

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.216.2:537.62

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК НА ДЕТЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТОУПРУГИХ ПОЛЕЙ ПРИ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

© 2022 г. Д. А. Плешев^{a, b, *}, Ф. Ф. Асадуллин^a, В. С. Власов^b, Л. Н. Котов^b, В. И. Щеглов^c

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

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

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

*e-mail: dpleshev@gmail.com

Поступила в редакцию 25.11.2021 г.

После доработки 16.12.2021 г.

Принята к публикации 17.12.2021 г.

Рассматриваются детектирование амплитудно-модулированного магнитного линейно поляризованного переменного поля на упругой подсистеме магнитной пленки. Изучена динамика колебаний вектора намагниченности и упругого смещения изотропной пленки и пленок с различной ориентацией легких осей кубической анизотропии относительно нормали. Построены параметрические портреты колебаний компонент вектора намагниченности и частотные характеристики возбужденных колебаний намагниченности и упругого смещения. Определена зависимость режимов колебаний упругого смещения магнитной пленки от амплитуды напряженности переменного магнитного поля и глубины модуляции.

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

DOI: 10.31857/S001532302203007X

ВВЕДЕНИЕ

Возбуждение СВЧ-колебаний под действием магнитострикционных преобразователей находит применение в гидроакустике, дефектоскопии, ультразвуковой технике и обработке аналоговой информации в СВЧ-диапазоне [1–4].

Однако в настоящее время вопрос приема и регистрации таких волн изучен недостаточно, прежде всего в области отделения материалов передаваемого сообщения от СВЧ-сигнала. Реализация магнитоупругих колебаний в магнитострикционном преобразователе в линейном и нелинейном режимах позволяет использовать их для регистрации передаваемого сигнала.

Использование в качестве детектора магнитоупругой тонкой пленки позволяет избежать мешающего параметрического возбуждения обменных спиновых волн [5, 6]. Это позволяет увеличить мощность магнитного поля, используемого для возбуждения колебаний упругого смещения, и увеличить угол прецессии вектора намагниченности [7–10].

Общее описание процесса детектирования на магнитоупругой связи магнитной пленки дано в

работе [11]. Однако указанная работа посвящена рассмотрению детектирования на изотропных пленках, а процесс регистрации амплитудно-модулированных сигналов и динамика магнитной и упругой подсистем в анизотропных пленках не рассматривается.

Настоящая работа посвящена рассмотрению процессов регистрации амплитудно-модулированных переменных магнитных полей на основе магнитоакустических свойств анизотропных магнитных пленок, в том числе выделения частоты модуляции, а также анализу установившихся режимов и амплитудно-частотных характеристик колебаний намагниченности и упругого смещения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Магнитоупругая плоскопараллельная пленка ферромагнетика кубической симметрии толщиной d помещена в постоянное магнитное поле \mathbf{H}_0 , ориентированное по нормали к плоскости пленки (рис. 1). Возбуждение колебаний вектора намагниченности производится переменным магнитным полем \mathbf{h}_0 , лежащим в плоскости пленки.

Выбор геометрии нормально намагниченной пленки приводит к смещению частоты ФМР в область дна спин-волнового спектра, что обеспечивает однородность прецессии и отсутствие перекрытия с обменным спектром.

Задача решается в декартовой системе координат. Центр системы координат совпадает с геометрическим центром пленки. Ее оси ориентированы параллельно ребрам куба кристаллографической ячейки (далее КЯ) в случае ориентации [001]. В случае ориентации [111] одна пространственная диагональ куба направлена вдоль оси Oz , при этом ось Ox ориентирована вдоль проекции одного из ребер куба на плоскость Oxy .

Для упрощения задачи использованы следующие допущения:

- 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 полная плотность энергии пластины U в магнитном поле $\mathbf{H} = \{h_x; h_y; H_0\}$ равна сумме 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

$$H_{\text{eff}} = -\frac{\partial U}{\partial \mathbf{M}}, \quad (2)$$

уравнение для намагниченности в этом случае примет вид:

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

где \mathbf{M} – вектор намагниченности образца, γ – гиромангнитная постоянная, α – параметр магнитного затухания, M – модуль вектора намагниченности.

