

05

## Импеданс и магнитные свойства аморфных лент $\text{CoFeCrSiB}$ вблизи температуры Кюри

© А.В. Семиров,<sup>1</sup> М.С. Деревянко,<sup>1</sup> Д.А. Букреев,<sup>1</sup> А.А. Моисеев,<sup>1</sup> Г.В. Курляндская<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Восточно-Сибирская государственная академия образования,  
664011 Иркутск, Россия,  
e-mail: semirov@igru.ru

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина,  
620000 Екатеринбург, Россия  
e-mail: Galina.Kurlyandskaya@usu.ru

(Поступило в Редакцию 12 июля 2012 г.)

Исследовано влияние температуры на магнитные свойства и магнитный импеданс аморфных лент  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ , обладающих различными температурами Кюри. Обнаружено значительное изменение импеданса и его компонент при переходе материала лент в парамагнитное состояние. Данное явление может быть использовано для определения температуры Кюри ферромагнитных материалов, а также для создания тепловых измерительных преобразователей, обладающих высокой чувствительностью.

### Введение

Развитие техники и технологий приводит к ужесточению требований к измерительным преобразователям датчиков внешних воздействий, которые, во-первых, должны обладать хорошими метрологическими характеристиками, а во-вторых, иметь высокую надежность. Поиск материалов для измерительных преобразователей, удовлетворяющих этим требованиям, заставляет обратить внимание на сравнительно новый вид функциональных сред — аморфные ферромагнитные металлические сплавы.

На сегодняшний день достаточно полно исследованы условия получения данных материалов, позволяющие сформировать у них необходимые функциональные свойства. Так, вариации состава аморфного сплава, его термообработка позволяют целенаправленно изменять его магнитные свойства [1,2]. С особенностями магнитных свойств аморфных и нанокристаллических сплавов в свою очередь связан целый ряд явлений, интересных с фундаментальной и прикладной точек зрения, например, эффект магнитоимпеданса (МИ) [3,4]. МИ заключается в зависимости электрического импеданса проводника от напряженности внешнего магнитного поля и определяется соответствующей зависимостью магнитной проницаемости. Относительное изменение модуля импеданса в случае аморфных магнитомягких сплавов может превышать 100% в полях напряженностью порядка единиц Эрстед, что создает перспективы для использования данных материалов в качестве измерительных преобразователей в датчиках слабых магнитных полей, в том числе создаваемых маркированными биологическими объектами [4,5]. Так как магнитная проницаемость может значительно изменяться с температурой, возникает вопрос о термостабильности магнитоимпедансных измерительных преобразователей. Изучению этого вопроса был посвящен ряд работ [6,7], однако остаются слабо

исследованными изменения импеданса и МИ при температурах ниже комнатных, а также вблизи температуры Кюри.

Авторы работы [8] при исследовании нанокристаллических проволок  $\text{FeSiBSiNb}$  обнаружили резкое изменение импеданса вблизи температуры Кюри, связанное с радикальным падением циркулярной магнитной проницаемости в результате разрыва обменных связей между нанокристаллитами. Сильное изменение импедансных свойств вблизи температуры Кюри следует также ожидать и в случае аморфных ферромагнетиков. Так как данное явление может быть использовано для создания высокочувствительных тепловых преобразователей, исследования импеданса аморфных сплавов в области ферромагнитного фазового перехода представляются особенно интересными. При этом коррозионная стойкость и высокая прочность данных материалов позволяют говорить о возможности их использования даже в экстремальных условиях эксплуатации.

В настоящей работе исследуется воздействие температуры на магнитные и импедансные свойства аморфных лент составов  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$  в области температуры Кюри.

### Образцы и экспериментальные методики

Ленты составов  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$  были получены методом быстрой закалки из расплава на вращающийся барабан. Длина лент составляла 50 mm, ширина 2 mm, толщина 20  $\mu\text{m}$ . Их структурное состояние исследовалось с помощью рентгеноструктурного анализа в  $\text{Cu-K}\alpha$  излучении (PHILIPS X'PERT PRO диффрактометр).

Исследования МИ проводились в интервале температур  $T$  от 170 до 400 K. Температуры ниже комнатной

достигались помещением образца в поток паров азота. Для достижения температур выше комнатных использовался поток нагретого воздуха. Температура образца контролировалась термопарой.

