

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.622.4:539.213.27:53.096:53.098

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИМПЕДАНС НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛЕНТ FeSiBNbCu В ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ ОТ 300 ДО 723 К

© 2020 г. Д. А. Букреев^{a, *}, М. С. Деревянко^a, А. А. Моисеев^a,
А. С. Кузьмина^b, Г. В. Курляндская^{c, d}, А. В. Семиров^a

^aИркутский государственный университет, ул. К. Маркса, 1, Иркутск, 664003 Россия

^bИркутский национальный исследовательский технический университет,
ул. Лермонтова, 83, Иркутск, 664074 Россия

^cУниверситет Страны Басков, Лейоа, 48940 Испания

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

*e-mail: da.bukreev@gmail.com

Поступила в редакцию 16.05.2020 г.

После доработки 17.06.2020 г.

Принята к публикации 23.06.2020 г.

Проведены исследования магнитных свойств и высокочастотного импеданса нанокристаллических лент $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{V}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ в диапазоне высоких температур от 300 до 723 К. Установлено, что обменно-связанное состояние нанокристаллитов разрушается при температуре около 530 К, которая значительно ниже температуры Кюри аморфной фазы, находящейся вблизи температуры 635 К. Обнаружено, что на частоте переменного тока выше 5 МГц во всем исследованном диапазоне температур наблюдается заметный магнитоимпедансный эффект (более 50% для магнитоимпедансного отношения в случае полного импеданса). Подобное поведение может быть востребовано для создания специализированных датчиков магнитного поля, предназначенных для использования при высоких температурах.

Ключевые слова: нанокристаллические сплавы, магнитоимпедансный эффект, температура Кюри, модель случайной анизотропии

DOI: 10.31857/S0015323020100022

ВВЕДЕНИЕ

Нанокристаллические ферромагнитные материалы, получаемые из аморфных сплавов на основе переходных металлов в результате контролируемого термического воздействия, представляют собой системы, содержащие две ферромагнитные фазы: остаточную аморфную и нанокристаллическую. Последняя представлена нанокристаллитами размером порядка десяти нанометров [1–3]. Нанокристаллиты отделены друг от друга аморфной фазой.

Одними из наиболее изученных нанокристаллических ферромагнетиков являются материалы, получаемые из аморфного сплава FeSiBNbCu . Впервые эти материалы были описаны под названием “Finemet” в работе [1]. В этой работе отмечено, что в процессе надлежащего отжига формируются превосходные магнитно-мягкие свойства, включая высокую индукцию насыщения (1.2 Тл и более), высокую магнитную проницаемость (порядка 10^5), незначительную коэрцитивную силу и

малую эффективную магнитную анизотропию, которая значительно ниже магнитокристаллической анизотропии нанокристаллитов (при отжиге сплава FeSiBNbCu формируются нанокристаллиты $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$ размером 10–20 нм). Малые значения эффективной магнитной анизотропии были объяснены в работе [2], где для случая нанокристаллических ферромагнетиков была адаптирована модель случайной анизотропии, предложенная ранее для аморфных ферромагнитных сплавов [4]. Также она получила развитие в работах [5, 6]. Согласно модели случайной анизотропии, магнитокристаллическая анизотропия может “усредняться”, если возникает обменно-связанное состояние нанокристаллитов. А поскольку оси анизотропии нанокристаллитов ориентированы хаотично, то результирующая магнитная анизотропия получается очень малой.

Активные исследования нанокристаллических Finemet-подобных сплавов велись на протяжении двух десятилетий и продолжают в настоящее время [7–9].

