

УДК 539.216.2:537.62

ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ МАГНИТНОЙ ПЛЕНКИ НА ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

© 2023 г. Ф. Ф. Асадуллин¹, *, Д. А. Плешев^{1, 2}, В. С. Власов², В. И. Щеглов³

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

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

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук”, Москва, Россия
*E-mail: aff@sfi.komi.com

Поступила в редакцию 28.09.2022 г.

После доработки 27.10.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

Показана возможность использования магнитострикционного преобразователя для детектирования частотно-модулированного СВЧ-сигнала. Рассмотрены колебания намагниченности и упругие колебания ферритовой пленки с кристаллографической анизотропией. Анализируется влияние ориентации кристаллографической ячейки на динамику магнитоупругой системы, установление различных мод колебаний и процесс детектирования.

DOI: 10.31857/S0367676522700673, EDN: HGHRMU

ВВЕДЕНИЕ

Более полувека магнитострикционные преобразователи на основе ферритовых материалов используются для генерации ультразвуковых колебаний и находят применение в ультразвуковой технике, дефектоскопии и акустоэлектронике [1, 2]. Синтезирование железоиттриевого граната, благодаря целому набору уникальных свойств, в том числе узкой линии ФМР, высокой акустической добротности, низкому затуханию спиновых волн и высокой температуре Кюри, позволили создать широкий ряд магнитоакустических устройств, обеспечивающих высокую эффективность в диапазоне СВЧ [3, 4]. Использование геометрии нормально намагниченной тонкой пластины позволило увеличить мощность возбуждаемых гиперзвуковых колебаний и избежать возбуждения обменных спиновых волн [5–7].

В последнее время внимание исследователей обращено как на возбуждение спиновых волн за счет магнитострикции в схеме “накачки-зонда” при воздействии на ферритовую пленку мощным импульсом света от фемтосекундного лазера [8, 9], так и на традиционную обработку аналоговых сигналов СВЧ диапазона [10].

В работах [11, 12] рассмотрена возможность использования таких преобразователей для детектирования СВЧ сигналов, модулированных по амплитуде, а в работе [13] подобная задача рассмотрена для случая частотной модуляции в линейном режиме, то есть для случая малой амплитуды сигнала.

В настоящей работе рассмотрено влияние кристаллографической анизотропии ферритовых пленок на детектирование частотно-модулированного сигнала высокого уровня, то есть в условиях сильной нелинейности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве детектора переменного частотно-модулированного магнитного поля используем плоскостепенную монокристаллическую пленку ЖИГ. Декартову систему координат выберем таким образом, чтобы ее начало располагалось в центре пленки, плоскость Oxy лежала в плоскости пленки, а поверхности пленки имели координаты $z = \pm d/2$, где d – толщина пленки. Поместим пленку в постоянное магнитное поле $\vec{H}_0$, направленное в положительном направлении оси Oz . Пере-

менное частотно-модулированное магнитное поле $\vec{h}$ лежит в плоскости пленки.

Полную плотность энергии ферромагнитной пленки U в магнитном поле $\vec{H} = \{h_x, h_y, H_0\}$ определим как сумму энергий диполь-дипольного взаимодействия, зеемановской энергии, энергии кубической анизотропии, магнитоупругой и упругой энергий:

$$U = U_{dd} + U_{ze} + U_{an} + U_{me} + U_e. \quad (1)$$

Эффективное поле будет определяться как:

$$\vec{H}_{eff} = -\frac{\partial U}{\partial \vec{M}}. \quad (2)$$

Динамика намагниченности будет определяться уравнением Ландау–Лифшица с диссипативным членом в форме Гильберта:

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

где $\vec{M}$ – вектор намагниченности образца, γ – гиромагнитная постоянная, α – параметр магнитного затухания, M – модуль вектора намагниченности.

Упругие колебания будут определяться уравнением:

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

где u_i – компонента упругого смещения, ρ – плотность материала пленки, β – параметр упругого затухания, c_{44} – константа (модуль) упругости.

