

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ
В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ И ПЛАЗМЕ

УДК 537.874;537.624

УДАРНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ МАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ
ИМПУЛЬСОМ УПРУГОГО СМЕЩЕНИЯ

© 2022 г. В. С. Власов^а, П. А. Макаров^а, В. Г. Шавров^б *, В. И. Щеглов^б **

^аСыктывкарский государственный университет,
Октябрьский просп., 55, Сыктывкар, 167001 Российская Федерация
^бИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, корп. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

*E-mail: shavrov@cplire.ru

**E-mail: vshcheg@cplire.ru

Поступила в редакцию 13.03.2018 г.

После доработки 08.06.2021 г.

Принята к публикации 27.06.2021 г.

В схеме “накачка-зондирование” рассмотрены колебания намагниченности в нормально намагниченной обладающей магнитоупругими свойствами пластине, которые происходят под действием упругого импульса, возбуждаемого мощным импульсным лазером. Исследовано развитие во времени магнитных колебаний, возбуждаемых упругим импульсом, построены соответствующие прецессионные портреты. Для случая совпадения резонансных частот магнитных и упругих колебаний и близких времен релаксации тех и других отмечены три характерных режима, при которых колебания намагниченности имеют нестационарный характер, соответствующие малой, средней и высокой амплитуде возбуждающего импульса. Особенности наблюдаемых явлений интерпретированы на основе ударного характера возбуждаемых упругих колебаний.

DOI: 10.31857/S0033849422070154

ВВЕДЕНИЕ

Современная технология обработки информации требует обращения к процессам, характерное время которых исчисляется нано-, пико- и даже фемтосекундами. Особый интерес представляют такие процессы в средах, обладающих магнитным упорядочением [1]. Для их исследования используется метод “накачка-зондирование”, когда возмущение намагниченности создается мощным лазером (обычно пико- или фемтосекундным), а ее считывание – другим маломощным лазером по эффекту Фарадея или Керра [2, 3]. Мощный импульс света нагревает магнитную среду, в результате чего в ней возникают упругие напряжения волнового характера [4–6], через посредство магнитострикции вызывающие изменение намагниченности, в том числе прецессию резонансного характера [7, 8] и спиновые волны [9].

В приведенных работах исследовалось прецессия намагниченности при сравнительно невысоком уровне возбуждения. В то же время известно, что сильное возбуждение магнитной среды характеризуется многочисленными явлениями нелинейного характера [10–13].

Цель данной работы – исследовать особенности колебаний намагниченности при высоком уровне

возбуждения, когда оно носит ярко выраженный ударный характер.

1. ГЕОМЕТРИЯ ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Наиболее эффективное воздействие света на намагниченность имеет место при отделении возбуждения упругих колебаний от прецессии намагниченности. При этом для возбуждения упругих импульсов используется среда, имеющая значительное тепловое расширение под действием мощного света, а прецессия намагниченности возбуждается в среде, где магнитострикция велика, а затухание прецессии мало.

Для такого раздельного возбуждения используется схема “накачка–зондирование”, приведенная на рис. 1. Луч света 1 от мощного импульсного лазера падает слева по рисунку на тонкую металлическую пленку 2, нанесенную на одну из поверхностей достаточно толстой подложки 3, играющей роль разделительного и передаточного буфера. Под действием мощного импульса света пленка 2 испытывает тепловое расширение (показано точечными линиями), в результате чего в подложке 3 возбуждается импульс упругого смещения 4, распро-

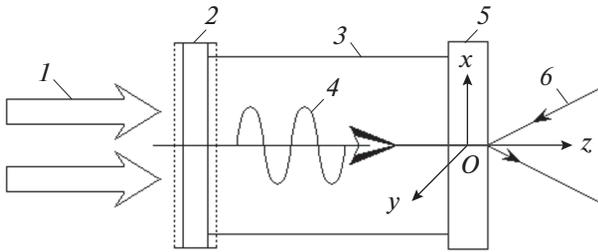


Рис. 1. Схема метода “накачка–зондирование” с разделением возбуждения и регистрации: 1 – луч света от мощного импульсного лазера; 2 – тонкая металлическая немагнитная пленка; 3 – подложка (буферный слой); 4 – импульс упругого смещения; 5 – исследуемая магнитная пленка; 6 – зондирующий луч света.

