

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 537.9:681.586.773

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).453-465

Поступила в редакцию / Received 29.08.2024

ГРНТИ 29.05.33+47.09.33

Специальность ВАК 1.3.8

Принята к публикации / Accepted 19.09.2024

Научная статья

ВЛИЯНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФАЗЫ НА МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ: ОБЗОР

Саплев А. Ф., Петров В. М.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В статье представлен обзор по изучению влияния внешнего электрического поля на параметры спектра магнитного резонанса в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах. Показано, что в симметричных структурах наблюдается электрически индуцированный сдвиг основной линии магнитного резонанса без изменения ширины линии. В антисимметричных структурах имеет место неоднородное уширение линии, при этом сдвиг линии не наблюдается. В общем случае наблюдается сдвиг резонансной линии и ее уширение. Определены оптимальные соотношения толщин компонентов слоистых структур различных типов для получения наибольшей величины смещения и уширения резонансной линии. Рассмотрен также магнитоэлектрический эффект в области магнитоакустического резонанса. При этом использование биморфного пьезоэлектрического слоя позволяет наблюдать гигантский МЭ эффект при наложении частот магнитного резонанса и высших мод электромеханического резонанса.

Ключевые слова: *магнитный резонанс, магнитоакустический резонанс, слоистая структура, магнитоэлектрический эффект, биморфный пьезоэлектрический преобразователь*

Для цитирования: Саплев А. Ф., Петров В. М. Влияние пьезоэлектрической фазы на магнитный резонанс в слоистых структурах: обзор // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 453-465. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137). 453-465

Research Article

PIEZOELECTRIC PHASE EFFECT ON MAGNETIC RESONANCE IN LAYERED STRUCTURES: A REVIEW

Saplev A. F., Petrov V. M.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The article presents a review of the external electric field effect on the magnetic resonance spectrum in layered ferrite-piezoelectric structures. It is shown that in symmetric structures, an electrically induced shift of the magnetic resonance line is observed without line broadening. In antisymmetric structures, an inhomogeneous line broadening takes place, while a line shift is not observed. In the general case, a shift of the resonance line and its broadening are observed. For the different layered structures, the optimum component thickness ratios are determined to obtain the maximal values of the resonance line shift and broadening. The magnetoelectric (ME) effect in the magnetoacoustic resonance region is also considered. In this case, the use of a piezoelectric bimorph layer makes it possible to observe a giant ME effect at overlaying the magnetic resonance frequency and electromechanical resonance higher modes frequencies.

Keywords: *magnetic resonance, magnetoacoustic resonance, layered structure, magnetoelectric effect, piezoelectric bimorph*

For citation: Saplev A. F., Petrov V. M. Piezoelectric phase effect on magnetic resonance in layered structures: a review // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 453-465. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).453-465

Введение

Одним из актуальных объектов исследований в области физического материаловедения является магнитоэлектрическое (МЭ) взаимодействие композиционных материалов [1-4]. Большинство однофазных материалов обладают малыми значениями МЭ коэффициентов, что затрудняет их практическое использование. При этом композиционные магнитострикционно-пьезоэлектрические материалы и структуры позволяют получить более сильный МЭ эффект, наблюдаемый при комнатной температуре. Имеющаяся связь между электрической и магнитной подсистемами открывает возможность использования таких материалов при проектировании датчиков магнитного поля, переключателей устройств, фильтров и других электронных компонентов. К достоинствам слоистых структур можно отнести высокую степень поляризации сегнетоэлектрической фазы, а также возможность использования магнитной компоненты с большой магнитострикцией. Указанные свойства позволили получить слоистые структуры с гигантским МЭ взаимодействием.

Известны многочисленные исследования МЭ эффекта в слоистых структурах [5-8], изучающих возникновение электрической поляризации, когда материал подвергается воздействию внешнего магнитного поля, или намагниченности, когда материал подвергается воздействию внешнего электрического поля. Доказано, что сила МЭ коэффициентов на несколько порядков превышает значения этих коэффициентов в однофазных материалах. Поэтому создание новых МЭ материалов с гигантским МЭ взаимодействием является важным шагом, направленным на практическое применение МЭ взаимодействия в композиционных материалах.

Представленная работа посвящена рассмотрению микроволнового МЭ эффекта в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах и влиянию пьезоэлектрической фазы на параметры магнитного резонанса.

Микроволновый магнитоэлектрический эффект в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах

Рассмотрим ферритовый слой, помещенный в смещающее магнитное поле H_0 . Будем считать это поле достаточно сильным для того, чтобы магнитострикционный слой был однородно намагничен. Известно, что для наблюдения ферромагнитного резонанса необходимо присутствие переменного магнитного поля. Пусть подмагничивающее поле H_0 направлено вдоль оси OZ, тогда переменное поле H должно лежать в плоскости XOY.