Действительная  $R$  и мнимая  $X$  компоненты импеданса  $Z$  определялись по результатам измерений на автоматизированном комплексе магнитоимпедансной спектроскопии [9] при действующем значении пробного переменного тока  $10 \text{ mA}$  в диапазоне частот  $f$  от  $0.1$  до  $70 \text{ MHz}$ . Магнитоимпедансный эффект исследовался в магнитных полях  $H$  напряженностью до  $150 \text{ Oe}$ . Внешнее магнитное поле и пробный переменный ток были ориентированы вдоль длины образца. Модуль импеданса рассчитывался как  $Z = (R^2 + X^2)^{1/2}$ .

Относительное температурное изменение импеданса  $\Delta Z/Z$  определялось согласно выражению

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{Z(T) - Z(T_K)}{Z(T_K)} 100\%,$$

где  $Z(T)$  — значение импеданса при температуре  $T$ ,  $Z(T_K)$  — значение импеданса при температуре Кюри.

Из температурных зависимостей модуля импеданса была рассчитана его температурная чувствительность, приведенная к  $Z(T_K)$ :

$$S_Z = \frac{\partial Z}{\partial T} \frac{1}{Z(T_K)} 100\%.$$

Аналогично были найдены приведенные температурные чувствительности  $S_R$  и  $S_X$  действительной и мнимой компонент импеданса соответственно.

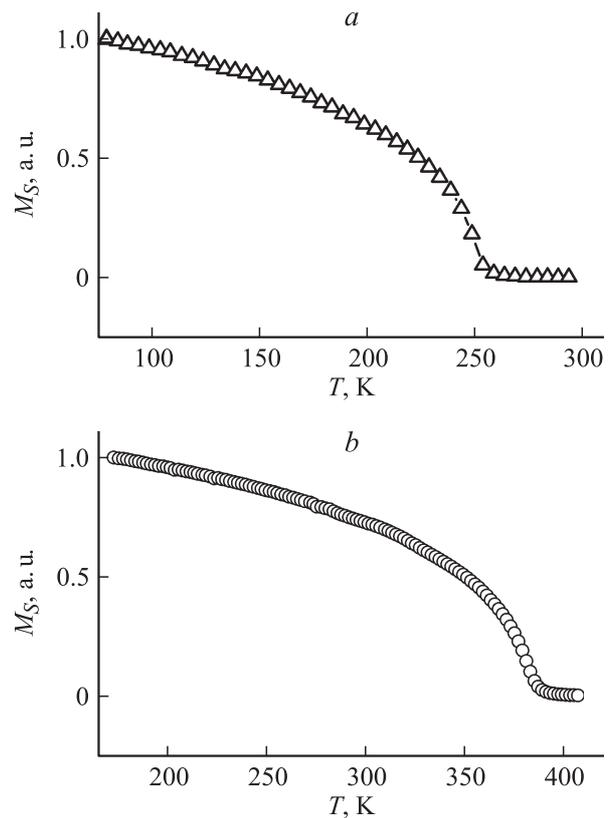
Температурные исследования магнитных свойств были проведены на вибрационном магнитометре в температурном интервале  $90\text{--}420 \text{ K}$ , длина лент в данном случае составляла  $9 \text{ mm}$ .

## Результаты и обсуждение

Согласно данным рентгеноструктурного анализа, ленты находились в аморфном состоянии. Наблюдалось лишь небольшое повышение интенсивности в интервале двойных углов  $40^\circ\text{--}55^\circ$ . Было установлено, что нагрев образцов в исследуемом температурном диапазоне не приводит к изменению структуры.

Согласно магнитометрическим исследованиям, намагниченность лент обоих составов с ростом температуры монотонно уменьшается (рис. 1). При этом сплавы, несмотря на близкие составы, имеют различные температуры Кюри. Для сплава  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  температура Кюри находится вблизи  $250 \text{ K}$  (рис. 1, *a*), а для сплава  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$  — вблизи  $380 \text{ K}$  (рис. 1, *b*). Таким образом, варьируя незначительно состав сплава, можно в широких пределах изменять его температуру Кюри.