Уравнения для упругих смещений примет вид:

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

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

Граничные условия определяются соотношением

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

где B_2 – константа магнитоупругого взаимодействия, m_i – компоненты нормированного вектора намагниченности $\mathbf{m} = \mathbf{M}/M$.

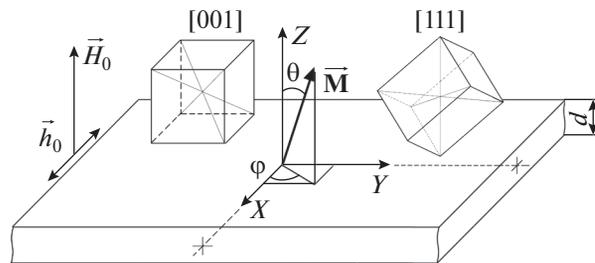


Рис. 1. Геометрия задачи.

Как было выявлено в программной работе [11] и подтверждено численным экспериментом, представленным в работах [12, 13], существенная нелинейность поставленной задачи и необходимость эффективного возбуждения магнитной и упругой подсистем требуют использования линейно-поляризованного переменного магнитного поля.

Предполагая, что переменное магнитное поле поляризовано вдоль ось Ox , 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 железоиттриевого граната (ЖИГ): $M = 139$ 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. Кристаллографическую анизотропию учитывали в форме, предложенной Акуловым, аналогично подходу, изложенному в работе [14]. Частота ФМР равна несущей частоте амплитудно-модулированного поля и составляет 2800 МГц, частота модуляции равна частоте акустического резонанса при толщине пленки 6.865 мкм, что соответствует 280 МГц. Глубину модуляции A_m варьировали в диапазоне [0.1, 1] с шагом 0.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В первую очередь рассмотрим влияние глубины модуляции на динамику вектора намагниченности. На рис. 2 видно, что при увеличении глубины модуляции от 0.1 до 1 значительно возрастает сложность параметрических портретов, траектории движения вектора намагниченности начинают накладываться друг на друга, увеличивается амплитуда колебаний компонент вектора намагниченности. В дальнейшем для удобства будем рассматривать только

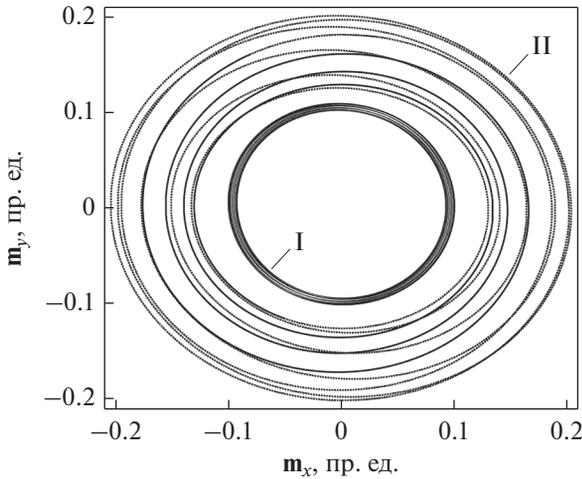


Рис. 2. Параметрические портреты колебаний вектора намагниченности для анизотропной пленки с ориентацией КЯ [111] при глубине модуляции $A_m = 0.1$ (I) и $A_m = 1$ (II).

глубину модуляции, равную $A_m = 1$. Вопрос влияния глубины модуляции на магнитную и упругую динамику авторы оставляют в качестве задачи для отдельного исследования.

При данных условиях возбуждения упругая подсистема следует за магнитной в линейном ре-

жиме. Такое поведение сохраняется до амплитуд переменного поля, не превышающих 50 Э. Увеличение напряженности переменного магнитного поля приводит к сильно нелинейной динамике магнитной и упругой подсистем.

При напряженности поля $h_0 = 100$ Э спектры колебаний намагниченности для изотропной и анизотропных пленок, представленные на рис. 3а, 3б и 3в, обогащаются комбинационными составляющими как в области нижней боковой частоты, так и в области верхней. При этом наибольшие амплитуды соответствуют несущей частоте возбуждения и боковым полосам.

Упругая подсистема в случае изотропной пленки (рис. 3г) и пленки с ориентацией КЯ [001] (рис. 3д) следует за колебаниями намагниченности в квазистационарном режиме.