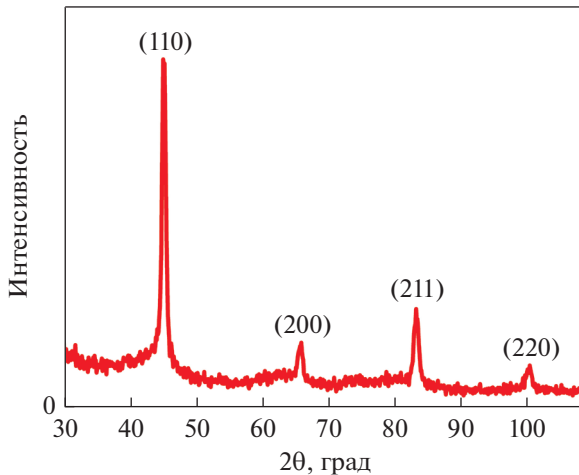


Рис. 1. Дифрактограмма ленты сплава $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ после отжига при температуре 795 К в течение 1 ч. Над пиками указаны индексы Миллера.

Нанокристаллические сплавы на основе переходных металлов показали себя как материалы с сильным магнитоимпедансным эффектом (МИ), заключающемся в зависимости импеданса от напряженности внешнего магнитного поля [10, 11]. По этой причине они перспективны для применения в качестве измерительных преобразователей в датчиках слабых магнитных полей, в том числе и в используемых в задачах биодетектирования [12]. МИ в нанокристаллических сплавах интересен и с фундаментальной точки зрения, так как позволяет изучать особенности магнитной анизотропии [13–15], определять величину и знак константы магнитострикции [16], определять температуру Кюри [17] и т.д.

Особое место в изучении МИ занимают его температурные исследования [16, 17]. Они важны для определения диапазонов термостабильности и термообратимости МИ-сенсоров [18, 19], а также позволяют изучать температурные изменения магнитных свойств [16, 20]. В то же время температурные исследования МИ в нанокристаллических ферромагнетиках и исследования, затрагивающие температуры выше температуры Кюри аморфной фазы, немногочисленны [17, 21]. При этом результаты исследования магнитных свойств [5, 22, 23] дают основание предполагать, что и выше температуры Кюри аморфной фазы в нанокристаллических сплавах можно добиваться высоких значений МИ. Такие исследования, с одной стороны, создадут задел для расширения диапазона рабочих температур сенсоров магнитного поля на основе этого эффекта в нанокристаллических ферромагнетиках, а с другой – благодаря высокой чувствительности МИ к изменениям магнитных свойств позволят изучить специфические эффекты взаимодей-

ствия между нанокристаллитами, обусловленные их составом, размерами и расстоянием между ними, и их проявление в МИ.

В настоящей работе представлены результаты исследований магнитных свойств и высокочастотного импеданса нанокристаллических лент $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$, проведенных в диапазоне температур от 300 до 723 К.

ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

Ленты сплава $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ толщиной 20 мкм и шириной 0.8 мм были получены методом быстрой закалки из расплава на вращающийся барабан и изначально находились в аморфном состоянии. Для нанокристаллизации их подвергали отжигу в форвакууме при температуре 793 К в течение 1 ч.

Структурное состояние лент исследовали при комнатной температуре методом рентгенофазового анализа с использованием CuK_α -излучения (длина волны $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$). Эксперименты проводили на дифрактометре Philips PW1710.

Для исследования магнитных свойств и полного электрического импеданса были подготовлены образцы длиной 15 мм. Магнитные свойства изучали индукционным методом в продольном магнитном поле, изменяющемся с частотой 1 кГц и амплитудой 1.8 кА/м.

Модуль импеданса образцов Z измеряли по схеме с балластным сопротивлением в диапазоне частот переменного тока 0.1–20 МГц при действующем значении силы тока 10 мА с использованием генератора IFR-2023А и милливольтметра переменного напряжения АКИП-2403. Магнитное поле при этом ориентировали вдоль длинной стороны образцов, его максимальная напряженность, H_{max} , составляла 11.3 кА/м. Таким образом, измерения проводили в конфигурации продольного импеданса.

Исследования импеданса и магнитных свойств проводили в диапазоне температур от 300 до 723 К. Нагрев образцов производили потоком воздуха заданной температуры так, как описано в работе [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Дифрактограммы указывают на то, что в процессе отжига формируется нанокристаллическая структура с размером нанокристаллитов $D = 12.3 \pm 3.0$ нм. Нанокристаллиты в основном представлены фазой $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$ (рис. 1).

