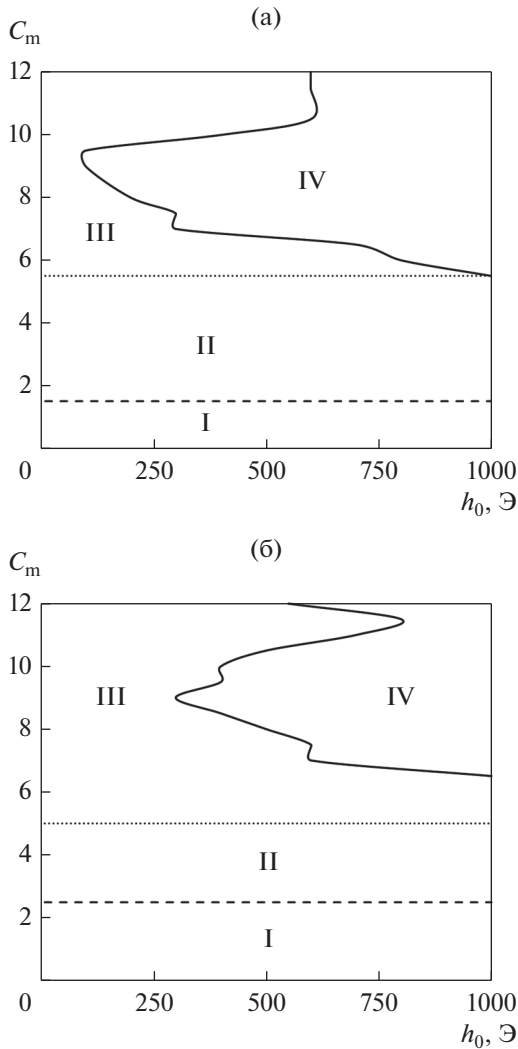


Рис. 4. Области установления режимов колебаний упругого смещения при круговой (а) и линейной (б) поляризации переменного магнитного поля. Римские цифры соответствуют реализуемому режиму.

ции, при амплитудах переменного поля  $h_0 > 600$  Э, т.е. в сильно нелинейном случае, как в случае круговой, так и в случае линейной поляризации реализуется режим квазихотических колебаний – Режим IV (рис. 3г, 3р).

Зависимость установления соответствующих режимов колебаний от напряженности переменного магнитного поля и глубины модуляции представлена на рис. 4. Из рис. 4а, 4б видно, что границы между Режимом I, II и III расположены линейно относительно глубины модуляции. Отметим тот факт, что граница между Режимом III и IV имеет сложную форму и достаточно условна, т.к. только при полях до  $h_0 \sim 700$  Э возможна реализация детектирования сигнала, а при больших

полях их нелинейный вклад делает невозможным детектирование сигнала.