Однако при ориентации КЯ [111] (рис. 3е) в низкочастотной области спектра колебаний упругого смещения можно видеть возбуждение упругих колебаний на частоте акустического резонанса пленки совпадающей с частотой модуляции.

Возбуждение колебаний упругой подсистемой на собственных частотах при таких значениях напряженности внешнего переменного магнитного поля связано, прежде всего, с тем, что при ориентации КЯ [111] (рис. 3в) вектору намагниченности энергетически выгодно увеличивать угол прецес-

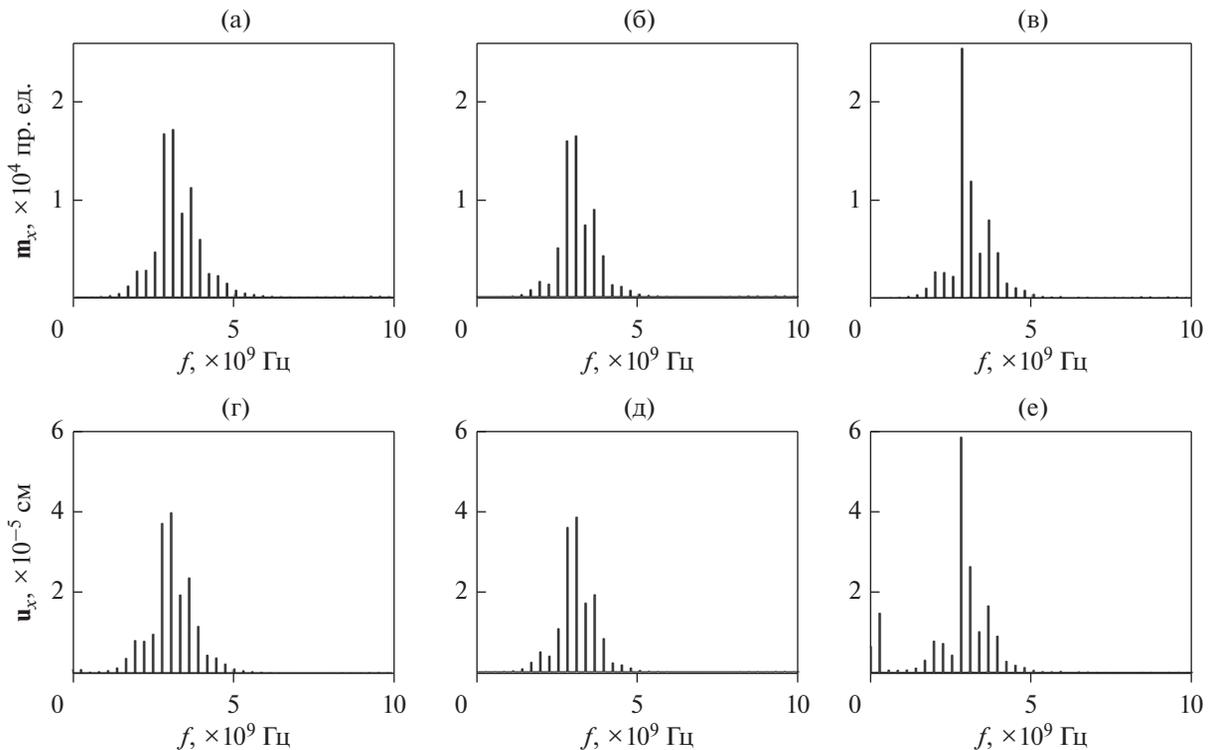


Рис. 3. Спектры колебаний компоненты намагниченности m_x (а, б, в) и упругого смещения u_x (г, д, е) при $h_0 = 100$ Э и $A_m = 1$ для изотропной пленки (а, г) и анизотропных пленок с ориентацией КЯ [001] (б, д) и [111] (в, е).

