УДК 537.86:534-8

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОУПРУГОЙ СВЧ ДИНАМИКИ ТРЕХСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ

© 2022 г. Л. Н. Котов^{1,} *, М. Ю. Дианов¹, В. С. Власов¹, Ф. Ф. Асадуллин²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина", Сыктывкар, Россия ²Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова", Сыктывкар, Россия

> **E-mail: kotovln@mail.ru* Поступила в редакцию 18.04.2022 г. После доработки 13.05.2022 г. Принята к публикации 23.05.2022 г.

Выполнено численное моделирование магнитоупругой динамики трехслойной магнитной структуры при ее возбуждении СВЧ магнитным полем. Построены прецессионные портреты магнитных колебаний. Выявлены значения параметров слоев и амплитуды полей для условий максимальной перекачки энергии из магнитной в упругую подсистему трехслойной структуры.

DOI: 10.31857/S0367676522090150

введение

В последнее десятилетие быстро развивается область стрейнтроники, связанной с реализацией устройств записи/считывания информации на основе электро- и магнитоакустических эффектов в многослойных структурах [1, 2]. Причем на современном этапе развития магнитоакустики возможно использование сверхбыстрых эффектов для управления магнитными наноструктурами. Такая область носит название сверхбыстрой магнитоакустики, в которой сверхкороткие (пикосекундные) упругие импульсы эффективно управляют магнитным состоянием различных наноструктур [3]. Новое поколение устройств стрейнтроники не уступает, а по ряду позиций, включая скорость работы и энергоэффективность, опережает современные устройства, работающие на стандартной полупроводниковой технологии [1-3]. Для дальнейшего улучшения характеристик устройств стрейнтроники необходимо изучить нелинейные магнитоупругие эффекты в многослойных магнитных структурах. Выявление новых нелинейных эффектов магнитоупругой СВЧ динамики в многослойных структурах также продвигает современную магнитоакустику, теорию нелинейных волн и нелинейных динамических систем [3-6].

Новые эффекты могут быть выявлены, например, с помощью моделирования нелинейной магнитоупругой СВЧ динамики планарной трехслойной магнитной структуры при возбуждении ее переменным магнитным полем. Моделирование магнитоупругой динамики трехслойной структуры позволяет определить амплитуды переменного и постоянного магнитных полей, значений материальных параметров слоев при которых наблюдается максимальное преобразование энергии переменного магнитного поля в упругую энергию слоев. Кроме этого, результаты проведенных исследований позволят выявить новые материалы, которые можно будет использовать, например, в качестве СВЧ датчиков электромагнитного поля и гиперзвукового преобразователя.

ГЕОМЕТРИЯ ЗАДАЧИ, ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ, ПАРАМЕТРЫ СЛОЕВ

Рассмотрим планарную трехслойную магнитную структуру. Обозначим верхний слой структуры буквой p, средний слой буквой d, и третий слой буквой r (рис. 1). Конфигурация внешних постоянного и переменного магнитных полей выбиралась исходя из геометрии, предотвращающей процессы параметрического распада ферромагнитного резонанса (ФМР) [7]. Для такой геометрии необходимо, чтобы ось О*z* декартовой системы координат совпадала с направлением постоянного поля $\overline{H_0}$ и с направлением нормали к плоскости трехслойной структуры. Внешнее переменное магнитное поле \vec{h} имеет круговую поляризацию и лежит в плоскости О*ху*. При расчетах напряженность постоянного магнитного



Рис. 1. Геометрия магнитных полей и трехслойной структуры.

поля H_0 изменялась от 200 до 500 Э, амплитуда переменного магнитного поля варьировалась от 1 до 200 Э, а частота переменного поля менялась от 0.1 до 5 ГГц.

При моделировании рассматривалось взаимодействие только поперечных упругих колебаний с прецессией вектора намагниченности. В уравнениях плотность энергии трехслойной структуры представляла собой сумму зеемановской энергии, энергии диполь-дипольного взаимодействия, магнитоупругой и упругой энергии [7, 8]:

$$U_{j} = -M_{0j}h_{x}m_{jx} - M_{0j}h_{y}m_{jy} - - M_{0j}H_{0}m_{jz} + 2\pi M_{0j}^{2}m_{jz}^{2} + + 2B_{j2}(m_{jz}m_{jy}u_{zy} + m_{jx}m_{jz}u_{xz}) + + 2C_{44}(u_{xy}^{2} + u_{yz}^{2} + u_{zx}^{2}),$$
(1)