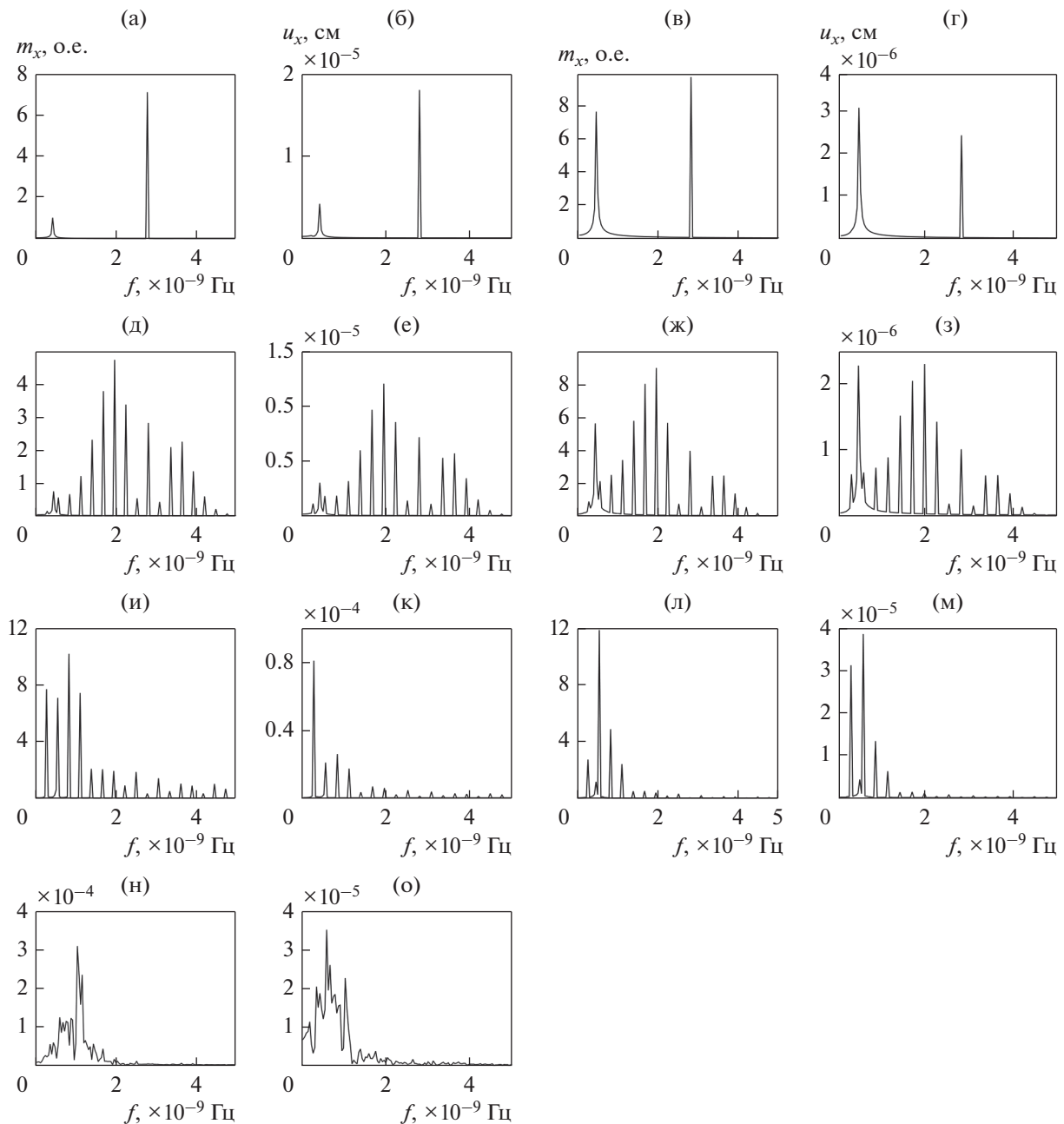
Анализ спектров колебаний намагниченности при круговой и линейной поляризации переменного магнитного поля, представленных на рис. 3 и 4, показал, что в случае реализации Режим I для круговой и линейной поляризации (рис. 5а–5г) переменного поля колебания намагниченности и упругого смещения возбуждаются на частоте, соответствующей несущей частоте  $f_0 = 2800$  МГц, и на частотах, находящихся в окрестности 440 МГц. Вторая область неустойчивости соответствует частотам девиации, в которых находится система при максимальном отклонении вектора намагниченности и упругого смещения от нулевой линии. Детектирование в данном режиме не реализуется.

В Режиме II, как видно из рис. 5д–5з, спектр обогащен большим количеством спутных и комбинационных частот. При этом составляющие спектра на несущей частоте возбуждения и частоте модуляции не играют существенной роли в формировании магнитных и упругих колебаний. Детектирование в данном режиме не реализуется.

Режим III также характеризуется большим количеством возбуждаемых комбинационных частот (рис. 5и–5м). Однако при круговой поляризации составляющая на частоте модуляции колебаний упругого смещения более чем в 3 раза превышает по уровню составляющие на других частотах, реализуя таким образом детектирование модулированного по частоте сигнала. При линейной поляризации переменного магнитного поля составляющая упругих колебаний на частоте модуляции также вносит значительный вклад, но уступает более чем на 20% по амплитуде колебаниям, реализуемым на удвоенной частоте модуляции  $2f_m$ . На спектрах колебаний компоненты намагниченности  $m_x$  при любой поляризации, благодаря обратной магнитоупругой связи, также присутствуют составляющие на частотах модуляции, но их вклад не позволяет реализовать детектирование на магнитной подсистеме. Это характерно и для случая линейной поляризации, когда составляющая на удвоенной частоте более чем в 2 раза превышает по амплитуде вклад других частот.

