

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.622.4:537.621.2:539.213.27

МАГНИТНЫЕ И МАГНИТОИМПЕДАНСНЫЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ ЛЕНТ НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА С ОСОБЕННОСТЯМИ ЭФФЕКТИВНОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ

© 2022 г. А. А. Пасынкова^{a, b, *}, А. В. Тимофеева^b, В. А. Лукшина^b,
Е. А. Степанова^a, Г. В. Курляндская^{a, c}

^aУральский федеральный университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

^bИнститут физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

^cUniversidad del País Vasco UPV/EHU, Sarriena s/n, Leioa, 48940 Spain

*e-mail: pasynkova_a@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 28.04.2022 г.

После доработки 26.05.2022 г.

Принята к публикации 30.05.2022 г.

Структура, магнитные и магнитоимпедансные свойства аморфных лент сплава $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ были исследованы на образцах различной геометрии, полученных методом быстрой закалки на вращающийся барабан. Сравнительный анализ проводился для исходного состояния (без дополнительных обработок, А), после релаксационного отжига при температуре 350°C (В) или после термомеханической обработки при 350°C и удельной нагрузке 230 МПа (С). Выбранным состояниям А и В соответствовала продольная эффективная магнитная анизотропия, при меньшем уровне остаточных напряжений в случае отожженных образцов. Обработка С приводила к созданию поперечной одноосной магнитной анизотропии и рекордно высокой чувствительностью гигантского магнитоимпедансного эффекта (около 200%/Э) к внешнему магнитному полю в области малых полей около 2–3 Эрстед.

Ключевые слова: аморфные магнитные ленты, магнитные свойства, магнитная анизотропия, магнитный импеданс, детекторы слабых магнитных полей

DOI: 10.31857/S0015323022080058

ВВЕДЕНИЕ

Гигантский магнитоимпедансный (ГМИ) эффект заключается в значительном изменении полного электрического сопротивления Z ферромагнетика при приложении внешнего магнитного поля и пропускании через него тока высокой частоты [1, 2]. Часто этот эффект рассматривается в контексте перспектив его приложений, ввиду экстремально высокой чувствительности по отношению к внешнему магнитному полю как в области неразрушающего контроля, так и для определения наличия или концентрации биологических объектов [2–4]. Эффект ГМИ привлекает особый интерес исследователей и разработчиков различных устройств еще и тем, что его можно использовать для анализа особенностей эффективной константы магнитной анизотропии. Она определяет особенности динамической магнитной проницаемости, от которой, в свою очередь, зависит импеданс ферромагнитного проводника [5, 6]. Аморфные ленты на основе кобальта являются магнитомягкими магнетиками с особыми характеристиками, которые могут быть сформированы в материале при помощи

дополнительных термомеханических обработок как без нагрузки (релаксационный отжиг), так и под нагрузкой (ТМехО).

Аморфные ленты на основе кобальта состава $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ — это магнитомягкие материалы с очень низкой отрицательной константой магнитострикции, а также высокой коррозионной стойкостью благодаря добавлению хрома. Магнитная анизотропия данных аморфных сплавов очень чувствительна к условиям и типу ТМехО, благодаря чему может быть сформирована как преимущественно поперечная анизотропия в плоскости ленты, так и продольная (при помощи релаксационного отжига) [7, 8]. Более того, именно в случае быстрозакаленных аморфных лент сплава $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ было обнаружено и описано такое интересное явление как анизотропия высокого порядка [9]. Помимо анализа кривых намагничивания и особенностей поведения магнитной доменной структуры особую роль в понимании влияния анизотропии высокого порядка на процессы статического и динамического перемагничивания сыграли исследования ГМИ

свойств [10]. При этом особое внимание уделяли влиянию ТМехО в тех режимах, когда эффективная магнитная анизотропия характеризуется достаточно большой величиной константы анизотропии K_u (более 5000 эрг/см³) и полем анизотропии H_a до 20 Э [11]. После релаксационного отжига аморфных лент эти величины не превышают 100 эрг/см³ и 1 Э соответственно.

