

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 5
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(5)

Научная статья
УДК 537.86

DOI: 10.18500/0869-6632-003004
EDN: ROMWUU

Модуляция магнитоимпеданса в планарной магнитоэлектрической гетероструктуре ферромагнетик – пьезоэлектрик

Д. А. Бурдин, Д. В. Чашин, Н. А. Экономов, Ю. К. Фетисов ✉

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия
E-mail: phantastic@mail.ru, chashin@mirea.ru, economov@list.ru, ✉fetisov@mirea.ru
Поступила в редакцию 27.05.2022, принята к публикации 18.08.2022,
опубликована 30.09.2022

Аннотация. Эффект гигантского изменения импеданса ферромагнитных материалов под действием внешнего магнитного поля широко применяют для создания высокочувствительных датчиков магнитных полей. Цель данной работы состояла в демонстрации возможностей управления величиной магнитоимпеданса в структуре ферромагнетик–пьезоэлектрик с помощью электрического поля. Метод. В измерениях использовали планарную гетероструктуру, содержащую полосу из аморфного ферромагнетика Metglas толщиной 25 мкм и длиной 25 мм, механически соединенную с биморфом толщиной 0.5 мм и длиной 30 мм из пьезокерамики цирконата-титаната свинца. Через полосу пропускали переменный ток с частотой 30 кГц...10 МГц, структуру помещали в продольное постоянное магнитное поле 0...500 Э, к пьезобиморфу прикладывали переменное электрическое поле напряженностью до 400 В/см с частотой 60 Гц...50 кГц и регистрировали изменение величины импеданса полосы. Результаты. В отсутствие электрического поля обнаружено сужение области магнитных полей существования магнитоимпеданса при уменьшении частоты тока и насыщение магнитоимпеданса в магнитных полях выше 334 Э. Максимальная величина магнитоимпеданса достигала 18% при частоте тока через полосу 1 МГц. Приложение электрического поля к пьезобиморфу приводило к появлению в спектре частот напряжения на ферромагнитном слое боковых составляющих, что свидетельствует об амплитудно-фазовой модуляции магнитоимпеданса. Коэффициент амплитудной модуляции достигал максимального значения $6 \cdot 10^{-3}$ при частоте электрического поля 11.2 кГц и монотонно падал при увеличении магнитного поля. Модуляция магнитоимпеданса возникает в результате обратного магнитоэлектрического эффекта в гетероструктуре, приводящего к модуляции намагниченности ферромагнитного слоя и последующему изменению относительной магнитной проницаемости и толщины скин-слоя в ферромагнетике. Результаты могут быть использованы для создания датчиков магнитных полей, управляемых электрическим полем.

Ключевые слова: магнитоимпеданс, композитная гетероструктура, ферромагнетик, пьезоэлектрик, магнитоэлектрический эффект.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00811.

Для цитирования: Бурдин Д. А., Чашин Д. В., Экономов Н. А., Фетисов Ю. К. Модуляция магнитоимпеданса в планарной магнитоэлектрической гетероструктуре ферромагнетик – пьезоэлектрик // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 5. С. 554–562. DOI: 10.18500/0869-6632-003004. EDN: ROMWUU

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Magnetoimpedance modulation in a planar magnetoelectric ferromagnet – piezoelectric heterostructure

D. A. Burdin, D. V. Chashin, N. A. Ekonomov, Y. K. Fetisov✉

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
E-mail: phantastic@mail.ru, chashin@mirea.ru, ekonomov@list.ru, ✉fetisov@mirea.ru
Received 27.05.2022, accepted 18.08.2022, published 30.09.2022

Abstract. The effect of a giant change in the impedance of ferromagnetic materials under the action of an external magnetic field is widely used to elaborate highly sensitive magnetic field sensors. The *purpose* of this work was to demonstrate the possibilities of controlling the magnitude of the magnetoimpedance in a ferromagnet-piezoelectric structure using an electric field. *Method.* In the measurements, we used a planar heterostructure containing a strip of amorphous ferromagnet Metglas, 25 μm thick and 25 mm long, mechanically connected to a bimorph, 0.5 mm thick and 30 mm long, made of piezoceramic lead zirconate titanate. An alternating current with a frequency of 30 kHz...10 MHz was passed through the strip, the structure was placed in a longitudinal permanent magnetic field of 0...500 Oe, an alternating electric field up to 400 V/cm with a frequency of 60 Hz...50 kHz was applied to the piezobimorph, and the change in the impedance of the strip was recorded. *Results.* In the absence of electric field, a narrowing of the magnetoimpedance magnetic fields region with a decrease in the current frequency and saturation of the magnetoimpedance in magnetic fields above 334 Oe were observed. The maximum value of the magnetoimpedance reached 18% at a current frequency of 1 MHz. The application of electric field to the piezobimorph led to the appearance of side components in the frequency spectrum of the voltage on the ferromagnetic layer, which indicates the amplitude-phase modulation of the magnetoimpedance. The amplitude modulation coefficient reached a maximum value of $6 \cdot 10^{-3}$ for the electric field frequency of 11.2 kHz and decreased monotonically with an increase in the magnetic field. The modulation of the magnetoimpedance occurs due to the converse magnetoelectric effect in the heterostructure, which leads to the modulation of the magnetization of the ferromagnetic layer, and the subsequent change in the relative magnetic permeability and thickness of the skin layer in the ferromagnet. The results obtained can be used to create magnetic fields sensors controlled by an electric field.