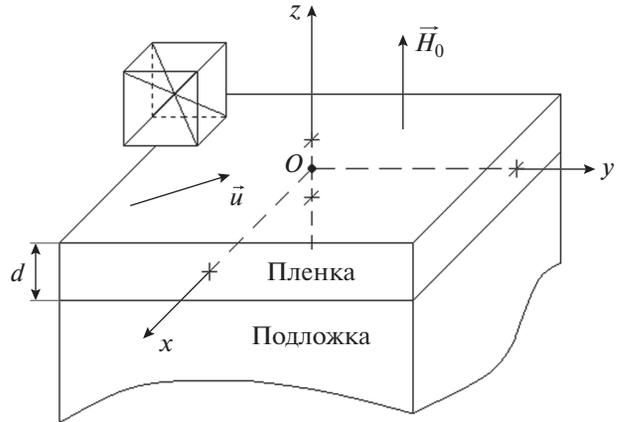


Рис. 2. Схема геометрии магнитной части задачи.

страняющийся к другой поверхности подложки, где он попадает в магнитную пленку 5. Изменение магнитного состояния пленки 5, вызванное упругим импульсом 4 через магнитоупругую связь, регистрируется падающим на пленку 5 лучом 6 от другого маломощного лазера, по повороту плоскости поляризации которого определяется намагниченность в точке, освещаемой этим лучом. Такая схема метода “накачка–зондирование” реализуется, например, в работах [14–16] и ряде других.

Рассмотрим теперь более подробно геометрию именно магнитной части задачи. Будем использовать декартову систему координат $Oxyz$, ориентация которой на рис. 1 показана внутри контура магнитной пленки 5. Более подробно магнитная пленка на подложке показана на рис. 2. В качестве пленки будем рассматривать плоскопараллельную пластину толщиной d , обладающую магнитоупругими свойствами в рамках кубической магнитной симметрии, плоскость (100) которой совпадает с плоскостью пластины.

Плоскость Oxy декартовой системы координат $Oxyz$ совпадает с плоскостью пластины, ось Oz ей перпендикулярна. Оси Ox , Oy и Oz параллельны ребрам куба кристаллографической ячейки. Центр системы координат O находится в центре пластины, ее плоскости соответствуют координатам $z = \pm d/2$. Внешнее постоянное магнитное поле \vec{H}_0 приложено перпендикулярно плоскости пластины. Такая ориентация поля необходима для возможности возбуждения прецессии с достаточно высокой амплитудой [17]. При этом частота магнитного резонанса совпадает с дном спектра обменных спиновых волн, в результате чего помехи от их параметрического возбуждения исключаются [13, 18, 19]. Пленка находится на подложке, показанной в нижней части рис. 2. Будем полагать, что модули упругости пленки и подложки различаются настолько сильно, что по толщине

не пленки может реализоваться упругий резонанс с достаточной добротностью. Вектор упругого смещения \vec{u} , приходящего из подложки, действует в плоскости магнитной пленки.

Будем полагать, что величина магнитного поля и толщина пленки выбраны таким образом, что частота магнитного резонанса и частота упругого (на первой моде по толщине пленки) между собой совпадают.

Система уравнений движения для нормированных на намагниченность насыщения M_0 компонент намагниченности $m_{x,y,z}$, имеет вид [17]

$$\frac{\partial m_x}{\partial t} = -\frac{\gamma}{1 + \alpha^2} [(m_y + \alpha m_x m_z) H_z - (m_z - \alpha m_y m_x) H_y - \alpha (m_y^2 + m_z^2) H_x], \quad (1)$$

а уравнения для m_y и m_z получаются циклической перестановкой x, y, z . Уравнения для компонент упругого смещения $u_{x,y}$ имеют вид

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

граничные условия –

$$c_{44} \frac{\partial u_{x,y}}{\partial z} \Big|_{z=\pm d/2} = -B_2 m_{x,y} m_z. \quad (3)$$

В выражениях (1)–(3) $H_{x,y,z}$ – эффективные поля, определяемые как производные от плотности энергии по компонентам намагниченности, γ – гиромагнитная постоянная, α – параметр магнитного затухания по Гильберту, c_{44} – модуль упругости, β – параметр упругого затухания, ρ – плотность материала магнитной пластины, B_2 – константа магнитоупругого взаимодействия.