Полевые зависимости магнитного импеданса и его действительной и мнимой компонент лент в быстрозакаленном состоянии имеют форму типа “один пик” с максимумом огибающей вблизи нулевого поля, но с заметным “провалом” в нулевом поле из-за вклада поверхностной анизотропии и остаточных напряжений. Полевые зависимости магнитного импеданса после релаксационного отжига имеют форму типа “один пик” практически без “провала”, а после ТМехО – кривые типа “два пика”, когда два симметричных максимума наблюдаются вблизи положительного и отрицательного значений поля анизотропии. Именно после ТМехО при температуре 350°C и нагрузке $P = 210$ МПа в области малых полей около 3–4 Э наблюдали рекордные значения чувствительности ГМИ-откликов по отношению к внешнему магнитному полю [7]. Однако систематических исследований особенностей эффективной магнитной анизотропии именно в области перехода от анизотропии одного типа к анизотропии другого типа проведено не было, как не было проведено и детальное сравнительное исследование, необходимое для понимания причин и условий получения максимальной ГМИ-чувствительности. Эти данные позволили бы оценить стабильность получения максимального ГМИ-эффекта лент с поперечной одноосной магнитной анизотропией.

При рассмотрении чувствительного ГМИ-элемента с конкретными геометрическими размерами (длина, ширина, толщина) возникает необходимость учета анизотропии формы, как компоненты, дополняющей одноосную магнитную анизотропию. Более короткие элементы обладают меньшим ГМИ-эффектом в связи с размагничивающим магнитным полем, возникающим вблизи концов элемента, которое значительно изменяет распределение намагниченности в этой области. Еще одной особенностью быстрозакаленных аморфных лент является существование приповерхностного слоя, где магнитоупругая составляющая анизотропии определяется относительно сильными сжимающими напряжениями, конкурирующими с растягивающими напряжениями внутренней области [12]. Релаксационный отжиг в оптимальном режиме приводит не только к снижению общего уровня внутренних напряжений, но и к изменению вклада приповерхностного слоя и особенностей поверхностной анизотропии, что отражается на ГМИ характеристиках.

В настоящей работе были исследованы структура, магнитные и магнитоимпедансные свойства аморфных лент $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ в области перехода от продольной к поперечной эффективной магнитной анизотропии. Для этого были рассмотрены ленты сразу после закалки, закаленные и подвергнутые релаксационному отжигу при температуре 350°C или термомеханической обработке при 350°C и удельной нагрузке 230 МПа, что обеспечивало варибельность эффективной магнитной анизотропии в интервале полей магнитной анизотропии до 5 Э.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Аморфные ленты состава $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ шириной 0.8 и 2 мм были получены методом закалки из расплава на вращающийся барабан. Дополнительная обработка включала отжиг при температуре 350°C в течение 1 ч без нагрузки или ТМехО с нагрузкой 230 МПа. Условия обработок были выбраны из анализа научной литературы для достижения большего ГМИ-эффекта, что коррелировало с величиной константы анизотропии порядка 100 эрг/см³ [7, 9]. Ширина лент была определена с помощью оптической микроскопии (Nikon с цифровой камерой). Условные обозначения образцов, типы их обработок и магнитные характеристики приведены в табл. 1.

Аморфное состояние лент было установлено методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Bruker D8 Advance. Петли магнитного гистерезиса были получены для образцов лент длиной 7 см на установке для измерения электромагнитных параметров магнитомягких материалов ММКС-05 (АО “НИИ СТТ” (завод “Эдельвейс”)).

Магнитный импеданс измеряли при помощи автоматизированного комплекса на основе анализатора импеданса Agilent HP e4991A с использованием стандартной процедуры калибровки микроволнового тракта [13]. Измерения ГМИ проводили с использованием держателей типа “микророскопическая линия” при длине образцов лент 4.5 см. Внешнее магнитное поле, создаваемое соленоидом, варьировали в интервале от +110 до –110 Э, достаточном для достижения магнитного насыщения образца, поле было приложено вдоль длинной стороны ленты. Случайная погрешность измерений на установке импедансной спектроскопии не превышала 2%. Для описания изменений полного импеданса использовано магнитоимпедансное соотношение $\Delta Z/Z$, рассчитанное таким образом:

$$\Delta Z/Z = 100\% \times (Z(H) - Z(H_{\max})) / Z(H_{\max}), \quad (1)$$

где $H_{\max} = \pm 110$ Э.