Keywords: magnetoimpedance, composite heterostructure, ferromagnet, piezoelectric, magnetoelectric effect.

Acknowledgements. The work was supported by Russian Foundation for Basic Research, grant No 20-07-00811.

For citation: Burdin DA, Chashin DV, Ekonomov NA, Fetisov YK. Magnetoimpedance modulation in a planar magnetoelectric ferromagnet – piezoelectric heterostructure. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(5):554–562. DOI: 10.18500/0869-6632-003004

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

Эффект гигантского магнитоимпеданса (ГМИ) в аморфных магнитных проводящих материалах интенсивно изучают в последние десятилетия в связи с перспективами его использования для создания высокочувствительных датчиков магнитных полей [1]. Эффект проявляется в изменении импеданса образца с текущим по нему высокочастотным током под действием постоянного магнитного поля и возникает из-за изменения величины магнитной проницаемости и скин-слоя магнитного проводника [2, 3]. В аморфных ферромагнетиках на основе железа и кобальта, обладающих гигантской магнитной проницаемостью ($\mu \sim 10^5$) в слабых магнитных полях ($H \sim 100$ Э), вызванное магнитным полем изменение импеданса может достигать сотен процентов и сильно зависит от состава и геометрии образцов (микропровода, пленки, многослойные структуры), технологии их изготовления, частоты и амплитуды тока, различных внешних воздействий [4]. Показано, в частности, что к изменению импеданса аморфных материалов, обладающих магнито-стрикцией, приводит деформация образца (stress-impedance effect) [5]. В аморфных магнитных лентах различных составов наблюдали изменение импеданса до 40% под действием растягивающих механических напряжений 200 МПа [6]. Импеданс таких материалов изменяется вследствие

обратной магнитострикции (эффект Виллари), вызывающей изменение намагниченности M , а следовательно, и магнитной проницаемости μ материала, под действием деформации.

Особый интерес представляет исследование ГМИ в композитных гетероструктурах, содержащих механически связанные ферромагнитные (ФМ) и пьезоэлектрические (ПЭ) слои. В таких структурах имеют место магнитоэлектрические (МЭ) эффекты, приводящие к изменению электрической поляризации структуры P под действием магнитного поля H (прямой МЭ-эффект) или изменению намагниченности структуры M под действием электрического поля E (обратный МЭ-эффект) [7]. МЭ-эффекты возникают в результате комбинации магнитострикции ФМ-слоя и пьезоэлектричества в ПЭ-слое структур. Очевидно, что МЭ-эффекты могут быть использованы для динамического управления магнитоимпедансом ФМ-слоя с помощью магнитного или электрического полей.

К настоящему времени опубликовано всего несколько работ, посвященных исследованию ГМИ в композитных гетероструктурах. В кольцевом резонаторе со слоями из керамики цирконата-титаната свинца (PZT) и Терфенола на частоте акустического резонанса 70 кГц наблюдали изменение емкостной составляющей импеданса на 225% под действием магнитного поля 800 мТл [8]. В слоистой структуре аморфный ферромагнетик Metglas – PZT прямоугольной формы на частоте резонанса около 60 кГц обнаружено изменение индуктивной и емкостной составляющих импеданса до 450% в магнитном поле 100 Э [9]. Авторы [10] исследовали ГМИ в структурах Metglas – PZT и Терфенол – PZT и показали, что величина магнитоимпеданса существенно зависит от магнитной и диэлектрической проницаемостей, магнитострикции и модулей Юнга слоев структур, на частоте резонанса 130 кГц зарегистрировали вызванное магнитным полем изменение импеданса структуры Metglas – PZT на 600%, что в 8.6 раз больше, чем для структуры Терфенол – PZT.

В данной работе исследован эффект ГМИ в планарной гетероструктуре Metglas – PZT в широкой полосе частот тока, протекающего через ферромагнитный слой. Впервые обнаружен эффект модуляции магнитоимпеданса под действием гармонического электрического поля, приложенного к PZT-слою структуры. В первой части статьи описана гетероструктура и методики измерений. Во второй части изложены результаты измерений. Далее обсуждаются результаты и сформулированы основные выводы работы.