Для расчета изменения спектра магнитного резонанса под действием электрически индуцированного механического напряжения необходимо найти решение уравнения движения намагниченности [7-10].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\gamma[M, H_{eff}] \quad (1)$$

Методика определения эффективного поля H_{eff} и решения уравнения движения намагниченности подробно рассмотрена в [7-9]. При этом в плотности свободной энергии монокристалла феррита учтена энергия магнитокристаллической анизотропии, анизотропии формы и магнитоупругой энергии

Для расчета смещения линии ФМР определен тензор механических напряжений, в ферритовом слое [3, 4, 11] использован обобщенный закон Гука и материальные уравнения для фаз используемого образца. При этом учтены изгибные деформации структуры. Предполагается, что все слои конструкции имеют идеальный механический контакт.

Применим предложенную модель к важному случаю, когда в двухслойной структуре ЖИГ – ЦТС магнитное поле H параллельно оси ЖИГ [11]. В этом случае геометрические коэффициенты размагничивания составляют $N^F_{11}=N^F_{22}=0$ и $N^F_{33}=4\pi$. Полученное уравнение средней восприимчивости довольно длинное, что упрощает поиск численного решения и его графическое отображение. При численной оценке использовались следующие материальные параметры материала ЦТС: пьезоэлектрический коэффициент $p_{d31} = -175 \cdot 10^{-12}$ м/В, коэффициент податливости $p_{s11} = 15 \cdot 10^{-12}$ м²/Н. Для ЖИГ использованы материальные параметры: константы магнитострикции $\lambda_{100} = -1,4 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{111} = -2,4 \cdot 10^{-6}$. $4\pi M_0 = 1750$ Гс; поле кристаллографической анизотропии $H_a = -42$ Э; коэффициент податливости $m_{s11} = 4,8 \cdot 10^{-12}$ м²/Н.

Двухслойная структура состава железо-итриевый гранат (ЖИГ) – пьезоэлектрик ЦТС показана на рисунке 1.

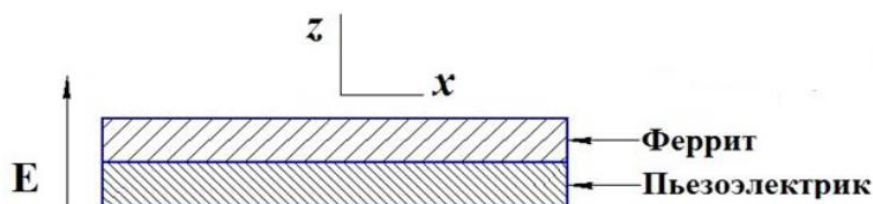


Рисунок 1. Двухслойная структура феррит-пьезоэлектрик

На рисунке 1 представлена зависимость мнимой части микроволновой восприимчивости от поля смещения на частоте 9,3 ГГц. 5 для двухслойного (111) ЖИГ и ЦТС.

На рисунке 2 ясно видны два важных эффекта. Приложение электрического поля напряженностью 30 кВ/см уширяет резонансную кривую и слегка смещает ее вниз. Ширина линии ФМР увеличилась до 20 Э.

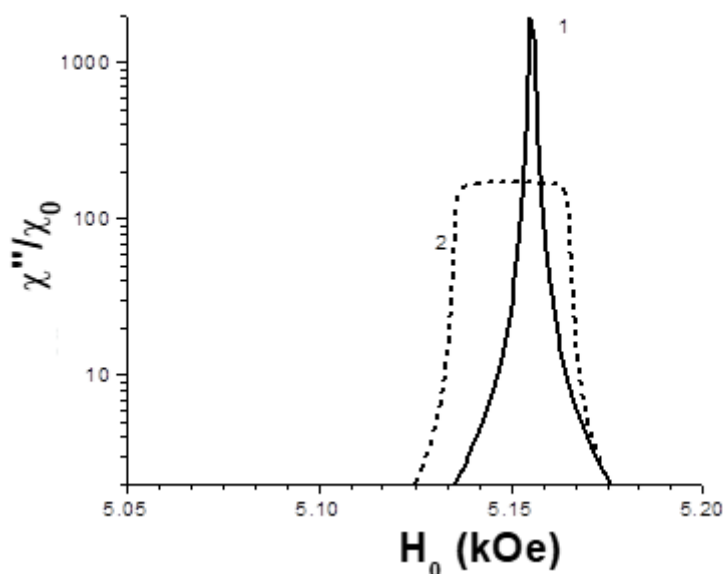


Рисунок 2. Теоретическая зависимость мнимых частей магнитной восприимчивости от магнитного поля для двухслойной структуры состава ЖИГ (111) и ЦТС на частоте 9,3 ГГц в отсутствие внешнего электрического поля (1) и в электрическом поле $E=30$ кВ/см (2). Отношение толщины ЖИГ к толщине ЦТС равно 1,2