При исследовании магнитных свойств было установлено, что при комнатной температуре ленты имеют намагниченность насыщения M_S около 0.95 МА/м. С ростом температуры T намагниченность насыщения уменьшается. При этом в диапа-

зоне температур от 610 до 650 К изменение намагниченности при повышении температуры сначала ускоряется, а затем становится более медленным (рис. 2, квадратные маркеры), кривая имеет точку излома. Такой характер температурного изменения M_S можно связать с переходом аморфной фазы в парамагнитное состояние [2].

Экспериментальные значения M_S хорошо аппроксимируются выражением для температурной зависимости намагниченности двухфазного ферромагнетика [2]:

$$M_S(T) = \sum_{i=1}^2 v_i M_{S0i} \left(1 - \frac{T}{T_{Ci}}\right)^{\beta_i}, \quad (1)$$

где v_i , M_{S0i} , T_{Ci} и β_i – объемная доля, намагниченность насыщения при 0 К, температура Кюри и критический показатель i -ой фазы соответственно. Индекс $i = 1$ отнесем к аморфной, $i = 2$ – к нанокристаллической фазе. В [25] было показано, что β_i могут принимать значения в интервале от 0.23 до 0.36.

На рис. 2 (штриховая линия) приведена температурная зависимость намагниченности, рассчитанная с помощью выражения (1). При этом наилучшая аппроксимация была достигнута при следующих значениях: $T_{C1} = 635$ К, $T_{C2} = 860$ К, $\beta_1 = \beta_2 = 0.36$ и $v_1 M_{S01}/v_2 M_{S02} = 1.22$. Ранее при исследовании нанокристаллических лент похожего состава, прошедших отжиг при схожих условиях, были получены близкие значения температур Кюри аморфной и нанокристаллической фаз [25, 26].

Рассмотрим температурную зависимость коэрцитивной силы, $H_c(T)$ (рис. 2). В начале исследованного диапазона температур она демонстрирует заметное уменьшение, достигая минимума около $T_K \approx 470$ К. Ниже будет показано, что T_K – это температура, при которой наблюдается минимальное в исследованном диапазоне температур значение константы эффективной магнитной анизотропии, K . Ранее наблюдали [2], что при повышении температуры коэрцитивная сила медленно растет вплоть до некоторой температуры (обозначим ее T_{ex}), выше которой начинается резкий рост H_c . Такой характер температурной зависимости коэрцитивной силы объясняли температурными изменениями эффективной магнитной анизотропии, которая, согласно модели случайной анизотропии, зависит от параметров обменного взаимодействия между нанокристаллитами. В нашем случае уменьшение коэрцитивной силы в начале исследованного диапазона температур отражает, по-видимому, уменьшение K и обусловлено наличием дополнительного вклада в эффективную магнитную анизотропию, уменьшающегося с ростом температуры и имеющего, вероятно, магнитоупругую природу [5]. В пользу наличия этого вклада говорят и довольно высокие значения коэрцитив-

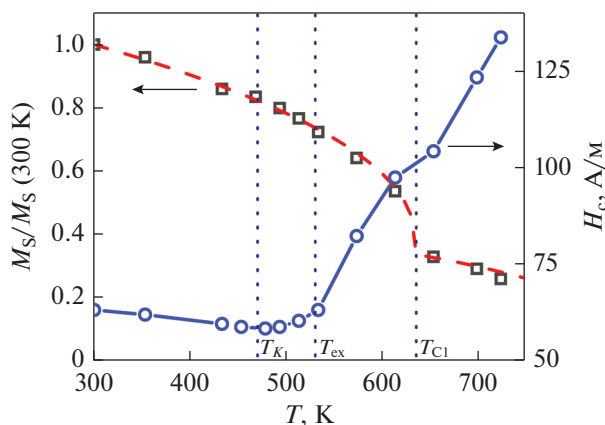


Рис. 2. Температурные зависимости намагниченности насыщения M_S , приведенной к значению при 300 К (квадратные маркеры – экспериментальные значения, пунктирная линия – значения, рассчитанные с помощью выражения (1), и коэрцитивной силы H_c .