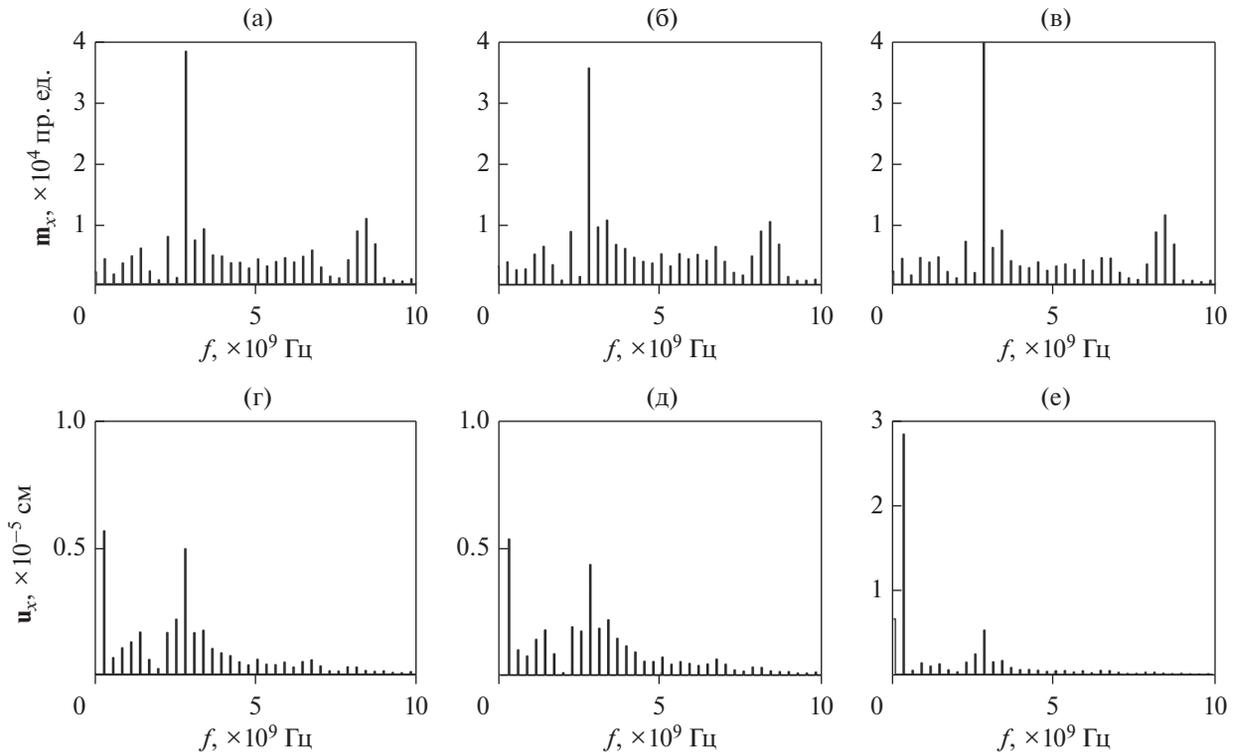


Рис. 4. Спектры колебаний компоненты намагниченности m_x (а, б, в) и упругого смещения u_x (г, д, е) при $h_0 = 1250$ Э и $A_m = 1$ для изотропной пленки (а, г) и анизотропных пленок с ориентацией КЯ [001] (б, в) и [111] (д, е).

сии. Это сказывается на росте амплитуды колебаний намагниченности по сравнению с изотропным случаем (рис. 3а) и случаем с ориентацией КЯ [001] (рис. 3б) и, как следствие, росте амплитуды колебаний упругого смещения (рис. 3е).

Дальнейшее увеличение напряженности переменного магнитного поля до значений $h_0 = 1250$ Э приводит к увеличению количества возбуждаемых комбинационных частот для всех рассматриваемых пленок. При этом для всех пленок спектры колебаний компоненты намагниченности m_x в областях выше и ниже несущей частоты меняются незначительно (рис. 4а, 4б, 4в).

Из рис. 4г, 4д, 4е видно, что для всех пленок амплитуды колебаний упругого смещения на несущей частоте амплитудно-модулированного переменного магнитного поля сопоставимы. Отметим, что при увеличении напряженности переменного поля более, чем в 12.5 раз по сравнению со случаем $h_0 = 100$ Э, амплитуды колебаний упругого смещения на несущей частоте увеличились менее чем на 20%.

Иная ситуация наблюдается для колебаний упругого смещения на частоте акустического резонанса:

- в случае изотропной пленки (рис. 4г) и пленки с ориентацией КЯ [001] (рис. 4е) амплитуды колебаний упругого смещения сопоставимы.