Максимальное значение ГМИ-соотношения $\Delta Z/Z$ при фиксированной частоте (f) тока возбуждения обозначали $(\Delta Z/Z)_{\max}$. Измерения проводи-

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых образцов. N – размагничивающий фактор, H_a – поле анизотропии, K_u – константа одноосной магнитной анизотропии

Образец	Тип обработки	Ширина, мм	Толщина, мкм	N		H_a , Э	K_u , эрг/см ³
				$\chi = 0$	$\chi = 99$		
A1	Быстрозакаленная	0.8	24			0.1	100
B1	Релаксационный отжиг	0.8	24	0.0010	0.0004	0.3	100
C1	ТМехО	0.8	24			3.3	500
A2	Быстрозакаленная	2.0	32			0.3	100
B2	Релаксационный отжиг	2.0	32	0.0013	0.0005	0.5	100
C2	ТМехО	2.0	32			3.4	500

ли в интервале рабочих частот от 1 до 100 МГц. Поскольку для практических приложений наибольший интерес представляет не столько само значение $(\Delta Z/Z)_{\max}$, сколько чувствительность ГМИ по отношению к внешнему магнитному полю в определенном интервале полей, удобных для технологических приложений, чувствительность S была определена таким образом:

$$S = (\Delta Z/Z(H_1) - \Delta Z/Z(H_2))/|H_1 - H_2|. \quad (2)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1а, 1б приведены оптические изображения поверхности лент как со свободной стороны (не касающейся барабана во время закалки), так и со стороны барабана. Видно, что получены материалы с хорошим качеством поверхности и стабильной шириной ленты. Следует отметить, что форма параллелепипеда (a – длина, b – ширина и c – толщина) дает возможность приблизительной, но достаточно хорошей оценки размагничивающего фактора и статических полей размагничивания при известных геометрических параметрах и намагниченности. Так, в работе [14] такие оценки даны для набора величин магнитной восприимчивости от 0 до 10^9 . Для образцов первой группы $a/(bc)^{1/2} \approx 330$ ($b/c \approx 33$), а для образцов второй группы $a/(bc)^{1/2} \approx 180$ ($b/c \approx 63$). Пользуясь методикой расчета усредненного по объему размагничивающего фактора N , предложенной в работе [14], можно получить данные, представленные в табл. 1 для двух выбранных значений магнитной проницаемости $\chi = 0$ и $\chi = 99$. Хорошо видно, что для узких лент первой группы размагничивающий фактор, а соответственно, и поля рассеяния, связаны с анизотропией формы, ниже полей рассеяния широких образцов. Данный результат далее будет использован при

анализе ГМИ-параметров образцов различного типа.

Ленты рассматриваемых типов во всех состояниях обладали типичными для аморфных материалов рентгеновскими характеристиками (рис. 1в) с характерным гало в области углов 2θ около 44° и размером области когерентного рассеяния менее 3 нм. Таким образом, термические обработки, использованные для формирования эффективной магнитной анизотропии с заданными параметрами, не приводят к переходу образцов из аморфного в кристаллическое состояние.

Петли магнитного гистерезиса, измеренные вдоль длинной стороны в плоскости лент, в закаленном состоянии и после релаксационного отжига по форме близки к прямоугольным при очень низком поле насыщения (менее 0.3 Э), т.е. типичны для магнитомягкого ферромагнетика с продольной эффективной анизотропией. ТМехО приводит к значительным изменениям формы петли гистерезиса и формированию одноосной поперечной магнитной анизотропии, что сопровождается ростом поля анизотропии образцов. Константа одноосной анизотропии K_u была рассчитана как $K_u = 0.5M_sH_a$, где M_s – намагниченность насыщения и H_a – поле магнитной анизотропии (табл. 1).

На рис. 2а приведены частотные зависимости $(\Delta Z/Z)_{\max}(f)$ для лент всех типов. Видно, что общий вид кривых хорошо согласуется с имеющимися в литературе представлениями о частотной зависимости импеданса однородного ферромагнитного проводника, связанными со скин-эффектом и зависимостью динамической магнитной проницаемости от частоты. Так величина $(\Delta Z/Z)_{\max}$ возрастает, достигает максимума и далее уменьшается с ростом частоты тока возбуждения [13].