1. Образец и методики измерений

Исследуемая гетероструктура и блок-схема измерительной установки схематически изображены на рис. 1. Структура содержала ФМ-слой и ПЭ-слой. ФМ-слой изготовлен из ленты аморфного ферромагнетика FeBSiC (Metglas 2605SA1, Metglas Inc., USA), имел размеры 23×1.7 мм, толщину 25 мкм, намагниченность насыщения $M_S = 1.56$ Тл, максимальную магнитную проницаемость $\mu \sim 1.2 \cdot 10^5$, магнитострикцию насыщения $\lambda_S = 25 \cdot 10^{-6}$ и удельное сопротивление $\rho \approx 120 \cdot 10^{-6}$ Ом·см. ПЭ-слой представлял собой биморф, изготовленный из двух пластин пьезокерамики $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ (PZT) (АО «НИИ Элпа», Москва, Россия) размерами 30×13 мм и толщиной 0.25 мм каждая. На поверхности биморфа были нанесены Ag-электроды толщиной приблизительно по 3 мкм и слои были поляризованы навстречу друг другу. Слой Metglas и PZT-биморф были соединены с помощью цианоакрилатного клея.

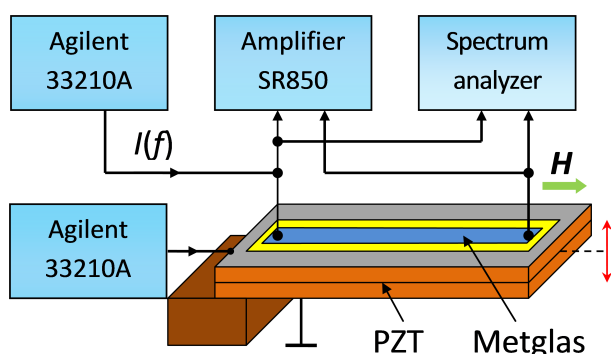


Рис. 1. Схематическое изображение структуры Metglas – PZT-биморф и блок-схема измерительной установки

Fig. 1. Schematic representation of the Metglas – PZT bimorph structure and block diagram of the measuring setup

Исследуемая гетероструктура и блок-схема измерительной установки схематически изображены на рис. 1. Структура содержала ФМ-слой и ПЭ-слой. ФМ-слой изготовлен из ленты аморфного ферромагнетика FeBSiC (Metglas 2605SA1, Metglas Inc., USA), имел размеры 23×1.7 мм, толщину 25 мкм, намагниченность насыщения $M_S = 1.56$ Тл, максимальную магнитную проницаемость $\mu \sim 1.2 \cdot 10^5$, магнитострикцию насыщения $\lambda_S = 25 \cdot 10^{-6}$ и удельное сопротивление $\rho \approx 120 \cdot 10^{-6}$ Ом·см. ПЭ-слой представлял собой биморф, изготовленный из двух пластин пьезокерамики $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ (PZT) (АО «НИИ Элпа», Москва, Россия) размерами 30×13 мм и толщиной 0.25 мм каждая. На поверхности биморфа были нанесены Ag-электроды толщиной приблизительно по 3 мкм и слои были поляризованы навстречу друг другу. Слой Metglas и PZT-биморф были соединены с помощью цианоакрилатного клея.

Слой клея толщиной порядка 10 мкм передавал механические деформации через границу раздела и обеспечивал электрическую изоляцию слоя Metglas от электрода PZT-биморфа. Структура была закреплена на массивном основании на одном конце, так что она могла совершать изгибные колебания. Выбор PZT-биморфа, который создает значительно большие деформации, чем один PZT-слой, позволил исследовать эффекты на низких частотах. Структура была помещена между полюсами электромагнита в постоянное магнитное поле $H = 0 \dots 400$ Э, приложенное вдоль ее длинной оси. Через полосу Metglas пропускали переменный ток $I \cos(2\pi ft)$ с амплитудой до $I = 200$ мА и частотой в диапазоне $f = 50$ Гц...10 МГц от генератора сигналов произвольной формы Agilent 33210A. К электродам PZT-биморфа от второго генератора Agilent 33210A прикладывали переменное напряжение $U \cos(2\pi Ft)$ с частотой $F = 10$ Гц...100 кГц и амплитудой до 10 В, которое создавало в пьезоэлектрике переменное поле с амплитудой до $E = 400$ В/см. С помощью синхронного детектора SR850 измеряли падение напряжения $u \cos(2\pi ft + \varphi)$ между концами ФМ-полоски, где φ — сдвиг фаз между напряжением и током. По измеренным значениям напряжения u и тока I определяли импеданс полоски Metglas $Z = u/I$, а затем рассчитывали величину магнитоимпеданса MI при поле H по формуле

$$MI(H) = \frac{Z(H) - Z(H_S)}{Z(H_S)} 100\%, \quad (1)$$

где $Z(H)$ — импеданс ФМ-полоски при поле H , $Z(H_S)$ — импеданс в поле насыщения H_S . Магнитное поле измеряли гауссметром LakeShore модель 421 с точностью 0.1 Э. Измерения проводили сначала в отсутствие электрического поля, а затем при различных амплитудах и частотах поля E , приложенного к PZT-биморфу. Спектр частот напряжения на полоске Metglas измеряли с помощью спектроанализатора Siglent SSA3021X. Все измерения проводили при комнатной температуре, которую поддерживали с точностью 0.5° С.