где U_j – плотность энергии для слоя j (j = p, d, *r*); M_0 – намагниченность насыщения; h_x, h_y – компоненты переменного магнитного поля, m_{ii} компоненты единичного вектора намагниченности для слоя j, H_0 — напряженность постоянного магнитного поля, B_{j2} – магнитоупругая константа слоя *j*, *C*₄₄ – компонента тензора упругих модулей, *u*_{*ik*} – компоненты тензора деформации. Для получения полной плотности энергии трехслойной пленки нужно провести суммирование плотностей энергий от отдельных слоев. определяемых выражением (1). Магнитоупругая динамика трехслойной пленки описывалась системой уравнений Ландау–Лифшица–Гильберта и уравнением движения упругой среды, записанных для каждого слоя в отдельности [8]. Связь слоев в системе уравнений обеспечивалась через граничные условия для упругих компонент. Общее решение для упругих смещений искалось в виде суммы однородной и неоднородной частей компонент упругих смещений:

$$u_i(z,t) = U_i(z,t) + v_i(z,t),$$
(2)

где $V_i(z,t)$ — однородная часть решения, частная производная которой по координате z равна 0 на внешних поверхностях структуры, $i = x, y; U_i - \text{не-}$ однородная составляющая решения, являющаяся кусочно-линейной функцией от координаты д. Однородная и неоднородная части решения уравнений разлагается по собственным функциям. Для получения расчетной системы дифференциальных уравнений находились собственные функции магнитоупругой задачи. После подстановки полученных выражений в уравнения для движения упругой среды [9], получаем нелинейную систему обыкновенных дифференциальных уравнений, состоящую из уравнений Ландау-Лифшица-Гильберта и уравнений для мод упругих смещений. Уравнение упругих смещений можно записать для *р* слоя в следующем виде [9]

$$u_{x}(z,t) = -\left(\frac{B_{p2}}{C_{44}}m_{px}m_{pz}\right)z + \frac{d}{2}\left(\frac{B_{d2}}{C_{44}}m_{dx}m_{dz} - \frac{B_{p2}}{C_{44}}m_{px}m_{pz}\right) + (3) + v_{0px}(t) + v_{1px}(t)\cos\left(\frac{\pi}{p}z + \frac{\pi}{p}\frac{d}{2}\right),$$

и для *r* слоя

$$u_{x}(z,t) = -\left(\frac{B_{r2}}{C_{44}}m_{rx}m_{rz}\right)z - \frac{d}{2}\left(\frac{B_{d2}}{C_{44}}m_{dx}m_{dz} - \frac{B_{r2}}{C_{44}}m_{rx}m_{rz}\right) + (4) + v_{0rx}(t) + v_{1rx}(t)\cos\left(-\frac{\pi}{r}z + \frac{\pi}{r}\frac{d}{2}\right),$$

где $v_{ljx}(t) - l$ -моды упругих смещений (l = 0, 1)для слоев j (j = p, r). Для численного интегрирования полученной нелинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений применялся метод Рунге—Кутта—Фельберга 4—5 порядков [10].

Толщина двух первых магнитных слоев выбиралась равной p = d = 0.1 мкм, а толщина третьего слоя r = 0.48 мкм. Такие значения толщин слоев соответствовали максимальному преобразованию СВЧ магнитной энергии в упругую энергию трехслойной структуры. Значение плотности слоев выбиралось равным $\rho = 5.17$ г/см³; константы упругости слоев $C_{44} = 7.64 \cdot 10^{11}$ эрг · см⁻³; намагниченности насыщения $4\pi M_{0p} = 4\pi M_{0d} = 4\pi M_{0r} = 280$ Гс; параметр магнитной диссипации $\alpha = 0.3$, константа упругих потерь $\beta = 10^9$ с⁻¹. Константы магнитоупругой связи двух слоев p и d брались



Рис. 2. Временные зависимости магнитных компонент слоев r и p, и упругих компонент смещения при разных константах магнитоупругой связи r слоя B_{r2} : 0 (a-e), 0.2 B_{p2} (e-e). $B_{p2} = 6.96 \cdot 10^6$ эрг · см⁻³. f = 3 ГГц. h = 1 Э. $H_0 = 250$ Э.

постоянными $B_{p2} = B_{d2} = 6.96 \cdot 10^6$ эрг · см⁻³, а для третьего *r* слоя она изменялась от 0 до $2B_{p2}$. Все материальные параметры выбирались равными и близкими к известным и широко используемым ферримагнитным материалам [9].

ОПИСАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате численного решения системы уравнений Ландау—Лифшица—Гильберта и уравнений для мод упругих смещений слоев были получены графики временных зависимостей магнитых и упругих колебаний (рис. 2). При нулевой константе магнитоупругой связи для r слоя $B_{r2} = 0$ наблюдаются высокочастотные колебания магнитных компонент на частоте переменного магнитного поля, которые промодулированы низкочастотными колебаниями упругого смещения слоя p (рис. 2*a*). Период низкочастотной модуляции высокочастотного сигнала p слоя составляет $T_p \approx 0.3$ мкс. При нулевой константе $B_{r2} = 0$ амплитуда упругих колебаний r слоя ничтожно мала.

При значении магнитоупругой константы $B_{r2} = 1.392 \cdot 10^6$ эрг · см⁻³ и одинаковых значениях магнитоупругих констант других двух слоев $B_{p2} =$

 $= B_{d2} = 6.96 \cdot 10^6$ эрг · см⁻³, наблюдаются большие по амплитуде низкочастотные колебания магнитных компонент слоев и упругих смещений (рис. 2г, 2д и 2е). Амплитуда магнитных компонент высокочастотных колебаний слоев на частоте переменного поля в начале возбуждения упругих колебаний быстро затухает, а затем долго продолжается с малой амплитудой $m_{pv}, m_{px} \leq 0.05$. Это говорит о том, что в условиях, близких к акустическому резонансу трехслойной структуры, большая часть энергии переменного магнитного поля быстро трансформируется в энергию упругих колебаний слоев. В результате такой трансформации графики временных зависимостей низкочастотных колебаний магнитных компонент r слоя и упругих смещений коррелируют между собой и

сдвинуты по фазе на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 2*г* и 2*e*).

На основе полученных графиков временных зависимостей единичных компонент вектора намагниченности были построены прецессионные портреты магнитных колебаний *r* слоя для разных значений констант магнитоупругой связи B_{r2} (рис. 3). Прецессионные портреты магнитных колебаний *r* слоя при нулевой константе магнитоупругой связи $B_{r2} = 0$ приведены на рис. 3*a*. Как видно из рисунка, в этом случае наблюдаются



Рис. 3. Прецессионные портреты магнитных колебаний *r* слоя при разных константах B_{r2} : 0 (*a*), 0.6 B_{p2} (*b*), $B_{r2} = 2B_{p2}$ (*b*). $B_{p2} = 6.96 \cdot 10^6$ эрг · см⁻³. f = 0.1 ГГц. h = 1 Э. $H_0 = 250$ Э.

промодулированные синусоидальные магнитные колебания вектора намагниченности в плоскости слоя *r*. Прецессионные портреты магнитных колебаний *r* слоя при ненулевых значениях констант магнитоупругой связи приведены на рис. *Зб* и *3в*. Из рис. *Зб* и *3в* можно видеть изменение и