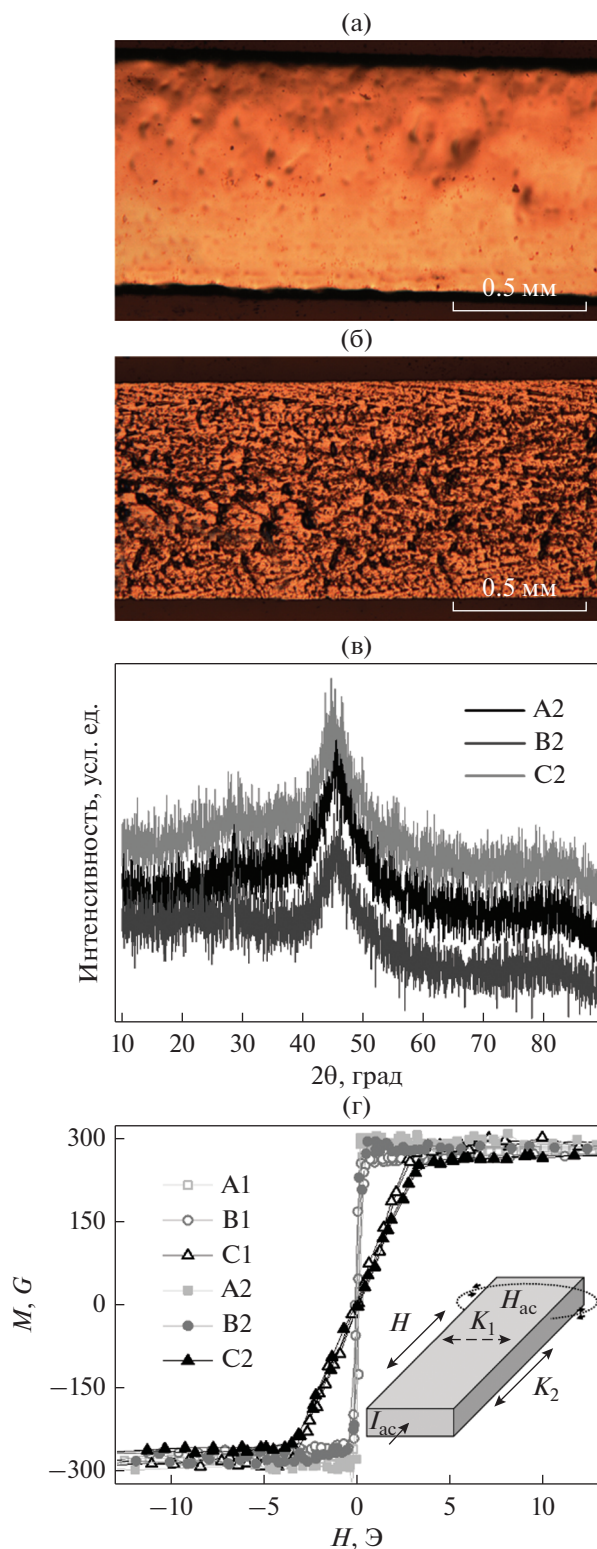


Рис. 1. Оптические изображения лент $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ со свободной (а) и стороны барабана (б). Рентгеновские спектры образцов в различных состояниях (в). Петли гистерезиса для лент в различных состояниях (г). Особенности геометрии: высокочастотный ток I_{ac} протекает вдоль длинной стороны ленты, соосно с направлением внешнего поля H , создавая циркулярное H_{ac} . ОЛН образцов в состояниях А и В соосна оси K_2 , а образцов С соосна оси K_1 (вставка).