2. Результаты измерений

На первом этапе были исследованы характеристики магнитоимпеданса в описанной структуре без приложения напряжения к PZT-биморфу. Ток через полосу устанавливали в интервале $I = 20 \dots 200$ мА. В отсутствие поля $H = 0$ при токе 200 мА с частотой 1 МГц падение напряжения на полоске составляло $u = 137$ мВ и величина импеданса равнялась $Z(0) = 0.635$ Ом, а при поле насыщения $H_S = 400$ Э импеданс равнялся $Z(H_S) = 0.61$ Ом.

На рис. 2 приведены зависимости магнитоимпеданса MI от магнитного поля H для разных частот тока f через полосу Metglas при амплитуде тока $I = 200$ мА. Для наглядности по вертикальной оси графика выбран логарифмический масштаб. Видно, что с увеличением частоты тока от 34 кГц до 10 МГц величина магнитоимпеданса растет и область полей, где магнитное поле влияет на импеданс, расширяется примерно от 20 до 334 Э. Определенное экспериментально поле $H_S \approx 334$ Э можно считать полем насыщения магнитоимпеданса (см. формулу (1)) в полоске Metglas.

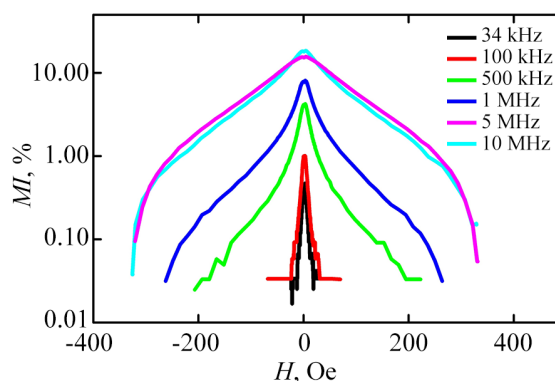


Рис. 2. Зависимость магнитоимпеданса MI структуры Metglas–PZT-биморф от магнитного поля H при разных частотах тока f (цвет online)

Fig. 2. Magnetoimpedance of the Metglas–PZT bimorph structure vs. dc magnetic field H for different current frequencies f (color online)

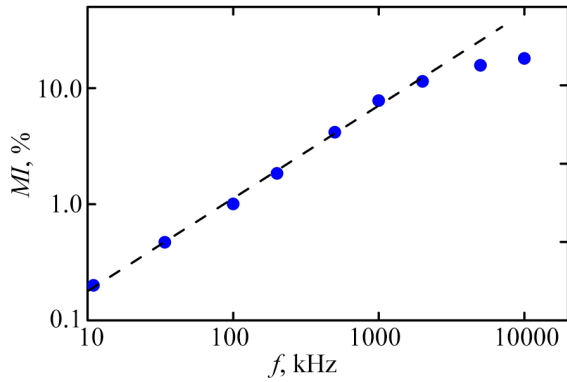


Рис. 3. Зависимость магнитоимпеданса MI структуры Metglas–PZT-биморф от частоты тока f при $H = 0$

Fig. 3. Magnetoimpedance of the Metglas–PZT bimorph structure vs. current frequency f at $H = 0$

туре. На рис. 4 в качестве примера показаны спектры MI напряжения, измеренные для тока с амплитудой 200 мА и частотой $f = 1$ МГц при $H = 0$ и разных частотах F электрического поля. Видно, что электрическое поле приводит к модуляции магнитоимпеданса структуры. В отсутствие переменного поля ($E = 0$) и при всех частотах поля амплитуда центральной линии спектра составляла $u_0 \approx 10$ мВ, а ширина линии