ной силы, выше, чем можно было бы ожидать в рамках модели случайной анизотропии [2].

Резкий рост H_c , отражающий увеличение K [2], начинается при температуре около 530 К (рис. 2), являющейся, по-видимому, температурой разрушения обменно-связанного состояния, T_{ex} . При этом T_{ex} значительно ниже T_{C1} . Это, вероятно, связано с малой объемной долей нанокристаллической фазы, v_2 . В пользу этого свидетельствует тот факт, что отношение $v_1 M_{S01}/v_2 M_{S02}$ больше единицы, в то время как $M_{S01} < M_{S02}$ [2]. Вследствие малой доли нанокристаллической фазы расстояние между нанокристаллитами велико, поэтому обменно-связанное состояние разрушается раньше перехода аморфной фазы в парамагнитное состояние [5, 22, 23]. Тем не менее нужно отметить, что фазовый переход в аморфной фазе все же отражается на зависимости $H_c(T)$: в окрестности T_{C1} на ней есть заметный изгиб.

Температурные изменения магнитных свойств приводят к температурным изменениям импеданса лент. Отметим, что ранее влияние температуры на импеданс нанокристаллических лент подобного состава в случае, когда $T_{ex} < T_{C1}$, не рассматривали.

Модуль импеданса ферромагнитного планарного проводника толщиной d , опираясь на работы [27, 28], можно представить в следующей форме:

$$Z = \frac{k R_{DC}}{2(\operatorname{ch} k - \cos k)} \times \sqrt{(\sin k + \operatorname{sh} k)^2 + (\sin k - \operatorname{sh} k)^2}, \quad (2)$$

где R_{DC} – сопротивление на постоянном токе; $k = d/\delta$; $\delta = (\rho/\pi f \mu_0 \mu_i)^{1/2}$ – толщина скин-слоя; f –

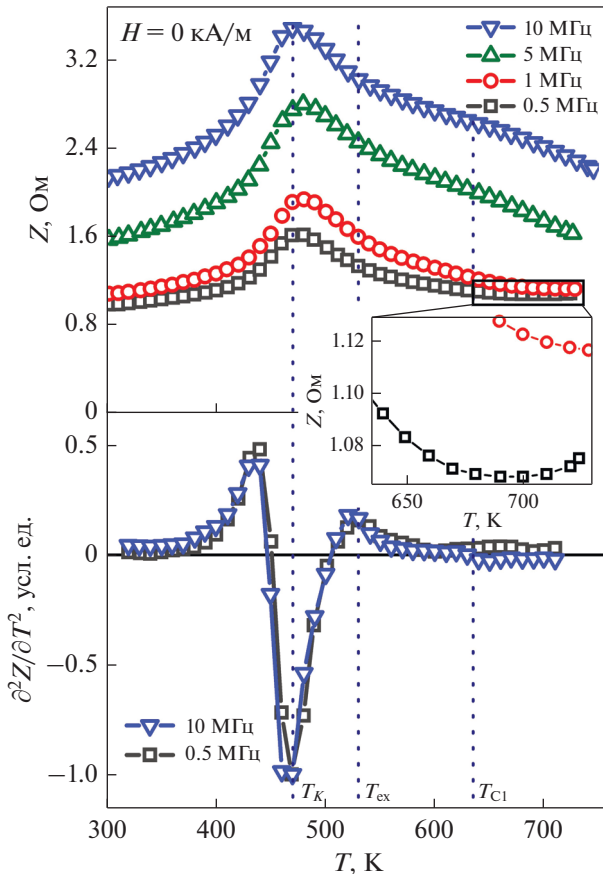


Рис. 3. Температурные зависимости импеданса Z нанокристаллических лент $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$, измеренного в отсутствие внешнего магнитного поля (верхняя панель), и его второй производной по температуре, $\partial^2 Z/\partial T^2$ (нижняя панель). Зависимости получены на частотах переменного тока 0.5, 1, 5 и 10 МГц. На вставке: увеличенный фрагмент зависимостей $Z(T)$.