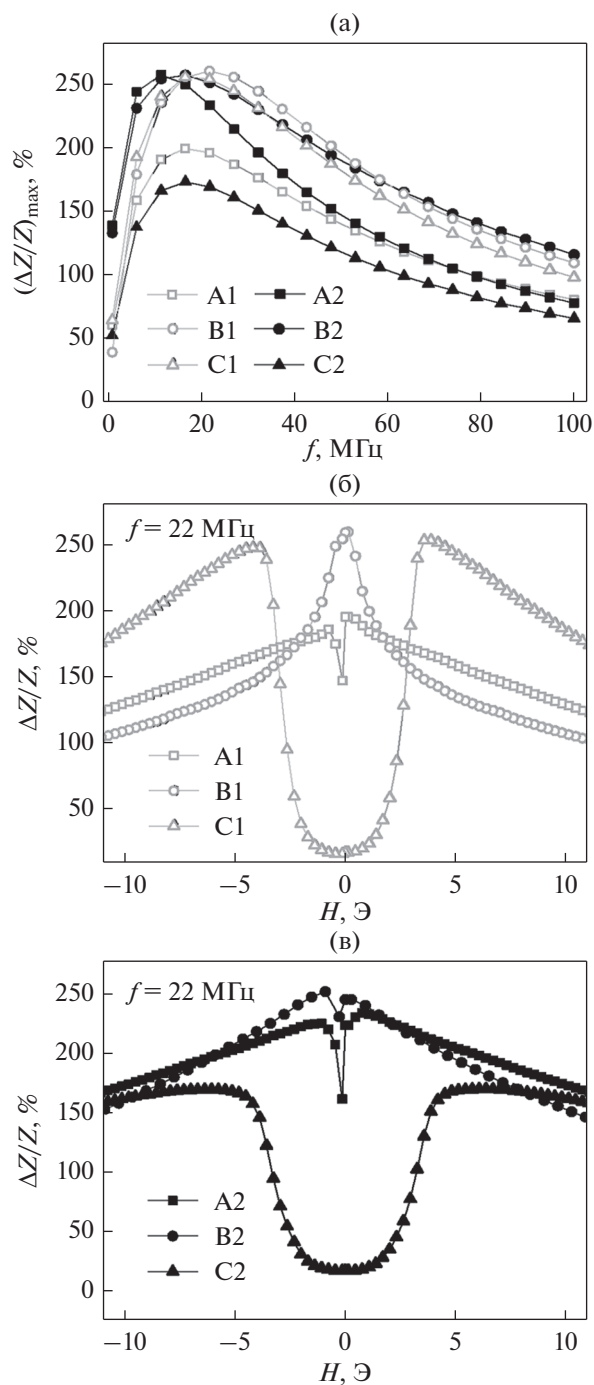


Рис. 2. Частотная зависимость ГМИ соотношения высокочастотного импеданса для образцов лент $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ (см. также табл. 1) (а). Полевая зависимость ГМИ соотношения импеданса для образцов узких аморфных лент на частоте 22 МГц (б). Полевая зависимость ГМИ соотношения импеданса для образцов широких аморфных лент на частоте 22 МГц (в).

Основные результаты анализа ГМИ параметров представлены в табл. 2. Для узких лент типа А, как и следовало ожидать, ввиду релаксации локальных напряжений, абсолютный максимум ГМИ соотношения наблюдается для лент после релаксацион-

Таблица 2. ГМИ-характеристики быстрозакаленных аморфных лент $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ различной геометрии и в различных состояниях, частота f указана для максимальной наблюдаемой величины $(\Delta Z/Z)_{\max}$; S – чувствительность по отношению к внешнему полю, определенная для частоты $f = 22$ МГц, H^* – середина интервала полей ΔH , для которых определена чувствительность

Образец	$(\Delta Z/Z)_{\max}$, %	f , МГц	S , %/Э	ΔH , Э	H^* , Э
A1	255	17	7.7	0.1–4.2	2.1
B1	260	20	60.0	0.1–1.2	0.6
C1	255	17	180.0	2.1–3.1	2.6
A2	257	10	6.7	0.8–4.2	1.7
B2	257	12	11.0	0.1–4.2	2.1
C2	173	13	82.0	2.6–3.6	3.1

ного отжига. Максимуму около 260% соответствовала частота около 22 МГц. ТМехО приводит к незначительному снижению величины $(\Delta Z/Z)_{\max}$ до 255%, несколько уменьшая и частоту, которой соответствует максимум $(\Delta Z/Z)_{\max}(f)$ (до 20 МГц). В случае широких лент наблюдается такая же тенденция, хотя частоты соответствующих максимумов оказываются на 2–3 МГц ниже. Заметим, что полученные величины $(\Delta Z/Z)_{\max}$ (выше 250%) не просто соответствуют наибольшим величинам ГМИ эффекта для аморфных лент на основе кобальта [7, 15, 16], но и в настоящем исследовании они были получены для элементов существенно меньшей длины (4.5 см в настоящей работе и 10 см в работе [7]).

С точки зрения практической ценности этот результат важен, т.к. отражает влияние анизотропии формы на величину поля, в котором наблюдается ГМИ максимум для аморфных лент на основе кобальта.

Обратимся к анализу полевой зависимости ГМИ соотношения для узких лент на частоте $f = 22$ МГц (вблизи максимума кривой $(\Delta Z/Z)_{\max}(f)$). Как и следовало ожидать, для образцов в быстрозакаленном состоянии (рис. 2а) форма огибающей магнитоимпедансной кривой имеет один пик, но с заметным “провалом” вблизи нулевого поля из-за значительного вклада поверхностной анизотропии [11, 12]. Релаксационный отжиг приводит к ослаблению закалочных поверхностных напряжений и снижению уровня магнитных неоднородностей по сечению образца [11, 17], тонкая структура “двойного” пика в малых полях исчезает (рис. 2б) выявляя факт, хорошо подтверждаемый особенностями статических петель магнитного гистерезиса (рис. 1г): основной вклад в эффективную магнитную анизотропию в состоя-

нии *B2* вносит продольная магнитная анизотропия. ТМехО приводит к изменению типа ГМИ кривой – она преобразуется в кривую типа “двойной пик” с максимумами $\Delta Z/Z$ соотношения вблизи поля анизотропии (в положительном и отрицательном внешних полях) [11].

