
**НОВЫЕ ПРИБОРНЫЕ РАЗРАБОТКИ
И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ**

УДК 621.317.2: 537.312

© А. В. Семиров, А. А. Моисеев, Д. А. Букреев, В. О. Кудрявцев,
А. А. Гаврилюк, Г. В. Захаров, М. С. Деревянко

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС
МАГНИТОИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Разработан автоматизированный измерительный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии для исследования влияния внешних воздействий на импедансные свойства магнитомягких материалов. Комплекс позволяет исследовать в широком частотном диапазоне совместное влияние на импеданс образцов, его активную и реактивную компоненты внешнего магнитного поля, температуры, упругих растягивающих напряжений и подмагничивающего тока.

Кл. сл.: магнитоимпеданс, магнитоимпедансная спектроскопия, аморфные и нанокристаллические материалы, магнитомягкие материалы

ВВЕДЕНИЕ

Высокий интерес к исследованию свойств магнитомягких аморфных и нанокристаллических материалов вызван их уникальными свойствами, например рекордными значениями магнитной проницаемости и магнитоимпедансного эффекта (МИ) [1–3], чувствительность которого может достигать 400 %/Э [3, 4]. МИ-эффект состоит в изменении величины комплексного сопротивления материала под действием внешнего магнитного поля [5]. Высокая чувствительность данного эффекта к внешнему магнитному полю и механическим напряжениям может быть использована при создании чувствительных элементов датчиков различных физических величин [1–4, 6].

Одним из важных технических параметров датчиков является температурная зависимость физических характеристик, лежащих в основе детектирования. Результаты работ по исследованию МИ-эффекта при раздельном воздействии магнитного поля, механических напряжений и температуры достаточно широко освещены в научной литературе, а изучение совместного влияния данных факторов на МИ-эффект представлено единичными публикациями [7, 8]. Одной из основных причин этого является отсутствие соответствующего измерительного оборудования.

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС
МАГНИТОИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

Для исследования совместного влияния магнитного поля, упругих напряжений, температуры и подмагничивающего тока на импеданс аморфных

и нанокристаллических материалов был разработан и изготовлен автоматизированный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии (рис. 1). Измерительный комплекс может быть использован как для исследования МИ-эффекта в магнитомягких проволоках и фольгах, имеющих широкое практическое применение, так и в материалах другой геометрии.

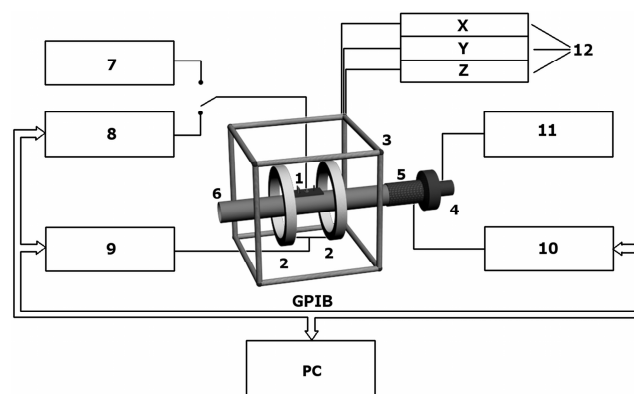


Рис. 1. Функциональная схема измерительного комплекса магнитоимпедансной спектроскопии.

1 — измерительная ячейка; 2 — перемещающее устройство; 3 — компенсационная система; 4 — нагнетатель воздуха; 5 — нагревательный элемент; 6 — воздуховод; 7 — блок измерения электросопротивления образцов на постоянном токе; 8 — анализатор импеданса; 9 — источник питания перемещающего устройства; 10 — источник питания нагревательного элемента; 11 — источник питания нагнетателя воздуха; 12 — источники питания компенсационной системы

Данный комплекс обладает следующими возможностями и характеристиками.