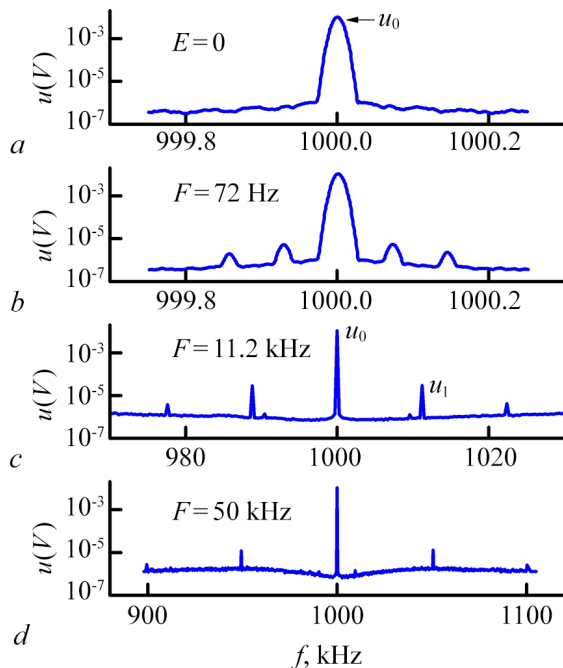


Рис. 4. Спектр частот MI напряжения: a – без электрического поля $E = 0$, при поле $E = 400$ В/см с частотой F : b – 72 Гц, c – 11.2 кГц, d – 50 кГц

Fig. 4. Frequency spectrum of the MI voltage: a – without electric field, at the field $E = 400$ V/cm with frequency F : b – 72 Hz, c – 11.2 kHz, d – 50 kHz

Форма зависимостей не изменялась при инверсии направления магнитного поля ($H \rightarrow -H$). На рис. 3 приведена зависимость магнитоимпеданса MI от частоты тока f через ферромагнитный слой структуры в отсутствие магнитного поля при $I = 200$ мА. Видно, что с увеличением частоты тока магнитоимпеданс монотонно растет и достигает максимального значения 18% при частоте около 10 МГц. Причем в области частот от 10 кГц приблизительно до 2 МГц в логарифмических координатах зависимость линейная. С увеличением частоты тока выше 10 МГц магнитоимпеданс уменьшался.

Затем исследовали влияние электрического поля E , приложенного к PZT-биморфу, на характеристики магнитоимпеданса в структуре. На рис. 4 в качестве примера показаны спектры MI напряжения, измеренные для тока с амплитудой 200 мА и частотой $f = 1$ МГц при $H = 0$ и разных частотах F электрического поля. Видно, что электрическое поле приводит к модуляции магнитоимпеданса структуры. В отсутствие переменного поля ($E = 0$) и при всех частотах поля амплитуда центральной линии спектра составляла $u_0 \approx 10$ мВ, а ширина линии у основания равнялась 54 Гц. При приложении электрического поля к PZT-биморфу в спектре напряжения появлялись по две боковые линии с каждой стороны от центральной составляющей, отстоящие от нее на величину, кратную частоте накачки. Появление боковых линий наблюдали при частотах модуляции от 60 Гц до 100 кГц. Амплитуда боковых составляющих спектра немонотонно зависела от частоты электрического поля F . Как видно из рис. 4, наибольшую амплитуду $u_1 \approx 30$ мкВ первая боковая составляющая имела при частоте электрического поля $F = 11.2$ кГц.

На рис. 5 в качестве примера показана зависимость амплитуды боковой составляющей спектра u_1 от амплитуды переменного электрического поля E при частоте тока 1 МГц, частоте поля $F = 11.2$ кГц и $H = 0$. Видно, что в исследованном диапазоне амплитуд поля зависимость линейна. На рис. 6 приведена зависимость амплитуды боковой составляющей спектра u_1 от постоянного магнитного поля H при частоте тока $f = 1$ МГц, частоте поля $F = 11.2$ кГц и амплитуде поля $E = 400$ В/см. Для сравнения на том же рисунке приведена полевая зависимость

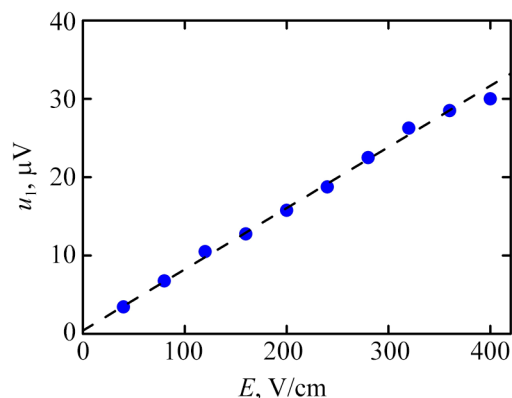


Рис. 5. Зависимость амплитуды боковой линии спектра u_1 от амплитуды электрического поля E , приложенного к PZT-биморфу, при $f = 1$ МГц и $F = 11.2$ кГц

Fig. 5. Dependence of the spectrum side-line amplitude u_1 on the electric field E applied to the PZT bimorph at $f = 1$ MHz and $F = 11.2$ kHz