Компоненты тензора деформаций равны:

$$u_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right), \quad (5)$$

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

Для снижения сложности решения задачи введем два упрощения:

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

Частотная модуляция для возмущающего переменного магнитного поля вводится в классическом виде [13]:

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

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

где C_m – коэффициент модуляции или, по аналогии с амплитудной модуляцией, глубина модуля-

ции, f_0 – несущая частота, f_m – частота модуляции. При этом девиация частоты равна:

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

Материальные параметры пленки соответствуют железоиттриевому гранату: намагниченность насыщения $M_0 = 139$ Гс, константа магнитоупругого взаимодействия $B_2 = 6.96 \cdot 10^6$ эрг $\cdot$ см $^{-3}$, константа (модуль) упругости $c_{44} = 7.64 \cdot 10^{11}$ эрг $\cdot$ см $^{-3}$. Параметры диссипации магнитной и упругой подсистемы взяты равными $\alpha = 0.02$ и $\beta = 2 \cdot 10^8$ с $^{-1}$ соответственно, что больше реальных значений, но обеспечивает быструю релаксацию магнитной и упругой подсистем. Напряженность постоянного магнитного поля $H_0 = 2750$ Э. Напряженность переменного магнитного поля принимает значения от 1 до 10^3 Э. При указанных параметрах частота ФМР пленки ЖИГ равна несущей частоте f_0 частотно-модулированного поля и составляет 2800 МГц, а частота модуляции f_m 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

В работе рассмотрены три типа пленок: одна изотропная и две с кристаллографической анизотропией. Анизотропные пленки имеют ориентацию кристаллографической ячейки (далее – КЯ) [111] и [001].

Проведен анализ спектров колебаний и их разверток по времени для компоненты намагниченности m_x (рис. 1) и компоненты упругих колебаний u_x (рис. 2). Были выявлены пять различных режимов упругих колебаний, которые могут возникать при возбуждении пленки ЖИГ переменным частотно-модулированным магнитным полем.

Режим 1 – режим смещения нулевой линии. В данном режиме колебания намагниченности (рис. 1а) и упругие колебания (рис. 2а) представляют собой гармоническое колебание на несущей частоте возбуждения f_0 , нулевая линия которого осуществляет гармоническое колебание на частоте модуляции f_m . Упругие колебания следуют за колебаниями намагниченности в квазистатическом режиме, повторяя профиль колебаний и компоненты спектра.

Режим 2 – режим модуляции колебаний. Данный режим характеризуется периодическим изменением как амплитуды, так и фазы колебаний намагниченности (рис. 1б) и упругие колебания (рис. 2б), которые реализуются за счет периодического изменения мгновенной частоты и приводят к формированию амплитудно-частотных модулированных колебаний. Упругие колебания,