Магнитные и упругие параметры материала пластины возьмем такие же, как для железо-иттриевого граната (ЖИГ): $4\pi M_0 = 1750$ Гс, $c_{44} = 7.64 \times 10^{11}$ эрг см⁻³, $\rho = 5.17$ г см⁻³, $B_2 = 6.96 \times 10^6$ эрг см⁻³. Параметр затухания магнитных колебаний примем равным $\alpha = 0.02$, упругих колебаний — $\beta = 10^9$ с⁻¹. При этом время релаксации магнитных колебаний составит около 0.4×10^{-8} с. Время релаксации упругих — около 0.2×10^{-8} с. Будем рассматривать колебания на частоте 2800 МГц. При этом резонансное поле с учетом размагничивания получается равным 2750 Э, а резонансная толщина магнитной пластины 0.6865 мкм. Длительность импульса упругого смещения будем полагать равной 10^{-9} с, его форму будем считать прямоугольной. Амплитуда импульса упругого смещения в различных случаях будет различаться, поэтому ее величину указываем по ходу текста. Зададим отклонение намагниченности в начальный момент времени на 45° от нормали к плоскости пленки. После этого прецессию намагниченности будем полагать подверженной лишь воздействию упругого импульса. Будем считать, что упругий импульс задержан относительно начального момента времени на 2×10^{-9} с. То есть в этот промежуток времени магнитные колебания развиваются свободно, вплоть до начала действия упругого импульса.

2. РАЗВИТИЕ МАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВО ВРЕМЕНИ

Решение системы уравнений (1)–(3) выполнялось методом Рунге–Кутты четвертого порядка [20]. Рассматривалось развитие магнитных и упругих колебаний во времени, а также соответствующие прецессионные портреты для намагниченности.

В соответствии с принятыми выше параметрами система испытывает упругую деформацию в момент времени 0.2×10^{-8} с, которая заканчивается в момент времени 0.3×10^{-8} с. Будем полагать, что между этими моментами времени упругое смещение поддерживается постоянным. После окончания импульса смещения система представляется самой себе и в ней происходят свободные упругие колебания. Подробное исследование показывает, что в таких условиях на заднем фронте импульса происходит возбуждение свободных упругих колебаний, причем их амплитуда может значительно (в несколько раз) превышать амплитуду самого импульса. То есть происходит как бы ударное возбуждение упругих колебаний, продолжающихся далее в соответствии со своим временем релаксации.

Типичные развертки во времени и прецессионные портреты магнитных колебаний, соответствующих различным уровням возбуждающего упругого импульса, показаны на рис. 3. Из рисунка видно, что во всех случаях после окончания упругого импульса характер магнитных колебаний является резко нестационарным с элементами хаотичности. Такой нестационарный режим имеет место при достаточной амплитуде упругого импульса, превышающей 10^{-7} см. При меньшей амплитуде после окончания упругого импульса магнитные колебания являются регулярными и постепенно спадают в соответствии со своим временем релаксации. Переход от стационарного режима к нестационарному не имеет резкого порога и является достаточно плавным. Характерный нестационарный режим устанавливается только после амплитуды упругих колебаний, равной 10^{-6} см.

Из различных видов нестационарных колебаний можно выделить три характерных режима, соответствующие трем приведенным на рисунке разверткам колебаний во времени. Смена режимов определяется амплитудой упругих колебаний, малой, средней и высокой, поэтому рассмотрим их по отдельности.

2.1. Режим 1.