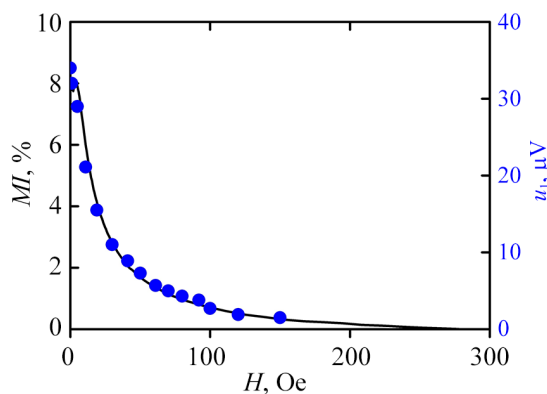


Рис. 6. Зависимость амплитуды боковой линии спектра u_1 и магнитоимпеданса MI от постоянного магнитного поля H при $f = 1$ МГц и $F = 11.2$ кГц

Fig. 6. Dependence of the spectrum side-line amplitude u_1 and magnetoimpedance MI on the dc magnetic field H at $f = 1$ MHz and $F = 11.2$ kHz

магнитоимпеданса $MI(H)$. Видно, что две полевые зависимости практически накладываются друг на друга: амплитуда боковой составляющей и величина магнитоимпеданса монотонно падают с ростом поля. Зависимости, аналогичные показанным на рис. 5 и 6, наблюдали и при других частотах тока через ферромагнетик f и других частотах электрического поля F .

3. Обсуждение

Магнитоимпедансный эффект в слое ферромагнитного проводника возникает, как показано в [3], из-за уменьшения поперечной магнитной проницаемости ферромагнетика μ_T с ростом постоянного поля H . Уменьшение μ_T вызывает увеличение толщины скин-слоя

$$\delta = c / \sqrt{4\pi^2 f \sigma \mu_T}, \quad (2)$$

где c — скорость света, $\sigma = 1/\rho$ — проводимость материала, f — частота. С другой стороны, как следует из (2), толщина скин-слоя δ уменьшается с ростом частоты тока f . Конкуренция двух механизмов приводит к изменению как действительной, так и мнимой частей импеданса. Импеданс полоски перестает изменяться, когда толщина скин-слоя становится равной примерно половине толщины слоя ферромагнетика. Это объясняет, в частности, сужение области магнитных полей магнитоимпеданса с уменьшением частоты (см. рис. 2). Форма показанных на рис. 2 и рис. 3 зависимостей $MI(H)$ и $MI(f)$ и максимальная измеренная величина магнитоимпеданса в полоске Metglas согласуются с данными других исследований магнитоимпеданса в слоях аморфных ферромагнетиков на частотах до 10 МГц [1, 11].

Влияние электрического поля E на магнитоимпеданс возникает из-за обратного МЭ-эффекта в композитной структуре [12]. Приложенное к PZT-биморфу поле вызывает изгибную деформацию вследствие обратного пьезоэффекта, эта деформация передается слою Metglas и обратная магнитострикция (эффект Виллари) изменяет его намагниченность M . В результате изменяется магнитная проницаемость μ , а следовательно, и магнитоимпеданс слоя. При изгибе PZT-биморфа деформация по его длине распределена неоднородно, что затрудняет установление количественной связи импеданса с напряженностью поля E . В динамическом режиме МЭ-эффект приводит

к модуляции магнитоимпеданса. Показанный на рис. 4 спектр частот имеет вид, типичный для сигнала с амплитудной модуляцией [13]

$$u(t) = u_0[1 + m \cos(2\pi Ft)] \cdot \cos(2\pi ft). \quad (3)$$

Здесь m — коэффициент модуляции, который связан с амплитудой основной и боковой составляющих спектра как $m = 2u_1/u_0$. Подставляя данные рис. 4, c , получаем $m \approx 6 \cdot 10^{-3}$. Наличие в спектрах рис. 4 второй боковой составляющей свидетельствует о присутствии также слабой фазовой модуляции напряжения магнитоимпеданса. Одинаковый вид полевых зависимостей магнитоимпеданса $MI(H)$ и амплитуды боковой гармоники спектра частот MI напряжения на рис. 6 подтверждает предложенное объяснение эффекта.

Описанные выше измерения были проведены также на структуре, где в качестве магнитного слоя был использован аморфный ферромагнетик без магнитострикции. В такой структуре наблюдали магнитоимпеданс, но модуляция магнитоимпеданса электрическим полем отсутствовала, что подтверждает роль магнитоэлектрического эффекта.

Заключение

Таким образом, в работе экспериментально исследован эффект магнитоимпеданса в планарной композитной гетероструктуре Metglas–PZT в области частот от 10 кГц до 10 МГц. Максимальная величина магнитоимпеданса в нерезонансном режиме достигала 18.5%, что согласуется с литературными данными. Показано и объяснено сужение области магнитных полей магнитоимпеданса при уменьшении частоты. Обнаружен и исследован эффект амплитудной модуляции магнитоимпеданса переменным электрическим полем с частотой 60 Гц...50 кГц, приложенным к пьезослою. Модуляция возникает в результате обратного магнитоэлектрического эффекта в структуре, приводящего к изменению намагниченности ферромагнитного слоя. Результаты могут быть использованы для создания датчиков магнитных полей, управляемых электрическим напряжением.