1. Измерение импеданса и его компонент от 10 МОм до 40 МОм в диапазоне частот переменного тока от 40 Гц до 110 МГц в режиме стабилизации по току с возможностью установки его значения от 200 мкА до 20 мА. Погрешность измерения импеданса определяется его величиной и соответствующей частотой переменного тока и составляет от 0.1 до 3 %.

2. Измерение электросопротивления от 0.01 Ом до 100 МОм на постоянном токе с погрешностью от 0.05 до 0.1 %.

3. Изменение напряженности внешнего магнитного поля, действующего на образец, в диапазоне ± 150 Э с погрешностью установки 1 %.

4. Варьирование температуры образца в диапазоне от 20 до 400 °С с точностью установки ± 0.5 °С (с возможностью расширения температурного диапазона от -60 до 500 °С).

5. Создание механических напряжений внешней силой до 10 Н в измерительной ячейке, адаптированной для исследований проволок и фольг сечением от 10^{-9} до 10^{-6} м².

Немаловажной особенностью комплекса является возможность автоматической компенсации собственного импеданса измерительной ячейки 1 (рис. 1). Необходимость данной операции обусловлена тем, что собственный импеданс измерительной ячейки и соединительных проводов возрастает с увеличением частоты переменного тока, что на высоких частотах может существенно повлиять на результат измерений [9].

Условно комплекс можно разделить на несколько функциональных частей. Основой измерительной части комплекса является прецизионный анализатор импеданса Agilent 4294A. Она также включает блок измерения электросопротивления образцов на постоянном токе.

Ввиду того что при закреплении образца в измерительной ячейке с использованием пайки возможно изменение его структуры, а применение токопроводящих клеев не обеспечивает требуемой механической прочности, закрепление образца в контактах измерительной ячейки производится механически. Контакты ячейки изготовлены из посеребренной латуни, что обеспечило их малое удельное сопротивление, достаточно высокую стойкость к окислению при нагреве и механическую прочность. Основание ячейки изготовлено из микалекса, обладающего требуемыми прочностью, термостойкостью и диэлектрическими свойствами.

К действующей части относятся перемещающее и деформирующее устройства и термоблок. Исполнительный механизм деформирующего устройства позволяет воздействовать на образец дискретно изменяющейся аксиально направ-

ленной внешней силой. С этой целью для создания растягивающих напряжений один из контактов измерительной ячейки закреплен на ее основании неподвижно, другой контакт имеет шарнирное соединение с основанием ячейки. Максимальное значение действующей внешней силы ограничено конструкцией ячейки и равно 10 Н. Дискретность изменения внешней силы 0.01 Н.

Для создания внешнего квазистатического магнитного поля используется пара колец Гельмгольца 2, в центре которых располагается измерительная ячейка 1 с образцом (рис. 1). Питание данного перемещающего устройства осуществляется от программируемого источника тока 9 с возможностью изменения полярности напряжения (рис. 1). Кольца Гельмгольца снабжены поворотным механизмом, позволяющим изменять угол между вектором напряженности внешнего магнитного поля и осью образца в диапазоне ± 180 °, а при проведении температурных исследований — в диапазоне ± 35 °.

Так как исследуемые материалы относятся к магнитомягким материалам, при их исследовании необходима компенсация геомагнитного и техногенного магнитного полей. Для этого используются компенсационная система 3, состоящая из трех пар катушек, расположенных в ортогональных плоскостях (рис. 1). Питание каждой пары катушек осуществляется от отдельного источника 12.

Источник постоянного тока, используемый совместно с анализатором, позволяет проводить исследования влияния на импеданс постоянного подмагничивающего тока, протекающего по образцу. Максимальная величина подмагничивающего тока составляет ± 100 мА.