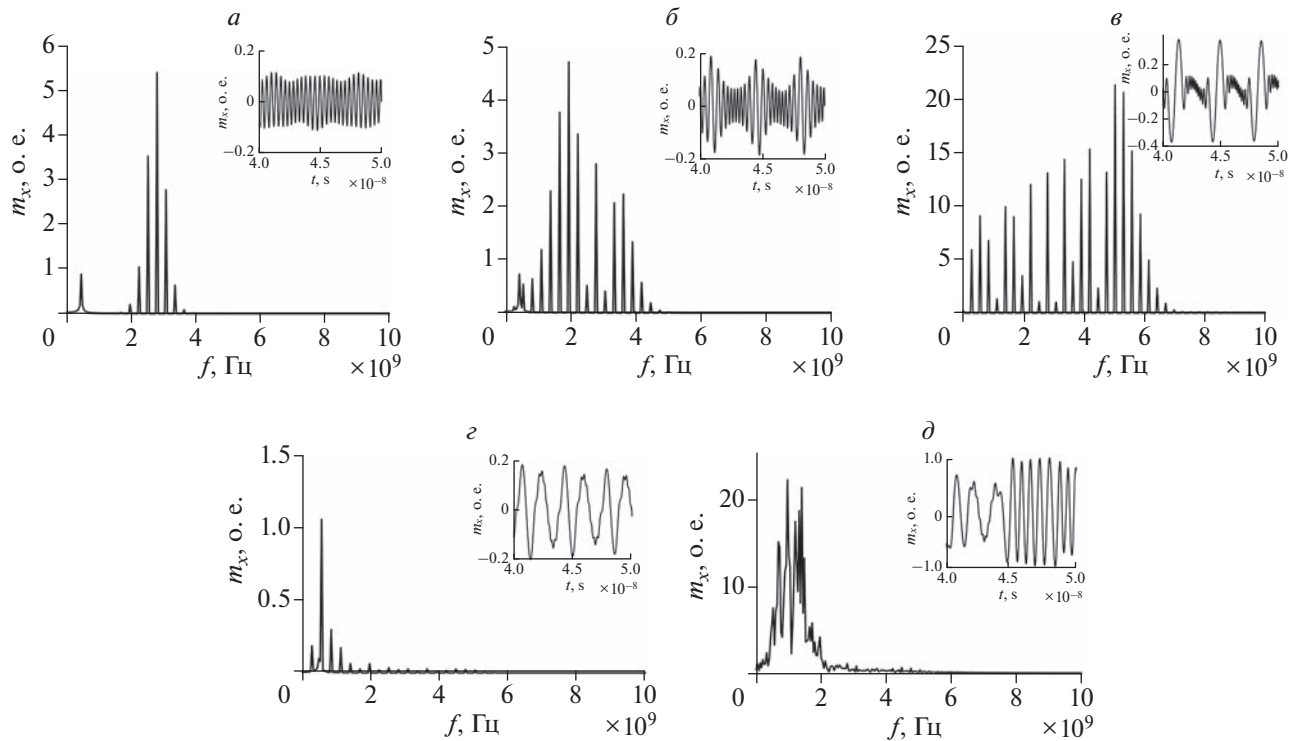


Рис. 1. Спектр и развертка по времени (врезка) колебаний компоненты намагниченности m_x . Напряженность переменного поля: $h_0 = 500$ Э (а, б, в, д), $h_0 = 100$ Э (з). Глубина модуляции: $C_m = 1$ (а), 4 (б), 8 (з, д), 10 (в). Изотропной пленке соответствуют эпюры (а, б), пленке с ориентацией КЯ [111] (в), пленке с ориентацией КЯ [001] (з, д).