При реализации режима хаотических колебаний – Режим IV (рис. 5н, 5о) спектр колебаний компоненты вектора намагниченности  $m_x$  и упругих колебаний  $u_x$  становится непрерывным, составляющие на частоте модуляции и несущей частоте значительно уступают по амплитуде другим возбуждаемым частотам. Детектирование в данном режиме реализуется около границы с Режимом III.





**Рис. 5.** Спектры колебаний компоненты намагниченности (а, в, д, ж, и, л, н) и упругого смещения (б, г, е, з, к, м, о) при круговой (а, б, д, е, и, к) и линейной (в, г, ж, з, л, м, н, о) поляризации переменного магнитного поля при глубине модуляции  $C_m = 0.5$  (а–г),  $C_m = 4$  (д–з),  $C_m = 12$  (и–о). Напряженность переменного магнитного поля  $h_0 = 500$  Э (а–м),  $h_0 = 900$  Э (н, о).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена возможность использования нелинейной динамики намагниченности и упругого смещения для осуществления детектирования частотно модулированного переменного магнитного поля, путем выделения на упругой подсистеме частоты модуляции за счет резонансных магнитострикционных свойств пленки.

Выявлено, что при малых значениях глубины модуляции  $C_m < 5.5$  при круговой поляризации и  $C_m < 5$  при линейной поляризации переменного магнитного поля невозможна реализация детектирования. Это связано с тем, что амплитуда детектируемых колебаний на частоте модуляции меньше амплитуд колебаний, возбуждаемых на частоте модуляции, комбинационных и спутниковых частотах.

Определены 4 режима колебаний упругого смещения и области их реализации в зависимости от напряженности переменного поля и глубины модуляции. Выявлено, что только в двух режимах из четырех возможна реализация детектирования.

Установлено, что для высоких значений напряженности переменного магнитного поля от 1 до  $10^3$  Э эффект детектирования является нелинейным по глубине модуляции, а не по амплитуде поля.

Выявлено, что при глубине модуляции  $C_m > 6$  и амплитудах напряженности переменного поля  $h_0 > 200$  Э для круговой поляризации и  $h_0 > 300$  Э для линейной поляризации наблюдается хаотизация колебаний намагниченности и упругого смещения. Это приводит к тому, что детектирование в рамках этого режима нестабильно и реализуется только вблизи границы с режимом детектирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-20048).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Голямина И.П.* Магнестрикционные излучатели из ферритов / Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 1. Источники мощного ультразвука / Под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука. 1967. С. 111–206.
2. *Eshbach J.R.* Spin-wave propagation and the magnetoelastic interaction in yttrium iron garnet / J.R. Eshbach // JAP. 1963. V. 34. № 4. P. 1298.
3. *Eggers F.G., Strauss W.A.* UHF delay line using single-crystal yttrium iron garnet // JAP. 1963. V. 34. № 4. P. 1180.
4. *Калашикова А.М., Кимель А.В., Писарев Р.В.* Сверхбыстрый оптомагнетизм // УФН. 2015. V. 185. № 10. P. 1064–1076.
5. *Yang W.G., Schmidt H.* Acoustic control of magnetism toward energy-efficient applications // Appl. Phys. Rev. 2021. V. 8. P. 021304.
6. *Локк Э.Г., Герус С.В., Анненков А.Ю.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 10. С. 1089.
7. *Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Темирязов А.Г., Тихомирова М.П.* Основная мода нелинейного спин-волнового резонанса в нормально намагниченных ферритовых пленках // ФТТ. 2000. Т. 42. № 6. С. 1062.
8. *Власов В.С., Плешев Д.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И.* Детектирование частотно-модулированного СВЧ сигнала с помощью магнестрикционного преобразователя // Журн. радиоэлектроники. 2020. № 7. С. 1–41.
9. *Плешев Д.А., Асадуллин Ф.Ф., Власов В.С., Щеглов В.И.* Детектирование модулированных магнитных полей. Сыктывкар: СЛИ, 2022. 108 с.
10. *Pleshev D.A., Asadullin F.F., Poleshnikov 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. T. 233–234. P. 471–475.
11. *Pleshev D., Asadullin F., Poleshnikov 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. C. 02004.
12. *Харкевич А.А.* Основы радиотехники. М.: Физматлит, 2007. 560 с.