Анализ чувствительности магнитоимпедансного соотношения S к внешнему магнитному полю эффективно проводить, учитывая такие параметры, как величина линейного участка ΔH в области малых полей и величина поля H^* , определяемая как середина этого интервала. Хорошо видно, что состоянию *C1* узких лент соответствует самая высокая чувствительность 180%/Э в интервале полей примерно от 2 до 3 Э, что очень хорошо согласуется с требованиями к современным магнитным материалам для детекторов слабых полей. Следует отметить, что ГМИ-параметры широких лент $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ во всех состояниях уступали ГМИ-параметрам узких лент. Так, максимальная чувствительность (82%/Э) также отмечена после отжига под нагрузкой, но была более, чем вдвое меньше чувствительности к внешнему полю для узких лент.

Рассмотрим некоторые особенности полевых зависимостей ГМИ соотношения (рис. 3) для образцов всех типов на частотах 11 и 32 МГц, т.е. вблизи частоты, где наблюдали абсолютный максимум $\Delta Z/Z$. Хорошо видно, что на низких частотах существует различие в изменении ГМИ-параметров широких и узких образцов без дополнительных обработок и после релаксационного отжига. Как форма $\Delta Z/Z(H)$ кривой, так и величина $(\Delta Z/Z)_{\max}$ узких образцов значительно меняются в результате отжига, а в случае широких образцов эти изменения менее значимы.

Последний факт можно объяснить, принимая во внимание различия в геометрии образцов. Быстрая закалка лент первого типа обеспечивает более высокий уровень закалочных напряжений и неоднородность их распределения по сечению образца ввиду меньшей толщины лент, а их релаксация повышает величину $(\Delta Z/Z)_{\max}$. В широких лентах, которые имеют большую толщину, закалочные напряжения успевают заметно релаксировать еще в процессе получения лент и дальнейший отжиг оказывается менее эффективным. Расчет глубины скин-слоя для данного состава и выбранной частоты дает примерно 20 мкм. Состояние сильного скин-эффекта наступает при приближении глубины скин-слоя к толщине ферромагнитного проводника. В образцах второго типа это условие начинает выполняться при меньших частотах, что и подтверждается появлением для них максимума $(\Delta Z/Z)_{\max}(f)$ на несколько меньшей частоте (рис. 2а).

Термомеханическая обработка приводит к формированию поперечной магнитной анизотропии, о чем можно судить по форме ГМИ-кривых (рис. 3а) и особенно высоким значениям ГМИ в случае узких лент (первого типа). Так, $(\Delta Z/Z)_{\max}$ для С1 составляет примерно 240%, а для С2 примерно 160% (для частоты 11 МГц). Поскольку в образцах, прошедших ТМехО, ориентации оси наведенной магнитной анизотропии и оси магнитной анизотропии, соответствующей вкладу анизотропии формы, не совпадают, именно в образцах после ТМехО различия в анизотропии формы имеют большое значение и определяют отличия ГМИ параметров лент различного типа. Как упоминали ранее (табл. 2), для широких лент (второго типа) для всех магнитных состояний и величин магнитной восприимчивости размагничивающий фактор и поля рассеяния, связанные с конкретной формой аморфных лент, оказываются заметно выше. Несмотря на преимущества большей толщины, это приводит к меньшим величинам $(\Delta Z/Z)_{\max}$ и меньшей чувствительности по отношению к внешнему полю вследствие наличия вклада анизотропии более высокого порядка. Данные магнитоимпедансной спектроскопии позволяют сделать вывод о наличии анизотропии более высокого порядка.

Бликие тенденции наблюдаются и для частоты 32 МГц. Основные результаты анализа параметров ГМИ чувствительности для образцов, прошедших ТМехО, для частот 11 и 32 МГц представлены в табл. 3. Наибольшая чувствительность (около 200%/Э) наблюдается для узких лент на низкой частоте 11 МГц. При этом для лент как первого, так и второго типа получены высокие значения чувствительности (не менее 50%/Э) к