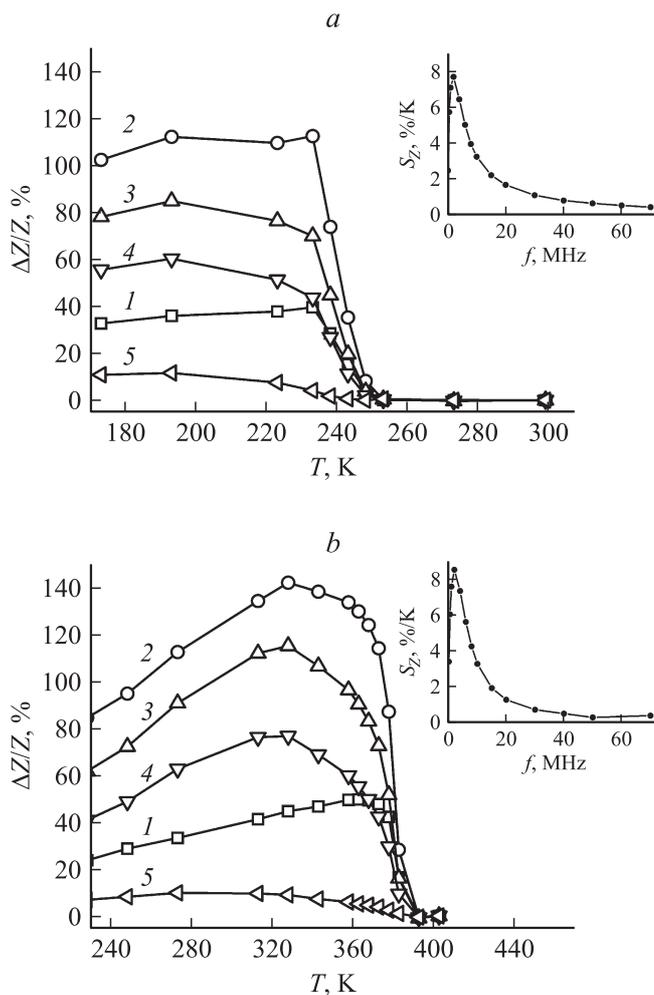
В отличие от намагниченности, импеданс в нулевом магнитном поле с повышением температуры испытывает сначала рост и лишь затем уменьшается, как это видно



**Рис. 1.** Относительное температурное изменение намагниченности лент сплавов: *a* —  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ , *b* —  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ .

из температурных зависимостей  $\Delta Z/Z$  (рис. 2). Такое поведение импеданса особенно выражено в случае лент  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$  (рис. 2, *b*). Наличие возрастающего участка свидетельствует о росте магнитной проницаемости, что, принимая во внимание температурную зависимость намагниченности (рис. 1), может быть вызвано существенным уменьшением эффективной магнитной анизотропии [7]. В области фазового перехода импеданс, как и намагниченность, испытывает значительный спад. При этом температура, при которой импеданс исследуемых лент достигает минимума, соответствует их температуре Кюри. При температурах более высоких, чем температура Кюри, наблюдается слабый рост импеданса вследствие уменьшения электропроводности сплава.

Изменение температуры также существенно сказывается и на характере изменения импеданса во внешнем магнитном поле (рис. 3). Как видно из магнитоимпедансных зависимостей  $Z(H)$ , при температурах ниже температуры Кюри с увеличением напряженности магнитного поля наблюдается рост импеданса до некоторого максимального значения  $Z_{\text{max}}$ , зависящего от частоты переменного тока и температуры. С дальнейшим увеличением  $H$  импеданс монотонно уменьшается. С повышением температуры возрастающий и убывающий участки на магнитоимпедансной зависимости становятся все менее выраженными, значение  $Z_{\text{max}}$  приближается к значению



**Рис. 2.** Относительное температурное изменение модуля импеданса: *a* — ленты сплава  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ , *b* — ленты сплава  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ . Зависимости  $\Delta Z/Z(T)$  получены в диапазоне частот переменного тока, МГц: 1 — 0,1, 2 — 2, 3 — 6, 4 — 10, 5 — 70. На вставке частотные зависимости максимального значения приведенной температурной чувствительности модуля импеданса  $S_Z$ .