На рисунке 3 показана зависимость от магнитного поля уширения линии ФМР бислоев ЦТС и ЖИГ на подложке из гадолиний-галлиевого граната. Как видно из рисунка 3, максимальное уширение линии ФМР равное 2,5 Э наблюдается при отношении толщины слоя ЖИГ к толщине слоя ЦТС, равном 1,2.

Трехслойная структура из пьезоэлектрического материала, ферритового материала и пьезоэлектрического материала, в которой направления поляризации пьезоэлектрических материалов одинаковы. Приложение к пьезоэлектрическому слою электрического поля той же величины и направления вызывает продольную деформацию, но образец не изгибается. В результате наблюдалось смещение резонансной линии, делающее невозможным ее уширение.

Трёхслойная структура состава железо-иттриевый гранат (ЖИГ) – пьезоэлектрик ЦТС показана на рисунке 4.

Трехслойная структура из пьезоэлектрического материала, ферритового материала и пьезоэлектрического материала с противоположными направлениями поляризации. Приложение электрического поля той же величины и направления к пьезоэлектрическому слою в конечном итоге приведет к изгибу образца. В этом случае наблюдается лишь неоднородное уширение резонансных линий.

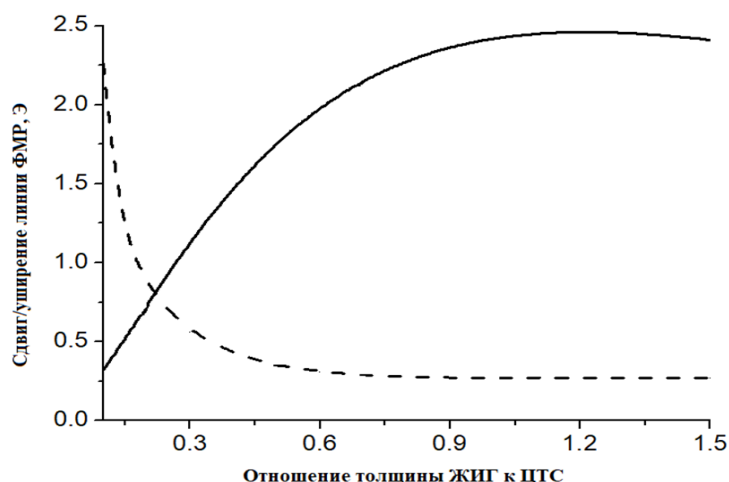


Рисунок 3. Зависимость сдвига (пунктирная линия) и уширения (сплошная линия) линии ФМР от отношения толщины слоя ЖИГ к ЦТС для двухслойной структуры

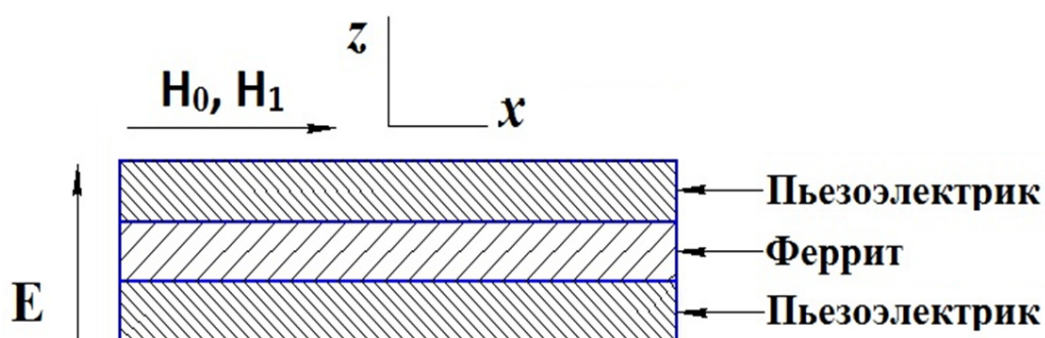


Рисунок 4. Структура пьезоэлектрик – феррит – пьезоэлектрик

Результаты моделирования показывают, что при соотношении толщин ЖИГ и ЦТС, равном 1,7, линия ФМР структуры ЦТС-ЖИГ-ЦТС с двумя слоями ЦТС с противоположными направлениями поляризации расширяется до максимума. На рисунке 5 показано влияние электрического поля $E = 30$ кВ/см на мнимую часть магнитной восприимчивости χ''/χ_0 (χ_0 – статическая восприимчивость) для трехслойного ЦТС-ЖИГ-ЦТС с параллельным и противоположным направлениями полярности слоев ЦТС.