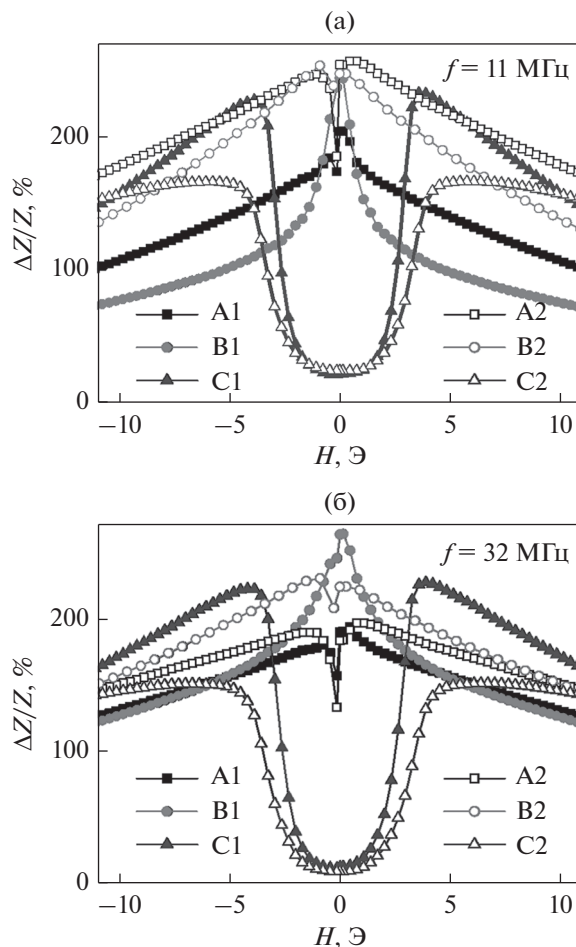


Рис. 3. Полевые зависимости ГМИ соотношения высокочастотного импеданса для аморфных лент $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ различной ширины для выбранных частот: $f = 11$ (а) и $f = 32$ МГц (б).

внешнему магнитному полю в широком диапазоне частот (от 10 до 50 МГц). Обратим внимание на то, что оба типа образцов были подвергнуты ТМехО при одной и той же величине удельной нагрузки, выбранной на основе литературных данных. Однако, как уже было упомянуто выше, ГМИ-исследования дают основания полагать, что ленты разной толщины с отличаются и различной степенью неоднородности закалочных напряжений по сечению образцов. Поэтому логично предположить, что дальнейшее повышение ГМИ чувствительности на основе получения образцов с поперечной магнитной анизотропией возможно. Однако обработка должна проводиться в очень узком интервале температур, времен выдержки и удельных нагрузок, чтобы избежать формирования анизотропии более высокого порядка.

Полученные значения ГМИ-чувствительности, особенно принимая во внимание тот факт, что они

Таблица 3. Параметры чувствительности ГМИ быстроокаленных аморфных лент $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ различной геометрии в состоянии после ТМехО, $\Delta(\Delta Z/Z)$ – чувствительность по отношению к внешнему полю, H^* – середина интервала полей, для которых определена чувствительность ΔH

Образец	$f = 11$ МГц			$f = 32$ МГц		
	$S, \%/Э$	$\Delta H, Э$	$H^*, Э$	$S, \%/Э$	$\Delta H, Э$	$H^*, Э$
C1	195	2.3–3.2	2.7	135	2.0–3.2	2.6
C2	75	2.7–3.9	3.3	65	2.6–3.9	3.2

наблюдаются для достаточно коротких образцов длиной 45 мм, открывают перспективы использования данных материалов в качестве чувствительных элементов сенсоров малых полей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ структуры, магнитных свойств и магнитоимпедансного эффекта был проведен для аморфных лент на основе кобальта $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ двух типов, отличающихся особенностями геометрии: образцы первого типа $0.8 \times 0.024 \times 45$ (мм³) и образцы второго типа $2.0 \times 0.032 \times 45$ (мм³). Исследованы три состояния: исходное – закаленное состояние без дополнительных обработок, а также состояния после релаксационного отжига при температуре 350°C и термомеханической обработки при 350°C и удельной нагрузке 230 МПа. По данным рентгенофазового анализа все образцы находились в аморфном состоянии. На основе анализа магнитоимпедансных спектров установлено, что в исходном состоянии и после релаксационного отжига образцы обладают продольной эффективной магнитной анизотропией, а отжиг под нагрузкой с выбранными параметрами приводит к формированию поперечной магнитной анизотропии.

Сравнительный анализ данных статических магнитных измерений и ГМИ позволяет сделать предположение о различной степени неоднородности закалочных напряжений в лентах различной толщины, что определило различную степень эффективности релаксационного отжига в одних и тех же условиях. Показано, что чувствительность порядка 200%/Э достигается в случае узких образцов в интервале полей 2–3 Э, что актуально при исследовании магнитных датчиков.