Малая амплитуда упругих колебаний

Режим 1 имеет место при амплитуде упругих колебаний между 10^{-6} см и 5×10^{-6} см. Именно такой режим соответствует рис. 3а. Как видим, здесь уже на переднем фронте упругого импульса, т.е. в момент времени 0.2×10^{-8} с характер магнитных колебаний резко изменяется. Частота прецессии значительно увеличивается, а время релаксации уменьшается. Можно полагать, что в этом случае частота прецессии определяется суммой полей внешнего и образованного упругим импульсом через посредство магнитострикции.

Магнитные колебания за время действия упругого импульса, т.е. до 0.3×10^{-8} с по амплитуде спадают примерно в два раза. Однако сразу после этого момента амплитуда колебаний намагниченности резко возрастает, что соответствует ударному возбуждению упругих колебаний на заднем фронте упругого импульса. Далее упругие колебания постепенно спадают в соответствии со своим временем релаксации, в результате чего их воздействие на магнитные колебания уменьшается, так что их нестационарный характер постепенно регулируется. Действие релаксирующих упругих колебаний на магнитные прекращается где-то около времени 0.8×10^{-8} с, после чего магнитные колебания остаются преданными самим себе и

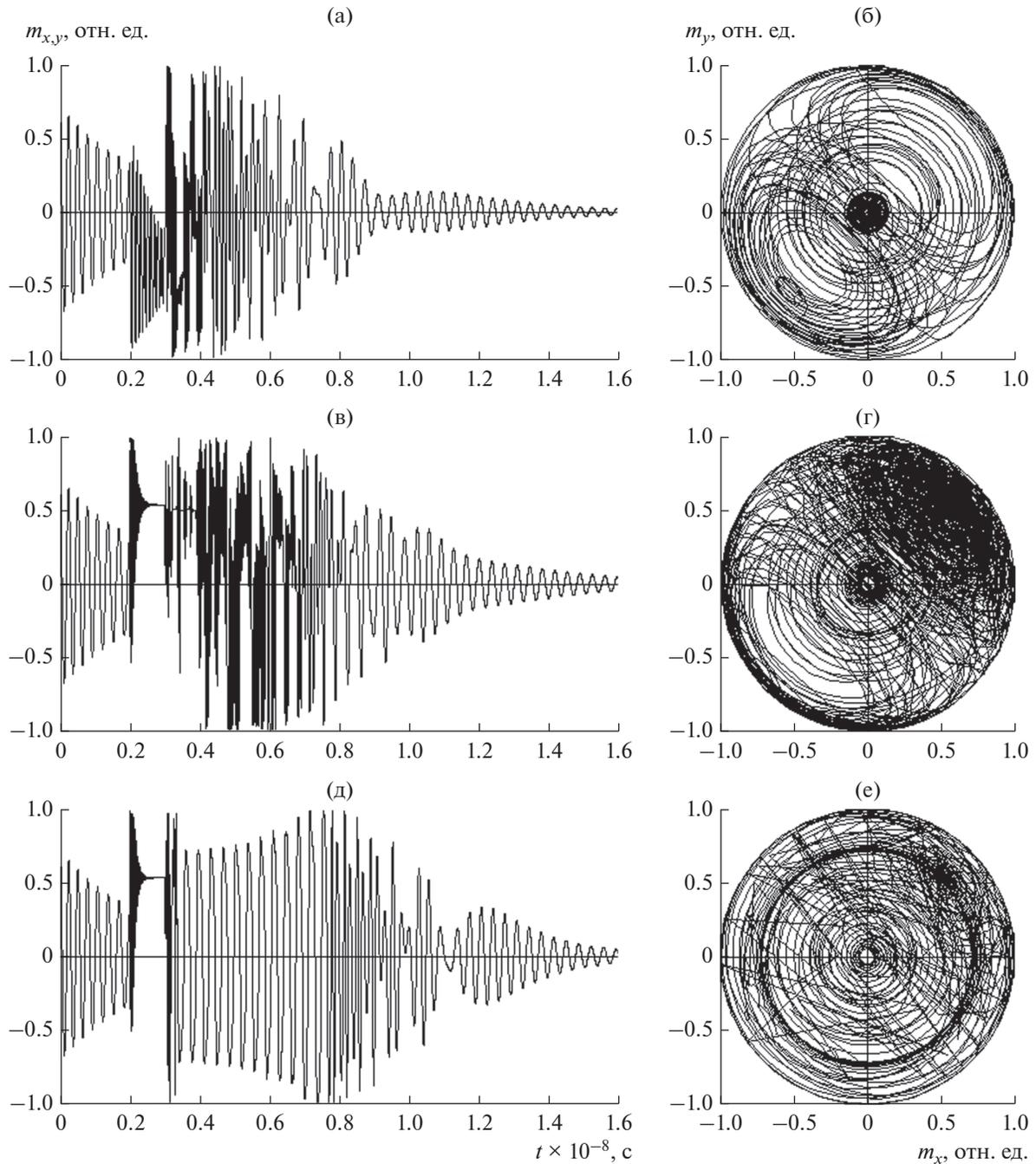


Рис. 3. Развертки магнитных колебаний (левая колонка) и прецессионные портреты (правая колонка), соответствующие различным амплитудам $(u_{x,y})_0$ возбуждающего упругого импульса: 10^{-6} (а, б), 10^{-5} (в, г) и 1.24005×10^{-5} см (д, е).

также постепенно затухают в соответствии со своим временем релаксации.

Прецессионный портрет (см. рис. 3б) по образующей имеет вид правильных колец, соответствующих раскрытию прецессии почти до полного разворота к плоскости, причем по мере спада колебаний внутренняя часть портрета заполняется концентри-

ческими кольцами, постепенно уменьшающимися в диаметре. Видны слабо отмеченные овальные кольца больших диаметров, группирующиеся в первой и третьей четвертях портрета. Эти кольца соответствуют интервалам времени $(0.34...0.37) \times 10^{-8}$ с и $(0.38...0.40) \times 10^{-8}$ с, где амплитуда магнитных

