## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.213.26:537.622:537.621.2

# ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МАГНИТОИМПЕДАНСНОГО ЭФФЕКТА В КОМПОЗИТНОМ ПРОВОДЕ С НАВЕДЕННОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

© 2020 г. А. А. Моисеев<sup>*a*, \*, Д. А. Букреев<sup>*a*</sup>, М. С. Деревянко<sup>*a*</sup>, В. О. Кудрявцев<sup>*a*</sup>, А. Ларраньяга<sup>*b*</sup>, Г. В. Курляндская<sup>*b*, *c*</sup>, А. В. Семиров<sup>*a*</sup></sup>

<sup>а</sup>Иркутский государственный университет, ул. К. Маркса, 1, Иркутск, 664003 Россия <sup>b</sup>Университет Страны Басков, Бильбао, Испания <sup>c</sup>Уральский федеральный университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия \*e-mail: moiseev.al.an@gmail.com Поступила в редакцию 16.10.2019 г. После доработки 03.12.2019 г. Принята к публикации 10.12.2019 г.

Исследованы особенности структуры, магнитные свойства и температурная зависимость магнитоимпедансного эффекта в композитном проводе Fe<sub>20</sub>Co<sub>6</sub>Ni<sub>74</sub>/Cu<sub>98</sub>Be<sub>2</sub> с наведенной аксиальной магнитной анизотропией. Показано, что повышение температуры в диапазоне от 150 до 450 К приводит к увеличению магнитоимпедансного эффекта. Для объяснения экспериментальных результатов предложена модель, учитывающая температурные изменения намагниченности и константы магнитной анизотропии в магнитном слое Fe<sub>20</sub>Co<sub>6</sub>Ni<sub>74</sub>.

Ключевые слова: композитный провод, магнитоимпедансный эффект, температурная зависимость

DOI: 10.31857/S0015323020050083

## введение

Высокочастотный электрический импеданс магнитомягких проводников проявляет высокую чувствительность к изменениям их магнитных свойств, в первую очередь, их динамической магнитной проницаемости [1, 2]. Следствием этого является зависимость электрического импеданса образцов из данных материалов от внешних воздействий, влияющих на их магнитные свойства. Наиболее исследованна в настоящее время зависимость высокочастотного электрического импеданса от внешнего магнитного поля, получившая название магнитоимпедансного эффекта (МИ) [3, 4]. При этом обнаружено и влияние на МИ других внешних воздействий, таких как слабая пластическая деформация, механические напряжения и температура, а также воздействий, меняющих состояние поверхности [5-11]. Особенности МИ и его поведение в присутствии внешних воздействий во многом определяются свойствами магнитной анизотропии проводника [12]. Основная часть исследований зависимости электрического импеданса от внешних воздействий различного типа выполнена на аморфных и нанокристаллических сплавах в виде проволок и лент. Однако свойства магнитной анизотропии данных объектов в настоящее время недостаточно изучены и вызывают ряд вопросов, таких как механизмы ее образования и пространственное распределение локальных осей легкого намагничивания, угловая и амплитудная дисперсия осей легкого намагничивания и ряд других [13]. В связи с этим подобные исследования представляют интерес в случае объектов с известными параметрами магнитной анизотропии. Одним из таких объектов может служить композитный провод, представляющий собой цилиндрическую основу из слабомагнитного проводника с тонким слоем магнитомягкого металла на поверхности [14, 15]. Электролитическая технология получения таких проводов хорошо отработана и обеспечивает высокую воспроизводимость их магнитных и электрических свойств. Для наведения магнитной анизотропии в данных проводах традиционно используют термомагнитную обработку, параметры которой также хорошо исследованы [16].

Несмотря на то что исследования МИ в композитных проводах продолжаются уже достаточно долго [14, 15, 17–21], должного внимания такому важному внешнему фактору, оказывающему сильное влияние на магнитные и электрические свойства, как температура, не уделяли. Поэтому цель данной работы — исследование температурного поведения МИ в композитных проводах с наведенной магнитной анизотропией.

## ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Объект исследования — отрезок композитного провода, полученного электролитическим осаждением ферромагнитного сплава  $Fe_{20}Co_6Ni_{74}$  на провод с высокой электропроводностью состава  $Cu_{98}Be_2$ . Толщина осажденного слоя составляла 1 мкм, общий диаметр провода — 105 мкм. Толщину слоя определяли как по времени осаждения, так и с помощью сканирующей электронной микроскопии, выполненной на Hitachi TM3000. Электрические и магнитоимпедансные измерения проводили на образцах длиной 30 мм.

Оценка некоторых параметров структуры проведена методом рентгеновской дифракции в Cu $K_{\alpha}$ -излучении на дифрактометре Bruker D8 Advance Vantec. Нагрев от 300 до 650 K с последующим охлаждением до 300 K не приводит к существенному изменению размера зерна, который составляет 30  $\pm$  3 нм для всех исследованных температур (300, 450 и 650 K).

Электролитическая технология получения магнитного слоя обуславливает формирование циркулярной магнитной анизотропии в исходных образцах [21]. При этом конкретные параметры магнитной анизотропии образцов могут иметь определенную дисперсию. Для наведения аксиальной магнитной анизотропии с минимально возможной дисперсией исходные провода подвергали термомагнитой обработке в течение 1 ч при температуре 600 К в аксиальном магнитном поле напряженностью 12 кА/м. Результат данной обработки отражает практически прямоугольная форма продольной петли магнитного гистерезиса, что говорит о минимальной дисперсии локальных осей анизотропии (рис. 1). Коэффициенты выпуклости и прямоугольности петли гистерезиса близки к единице. Коэрцитивная сила составляет примерно 320 А/м.

МИ исследовали на автоматизированном комплексе магнитоимпедансной спектроскопии в диапазоне частот переменного тока f = 0.1-100 МГц при действующем значении силы тока 1 мА, обеспечивающем линейный режим возбуждения [22]. Максимальная напряженность аксиального внешнего магнитного поля  $H_{\rm max}$  составляла ±12.3 кА/м. Исследования МИ проведены в диапазоне температур от 150 до 450 К.

Для количественного описания приращения импеданса, вызванного изменением внешнего





**Рис.** 1. Изображение, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии, (а) и продольная петля магнитного гистерезиса (б) композитного провода  $Cu_{98}Be_2/Fe_{20}Co_6Ni_{74}$  с аксиальной магнитной анизотропией.

магнитного поля, рассчитывали магнитоимпедансное отношение согласно выражению

$$\frac{\Delta Z}{Z}(H) = \frac{Z(H) - Z(H_{\text{max}})}{Z(H_{\text{max}})} \times 100\%, \qquad (1)$$

где Z(H) – импеданс в магнитном поле напряженностью  $H, Z(H_{\text{max}})$  – импеданс в магнитном поле напряженностью 12.3 кА/м.

Вид зависимости  $\Delta Z/Z(H)$  (рис. 2) повторяет вид зависимости Z(H), а именно: с ростом напряженности магнитного поля наблюдается уменьшение модуля импеданса и магнитоимпедансного отношения соответственно, т.е. его максимальное значение ( $\Delta Z/Z$ )<sub>тах</sub> наблюдается в нулевом магнитном поле.

При этом данный вид зависимости сохраняется во всем исследованном диапазоне температур.



**Рис. 2.** Зависимости магнитоимпедансного отношения композитного провода  $Cu_{98}Be_2/Fe_{20}Co_6Ni_{74}$  от напряженности внешнего магнитного поля для разных частот переменного тока, измеренные при температуре 150 (а); 450 К (б).

Наблюдаемая форма зависимостей  $\Delta Z/Z(H)$  типична для образцов магнитных материалов с ярко выраженной продольной магнитной анизотропией [23]. Таким образом, результаты магнитных измерений (рис. 1) и измерений МИ хорошо коррелируют друг с другом.

Следует отметить, что на частотах переменного тока ниже 1 МГц скин-эффект выражен слабо, и изменение импеданса под воздействием магнитного поля напряженностью 12.3 кА/м не превышает погрешности его измерения.