частота переменного тока; ρ – удельное электро-сопротивление; μ_0 – магнитная постоянная; μ_r – эффективная поперечная (относительно направления протекания переменного тока) магнитная проницаемость. Очевидно, что температурная зависимость Z кроме температурного изменения магнитных свойств будет определяться также и температурным изменением электро-сопротивления, которое, как это было показано ранее, практически линейно увеличивается с ростом температуры [29].

Из представленных на рис. 3 (верхняя панель) зависимостей $Z(T)$, полученных в нулевом внешнем магнитном поле, видно, что в начале исследованного диапазона температур независимо от частоты переменного тока при повышении температуры импеданс демонстрирует значительный рост, достигая выраженного максимума при температуре от 470 до 480 К. Эта температура лежит

вблизи температуры T_K , отмеченной выше на зависимости $H_c(T)$ (рис. 2). Рост импеданса в диапазоне температур от 300 К до T_K связан, вероятнее всего, с уменьшением эффективной анизотропии, способствующем росту эффективной магнитной проницаемости [29]. Об уменьшении эффективной анизотропии в этом диапазоне температур свидетельствует, как показано выше, и характер зависимости $H_c(T)$.

При температурах выше T_K характер изменения импеданса зависит от частоты переменного тока.

На частотах 1 МГц и менее при температурах выше T_{ex} спад импеданса, начавшийся после T_K , постепенно замедляется. На частотах переменного тока 0.5 МГц и ниже к концу исследованного диапазона температур намечается тенденция к росту Z (рис. 3, вставка). Такой характер температурного изменения импеданса обусловлен конкуренцией вкладов от уменьшающейся магнитной проницаемости и увеличивающегося электро-сопротивления. В магнитных полях, близких к полю насыщения вследствие уменьшения эффективной магнитной проницаемости влияние вклада от электро-сопротивления становится более явным. Так при напряженности внешнего магнитного поля H_{max} на рассматриваемых частотах наблюдается рост импеданса во всем исследованном диапазоне температур с небольшим отклонением от линейности вблизи T_K (рис. 4, верхняя панель).

На частотах более 1 МГц при температурах выше T_K импеданс уменьшается вплоть до конца исследованного диапазона температур, что обусловлено преобладанием вклада от уменьшающейся эффективной магнитной проницаемости. При этом нужно отметить, что на зависимостях $Z(T)$, полученных на этих частотах, в отличие от более низких частот, вблизи температуры T_{C1} наблюдается слабо выраженный перегиб. По-видимому, уменьшение μ_r вблизи этой температуры вследствие уменьшения намагниченности частично компенсируется уменьшающейся эффективной магнитной анизотропией. Увеличивающееся с ростом температуры электро-сопротивление также частично компенсирует уменьшение импеданса при температурах выше T_K , в том числе и вблизи T_{C1} .

Обсуждаемые особенности зависимости $Z(T)$ хорошо выявляются с помощью второй производной импеданса по температуре, $\partial^2 Z/\partial T^2$, значения которой были рассчитаны методом конечных разностей (рис. 3, нижняя панель). Видно, что на частотах выше 1 МГц зависимость $\partial^2 Z/\partial T^2(T)$ вблизи T_{C1} пересекает ось абсцисс, свидетельствуя о наличии перегиба на зависимости $Z(T)$. На более низких частотах вблизи этой температуры пересечения