Список литературы

1. *Knobel M., Pirota K. R.* Giant magnetoimpedance: concepts and recent progress // *J. Magn. Magn. Mater.* 2002. Vol. 242–245, no. 1. P. 33–40. DOI: 10.1016/S0304-8853(01)01180-5.
2. *Panina L. V., Mohri K.* Magneto-impedance effect in amorphous wires // *Appl. Phys. Lett.* 1994. Vol. 65, no. 9. P. 1189–1191. DOI: 10.1063/1.112104.
3. *Panina L. V., Mohri K., Uchiyama T., Noda M., Bushida K.* Giant magneto-impedance in Co-rich amorphous wires and films // *IEEE Trans. Magn.* 1995. Vol. 31, no. 2. P. 1249–1260. DOI: 10.1109/20.364815.
4. *Phan M.-H., Peng H.-X.* Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications // *Progress in Materials Science.* 2008. Vol. 53, no. 2. P. 323–420. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2007.05.003.
5. *Shen L. P., Uchiyama T., Mohri K., Kita E., Bushida K.* Sensitive stress-impedance micro sensor using amorphous magnetostrictive wire // *IEEE Trans. Magn.* 1997. Vol. 33, no. 5. P. 3355–3357. DOI: 10.1109/20.617942.
6. *Gazda P., Nowicki M., Szewczyk R.* Comparison of stress-impedance effect in amorphous ribbons with positive and negative magnetostriction // *Materials.* 2019. Vol. 12, no. 2. P. 275. DOI: 10.3390/ma12020275.
7. *Nan C.-W., Bichurin M. I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G.* Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // *J. Appl. Phys.* 2008. Vol. 103, no. 3. P. 031101. DOI: 10.1063/1.2836410.

8. Wang W., Wang Z., Luo X., Tao J., Zhang N., Xu X., Zhou L. Capacitive type magnetoimpedance effect in piezoelectric-magnetostrictive composite resonator // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 107, no. 17. P. 172904. DOI: 10.1063/1.4934821.
9. Leung C. M., Zhuang X., Xu J., Li J., Zhang J., Srinivasan G., Viehland D. Enhanced tunability of magneto-impedance and magneto-capacitance in annealed Metglas/PZT magnetoelectric composites // *AIP Advances*. 2018. Vol. 8, no. 5. P. 055803. DOI: 10.1063/1.5006203.
10. Chen L., Wang Y., Luo T., Zou Y., Wan Z. The study of magnetoimpedance effect for magnetoelectric laminate composites with different magnetostrictive layers // *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 21. P. 6397. DOI: 10.3390/ma14216397.
11. Amalou F., Gijs M. A. M. Giant magnetoimpedance in trilayer structures of patterned magnetic amorphous ribbons // *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol. 81, no. 9. P. 1654–1656. DOI: 10.1063/1.1499769.
12. Fetisov L. Y., Chashin D. V., Burdin D. A., Saveliev D. V., Ekonomov N. A., Srinivasan G., Fetisov Y. K. Nonlinear converse magnetoelectric effects in a ferromagnetic-piezoelectric bilayer // *Appl. Phys. Lett.* 2018. Vol. 113, no. 21. P. 212903. DOI: 10.1063/1.5054584.
13. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. Москва: Радио и связь, 1986. 512 с.