При проведении температурных исследований для уменьшения воздействия электромагнитных полей от теплоисточников необходимо разместить их на максимально возможном расстоянии от исследуемого образца и ограничить их тепловое воздействие областью размещения измерительной ячейки. При использовании радиационного нагрева выполнение этого условия затруднительно. Также при использовании такого вида нагрева ввиду малых размеров исследуемых образцов процесс измерения температуры образца и контроль равномерности его нагрева проблематичны. Поэтому для проведения температурных исследований магнитоимпеданса, был выбран способ нагрева образца потоком воздуха заданной температуры. Для проведения данных исследований в комплексе предусмотрен термоблок, состоящий из нагнетателя воздуха 4, нагревательного элемента 5 и теплоизолированного воздуховода 6 (рис. 1). Воздух с помощью нагнетателя продувается через нагревательный элемент и воздуховод. Нагнетатель и нагревательный элемент вынесены за пределы магнитной компенсационной системы.

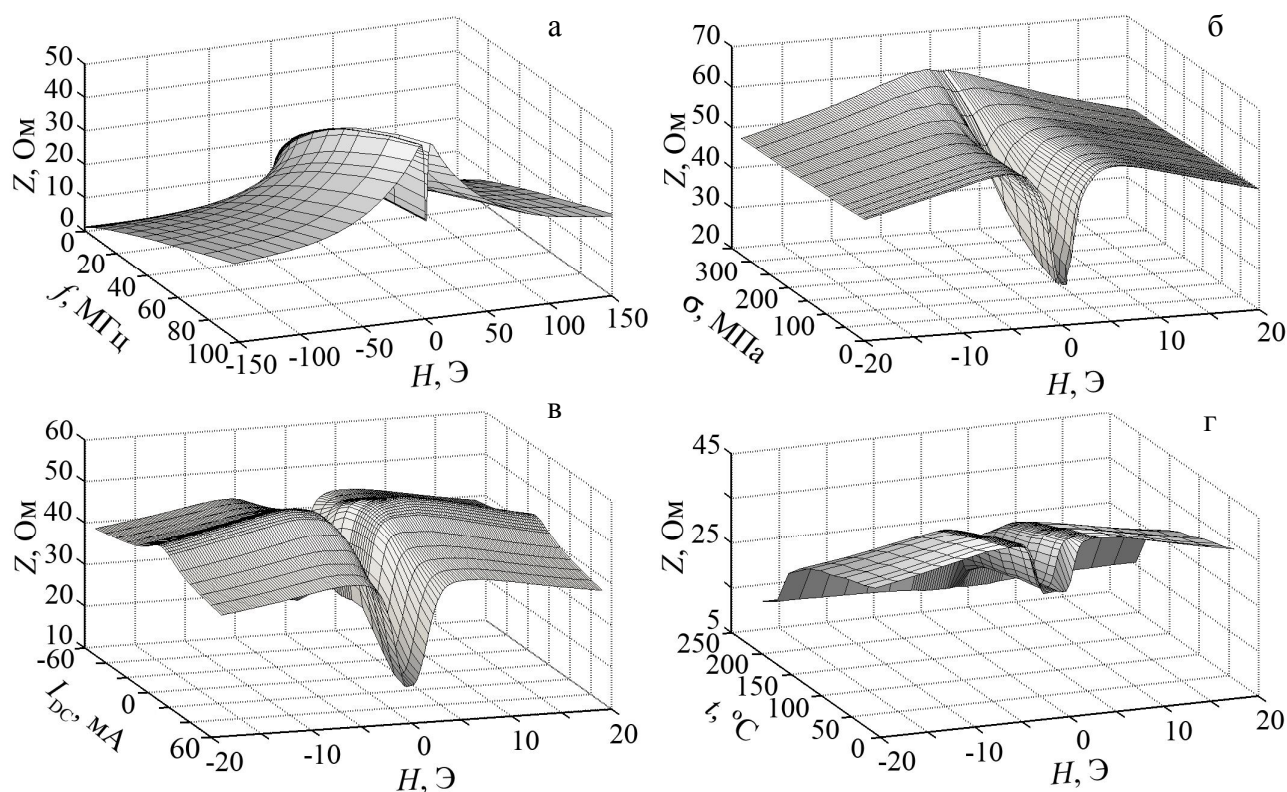


Рис. 2. Зависимость импеданса Z аморфных проволок на основе кобальта от внешнего магнитного поля H . Варьируемые параметры: а — частота переменного тока f ; б — упругое напряжение σ ; в — подмагничивающий ток I_{DC} ; г — температура t