колебаний имеет ступенчатый характер. Ярко выделенная сердцевина прецессионного портрета соответствует спаду и стремлению к нулю амплитуды магнитных колебаний при времени, большем 0.9×10^{-8} с.

2.2. Режим 2.

Средняя амплитуда упругих колебаний

Режим 2 имеет место при амплитуде упругих колебаний между 5×10^{-6} см и 1.2×10^{-5} см. Такой режим соответствует рис. 3в. Здесь на переднем фронте упругого импульса магнитные колебания возникают также резко и быстро спадают, однако в отличие от режима 1, центральная линия проходит далеко от нуля на уровне около 0.5 отн. ед. Это означает, что амплитуда упругого импульса столь велика, что он уже почти полностью “задавливает” свободные магнитные колебания и навязывает вынужденное отклонение намагниченности от нормали к плоскости пленки, где она и принимает более или менее стационарное положение. После окончания упругого импульса, возбужденные им упругие колебания еще некоторое время (до 0.4×10^{-8} с) стараются поддержать такое большое отклонение намагниченности, однако из-за собственного спада их удерживающая роль спадает и намагниченность срывается в прецессию, которая опять-таки происходит в нестационарном режиме. Степень нестационарности здесь заметно больше, чем в режиме 1, однако и в этом случае она заканчивается при времени около 0.8×10^{-8} с, где упругие колебания уже спадают настолько, что намагниченность переходит в собственное движение. Дальнейшие колебания намагниченности подобны таковым в режиме 1 и спадают с тем же временем релаксации.

Прецессионный портрет (см. рис. 3г) также ограничен правильным кольцом, соответствующим максимально возможному раскрытию конуса прецессии. Концентрический характер колец с убывающей амплитудой также сохраняется. Однако здесь в первой четверти портрета наблюдается сильное сгущение траекторий, значительно более интенсивное, чем в режиме 1. Можно полагать, что такое сгущение обусловлено резко выраженным ступенчатым характером колебаний в интервале $(0.40...0.75) \times 10^{-8}$ с, протяженность которого значительно превышает таковые интервалы в режиме 1. Центральная затемненная сердцевина портрета также соответствует свободно релаксирующим колебаниям намагниченности при времени, большем 1.0×10^{-8} с.