- в случае пленки с ориентацией КЯ [111] (рис. 4е) амплитуда колебаний упругого смещения, соответствующая акустической резонансной частоте, в 4.8 раза больше амплитуды колебаний в изотропной пленке и пленке с ориентацией КЯ [001].

Исследование колебаний упругого смещения для изотропных пленок и анизотропных пленок с ориентацией КЯ [001] и [111] при различных коэффициентах модуляции и амплитудах напряженности переменного магнитного поля позволили выявить два основных режима колебаний упругого смещения:

- режим модуляции (рис. 5а);
- режим детектирования (рис. 5б).

Нетрудно видеть, что со сменой режима возбуждения (изменение напряженности поля или глубины модуляции) действительно происходит качественное изменение характера колебаний упругого смещения. В режиме модуляции (рис. 5а) колебания упругого смещения следуют за колебаниями намагниченности в квазистационарном режиме, в режиме детектирования (рис. 5б) основные колебания происходят на частоте модуляции в виде гармонического колебания, а меньшие по амплитуде колебания на несущей частоте – с центром, соответствующим траектории колебаний на частоте модуляции.

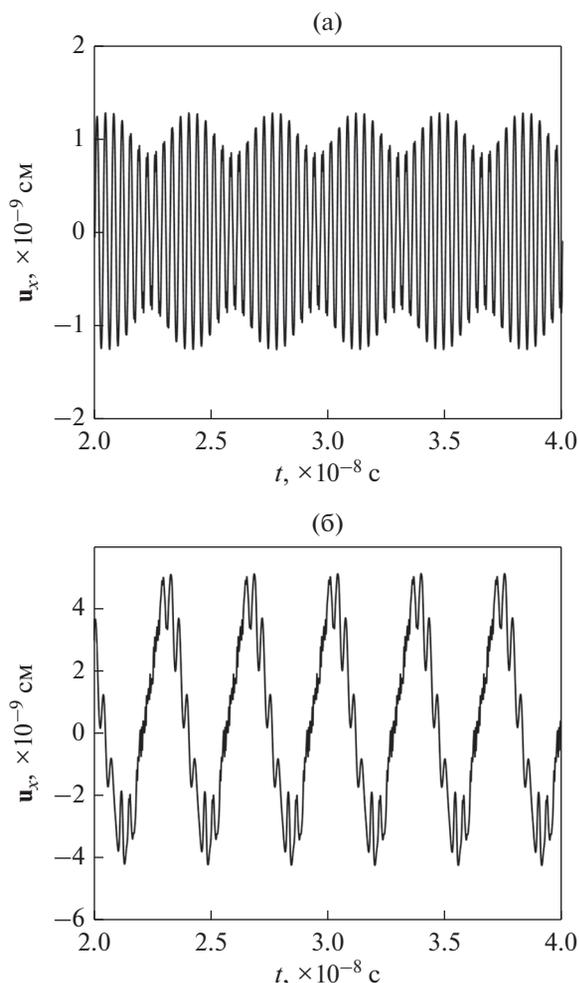


Рис. 5. Развитие во времени колебаний упругого смещения изотропной пленки в режиме модуляции (а) и в режиме детектирования (б) при глубине модуляции $A_m = 1$.

Необходимо указать, что основными материальными параметрами пленки, определяющими тот или иной режим колебаний упругого смещения, являются: константа кубической кристаллографической анизотропии магнитной пленки, ориентация КЯ, напряженность переменного амплитудно-модулированного магнитного поля и глубина ее модуляции.

Зависимость реализации режимов колебаний упругого смещения от ориентации КЯ, напряженности амплитудно-модулированного переменного поля и глубины модуляции представлена на рис. 6. Кривые разделяют два режима колебаний упругого смещения для соответствующих пленок. Ниже кривых располагается область режима модуляции, а выше область режима детектирования.

Как видно на рис. 6, колебания упругого смещения в анизотропных пленках с ориентацией

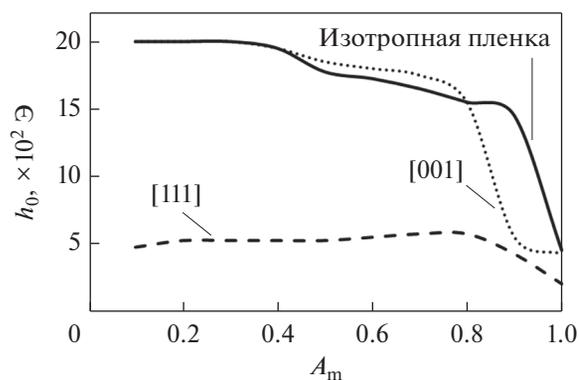


Рис. 6. Переход упругих колебаний из режима модуляции в режим детектирования: сплошная линия – изотропная пленка, точечная линия – анизотропная пленка с ориентацией КЯ [001], пунктирная линия – с ориентацией КЯ [111].