Величина  $\Delta Z/Z$  зависит от температуры и частоты переменного тока, на которой проведены измерения. При температуре 150 К наибольшее значение ( $\Delta Z/Z$ )<sub>max</sub>, равное 78%, наблюдается на частоте 10 МГц, а при температуре 450 К наиболь-



**Рис. 3.** Зависимости максимального магнитоимпедансного отношения  $(\Delta Z/Z)_{max}$  композитного провода Cu<sub>98</sub>Be<sub>2</sub>/Fe<sub>20</sub>Co<sub>6</sub>Ni<sub>74</sub> от частоты переменного тока при разных температурах (а) и от температуры при разных частотах переменного тока (б).

шее значение составляет 151% и наблюдается на частоте 15 МГц.

Примечательны два факта. Во-первых, частотная зависимость максимального значения магнитоимпедансного отношения,  $(\Delta Z/Z)_{max}$ , демонстрирует достаточно широкий максимум в интервале частот от 6 до 30 МГц (рис. 3а).

Данный факт снижает требования к точности поддержания заданной частоты переменного тока в измерительной цепи датчика магнитного поля, использующего исследуемые объекты в качестве чувствительного элемента.

Во-вторых, нагрев образцов приводит к существенному увеличению ( $\Delta Z/Z$ )<sub>тах</sub> на частотах переменного тока выше 2 МГц (рис. 36). При этом характер температурной зависимости ( $\Delta Z/Z$ )<sub>тах</sub> близок к линейному, что также перспективно для практических приложений. Стоит отметить, что температурная чувствительность  $(\Delta Z/Z)_{max}$  зависит от частоты переменного тока, на которой она измерена.

Наблюдаемое при нагреве образцов увеличение  $(\Delta Z/Z)_{\text{max}}$  требует отдельного обсуждения. Вследствие того, что электропроводность медной центральной жилы значительно больше электропроводности поверхностного магнитного слоя, переменный ток протекает в основном по ней [21]. Однако условия его протекания существенно зависят от магнитных свойств слоя Fe<sub>20</sub>Co<sub>6</sub>Ni<sub>74</sub>. Поэтому импеданс провода определяется электропроводностью жилы и циркулярной магнитной проницаемостью магнитного слоя, а его температурное изменение – температурными изменениями этих величин. Выше было показано, что размер зерна с температурой практически не изменяется. поэтому влияние структурных изменений на температурное изменение МИ можно исключить.

Для определения вкладов в температурное приращение импеданса соответствующих изменений электропроводности высокопроводящей жилы  $Cu_{98}Be_2$  и циркулярной магнитной проницаемости магнитного слоя  $Fe_{20}Co_6Ni_{74}$  проанализируем температурные зависимости импеданса, полученные в максимальном магнитном поле и в его отсутствие (рис. 4).

В магнитном поле напряженностью 12.3 кА/м образец находится в состоянии технического насыщения, его магнитная проницаемость близка к единице и вклад магнитного слоя в результирующий импеданс незначителен. При этом температурное приращение импеданса во всем исследованном диапазоне частот переменного тока оказывается близким к нулю (рис. 4а), следовательно, вклад температурного изменения электропроводности жилы в температурное приращение импеданса незначителен.

В отсутствие магнитного поля, когда магнитная проницаемость магнитного слоя много больше единицы, при нагреве образца наблюдается значительный рост импеданса, что особенно заметно на высоких частотах (рис. 4б).

Все вышесказанное позволяет утверждать, что температурное изменение импеданса в основном обусловлено температурным изменением циркулярной магнитной проницаемости,  $\mu_{\phi}$ , магнитно-го слоя Fe<sub>20</sub>Co<sub>6</sub>Ni<sub>74</sub>.

Далее проведем качественную оценку данного изменения. В случае аксиального направления оси легкого намагничивания циркулярная магнитная проницаемость определяется процессами вращения вектора намагниченности и в рамках



**Рис. 4.** Температурные зависимости импеданса композитного провода  $Cu_{98}Be_2/Fe_{20}Co_6Ni_{74}$  для разных частот переменного тока в магнитном поле напряженностью 12.3 кА/м (а) и в отсутствие магнитного поля (б).