2.3. Режим 3.

Высокая амплитуда упругих колебаний

Режим 3 имеет место при амплитуде упругих колебаний выше 1.24000×10^{-5} см. Развитие магнитных колебаний во времени показано на рис. 3д. Характерным отличием от режима 2 здесь является установление регулярных синусоидальных колебаний в интервале времени $(0.35...0.75) \times 10^{-8}$ с, амплитуда которых слегка нарастает. При времени, большем 0.75×10^{-8} с, магнитные колебания снова приобретают нестационарный характер, после чего постепенно спадают, подобно таковым в режиме 2. Регуляризация колебаний в интервале $(0.35...0.75) \times 10^{-8}$ с означает, что амплитуда упругих колебаний, возбуждаемых на заднем фронте импульса, настолько велика, что они напрямую навязывают свою амплитуду упругим колебаниям. То есть намагниченность здесь в точности следует тому, как ее ведет упругое смещение. Характерным свойством этого режима является его резко выраженный пороговый характер. Критическое значение амплитуды упругого импульса здесь соответствует 1.24000×10^{-5} см. Ниже этого значения колебания намагниченности имеют характер, соответствующий режиму 2, т.е. явно выраженная их регуляризация полностью отсутствует. Но уже при амплитуде 1.24005×10^{-5} см, т.е. при превышении амплитуды на тысячные доли процента, регуляризация уже наступает, как это видно из рис. 3д. При дальнейшем увеличении амплитуды упругого импульса регуляризация сохраняется, однако при амплитуде более 1.5×10^{-5} см правильная синусоида постепенно приобретает характер прямоугольных импульсов, сохраняя, однако, точную периодичность, соответствующую постепенно релаксирующим упругим колебаниям.

Прецессионный портрет (см. рис. 3е) здесь также представляет собой набор постепенно убывающих концентрических колец, однако сгущения или побочные циклы, подобные проявляющимся на рис. 3б и 3г, почти отсутствуют. Такое отсутствие нестационарных элементов портрета является следствием практически полной регуляризации магнитных колебаний, наблюдаемой на рис. 3д. Характерным отличием является четко выраженное правильное кольцо, соответствующее амплитуде около 0.7 отн. ед. Видно, что это кольцо как раз соответствует регулярным колебаниям в интервале времени $(0.35...0.75) \times 10^{-8}$ с.

Также следует отметить, что рассмотренные режимы 1–3 не полностью исчерпывают все возможности магнитных колебаний, возбуждаемых упругим импульсом. Так, ряд особенностей на-

блюдается при формировании прямоугольных колебаний в режиме 3, определенную роль играет соотношение времен релаксации магнитных и упругих колебаний, а также конкретный выбор параметров материала магнитной пластины, в первую очередь величины константы магнитоупругого взаимодействия. Вариации этих и других параметров, сохраняя роль приведенных режимов в качестве “опорных точек”, порождают значительное многообразие частных подрежимов, требующих отдельного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В схеме “накачка—зондирование” рассмотрены колебания намагниченности в нормально намагниченной обладающей магнитоупругими свойствами пластине, которые происходят под действием упругого импульса, возбуждаемого мощным импульсным лазером.

Отмечено, что наиболее интенсивные упругие колебания возбуждаются на заднем фронте прямоугольного упругого импульса, причем такое возбуждение носит ударный характер.

Исследовано развитие во времени магнитных колебаний, возбуждаемых упругим импульсом, а также построены соответствующие прецессионные портреты. Показано, что при достаточной мощности возбуждающего упругого импульса колебания намагниченности приобретают резко нестационарный характер.

Для случая совпадения резонансных частот магнитных и упругих колебаний и близких времен релаксации тех и других отмечены характерные режимы 1–3 нестационарных колебаний, сменяющие друг друга по мере увеличения амплитуды упругого импульса: малой, средней и высокой амплитуды упругих колебаний.