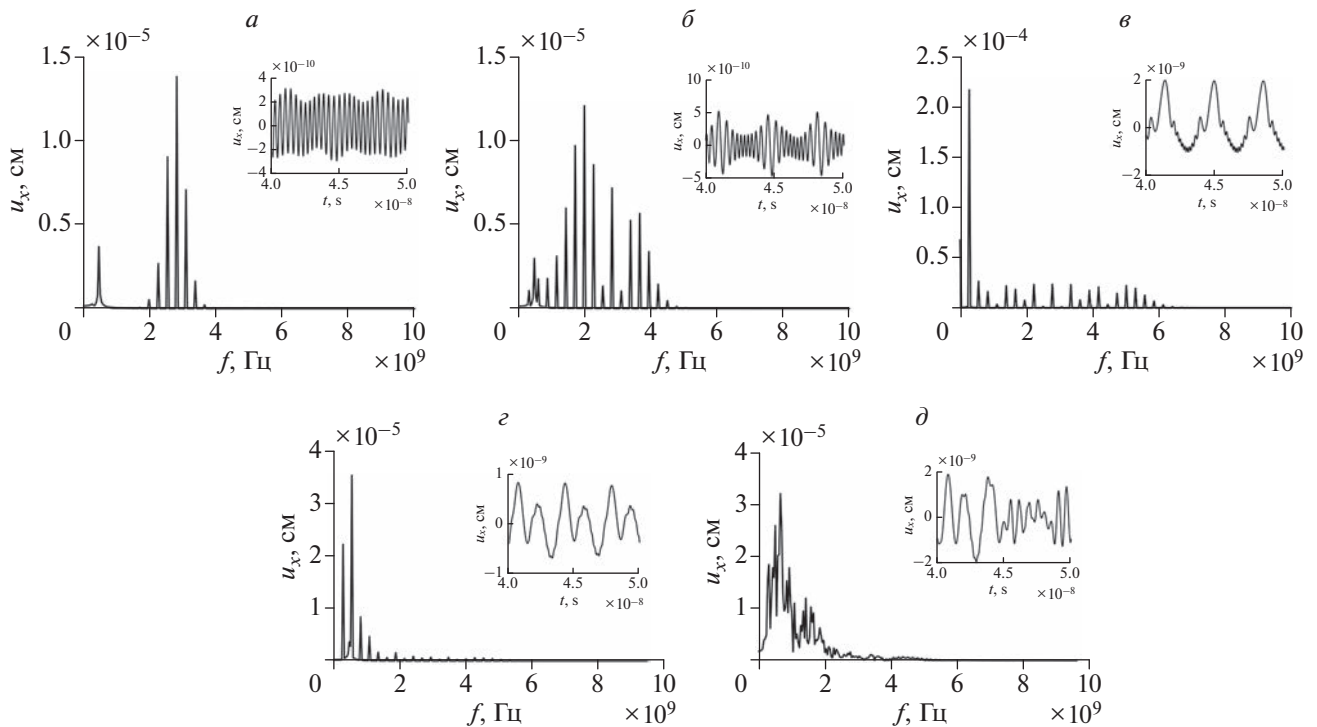


Рис. 2. Спектр и развертка по времени (врезка) колебаний компоненты упругого смещения u_x . Напряженность переменного поля: $h_0 = 500$ Э (а, б, в, д), $h_0 = 100$ Э (з). Глубина модуляции: $C_m = 1$ (а), 4 (б), 8 (з, д), 10 (в). Изотропной пленке соответствуют эпюры (а, б), пленке с ориентацией КЯ [111] (в), пленке с ориентацией КЯ [001] (з, д).

как и в режиме 1 следуют за колебаниями намагниченности. Развертки во времени колебаний компонент намагниченности и упругих колебаний представляют собой биения, реализующиеся с частотой модуляции f_m . При этом достижение максимальной амплитуды биениями сопровождается минимальной частотой колебаний, а минимальной амплитуды — максимальной частотой. Спектры колебаний намагниченности и упругих колебаний представляют собой несимметричный гауссиан со смещением в область низких частот (влево) экстремумом. Асимметрия спектра связана с возникновением паразитной амплитудной модуляции, что подтверждается графиком спектра, на котором область неустойчивости на несущей частоте $f_0 = 2.8 \cdot 10^9$ Гц сопровождается левой и правой боковыми составляющими, отстоящими от несущей частоты на частоту модуляции $f_m = 2.8 \cdot 10^8$ Гц.

Режим 3 — режим детектирования. Данный режим реализуется при значениях глубины модуляции $C_m > 4$. Колебания намагниченности в данном режиме, как и в режиме 2, реализуются в виде биений (рис. 1в). Однако их спектр также близок к несимметричному гауссиану, но уже со смещением в область высоких частот (вправо) экстремумом. Упругие колебания испытывают значительные изменения по сравнению с предыдущими режимами. Их амплитуда на частоте модуляции f_m увеличивается на порядок величины, а развертка во времени представлена большим по амплитуде гармоническим колебанием на частоте модуляции f_m , с малыми по амплитуде возмущениями (рис. 2в). Таким образом реализуется детектирование сигнала на частоте модуляции.

Режим 4 — режим детектирования с возбуждением колебаний на удвоенной частоте модуляции. Данный режим реализуется только при ориентации [001] кристаллографической ячейки и характеризуется тем, что и колебания намагниченности (рис. 1г), и упругие колебания (рис. 2г) осциллируют с большой амплитудой на удвоенной частоте модуляции $2f_m = 5.6 \cdot 10^8$ Гц, а колебания на частоте модуляции f_m могут быть равными им по амплитуде или меньше. При этом область неустойчивости спектров колебаний смещается в низкочастотную область.

Режим 5 — режим хаотизации колебаний (рис. 1д и 2д). Данный режим характеризуется непрерывным спектром в области частот ниже частоты возбуждения, что соответствует невозможности установления колебательного режима. Режим является сильно нелинейным и реализуется при больших значениях глубины модуляции C_m и амплитуды напряженности переменного магнитного поля h_0 .

На рис. 3 представлены зависимости реализации режимов упругих колебаний от глубины модуляции C_m и напряженности переменного магнитного поля h_0 для изотропной пленки (рис. 3а) и пленок с ориентацией КЯ [111] (рис. 3б) и [001] (рис. 3в). Отметим также, что в работе [13] показано, что при возбуждении тонкопленочных магнитоэлектрических преобразователей частотно-модулированным магнитным полем с большими амплитудами имеет место нелинейность не по амплитуде, а по девиации частоты возбуждающего сигнала. Это, как следует из (8), можно интерпретировать как нелинейности по глубине модуляции.

Из рис. 3 видно, что смена режимов приоритетно определяется значением глубины модуляции, т.к. границы смены режимов в большей степени ориентированы горизонтально. Однако границы существенно нелинейных режимов, таких как режим 5, зависят также от амплитуды напряженности поля.