References

1. Knobel M, Pirota KR. Giant magnetoimpedance: concepts and recent progress. *J. Magn. Magn. Mater.* 2002;242–245(1):33–40. DOI: 10.1016/S0304-8853(01)01180-5.
2. Panina LV, Mohri K. Magneto-impedance effect in amorphous wires. *Appl. Phys. Lett.* 1994;65(9): 1189–1191. DOI: 10.1063/1.112104.
3. Panina LV, Mohri K, Uchiyama T, Noda M, Bushida K. Giant magneto-impedance in Co-rich amorphous wires and films. *IEEE Trans. Magn.* 1995;31(2):1249–1260. DOI: 10.1109/20.364815.
4. Phan MH, Peng HX. Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science*. 2008;53(2):323–420. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2007.05.003.
5. Shen LP, Uchiyama T, Mohri K, Kita E, Bushida K. Sensitive stress-impedance micro sensor using amorphous magnetostrictive wire. *IEEE Trans. Magn.* 1997;33(5):3355–3357. DOI: 10.1109/20.617942.
6. Gazda P, Nowicki M, Szewczyk R. Comparison of stress-impedance effect in amorphous ribbons with positive and negative magnetostriction. *Materials*. 2019;12(2):275. DOI: 10.3390/ma12020275.
7. Nan CW, Bichurin MI, Dong S, Viehland D, Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions. *J. Appl. Phys.* 2008;103(3):031101. DOI: 10.1063/1.2836410.
8. Wang W, Wang Z, Luo X, Tao J, Zhang N, Xu X, Zhou L. Capacitive type magnetoimpedance effect in piezoelectric-magnetostrictive composite resonator. *Appl. Phys. Lett.* 2015;107(17):172904. DOI: 10.1063/1.4934821.
9. Leung CM, Zhuang X, Xu J, Li J, Zhang J, Srinivasan G, Viehland D. Enhanced tunability of magneto-impedance and magneto-capacitance in annealed Metglas/PZT magnetoelectric composites. *AIP Advances*. 2018;8(5):055803. DOI: 10.1063/1.5006203.
10. Chen L, Wang Y, Luo T, Zou Y, Wan Z. The study of magnetoimpedance effect for magnetoelectric laminate composites with different magnetostrictive layers. *Materials*. 2021;14(21):6397. DOI: 10.3390/ma14216397.
11. Amalou F, Gijs MAM. Giant magnetoimpedance in trilayer structures of patterned magnetic amorphous ribbons. *Appl. Phys. Lett.* 2002;81(9):1654–1656. DOI: 10.1063/1.1499769.
12. Fetisov LY, Chashin DV, Burdin DA, Saveliev DV, Ekonomov NA, Srinivasan G, Fetisov YK. Nonlinear converse magnetoelectric effects in a ferromagnetic-piezoelectric bilayer. *Appl. Phys. Lett.* 2018;113(21):212903. DOI: 10.1063/1.5054584.
13. Gonorovskii IS. Radiotechnical Circuits and Signals. Moscow: Radio i Svyaz'; 1986. 512 p. (in Russian).



Бурдин Дмитрий Алексеевич — окончил Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (2007, МИРЭА). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (2012, МИРЭА). В настоящее время работает в должности старшего научного сотрудника в Российском технологическом университете (ранее МИРЭА) в Научно-образовательном центре «Магнитоэлектрические материалы и устройства». Занимается исследованием линейных и нелинейных магнитоэлектрических эффектов в композитных гетероструктурах, разработкой на их основе датчиков магнитных полей, устройств микросистемной техники и электроники. Имеет более 40 статей в реферируемых журналах, 8 патентов, доклады на конференциях.

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78
МИРЭА — Российский технологический университет
E-mail: phantastic@mail.ru
AuthorID (eLibrary.Ru): 753703



Чашин Дмитрий Владимирович — окончил Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (1974, МИРЭА). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук (2015, МИРЭА). В настоящее время работает в Российском технологическом университете (ранее МИРЭА) в Научно-образовательном центре «Магнитоэлектрические материалы и устройства» в должности ведущего инженера, занимается исследованием магнитоэлектрических эффектов в композитных гетероструктурах, разработкой на их основе высокочувствительных датчиков магнитных полей, различных устройств микросистемной техники и электроники. Имеет более 70 статей в реферируемых журналах, 15 патентов, более 30 докладов на конференциях.

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78
МИРЭА — Российский технологический университет
E-mail: chashin@mirea.ru
ORCID: 0000-0002-1031-6696
AuthorID (eLibrary.Ru): 601897



Экономов Николай Андреевич — окончил физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова (1971). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в области физики магнитных явлений (1974, МГУ). С 1974 года по настоящее время работает в Российском технологическом университете (ранее МИРЭА) на кафедре физики в должности доцента. Область научных интересов — исследование магнитоакустических и магнитооптических явлений в легкоплоскостных антеферромагнетиках и магнитоэлектрических эффектов в композитных гетероструктурах ферромагнетик-пьезоэлектрик, их применение для создания устройств электроники и микросистемной техники. Имеет более 50 статей в реферируемых российских и международных журналах, 12 патентов, доклады на конференциях.

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78
МИРЭА — Российский технологический университет
E-mail: ekonomov@list.ru
AuthorID (eLibrary.Ru): 882134



Фетисов Юрий Константинович — окончил МИФИ (1978), затем аспирантуру МИФИ. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности физика твердого тела (1981, МИФИ) и доктора физико-математических наук (1993, ИРЭ РАН). В Московском институте радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА) работает с 1982 года в должности, доцента, профессора кафедры физики, директора НИИ информатики, декана факультета электроники. С 2015 года по настоящее время работает в Российском технологическом университете (ранее МИРЭА) в должности директора Научно-образовательного центра «Магнитоэлектрические материалы и устройства». Область научных интересов — спиновые волны в магнитных пленках и гетероструктурах, магнитоэлектрические явления в мультиферроиках и композитных гетероструктурах и их применение в микросистемной технике и электронике. Действительный член РАЕН. Имеет более 200 статей в реферируемых журналах, 12 патентов и несколько монографий.

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78
МИРЭА — Российский технологический университет
E-mail: fetisov@mirea.ru
ORCID: 0000-0002-8627-2730
AuthorID (eLibrary.Ru): 19490