сужение конечной области охвата прецессии вектора намагниченности для *r* слоя. Магнитные колебания через несколько периодов упругих колебаний продолжаются в положениях, соответствующих минимумам энергии трехслойной структуры, которые сдвигаются при изменении магнитоупругой константы слоев (рис. 36 и 3e). Данный факт можно будет использовать для изменения режима магнитоупругих колебаний, возбуждаемых СВЧ переменным магнитным полем. Из рис. 3a также видно, что наблюдается стремление вектора намагниченности слоя r ориентироваться в положение новой легкой оси, отличной от нормали к плоскости пленки. Это явление наблюдалось и ранее в материале с большими значениями константы магнитоупругости [11], а подобные режимы прецессии вектора намагниченности были обнаружены и в случае одного ферритового слоя [12, 13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено моделирование динамики магнитных и упругих колебаний планарной трехслойной магнитной структуры. Толщина слоев выбиралась с учетом выполнения условий акустического резонанса, когда суммарная толщина трех слоев равнялась половине длине упругих волн. При расчетах компонент вектора намагниченности предполагалось, что плоскость вращения вектора переменного магнитного поля совпадает с плоскостью слоев структуры. При анализе полученных результатов, было обнаружено, что при некоторых значениях констант магнитоупругости, и при условии, что постоянное магнитное поле, меньше поля насыщения пленки, возникают низкочастотные колебания вектора намагниченности большой амплитуды. Такие большие амплитуды низкочастотных магнитных и упругих колебаний наблюдаются на частотах переменного поля, превышающих частоты акустического резонанса планарной трехслойной структуры. Были получены прецессионные портреты магнитных колебаний слоев трехслойной структуры при нулевых и других значениях магнитоупругих констант. Были выявлены интервалы значений параметров магнитных слоев трехслойной структуры и частоты, амплитуды переменного магнитного поля, при которых наиболее эффективно трансформируется электромагнитная энергия поля трехслойной структуры в энергию упругих колебаний слоев. Анализ полученных результатов показывает, что можно изменять размеры конечной области прецессии вектора намагниченности для разных слоев, вблизи положений, соответствующих минимумам энергии структуры, при варьировании магнитоупругой константы слоев. Данный факт можно будет использовать для управления режимом магнитоупругих колебаний, возбуждаемых переменным магнитным полем или проходящим акустическим импульсом через слой. В работе определены материальные параметры слоев, значения напряженности постоянного магнитного поля, а также частоты, амплитуды переменного магнитного поля, которые можно будет использовать для разработки гиперзвукового преобразователя и СВЧ датчиков электромагнитного поля.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bandyopadhyay S., Atulasimha J., Barman A. // Appl. Phys. Rev. 2021. V. 8. No. 4. Art. No. 041323.
- Бухараев А.А., Звездин А.К., Пятаков А.П. и др. // УФН. 2018. Т. 188. № 12. С. 1288; Bukharaev А.А., Zvezdin А.К., Pyatakov А.P. et al. // Phys. Usp. 2018. V. 61. No. 12. P. 1175.
- Власов В.С., Голов А.В., Котов Л.Н. и др. // Акуст. журн. 2022. Т. 68. № 1. С. 22; Vlasov V.S., Golov A.V., Kotov L.N. et al. // Acoust. Phys. 2022. V. 68. No. 1. P. 18.
- 4. Власов В.С., Шавров В.Г., Щеглов В.И. // Радиотехн. и электрон. 2014. Т. 59. № 5. С. 482; Vlasov V.S., Shavrov V.G., Shcheglov V.I. // J. Commun. Technol. Electron. 2014. V. 59. No. 5. P. 441.
- Плешев Д.А., Асадуллин Ф.Ф., Оганезова Н.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 7. С. 987; Pleshev D.A., Asadullin F.F., Oganezova N.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 7. P. 901.
- Ferona A.M., Camley R.E. // Phys. Rev. B. 2017. V. 95. Art. No. 104421.
- 7. Власов В.С., Котов Л.Н., Шавров В.Г. и др. // Радиотехн. и электрон. 2009. Т. 54. № 7. С. 874; Vlasov V.S., Kotov L.N., Shavrov V.G. et al. // J. Commun. Technol. Electron. 2009. V. 54. No. 7. P. 832.
- 8. *Гуревич А.Г.* Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 592 с.
- 9. Дианов М.Ю., Котов Л.Н., Власов В.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 12. С. 1707.
- Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980. 280 с.
- 11. Власов В.С., Котов Л.Н., Шавров В.Г. и др. // Радиотехн. и электрон. 2012. Т. 57. № 5. С. 516; Vlasov V.S., Kotov L.N., Shavrov V.G. et al. // J. Commun. Technol. Electron. 2012. V. 57. No. 5. P. 453.
- Власов В.С., Кирушев М.С., Котов Л.Н. и др. // Радиотехн. и электрон. 2013. Т. 58. № 9. С. 857; Vlasov V.S., Kirushev M.S., Kotov L.N. et al. // J. Commun. Technol. Electron. 2013. V. 58. Р. 847.
- Власов В.С., Котов Л.Н., Липина Е.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 10. С. 1459; Vlasov V.S., Kotov L.N., Lipina E.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. No. 10. P. 1255.

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 86 № 9 2022

1368

КОТОВ и др.

Features of magnetoelastic microwave dynamics of a three-layer structure

L. N. Kotov^{a, *}, M. Yu. Dianov^a, V. S. Vlasov^a, F. F. Asadullin^b

^a Syktyvkar State University, Syktyvkar, 167001 Russia ^b Syktyvkar Forest Institute, Branch of the St. Petersburg State Forestry Engineering University, Syktyvkar, 167000 Russia *e-mail: kotovln@mail.ru

We performed numerical modeling of the magnetoelastic dynamics of a three-layer ferromagnetic structure when it is excited by a microwave magnetic field. Precession portraits of magnetic oscillations are constructed. The values of the layer parameters and field amplitudes for the conditions of maximum energy transfer from the magnetic to the elastic subsystem of the three-layer structure are determined.