Рисунок 6 показывает, что максимальное уширение линии ФМР 9.2 Э наблюдается при отношении толщин слоев ЦТС к ЖИГ, равном 1.7.

Как видно на рисунке 7 сдвиг линии для трёхслойной структуры совпадает со сдвигом линии в двухслойной структуре.

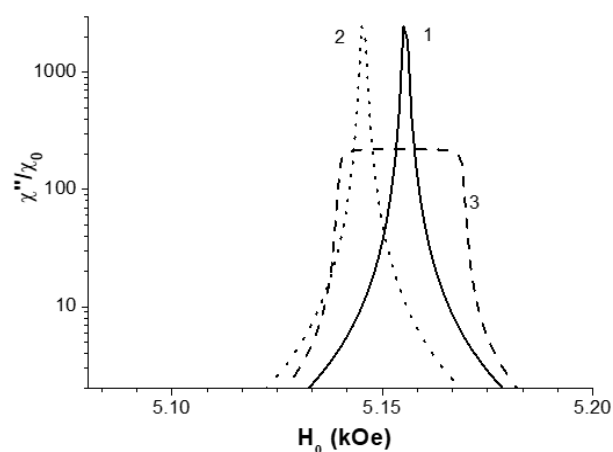


Рисунок 5. Зависимость мнимой части магнитной восприимчивости от подмагничивающего поля для структур ЦТС-ЖИГ-ЦТС при 9.3 ГГц: 1 - для $E=0$, 2 – для $E=30$ кВ/см для структуры с параллельными направлениями поляризации слоев ЦТС для отношения толщины слоя ЖИГ к ЦТС, равному 0.1, 3 – для $E=30$ кВ/см для структуры с противоположными направлениями поляризации слоев ЦТС для отношения толщины слоя ЖИГ к ЦТС, равному 1.7



Рисунок 6. Зависимость уширения линии ФМР от отношения толщины ЖИГ и двух слоев ЦТС с противоположными направлениями поляризации

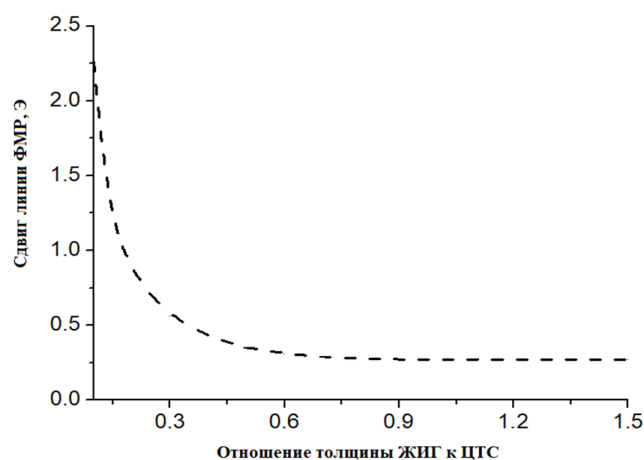


Рисунок 7. Зависимость сдвига линии ФМР от отношения толщины ЖИГ и двух слоев ЦТС с противоположными направлениями поляризации

Для уменьшения влияния пьезоэлектрического слоя на СВЧ поле феррита между слоями можно использовать дополнительный буферный слой, как показано на рисунке 8.

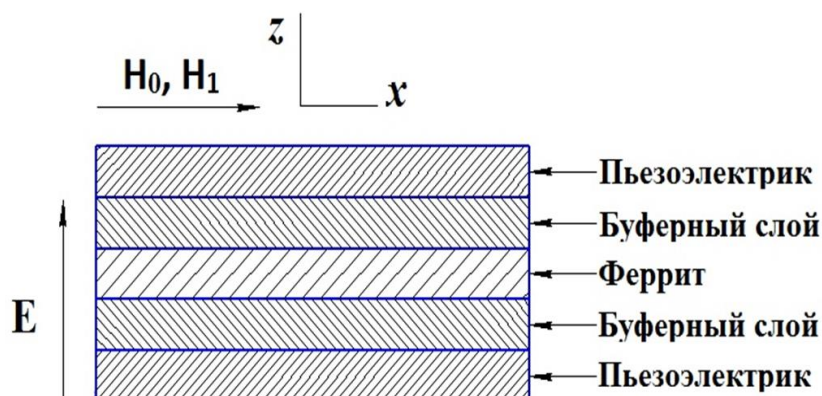


Рисунок 8. Пятислойная структура: Пьезоэлектрик – буферный слой – феррит – буферный слой – пьезоэлектрик

Рисунок 9 показывает, что максимальное уширение линии ФМР 9.3 Э наблюдается при отношении толщин слоев ЦТС к ЖИГ, равном 1.5.