КЯ [111] переходят в режим детектирования при напряженности поля более 550 Э в широком диапазоне степени модуляции. В изотропных пленках и анизотропных пленках с ориентацией КЯ [001] при таких значениях напряженности переменного поля переход из режима модуляции в режим детектирования происходит только при степени модуляции, близкой к $A_m \approx 1$.

Отметим, что данный переход не является пороговым и реализуется плавно в диапазоне ± 50 Э от границы перехода, представленной на рис. 6. В это время реализуется промежуточный режим, схожий с режимом модуляции, представленном на рис. 5а, но фаза огибающей колебаний упругого смещения в верхней полуплоскости начинает сдвигаться относительно фазы огибающей колебаний упругого смещения в нижней полуплоскости. Как только сдвиг фаз достигнет величины π , упругая подсистема перейдет в режим детектирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена возможность детектирования на упругой подсистеме амплитудно-модулированных колебаний линейно поляризованного переменного магнитного поля на основе резонансных магнитоакустических свойств магнитных пленок с кристаллографической кубической анизотропией при ориентации КЯ [001] и [111].

Выявлены два режима колебаний упругого смещения: режим модуляции и режим детектирования. Определены параметры реализации представленных режимов, а именно, зависимость напряженности переменного магнитного поля, необходимого для детектирования, от глубины модуляции для изотропных пленок и анизотропных пленок с ориентацией КЯ [001] и [111].

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kikuchi E.* The ultra-sound converters. М.: 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. *Biswas A.K., Bandyopadhyay S., Atulasimha J.* Energy-efficient magnetoelastic non-volatile memory // *Appl. Phys. Letters*. 2014. V. 104. № 23. P. 2403.
4. *Wei-Gang Yang and Holger Schmidt.* Acoustic control of magnetism toward energy-efficient applications // *Appl. Phys. Rev.* 2021. V. 8. P. 021304.
5. *Monosov Ya.A.* Nonlinear ferromagnetic resonance. М.: Nauka, 1971.
6. *Сул Г.* Теория ферромагнитного резонанса при больших уровнях высокочастотной мощности / В сб. статей: Ферриты в нелинейных сверхвысокочастотных устройствах. Пер. с англ. под ред. А.Г. Гуревича // М.: ИЛ, 1961. С. 163.
7. *Temiryazev A.G., Tikhomirova M.P., Zilberman P.E.* “Exchange” spin waves in nonuniform yttrium iron garnet films // *J. Appl. Phys.* 1994. V. 76. № 12. P. 5586.
8. *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.
9. *Sementsov D.I., Shuty A.M.* Nonlinear regular and stochastic dynamics of magnetization in thin-film structures // *Physics Uspekhi.* 2007. V. 50. № 8. P. 793.
10. *Gerrits Th., Schneider M.L., Kos A.B., Silva T.J.* Large-angle magnetization dynamics measured by time-resolved ferromagnetic resonance // *Phys. Rev. B.* 2006. V. 73. № 9. P. 094454(7).
11. *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.
12. *Asadullin F.F., Poleshikov S.M., Pleshev D.A. et al.* // *J. Siberian Federal University. Mathematics & Physics.* 2017. V. 10(1). P. 36–39.
13. *Чупров И.А., Асадуллин Ф.Ф., Плешев Д.А., Власов В.С., Котов Л.Н., Щеглов В.И.* Нелинейная динамика магнитоупругих колебаний в режиме амплитудной модуляции // *Челябинский физико-математический журн.* 2021. Т. 6. Вып. 2. С. 237–245.
14. *Власов В.С., Курушев М.С., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И.* Прецессия намагниченности второго порядка в анизотропной среде. II. Кубическая анизотропия // *Радиотехника и электроника.* 2013. Т. 58. № 9. С. 857–873.