модели Стонера-Вольфарта может быть представлена выражением [24]

$$\mu_{\phi} = 1 + \frac{2\mu_0 M_s^2}{K},$$
 (2)

где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума,  $M_s$  — намагниченность насыщения и K — константа магнитной анизотропии. Из приведенного выражения следует, что температурное изменение магнитной проницаемости определяется конкурирующими вкладами от температурных изменений намагниченности насыщения и константы магнитной анизотропии.

Температурная зависимость намагниченности насыщения описывается классическим законом Блоха [25]:

$$\Delta M_{\rm s} = [M_{\rm s}(T=0) - M_{\rm s}(T)] \sim T^{3/2}.$$
 (3)

В свою очередь температурная зависимость константы магнитной анизотропии имеет достаточно сложный вид [26]. Для значительного роста магнитной проницаемости при повышении температуры изменение константы магнитной анизотропии должно преобладать над соответствующим изменением намагниченности насыщения. Подобная ситуация возможна в случае нескольких механизмов формирования магнитной анизотропии. Для композитных материалов, подвергнутых отжигу в магнитном поле, дополнительным механизмом формирования магнитной анизотропии может стать магнитоупругое взаимодействие, обусловленное механическими напряжениями, возникающими в материале из-за отличия температурных коэффициентов линейного расширения его составляющих.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе проведенных исследований показано, что температурная зависимость МИ в композитных проводах Cu<sub>98</sub>Be<sub>2</sub>/Fe<sub>20</sub>Co<sub>6</sub>Ni<sub>74</sub> с наведенной аксиальной магнитной анизотропией близка к линейной, и повышение температуры приводит к росту МИ. При этом МИ достигает максимального значения в достаточно широком диапазоне частот переменного тока. Рост МИ при нагреве связан с преобладанием температурного изменения константы магнитной анизотропии над соответствующим изменением намагниченности насыщения, ввиду наличия нескольких механизмов ее формирования.

Работа выполнена по заданию Минобрнауки России на выполнение научно-исследовательских работ, проект 3.1941.2017/4.6. Некоторые исследования были проведены в общих научных сервисах университета Страны Басков (SGIKER UPV-EHU).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 621 с.
- Антонов А.С., Гадецкий С.Н., Грановский А.Б., Дьячков А.Л., Парамонов В.П., Перов Н.С., Прокошин А.Ф., Усов Н.А., Лагарьков А. Н. Гигантский магнитоимпеданс в аморфных и нанокристаллических мультислоях // ФММ. 1997. V. 83. № 6. С. 60–71.
- Panina L.V., Mohri K. Magneto-impedance effect in amorphous wires // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. № 9. P. 1189–1191.
- Beach R.S., Berkowitz A.E. Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. № 26. P. 3652–3654.
- Knobel M., Sanchez M. L., Velazquez J., Vazquez M. Stress dependence of the giant magneto-impedance effect in amorphous wires // J. Phys. Condens. Matter. 1995. V. 7. № 9. P. L115–L120.