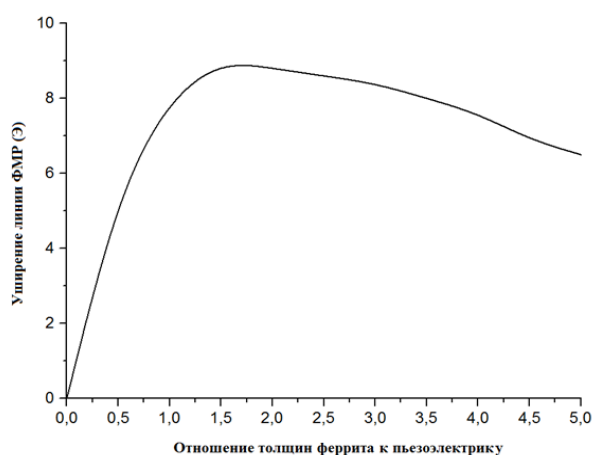


Рисунок 9. Зависимость неоднородного уширения линии ФМР от отношения толщины слоя ЖИГ к ЦТС в пятислойной структуре

На рисунке 10 видно, что зависимость уширения спектральной линии ФМР от толщины буферного слоя имеет максимальное значение. Обратите внимание, что буферный слой может использоваться для уменьшения влияния слоя ЦТС на диаграмму направленности микроволнового поля. Это объясняется перераспределением осевой деформации, вызванной буферным слоем. Среднее смещение линий ФМР составляет около 3 Э.

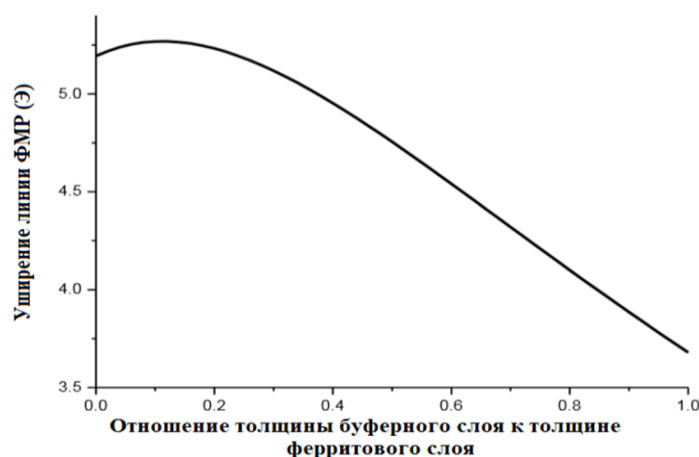


Рисунок 10. Зависимость неоднородного уширения линии ФМР от отношения толщины буферного слоя к толщине ЖИГ

Магнитоэлектрический эффект в области магнитоакустического резонанса

Как уже упоминалось, МЭ эффект в слоистых магнестрикционно-пьезоэлектрических структурах существует благодаря связи магнитной и электрической подсистем посредством упругих деформаций. Внешнее магнитное поле вследствие магнестрикции в магнитной компоненте ведет к возникновению упругих напряжений. Механические напряжения передаются в пьезоэлектрическую компоненту и индуцируют поляризацию электрической компоненты [1-7, 10].

Теоретическое моделирование показывает, что между механическим напряжением и однородной прецессией намагниченности ферритовой фазы существует связь через граничные условия на поверхностях пластинки. При приближении частоты переменного магнитного поля к частоте однородной прецессии намагниченности $\omega_0 = \gamma H_0 - 4\pi\gamma M_0$ величина механического напряжения резко возрастает. Механическое напряжение благодаря пьезоэлектрическому эффекту индуцирует электрическое поле в пьезоэлектрической компоненте. Теоретические оценки приводят к гигантским значениям МЭ коэффициента по напряжению порядка 80 – 480 В/(см Э) для двухслойных структур ЖИГ – ЦТС.