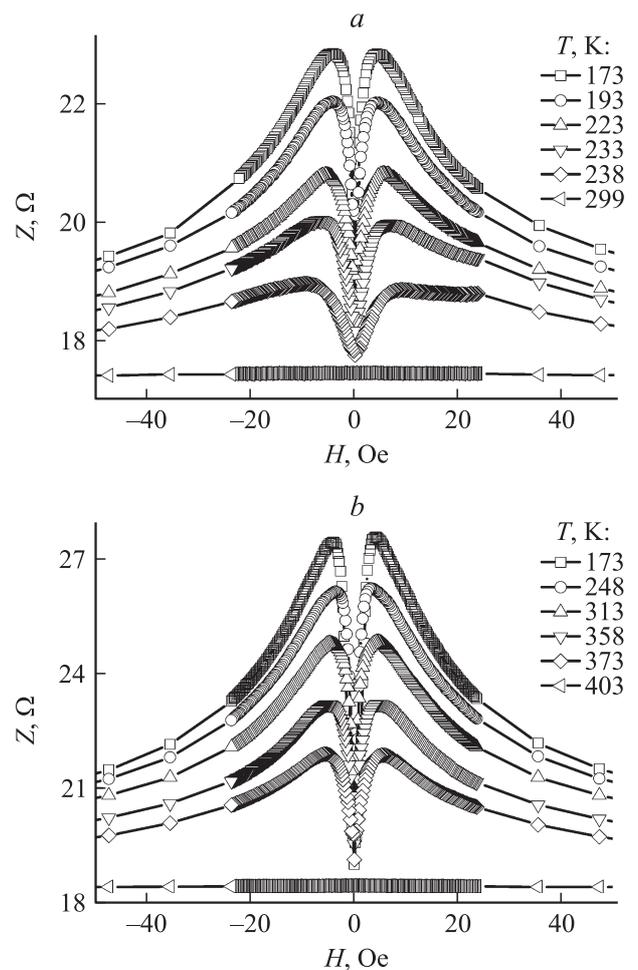
импеданса в нулевом магнитном поле. При температуре Кюри и выше величина импеданса, вследствие перехода сплава в парамагнитное состояние слабо зависит от напряженности внешнего магнитного поля — магнитоимпедансный эффект близок к нулевому.

Наибольших значений приведенная температурная чувствительность модуля импеданса  $S_Z$  лент обоих составов достигает в области фазового перехода на частотах переменного тока около 2 МГц (рис. 2, вставки). В случае лент сплава  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  она составляет 8%/К, в случае лент  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$  — 9%/К, что на порядок превышает температурную чувствительность платиновых температурных сопротивлений.

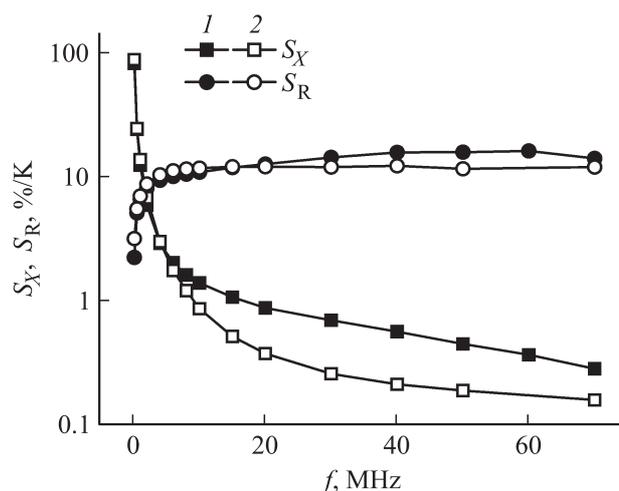
Несмотря на то, что температурная чувствительность импеданса достаточно высока, нужно отметить, что существует возможность увеличения чувствительности

импедансных преобразователей — детектирование не модуля импеданса, а его компонент. Например, в [2,5] было показано, что относительные изменения компонент импеданса в магнитном поле могут превышать относительное изменение модуля импеданса.