Режим смещения нулевой линии (режим 1) реализуется для всех рассматриваемых амплитуд магнитного поля в диапазоне глубин модуляции $0.5 < C_m < 1.5$ (рис. 3а и 3в). Исключение представляет пленка с ориентацией КЯ [111], для которой верхняя граница глубины модуляции для данного режима составляет $C_m = 3.5$ (рис. 3б). Такое смещение границы режима определяется распределением энергии кристаллографической анизотропии от направления в кубической решетке. Вектор намагниченности под воздействием поля анизотропии совершает ориентационный переход к энергетически более выгодным состояниям, расположенным под углом к оси Oz , обеспечивая большие по амплитуде колебания намагниченности и упругие колебания на несущей частоте.

Режим 2 (режим модуляции) является переходным между режимом смещения нулевой линии и режимом детектирования. Для изотропной пленки и пленки с ориентацией КЯ [001] увеличение глубины модуляции и, следовательно, увеличение девиации частоты не оказывает значительного влияния на низкочастотную область спектра колебаний, как видно из рис. 3в, 3г. Однако в случае ориентации КЯ [111] поле анизотропии способствует увеличению амплитуды колебаний намагниченности во всем диапазоне частот, что определяет скачек через режим 2, область реализации которого смещается к низким амплитудам поля до $h_0 = 25$ Э (рис. 3б).

Режим детектирования (режим 3) является основным для пленок с ориентацией КЯ [111] для глубины модуляции $C_m > 3.5$, т.к. соответствует сваливанию траектории прецессии в потенциальные ямы поля анизотропии (рис. 3б). Однако для изотропных пленок в границах режима детектирования располагается режим хаотизации (рис. 3а),