Рассмотрим результаты исследования индуцированного механического напряжения выходное электрическое поле в области магнитоакустического резонанса в слоистой структуре на основе ферритового слоя и биморфного пьезоэлектрического преобразователя [10, 12]. При этом подмагничивающее поле полагается достаточно большим для обеспечения малых магнитных потерь ферритового слоя. Биморфный пьезоэлектрический слой используется для преобразования механической энергии в электрическую. Таким образом, такой преобразователь дает возможность подавлять выходной электрический сигнал на некоторых типах колебаний, в то время как на других типах колебаний имеет место существенное увеличение выходного напряжения. Замена керамики ЦТС на монокристаллический лангитат позволило

уменьшить зависимость пьезоэлектрических модулей от напряженности электрического поля и температуры, а также расширить температурный интервал использования. В предлагаемой работе в качестве пьезоэлектрической фазы используется двухслойная компонента на основе Y-среза бессвинцового монокристаллического лангатата, при этом два слоя лангатата имеют противоположные направления оси Y. При выборе лангатата учтено, что отношение пьезоэлектрического модуля к диэлектрической проницаемости для лангатата материала выше, чем у ЦТС. Известно, что прямой МЭ эффект пропорционален отношению пьезоэлектрического модуля к диэлектрической проницаемости. Таким образом, можно ожидать, что использование лангатата приводит к большому МЭ эффекту. Используется Y-срез лангатата, у которого наблюдается реакция только на сдвиговые деформации. При получении теоретических оценок предполагалось, что постоянное магнитное поле перпендикулярно плоскости образца. Переменное внешнее магнитное поле лежит в плоскости образца.

Для моделирования МЭ взаимодействия в качестве исходных используются уравнения движения ферритового и двух пьезоэлектрических слоев, уравнение движения намагниченности ферритовой фазы, а также обобщенный закон Гука аналогично [13]. Для совместного решения указанных уравнений используются стандартные граничные условия, соответствующие непрерывности смещений и напряжений на границах раздела. Результаты численного решения указанных уравнений для слоистой структуры ЖИГ – биморфный пьезопреобразователь из Y-среза лангатата приведены на рисунке 11. Толщина слоя ЖИГ выбрана равной 0,4 мкм, общая толщина биморфного пьезоэлемента – 0.52 мкм. На рисунке 11 приведена частотная зависимость МЭ коэффициента по напряжению для третьей резонансной частоты при подмагничивающем поле $H_0=3520$ Э. Для сравнения на этом же рисунке приведен аналогичный график для обычной двухслойной структуры ЖИГ-лангатат.

Как следует из графика на рисунка 11, МЭ эффект подавляется на третьей резонансной частоте 4.96 GHz для двухслойной структуры ЖИГ-лангатат, в то время как для структуры ЖИГ - биморфный слой наблюдается значительное увеличение МЭ коэффициента по напряжению. Гигантский МЭ эффект связан с особенностями колебаний на частоте 4.96 GHz.

На рисунке 12 приведено распределение индуцированного электрического поля по толщине пьезоэлектрика. Из этого графика видно, что в случае двухслойной структуры ЖИГ-лангатат среднее значение индуцированного напряжения за полный период колебаний приблизительно равно нулю.

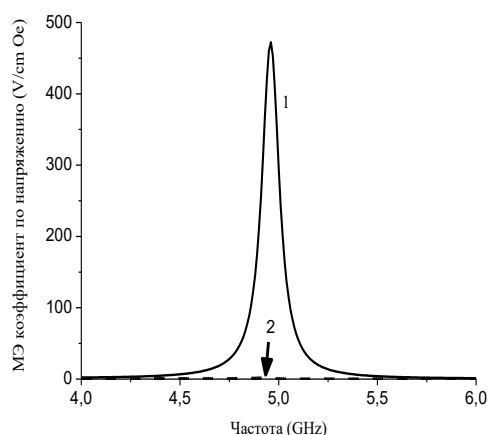


Рисунок 11. Частотная зависимость МЭ коэффициента по напряжению для слоистой структуры ЖИГ - биморфный пьезоэлемент на основе Y-среза лангатата (1) и двухслойной структуры ЖИГ - Y-срез лангатата (2) для $H_0=3520$ Oe

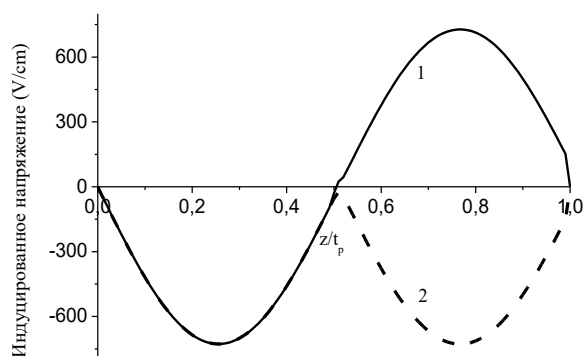


Рисунок 12. Распределение индуцированного электрического поля по толщине пьезоэлектрика для двухслойной структуры ЖИГ – лангатат (1) и слоистой структуры ЖИГ - биморфный пьезоэлемент на основе Y-среза лангатата (2) для $H_0=3520$ Oe и переменного магнитного поля 1 Oe

В случае слоистой структуры ЖИГ - биморфный пьезоэлемент индуцированное напряжение имеет одинаковые знаки в первом и втором полупериоде колебаний, при этом суммарное значение выходного сигнала существенно больше нуля по абсолютной величине.