Режим 1 характеризуется возбуждением регулярных магнитных колебаний в пределах продолжительности действия упругого импульса, после окончания которого амплитуда колебаний резко возрастает и они приобретают нестационарный характер. При дальнейшем развитии колебаний их нестационарный характер сглаживается и они приобретают плавно релаксирующий характер со свойственной этим колебаниям постоянной времени.

Режим 2 отличается от режима 1 в первую очередь установлением близкого к стационарному положению намагниченности со значительным отклонением от нормали к плоскости пластины, что имеет место в течение всей продолжительности действия упругого импульса. В остальном этот режим подобен режиму 1.

Режим 3 отличается от двух предыдущих резко выраженной регуляризацией магнитных колебаний, имеющей место на всем протяжении упругих колебаний, возбужденных на заднем фронте упругого импульса. Отмечен пороговый характер регуляризации, а также полный синхронизм возбуждаемых регулярных колебаний с релаксирующими упругими колебаниями, возбужденными на заднем фронте упругого импульса.

Рассмотрены особенности формирования прецессионных портретов во всех трех режимах колебаний. Отмечено появление дополнительных колец (режим 1) и сгущений (режим 2), отражающих нестационарный характер колебаний. Выявлено, что при наступлении регуляризации (режим 3) на прецессионном портрете возникает четко выраженное дополнительное кольцо, определяемое именно регуляризованными колебаниями.

Особенности развития колебаний во времени и прецессионных портретов во всех трех режимах интерпретированы на основе рассмотрения ударного характера возбуждаемых упругих колебаний.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-55-53019 ГФЕН_a), а также Российского научного фонда (проекты № 21-72-20048, 21-47-00019) и Правительства Республики Коми и Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ и Правительства Республики Коми, № 20-42-110004, p_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing T. // *Rev. Mod. Phys.* 2010. V. 82. № 3. P. 2731.
2. Walowski J., Münzenberg M. // *J. Appl. Phys.* 2016. V. 120. № 14. P. 140901.
3. Ka Shen, Bauer G.E.W. // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115. № 19. P. 197201.
4. Janusonis J., Chang C.L., Jansma T. et al. // *Phys. Rev. B.* 2016. V. 94. № 2. P. 024415.
5. Chang C.L., Lomonosov A.M., Janusonis J. et al. // *Phys. Rev. B.* 2017. V. 95. № 6. P. 060409(5).
6. Власов В.С., Макаров П.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. // *Электрон. журн. радиоэлектроники.* 2017. № 6. <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/5/text.pdf>.
7. Dreher L., Weiler M., Pernpeintner M. et al. // *Phys. Rev. B.* 2012. V. 86. № 13. P. 134415.
8. Thevenard L., Gourdon C., Prieur J.Y. et al. // *Phys. Rev. B.* 2014. V. 90. № 9. P. 094401(8).
9. Чернов А.И., Кожяев М.А., Ветошко П.М. и др. // *ФТТ.* 2016. Т. 58. № 6. С. 1093.

10. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994.
11. Моносов Я.А. Нелинейный ферромагнитный резонанс. М.: Наука, 1971.
12. Львов В.С. Нелинейные спиновые волны. М.: Наука, 1987.
13. Семенцов Д.И., Шутый А.М. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177. № 8. С. 831.
14. Linnik T.I., Scherbakov A.V., Yakovlev D.R. et al. // Phys. Rev. B. 2011. V. 84. № 21. P. 214432.
15. Jäger J.V., Scherbakov A.V., Linnik T.I. et al. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103. № 3. P. 032409.
16. Jäger J.V., Scherbakov A.V., Glavin B.A. et al. // Phys. Rev. B. 2015. V. 92. № 2. P.020404.
17. Власов В.С., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И. // РЭ. 2009. Т. 54. № 7. С. 863.
18. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Темирязов А.Г., Тихомирова М.П. // РЭ. 1999. Т. 44. № 10. С. 1262.
19. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Темирязов А.Г., Тихомирова М.П. // ФТТ. 2000. Т. 42. № 6. С. 1062.
20. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973.