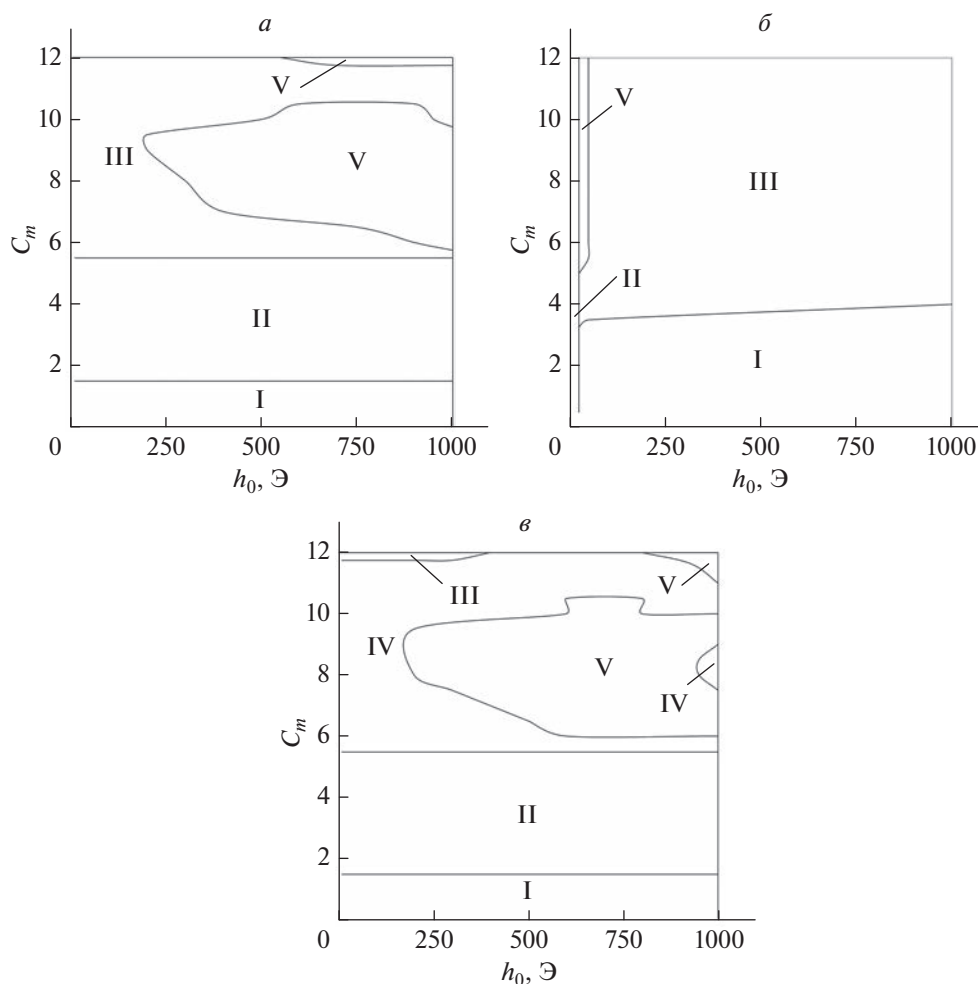


Рис. 3. Зависимость реализации режимов упругих колебаний от глубины модуляции C_m и амплитуды напряженности переменного магнитного поля h_0 : изотропная пленка (а), анизотропная пленка с ориентацией КЯ [111] (б) анизотропная пленка с ориентацией КЯ [001] (в). Римские цифры соответствуют номеру режима.

существенно ограничивающий возможности применения подобных пленок для детектирования частотно-модулированного сигнала при напряженностях поля $h_0 > 250 \text{ Э}$. Для пленок с ориентацией КЯ [001] данный режим является несущественным, т.к. реализуется только при значениях глубины модуляции $C_m > 11.5$ и напряженности магнитного поля $h_0 < 450 \text{ Э}$ (рис. 3в).

Режим 4 реализуется только в пленках с ориентацией КЯ [001] (рис. 3в). В данном режиме колебания намагниченности и упругие колебания являются нелинейными как по амплитуде, так и по глубине модуляции, благодаря чему возбуждаются комбинационные колебания на удвоенной частоте модуляции, соответствующей $2f_m = f_0 - 8f_m = 5.6 \cdot 10^8 \text{ Гц}$. Подробный анализ условий реализации данного режима остается вне рамок данной статьи и требует дополнительного исследования.

Режим возбуждения хаотических колебаний (режим 5), характерный для изотропных пленок (рис. 3а) и пленок с ориентацией КЯ [001] (рис. 3в), обусловлен в первую очередь частотной модуляцией регистрируемого сигнала, которая периодически выводит магнитную подсистему пленки из состояния ФМР, что приводит к периодическому срыву установления режима и хаотизации колебаний вектора намагниченности, что в свою очередь обуславливает хаотизацию динамики упругой подсистемы. При этом следует учитывать, что генерация таких колебаний возможна только в сильно нелинейном случае как по глубине модуляции $6 < C_m < 10.5$, так и по амплитуде напряженности намагниченности переменного магнитного поля $h_0 > 250 \text{ Э}$.

Рассмотрим зависимость амплитуд упругих колебаний от глубины модуляции и напряженности переменного магнитного поля, представленную на рис. 4. Из рисунка видно, что для всех ти-