Обнаруженный эффект может быть использован при исследовании МЭ эффекта в области наложения частот магнитного резонанса и высших типов механических колебаний образца для увеличения МЭ коэффициента [12].

Заключение

В работе приведены результаты рассмотрения микроволнового МЭ эффекта в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах и влиянию состава пьезоэлектрической фазы на параметры магнитного резонанса. Рассмотрены слоистые структуры на основе однородной пьезоэлектрической фазы, на основе

биморфного пьезоэлектрического преобразователя, определены оптимальные значения отношения толщин феррита и пьезоэлектрика. Рассмотрена также возможность уменьшения влияния пьезоэлектрического слоя на СВЧ поле феррита путем размещения между слоями дополнительного буферного диэлектрического слоя.

Наблюдаемый гигантский МЭ эффект в слоистой структуре состав феррит - биморфный пьезоэлемент рекомендуется использовать при исследовании МЭ эффекта в области наложения частот магнитного резонанса и высших типов механических колебаний образца. При этом наблюдаемое значение МЭ коэффициента значительно превышает его значение для стандартной двуслойной структуры.

Список литературы

1. Nan C.-W., Bichurin M. I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions. *Journal of Applied Physics*. 2008. 103 (3). 031101. DOI: 10.1063/1.2836410.
2. Fiebig M. Revival of the magnetoelectric effect. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2005. 38 (8). R123-R152. DOI: 10.1088/0022-3727/38/8/R01
3. Bichurin M. I., Petrov V. M. *Modeling of Magnetoelectric Effects in Composites*. Springer Netherlands, 2014. Springer in Materials Science. Series 201. DOI: 10.1007/978-94-017-9156-4
4. Bichurin M. I., Petrov V. M., Petrov R. V., Tatarenko A. S. *Magnetoelectric Composites*. Pan Stanford Publishing. Pte. Ltd, 2019. DOI: 10.1201/9780429488672
5. Bichurin M. I., Kornev I. A., Petrov V. M., Tatarenko A. S., Kiliba Yu. V., Srinivasan G. Theory of magnetoelectric effects at microwave frequencies in a piezoelectric/magnetostrictive multilayer composite. *Physical Review B: Condensed matter and Materials physics*. 2001. 64 (9). 944091-944096. DOI: 10.1103/PhysRevB.64.094409
6. Shastry S., Srinivasan G., Bichurin M. I., Petrov V. M., Tatarenko A. S. Microwave magnetoelectric effects in single crystal bilayers of yttrium iron garnet and lead magnesium niobate-lead titanate. *Physical Review B: Condensed matter and Materials physics*. 2004. 70 (6). 064416. DOI: 10.1103/PhysRevB.70.064416
7. Petrov V. M., Bichurin M. I., Saplev A. F., Tatarenko A. S., Lobekin V. N. Electric field induced broadening of magnetic resonance line in ferrite/piezoelectric bilayer. *Journal of Applied Physics*. 2017. 121 (22). 224103. DOI: 10.1063/1.4985069
8. Саплев А. Ф., Петров В. М. Управление параметрами магнитного резонанса в слоистой структуре феррит-пьезоэлектрик. *Вестник НовГУ*. 2022. 3 (128). 108-110. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).108-110
9. Pettiford C., Dasgupta S., Lou J., Yoon S. D., Sun N. X. Bias Field Effects on Microwave Frequency Behavior of PZT/YIG Magnetoelectric Bilayer. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007. 43 (7). 3343-3345. DOI: 10.1109/TMAG.2007.893790
10. Петров В. М., Саплев А. Ф. Магнитоакустический резонанс в слоистой структуре ферритбиморфный пьезоэлемент. Мультиферроики: получение, свойства, применение: материалы международной научно-практической конференции, Витебск, 24-27 сентября 2019 г. / под. редакцией В. В. Рубаника. Витебск: УО «ВГТУ», 2019. С. 88-90. DOI: 10.26201/ISSP.2019.45.557/MFerro.36
11. Лобекин В. Н., Бичурин М. И., Кафаров Р. Г., Петров Р. В. Исследование зависимости сдвига линии ферромагнитного резонанса от параметров