- Chiriac H., Sandrino Marinescu C., Óvári T.-A. Temperature dependence of the magneto-impedance effect in Co-rich amorphous glass-covered wires // J. Magn. Magn. Mater. 2000. V. 215–216. P. 539–541.
- 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 Fe<sub>73.5</sub>Si<sub>16.5</sub>B<sub>6</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub> ribbons // Tech. Phys. 2011. V. 56. № 3. P. 395–399.
- Semirov A.V., Derevyanko M.S., Bukreev D.A., Moiseev A.A., Kurlyandskaya G.V. Impedance and magnetic properties of CoFeCrSiB amorphous ribbons near the curie point // Tech. Phys. 2013. V. 58. № 5. P. 774–777.
- Bukreev D.A., Moiseev A.A., Derevyanko M.S., Semirov A.V. High-Frequency Electric Properties of Amorphous Soft Magnetic Cobalt-Based Alloys in the Region of Transition to the Paramagnetic State // Russ. Phys. J. 2015. V. 58. № 2. P. 141–145.
- Volchkov S.O., Cerdeira M.A., Gubernatorov V.V., Duhan E.I., Potapov A.P., Lukshina V.A. Effects of Slight Plastic Deformation on Magnetic Properties and Giant Magnetoimpedance of FeCoCrSiB Amorphous Ribbons // Chinese Phys. Lett. 2007. V. 24. № 5. P. 1357–1360.
- 11. Golubeva E.V., Stepanova E.A., Balymov K.G., Volchkov S.O., Kurlyandskaya G.V. Magnetic Properties and the Giant Magnetoimpedance of Amorphous Co-Based Wires with a Carbon Coating // Phys. Met. Metallogr. 2018. V. 119. № 4. P. 324–331.
- Sommer R.L., Chien C.L. Role of magnetic anisotropy in the magnetoimpedance effect in amorphous alloys // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. № 6. P. 857–859.
- 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 Fe<sub>73.5</sub>Si<sub>16.5</sub>B<sub>6</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub> strips // Russ. Phys. J. 2011. V. 54. № 5. P. 612–618.
- Beach R.S., Smith N., Platt C.L., Jeffers F., Berkowitz A.E. Magneto-impedance effect in NiFe plated wire // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. № 19. P. 2753–2755.
- 15. Antonov A.S., Buznikov N.A., Prokoshin A.F., Rakhmanov A.L., Iakubov I.T., Yakunin A.M. Nonlinear magnetization reversal in copper-permalloy composite wires induced by a high-frequency current // Tech. Phys. Lett. 2001. V. 27. № 4. P. 313–315.
- Kurlyandskaya G., García-Miquel H., Vázquez M., Svalov A., Vas'kovskiy V. Longitudinal magnetic bistability of electroplated wires // J. Magn. Magn. Mater. 2002. V. 249. № 1–2. P. 34–38.
- 17. Kurlyandskaya G.V., El Kammouni R., Volchkov S.O., Shcherbinin S.V., Larranaga A. Magnetoimpedance Sensitive Elements Based on CuBe/FeCoNi Electroplated Wires in Single and Double Wire Configurations // IEEE Trans. Magn. 2017. V. 53. № 4. P. 1–15.
- Chen D.L., Li X., Pan H.L., Luan H.Y., Zhao Z.J. Magneto-Impedance Effect of Composite Wires Prepared by Chemical Plating under DC Current // Nano-Micro Lett. 2014. V. 6. № 3. P. 227–232.
- Mishra A.C. Microstructure, magnetic and magnetoimpedance properties in electrodeposited NiFe/Cu and CoNiFe/Cu wire with thiourea additive in plating

bath // Phys. B Condens. Matter. Elsevier, 2012. V. 407.  $\mathbb{N}$  6. P. 923–934.

- García D., Kurlyandskaya G.V., Vázquez M., Toth F.I., Varga L.K. Influence of field annealing on the hysteretic behaviour of the giant magneto-impedance effect of Cu wires covered with Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> outer shells // J. Magn. Magn. Mater. 1999. V. 203. № 1–3. P. 208–210.
- Курляндская Г.В., Бебенин Н.Г., Васьковский В.О. Гигантский магнитный импеданс проволок с тонким магнитным покрытием // ФММ. 2011. Т. 111. № 2. С. 136–158.
- 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.

- 23. *Kraus L.* GMI modeling and material optimization // Sensors Actuators A Phys. 2003. V. 106. № 1–3. P. 187–194.
- 24. *Stoner E.C., Wohlfarth E.P.* A Mechanism of Magnetic Hysteresis in Heterogeneous Alloys // Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 1948. V. 240. № 826. P. 599–642.
- 25. Bloch F. Zur Theorie des Ferromagnetismus // Zeitschrift fur Phys. 1930. V. 61. № 3–4. P. 206–219.
- 26. Лесник А.Г. Наведенная магнитная анизотропия. Киев: Наукова думка, 1976. 164 с.