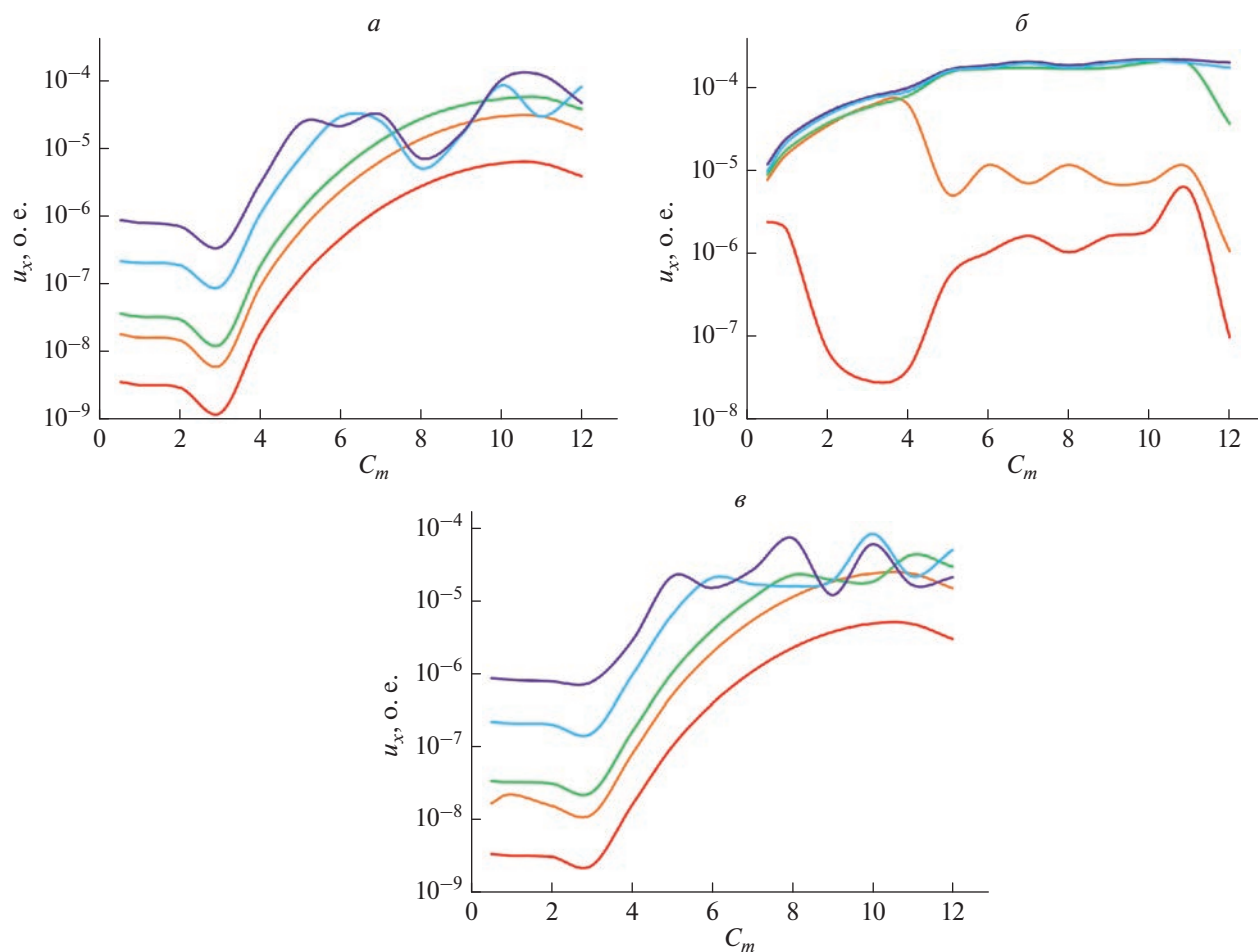


Рис. 4. Зависимость амплитуды упругих колебаний от глубины модуляции и напряженности переменного магнитного поля: изотропная пленка (а), анизотропная пленка с ориентацией КЯ [111] (б), анизотропная пленка с ориентацией КЯ [001] (в). Напряженность переменного поля: красная линия – $h_0 = 10$ Э, оранжевая – $h_0 = 50$ Э, зеленая – $h_0 = 100$ Э, голубая – $h_0 = 500$ Э, фиолетовая – $h_0 = 1000$ Э.

пов пленок амплитуда напряженности переменного поля $h_0 \approx 100$ Э является нерезкой границей перехода от нелинейных к сильно нелинейным режимам, т.е., характеристики упругих колебаний начинают зависеть не только от глубины модуляции, но и от напряженности переменного поля.

Еще одной границей качественной смены характеристик упругих колебаний для изотропных пленок и пленок с ориентацией КЯ [001] при возбуждении переменным магнитным полем с напряженностью до $h_0 < 100$ Э является глубина модуляции $C_m = 3$ (рис. 4а и 4в). Дальнейшее увеличение глубины модуляции вызывает плавное увеличение амплитуд упругих колебаний до глубины модуляции $C_m = 10.5$. Продолжающееся увеличение глубины модуляции приводит к уменьшению амплитуды упругих колебаний. При этом глобальный максимум и некоторая его окрестность для представленных кривых соответствуют режиму детектирования.

Увеличение напряженности переменного поля для изотропных пленок и пленок с ориентацией КЯ [001] приводит к появлению более сложных зависимостей амплитуды упругих колебаний от глубины модуляции. Локальные минимумы и прилегающая область на кривых, соответствующих напряженности переменного магнитного поля $h_0 > 100$ Э, соответствуют режиму хаотизации колебаний, а локальные максимумы и прилегающая область – режиму детектирования или режиму детектирования с возбуждением колебаний на удвоенной частоте модуляции.