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ МК-2080.2022.1.2. Избранные исследования были проведены в сервисе SGIKER UPV/EHU.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beach R. S. Berkowitz A. E. Sensitive field- and frequency-dependent impedance spectra of amorphous FeCoSiB wire and ribbon (invited) // JAP. V. 76. P. 6209–6213.
2. Franco C.S., Ribas G.P., Bruno A.C. Influence of the anisotropy axis direction and ribbon geometry on the giant magnetoimpedance of Metglas®2705M // Sens. Actuat. A-Phys. 2006. V. 132(1). P. 85–89.
3. Volchkov S.O., Pasyunkova A.A., Derevyanko M.S., Bukreev D.A., Kozlov N.V., Svalov A.V., Semirov A.V. Magnetoimpedance of CoFeCrSiB ribbon-based sensitive element with FeNi covering: Experiment and modeling // Sensors. 2021. V. 21(20). P. 6728.
4. Wang T., Yang Z., Lei C., Lei J., Zhou Y. Quantitative determination of magnetic beads using a magnetoimpedance-based lab-on-a-chip platform // JAP. 2014. V. 115. I. 22. P. 223901.
5. Bukreev D.A., Derevyanko M.S., Moiseev A.A., Kurlyandskaya G.V., Semirov A.V. Temperature Dependence of the Impedance of Amorphous Elastically Deformed CoFeSiB Ribbons // 2021. Phys. Met. Metallogr. V. 122. P. 1075–1080.
6. Coisson M., Kane S. N., Tiberto P., Vinai F. Influence of DC Joule-heating treatment on magnetoimpedance effect in amorphous $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ alloy // JMMM. 2004. V. 271(2–3). P. 312–317.
7. Kurlyandskaya G.V., Garca-Arribas A., Barandiaran J.M., Kisker E. Giant magnetoimpedance strip and coil sensors // Sens. Actuators. 2001. V. 91. P. 116–119.
8. Murthy V.S.N., Venkatesh S., Markandeyulu G. Effect of length and annealing conditions on magnetoimpedance of $\text{Co}_{68}\text{Fe}_5\text{Si}_{12}\text{B}_{15}$ amorphous ribbons // JAP. 2006. V. 99(8). P. 08F108.
9. Kurlyandskaya G.V., Dmitrieva N.V., Potapov A.P., Lukshina V.A., Voronova L.M., Gervas'eva I.V., Bebenin N.G. Stress-anneal-induced magnetic anisotropy in an amorphous alloy $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ // Phys. Met. Metal. 1997. V. 83(5). P. 487–490.
10. Hoffmann B., Kronmuller H. Stress-induced magnetic anisotropy in monocrystalline FeCuNbSiB alloy // JMMM. 1996. V. 152. P. 91–98.

11. *Semirov A.V., Bukreev D.A., Moiseev A.A., Lukshina V.A., Volkova E.G., Volchkov S.O.* Influence of the special features of the effective magnetic anisotropy on the temperature dependences of the magnetoimpedance of nanocrystalline $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ strips // *Rus. Phys J.* 2011. V. 54. № 5. P. 612–618.
12. *Saad A., Garcia J.A., Kurylyandskaya G.V., Santos J.D., Elbaile L.* Influence of residual stresses and their relaxation on giant magnetoimpedance of CoFeSiB metallic glasses // *Jap. J. Appl. Phys.* 2005. V. 44. P. 4939–4944.
13. *Курляндская Г.В., де Кос Д., Волчков С.О.* Магнито-чувствительные преобразователи для неразрушающего контроля, работающие на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта // *Дефектоскопия.* 2009. № 6. С. 13–42.
14. *Chen D.-X., Pardo E., Sanchez A.* Demagnetizing factors for rectangular prisms // *IEEE Trans. Magn.* 2005. V. 41(6). P. 2077–2088.
15. *Chaturvedi A., Dhakal T.P., Witanachchi S., Le A.-T., Phan M.-H., Srikanth H.* Critical length and giant magnetoimpedance in $\text{Co}_{69}\text{Fe}_{4.5}\text{Ni}_{1.5}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ amorphous ribbons // *Mater. Sci. Eng. B.* 2010. V. 172(2). P. 146–150.
16. *Pan P., Moorehead R.D., Hayward T.J.* Influence of geometry on the giant magnetoimpedance of high-aspect ratio amorphous magnetic ribbons // *JAP.* 2020. V. 128(17). P. 174504.
17. *Zhao C., Zhang X., Liu Q., Wang J.* GMI field sensitivity near a zero external field in Co-based amorphous alloy ribbons: experiments and model // *J. Phys. D Appl. Phys.* 2016. V. 49(6). P. 065006.