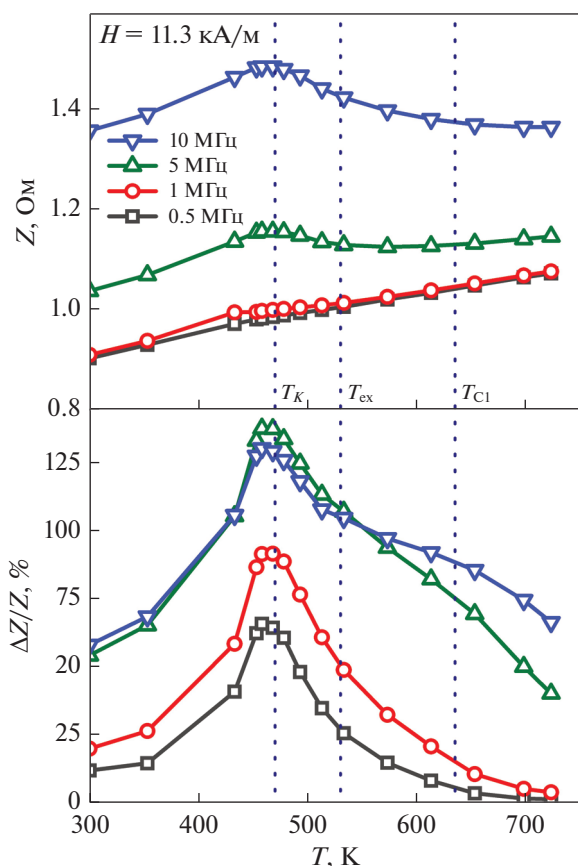


Рис. 4. Температурные зависимости импеданса Z нанокристаллических лент $Fe_{73.5}Si_{16.5}B_6Nb_3Cu_1$ в магнитном поле напряженностью H_{max} (верхняя панель) и величины магнитоимпедансного эффекта, $\Delta Z/Z$ (нижняя панель). Зависимости получены на частотах переменного тока 0,5, 1, 5 и 10 МГц.

нет. Отметим, что на всех исследованных частотах переменного тока зависимости $\partial^2 Z / \partial T^2(T)$ имеют минимумы вблизи T_K и максимумы вблизи T_{ex} , что может оказаться полезным для выявления этих характерных температур с помощью импедансных измерений.

Внешнее магнитное поле оказывает сильное влияние на импеданс при всех исследованных температурах (рис. 4, верхняя панель). Случай частот 1 МГц и менее уже обсуждали выше. На частотах более 1 МГц даже в поле H_{max} вблизи T_K наблюдается хорошо выраженный максимум, а рост Z вследствие роста удельного электросопротивления при температурах выше T_K наблюдается только на частотах переменного тока менее 10 МГц. На частоте 10 МГц при температурах выше T_K импеданс уменьшается до конца исследованного диапазона температур.

МИ рассчитывали по формуле

$$\Delta Z/Z = \frac{Z(H = 0) - Z(H_{max})}{Z(H_{max})} \times 100\%. \quad (3)$$

Характер температурной зависимости МИ повторяет таковой температурной зависимости импеданса (рис. 4, нижняя панель). При этом, как и в случае $Z(T)$, вблизи T_{C1} характер зависимости $\Delta Z/Z(T)$ изменяется слабо. В более ранних исследованиях МИ Finemet-подобных сплавов, вблизи температуры Кюри аморфной фазы наблюдали более заметные изменения характера температурной зависимости МИ [17, 21] вследствие того, что вблизи этой температуры также происходило разрушение обменно-связанного состояния нанокристаллитов. В нашем случае разрушение обменно-связанного состояния происходит вблизи температуры T_{ex} , при этом на зависимостях $\Delta Z/Z(T)$ наблюдается перегиб, хорошо заметный на частотах 5 МГц и выше.

Отметим также, что на частотах переменного тока более 5 МГц во всем исследованном диапазоне температур наблюдаются довольно значительный МИ (более 50%). Благодаря этому нанокристаллические ленты $Fe_{73.5}Si_{16.5}B_6Nb_3Cu_1$ могут найти применение при создании высокотемпературных датчиков на основе магнитоимпедансного эффекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были исследованы магнитные свойства и высокочастотный импеданс нанокристаллических лент $Fe_{73.5}Si_{16.5}B_6Nb_3Cu_1$ в диапазоне высоких температур от 300 до 723 К. По температурной зависимости коэрцитивной силы установлено, что обменно-связанное состояние нанокристаллитов разрушается при температуре около 530 К, т.е. температуре, значительно более низкой в сравнении с температурой Кюри аморфной фазы, находящейся вблизи 635 К. Полный импеданс и магнитоимпедансный эффект во всем исследованном диапазоне температур демонстрируют значительные температурные изменения, обусловленные температурными изменениями как магнитных, так и электрических свойств лент. При этом на частотах переменного тока более 5 МГц во всем исследованном диапазоне температур наблюдается заметный магнитоимпедансный эффект (более 50%), что может быть востребовано при создании датчиков магнитного поля, предназначенных для использования при высоких температурах.