Иные зависимости наблюдаются для пленок с ориентацией КЯ [111]. Из рис. 4б видно, что наличие большого количества локальных экстремумов соответствует режимам, реализующимся при низких амплитудах напряженности переменного поля $h_0 < 100$ Э, что соответствует режимам модуляции и хаотизации. Еще одним отличием является отсутствие при напряженностях поля $h_0 > 100$ Э

на зависимостях амплитуд ярко выраженных глобальных и локальных экстремумов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована возможность детектирования частотно-модулированного сигнала с использованием магнитострикционного преобразователя, построенного на базе тонкой пленки ЖИГ. Рассматриваются изотропные пленки и пленки с кристаллографической анизотропией, соответствующие ориентациям КЯ [111] и [001]. Для этих пленок выявлены пять режимов упругих колебаний, реализация которых зависит от параметров возбуждения, а именно от напряженности переменного магнитного поля и глубины модуляции.

Выявлено, что ферритовые пленки с ориентацией КЯ [001] не пригодны в качестве демодуляторов частотно-модулированного сигнала, т.к. область реализации режима модуляции в чистом виде крайне узка. Изотропные пленки также имеют существенные ограничения в области амплитуд напряженностей переменного магнитного поля $h_0 > 250$ Э, в связи с возникновением сильно нелинейного режима хаотизации.

Наиболее эффективными при детектировании частотно-модулированного сигнала являются анизотропные пленки с ориентацией КЯ [111]. Они имеют широкую область параметров возбуждения, позволяющих реализовать режим детектирования в чистом виде с возбуждением упругих колебаний большой амплитуды на частоте модуляции.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голямина И.П. Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 1. Источники мощного ультразвука. М.: Наука, 1967. С. 111.
2. Comstock R.L., LeCraw R.C. // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. No. 10. P. 3022.
3. Eshbach J.R. // JAP. 1963. V. 34. No. 4. P. 1298.
4. Schlömann E., Joseph R.I., Kohane T. // Proc. IEEE. 1965. V. 53. No. 10. P. 1495.
5. Семенцев Д.И., Шутый А.М. // УФН. 2007. Т. 177. № 8. С. 831; Sementsov D.I., Shutyi A.M. // Phys. Usp. 2007. V. 50. P. 793.
6. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Темирязов А.Г., Тихомирова М.П. // ФТТ. 2000. Т. 42. № 6. С. 1062; Gulyaev Yu.V., Zil'berman P.E., Temiryazev A.G., Tikhomirova M.P. // Phys. Solid State. 200. V. 42. No. 6. P. 1094.
7. Kirushev M.S., Vlasov V.S., Kotov L.N. et al. // Solid State Phenom. 2015. V. 233–234. P. 73.
8. Chang C.L., Tamming R.R., Broomhall T.J., Janusonis J. // Phys. Rev. Appl. 2018. V. 10. No. 3. Art. No. 034068.
9. Wei-Gang Yang, Holger Schmidt // Appl. Phys. Rev. 2021. V. 8. Art. No. 021304.
10. Локк Э.Г., Герус С.В., Анненков А.Ю. // Радиотехн. и электрон. 2018. Т. 63. № 10. С. 1089; Lokk E.G., Gerus S.V., Annenkov A.Yu. // J. Commun. Technol. Electron. 2018. V. 63. No. 10. P. 1197.
11. Чупров И.А., Асадуллин Ф.Ф., Плешев Д.А. и др. // Челябин. физ.-мат. журн. 2021. Т. 6. № 2. С. 237.
12. Плешев Д.А., Асадуллин Ф.Ф., Власов В.С. и др. // Физ. мет. и металловед. 2022. Т. 123. № 3. С. 320; Pleshev D.A., Asadullin F.F., Vlasov V.S. et al. // Phys. Metal. Metallogr. 2022. V. 123. No. 3. P. 276.
13. Власов В.С., Плешев Д.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. // Журн. радиоэлектрон. 2020. № 7. С. 8.

The influence of magnetic film anisotropy on the frequency-modulated signal detection

F. F. Asadullin^{a, *}, D. A. Pleshev^{a, b}, V. S. Vlasov^b, V. I. Shcheglov^c

^a Saint Petersburg State Forestry University, St. Petersburg, 194021 Russia

^b Syktyvkar State University, Syktyvkar, 167001 Russia

^c Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125009 Russia

*e-mail: aff@sfi.komi.com

We studied the possibility of using a magnetostriction converter for detecting a microwave signal with frequency modulation. The magnetization vector and elastic displacement oscillations in a normally magnetized ferrite film with crystallographic anisotropy are considered. We analyzed the effect of crystallographic cell orientation on the nature of the magnetization dynamics and elastic displacement oscillations, the establishment of various oscillation modes, and the detection process.