Из частотных зависимостей приведенных температурных чувствительностей компонент импеданса видно, что существует частота переменного тока  $f_{XR}$ , ниже которой наибольшие значения в области фазового перехода имеет температурная чувствительность мнимой компоненты импеданса  $S_X$ , а выше — чувствительность действительной компоненты  $S_R$  (рис. 4). При этом на частоте 100 кГц  $S_X$  достигает 100%/К для лент обоих составов. С ростом частоты чувствительность  $S_X$  значительно снижается. Температурная чувствительность действительной компоненты  $S_R$  с ростом частоты, напротив, увеличивается. Интенсивный рост наблюдается до частоты переменного тока около 6 МГц, при этом  $S_R$  достигает значений порядка 10%/К и с дальнейшим повышением частоты практически не изменяется. Следовательно, наибольшей температурной чувствительно-



**Рис. 3.** Магнитоимпедансные зависимости: *a* — лент сплава  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ , *b* — лент сплава  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ . Зависимости получены на частоте переменного тока 70 МГц в температурном диапазоне 173–403 К.



**Рис. 4.** Частотные зависимости максимальных значений приведенных температурных чувствительностей мнимой  $S_X$  и действительной  $S_R$  компонент импеданса лент сплава  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  (1) и сплава  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$  (2).

стью обладает мнимая компонента импеданса, причем максимальные значения  $S_X$  наблюдаются в области низких частот переменного тока, что значительно упрощает процедуру измерения. Все это позволяет говорить о целесообразности использования в импедансных тепловых преобразователях детектирования мнимой компоненты импеданса.

Таким образом, значительное изменение импедансных свойств исследуемых лент в области ферромагнитного фазового перехода может быть использовано как для определения температуры Кюри, так и для создания тепловых измерительных преобразователей, когда требуется высокая чувствительность в узком интервале температур. Варьируя состав сплава, можно изменять температуру Кюри, добываясь максимальной чувствительности преобразователя в нужном температурном диапазоне. Подобные преобразователи могут быть востребованы при создании термоанемометров, газовых анализаторов, вакуумметров и других устройств. Следует также отметить их применимость в сетевых сенсорных многофункциональных комплексах для одновременного контроля нескольких физических параметров, например таких, как напряженность магнитного поля и температура. Возможность использования одного и того же физического эффекта (магнитного импеданса) гарантирует существенное упрощение сетевой архитектуры такого многофункционального комплекса.

## Заключение

Методом быстрой закалки из расплава были получены аморфные ферромагнитные ленты двух близких составов  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ . В ходе магнитометрических и магнитоимпедансных исследований определены температуры Кюри полученных спла-

вов — 250 и 380 К соответственно. Показано, что модуль импеданса аморфных лент обоих составов и его компоненты в области ферромагнитного фазового перехода испытывают значительное температурное изменение. Данное явление может быть использовано при создании высокочувствительных тепловых измерительных преобразователей, а также для точного определения температуры Кюри аморфных ферромагнитных сплавов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ „Изучение термоиндуцированных изменений функциональных свойств наноструктурированных и аморфных магнитомягких сред“ и темы № 215 Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина „Магнитодинамика наноструктурированных сред с высокой магнитной проницаемостью“.

## Список литературы

- [1] Herzer G. Handbook of magnetic materials / Ed. By K.H.J. Buschov. Elsevier Science B.V., 1997. Vol. 10. P. 415–462.
- [2] Volchkov S.O., Dukhan E.I., Gubernatorov V.V., Potapov A.P. et al. // Phys. Metal. Metallogr. 2008. Vol. 106. N 4. P. 357–363.
- [3] Антонов А.С., Гадетский С.Н., Грановский А.Б. и др. // ФММ. 1997. № 6. С. 60–71.
- [4] Kurl'yand'skaya G.V., Fal Miyar V., Saad A. et al. // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. P. 054 505-1-9.
- [5] Курляндская Г.В., де Кос Д., Волчков С.О. // Дефектоскопия. 2009. № 6. С. 13–42.
- [6] Семиров А.В., Букреев Д.А., Кудрявцев В.О. и др. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 11. С. 25–29.
- [7] Семиров А.В., Букреев Д.А., Мoiseев А.А. и др. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 3. С. 80–84.
- [8] Gomez-Polo C., Socolovsky L.M., Knobel M., Vazquez M. // Sensor Letters. 2007. Vol. 5. P. 196–199.
- [9] Семиров А.В., Мoiseев А.А., Букреев Д.А. и др. // Научное приборостроение. 2010. Т. 20. № 2. С. 42–45.