Исследование выполнено частично за счет гранта по финансовой поддержке научно-педагогических коллективов ИРНИТУ (проект № 02-ФПК-19).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yoshizawa Y., Oguma S., Yamauchi K.* New Febased soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 64. P. 6044–6046.

2. *Herzer G.* Grain structure and magnetism of nanocrystalline ferromagnets // *IEEE Trans. Magn.* 1989. V. 25. P. 3327–3329.
3. *Glazer A.A., Klejnerman N.M., Lukshina V.A., Potapov A.P., Serikov V.V.* Thermomechanical treatment of nanocrystalline $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ alloy // *Fiz. Met. Met.* 1991. № 12. P. 56–61.
4. *Alben R., Becker J.J., Chi M.C.* Random anisotropy in amorphous ferromagnets // *J. Appl. Phys.* 1978. V. 49. P. 1653–1658.
5. *Hernando A., Vázquez M., Kulik T., Prados C.* Analysis of the dependence of spin-spin correlations on the thermal treatment of nanocrystalline materials // *Phys. Rev. B.* 1995. V. 51. P. 3581–3586.
6. *Iskhakov R.S., Komogortsev S.V., Moroz Z.M., Shalygina E.E.* Characteristics of the magnetic microstructure of amorphous and nanocrystalline ferromagnets with a random anisotropy: Theoretical estimates and experiment // *J. Exp. Theor. Phys. Lett.* 2000. V. 72. P. 603–607.
7. *Serikov V.V., Klejnerman N.M., Volkova E.G., Lukshina V.A., Potapov A.P., Svalov A.V.* Structure and magnetic properties of nanocrystalline FeCuNbSiB alloys after a thermomechanical treatment // *Phys. Met. Metallogr.* 2006. V. 102. P. 268–273.
8. *Stepanova E.A., Volchkov S.O., Lukshina V.A., Khudyakova D.M., Larrañaga A., Neznakhin D.S.* Magnetic and magnetoimpedance properties of rapidly quenched ribbons of modified alloys based on FINEMET // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1389. P. 012123.
9. *Mikhailitsyna E.A., Kataev V.A., Larrañaga A., Lepalovskij V.N., Kurlyandskaya G.V.* Nanocrystallization in FINEMET-Type $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ and $\text{Fe}_{72.5}\text{Nb}_{1.5}\text{Mo}_2\text{Cu}_{1.1}\text{Si}_{14.2}\text{B}_{8.7}$ Thin Films // *Materials (Basel)*. 2020. V. 13. P. 348.
10. *Panina L.V., Mohri K.* Magneto-impedance effect in amorphous wires // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 65. P. 1189–1191.
11. *Antonov A.S., Gadetskii S.N., Granovskii A.B., D'yachkov A.L., Paramonov V.P., Perov N.S., Prokoshin A.F., Usov N.A., Lagar'kov A.N.* Giant magnetoimpedance in amorphous and nanocrystalline multilayers // *Phys. Met. Metallogr.* 1997. V. 83. P. 612–618.
12. *Kurlyandskaya G.V., de Cos D., Volchkov S.O.* Magneto-sensitive transducers for nondestructive testing operating on the basis of the giant magnetoimpedance effect: A review // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2009. V. 45. P. 377–398.
13. *Ohnuma M., Hono K., Yanai T., Nakano M., Fukunaga H., Yoshizawa Y.* Origin of the magnetic anisotropy induced by stress annealing in Fe-based nanocrystalline alloy // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 86. P. 1–3.