пьезоэлектриков. Вестник НовГУ. 2023. 5 (134). 773-779. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).773-779

12. Petrov V., Saplev A., Srinivasan G. Magneto-acoustic resonance in layered structure of ferrite and piezoelectric bimorph. *Ferroelectrics*. 2020. 569 (1). 196-200. DOI: 10.1080/00150193.2020.1822676

13. Bichurin M. I., Petrov V. M., Ryabkov O. V., Averkin S.V., Srinivasan G. *Physical Review B: Condensed matter and Materials physics*. 2005. 72. 060408(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.72.060408

References

1. Nan C.-W., Bichurin M. I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions. *Journal of Applied Physics*. 2008. 103 (3). 031101. DOI: 10.1063/1.2836410.

2. Fiebig M. Revival of the magnetoelectric effect. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2005. 38 (8). R123-R152. DOI: 10.1088/0022-3727/38/8/R01

3. Bichurin M. I., Petrov V. M. *Modeling of Magnetoelectric Effects in Composites*. Springer Netherlands, 2014. Springer in Materials Science. Series 201. DOI: 10.1007/978-94-017-9156-4

4. Bichurin M. I., Petrov V. M., Petrov R. V., Tatarenko A. S. *Magnetoelectric Composites*. Pan Stanford Publishing. Pte. Ltd, 2019. DOI: 10.1201/9780429488672

5. Bichurin M. I., Kornev I. A., Petrov V. M., Tatarenko A. S., Kiliba Yu. V., Srinivasan G. Theory of magnetoelectric effects at microwave frequencies in a piezoelectric/magnetostrictive multilayer composite. *Physical Review B: Condensed matter and Materials physics*. 2001. 64 (9). 944091-944096. DOI: 10.1103/PhysRevB.64.094409

6. Shastry S., Srinivasan G., Bichurin M. I., Petrov V. M., Tatarenko A. S. Microwave magnetoelectric effects in single crystal bilayers of yttrium iron garnet and lead magnesium niobate-lead titanate. *Physical Review B: Condensed matter and Materials physics*. 2004. 70 (6). 064416. DOI: 10.1103/PhysRevB.70.064416

7. Petrov V. M., Bichurin M. I., Saplev A. F., Tatarenko A. S., Lobekin V. N. Electric field induced broadening of magnetic resonance line in ferrite/piezoelectric bilayer. *Journal of Applied Physics*. 2017. 121 (22). 224103. DOI: 10.1063/1.4985069

8. Saplev A. F., Petrov V. M. Control of magnetic resonance parameters in the layered structure of ferrite-piezoelectric. *Vestnik NovSU*. 2022. 3 (128). 108-110. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).108-110

9. Pettiford C., Dasgupta S., Lou J., Yoon S. D., Sun N. X. Bias Field Effects on Microwave Frequency Behavior of PZT/YIG Magnetoelectric Bilayer. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007. 43 (7). 3343-3345. DOI: 10.1109/TMAG.2007.893790

10. Petrov V. M., Saplev A. F. Magnitoakusticheskiy rezonans v sloistoj strukture ferritbimorfnyj p'ezoelement [Magnetoacoustic resonance in a layered structure of a ferrite-dimorphic piezoelectric element] // Mul'tiferroiki: poluchenie, svoystva, primeneniye: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Multiferroics: preparation, properties, application: materials of the international scientific and practical conference], Vitebsk, September 24-27, 2019 / ed. V. V. Rubanik. Vitebsk: UO «VGTU», 2019. P. 88-90. DOI: 10.26201/ISSP.2019.45.557/MFerro.36

11. Lobekin V. N., Bichurin M. I., Kafarov R. G., Petrov R. V. Investigation of the dependence of the shift of the ferromagnetic resonance line on the parameters of piezoelectric. *Vestnik NovSU*. 2023. 5 (134). 773-779. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).773-779

12. Petrov V., Saplev A., Srinivasan G. Magneto-acoustic resonance in layered structure of ferrite and piezoelectric bimorph. *Ferroelectrics*. 2020. 569 (1). 196-200. DOI: 10.1080/00150193.2020.1822676

13. Bichurin M. I., Petrov V. M., Ryabkov O. V., Averkin S.V., Srinivasan G. *Physical Review B: Condensed matter and Materials physics*. 2005. 72. 060408(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.72.060408

Информация об авторах

Сапле́в Алексе́й Фёдорович – преподаватель, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0008-9052-7987, Alexey.Saplev@novsu.ru

Петров Влади́мир Миха́йлович – доктор технических наук, профессор, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-7733-1030, Vladimir.Petrov@novsu.ru