14. *Lukshina V.A., Dmitrieva N.V., Volkova E.G., Shishkin D.A.* Structure of the $\text{Fe}_{63.5}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ Alloy Nanocrystallized in the Presence of Tensile Stresses // *Phys. Met. Metallogr.* 2019. V. 120. P. 1145–1151.
15. *Vazquez M., Kurlyandskaya G.V., Garcia-Beneytez J.M., Sinnecker J.P., Barandiaran J.M., Lukshina V.A., Potapov A.P.* Frequency dependence of the magnetoimpedance in nanocrystalline FeCuNbSiB with high transverse stress-induced magnetic anisotropy // *IEEE Trans. Magn.* 1999. V. 35. P. 3358–3360.
16. *Semirov A.V., Bukreev D.A., Moiseev A.A., Volchkov S.O., Kurlyandskaya G.V., Lukshina V.A., Volkova E.G.* Temperature Dependences of Magnetoimpedance of Nanocrystalline Fe-Based Ribbons // *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2012. V. 12. P. 7446–7450.
17. *Chen G., Yang X.L., Zeng L., Yang J.X., Gong F.F., Yang D.P., Wang Z.C.* High-temperature giant magnetoimpedance in Fe-based nanocrystalline alloy // *J. Appl. Phys.* 2000. V. 87. P. 5263–5265.
18. *Malátek M., Ripka P., Kraus L.* Temperature offset drift of GMI sensors // *Sensors Actuators A Phys.* 2008. V. 147. P. 415–418.
19. *Nabias J., Asfour A., Yonnet J.-P.* Temperature effect on GMI sensor: Comparison between diagonal and off-diagonal response, *Sensors Actuators A Phys.* // 2019. V. 289. P. 50–56.
20. *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 // *Russ. Phys. J.* 2011. V. 54. P. 612–618.
21. *Zeng L., Zhao Z.J., Yang X.L., Ruan J.Z., Chen G.* Observations of magnetic coupling in Fe-based nanocrystalline alloy by high-temperature giant magnetoimpedance effect // *J. Magn. Magn. Mater.* 2002. V. 246. P. 422–424.
22. *Ślawska-Waniewska A., Gutowski M., Lachowicz H.K., Kulik T., Matyja H.* Superparamagnetism in a nanocrystalline Fe-based metallic glass // *Phys. Rev. B.* 1992. V. 46. P. 14594–14597.
23. *Xu Y.-C., Wang Z.* Mechanism of Improved High-Temperature Magnetic Softness for Co-Contained Finemet Alloy // *IEEE Trans. Magn.* 2015. V. 51. P. 1–4.
24. *Семиров А.В., Моисеев А.А., Букреев Д.А., Кудрявцев В.О., Гаврилюк А.А., Захаров Г.В., Деревянко М.С.* Автоматизированный измерительный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии магнитомягких материалов // *Научное Прибостроение*. 2010. Т. 20. № 2. С. 42–45.
25. *Turtelli R.S., Duong V.H., Grossinger R., Schwetz M., Ferrara E., Pillmayr N.* Contribution of the crystalline phase $\text{Fe}_{100-x}\text{Si}_x$ to the temperature dependence of magnetic properties of FINEMET-type alloys // *IEEE Trans. Magn.* 2000. V. 36. P. 508–512.
26. *Herzer G.* Nanocrystalline soft magnetic alloys // *Handb. Magn. Mater.*, Chapter 3. 1997. P. 415–462.
27. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука. 1982. 621 с.
28. *Kraus L.* Theory of giant magneto-impedance in the planar conductor with uniaxial magnetic anisotropy // *J. Magn. Magn. Mater.* 1999. V. 195. P. 764–778.
29. *Semirov A.V., Bukreev D.A., Moiseev A.A., Lukshina V.A., Volkova E.G., Volchkov S.O., Kurlyandskaya G.V.* Temperature dependence of the magnetic properties and magnetoimpedance of nanocrystalline $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ ribbons // *Tech. Phys.* 2011. V. 56. P. 395–399.