Измерительная ячейка располагается на воздуховоде таким образом, что образец находится в центре потока нагретого воздуха соосно с ним. Дюралюминиевый воздуховод также выполняет функцию защитного экрана от электромагнитных полей. Температура воздуха и скорость его потока регулируются источниками питания нагревательного элемента 10 и нагнетателя воздуха 11 (рис. 1). Для контроля температуры образца используются два термоэлектрических преобразователя ТХК типа. Рабочие спай термопреобразователей располагаются в непосредственной близости от концов образца. Так как длина исследуемых образцов может достигать нескольких сантиметров, скорость потока воздуха подбирается таким образом, чтобы градиент температуры вдоль образца был минимален. Сигнал с термопреобразователей фиксируется и оцифровывается с помощью АЦП (термопреобразователи и АЦП на рисунках не показаны).

Для автоматизации процесса измерений было разработано специальное программное обеспечение. Анализатор импеданса 8, источники питания перемещающего устройства 9 и нагревательного элемента 10 соединены с персональным ком-

пьютером по интерфейсу GPIB, АЦП по интерфейсу PCI. Разработанная управляющая программа позволяет устанавливать следующие параметры эксперимента:

- частотные диапазоны переменного тока, протекающего по образцу, и шаг изменения в каждом из диапазонов;
- амплитуду переменного тока;
- величину и направление подмагничивающего постоянного тока;
- диапазоны изменения внешнего магнитного поля и шаг изменения в каждом из диапазонов;
- временную зависимость изменения магнитного поля;
- температуру образца и ее временную зависимость.

Для визуального контроля процесса измерений в программе предусмотрена возможность построения в реальном времени на мониторе ПК зависимости импеданса от внешнего магнитного поля в виде графика. Все параметры эксперимента и результаты измерений сохраняются на жесткий диск ПК. Полученный массив данных позволяет проводить комплексный анализ зависимостей импеданса и его компонент от частоты переменного

тока f , внешнего магнитного поля H , упругих растягивающих напряжений σ , величины подмагничивающего тока I_{DC} и температуры t (рис. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный автоматизированный измерительный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии магнитомягких материалов позволяет проводить комплексные исследования влияния внешнего магнитного поля, температуры, упругих растягивающих напряжений и подмагничивающего тока на импеданс образцов, его активную и реактивную компоненты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 07-08-05037-мтб; 09-08-00406-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов А.С., Гадецкий С.Н., Грановский А.Б. и др. Гигантский магнитоимпеданс в аморфных и нанокристаллических мультислоях // ФММ. 1997. Т. 83, № 6. С. 61–71.
2. Kurlyandskaya G.V., Sanchez M.L., Hernando B., et al. Giant-Magnetoimpedance-Based Sensitive Element as a Model for Biosensors // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82, N 18. P. 3053–3055.
3. Kurlyandskaya G.V. Giant Magnetoimpedance for Sensor Applications // Encyclopedia Of Sensors. 2006. V. 4. P. 205–237.
4. Mahdi A.E., Panina L., Mapps D. Some New Horizons

in Magnetic Sensing: High-Tc SQUIDS, GMR and GMI Materials // Sensors and Actuators A. 2005. V. 105. P. 271–285.

5. Harrison E.P., Turney G.L., Rowe H., Gollop H. The Electrical Properties of High Permeability wires Carrying Alternating Current // Proc. Roy. Soc. 1936. V. CLVII, A. P. 451.
6. Bayri N., Kolat V.S., Kaya H., et al. Effect of Tensile stress on Magnetoimpedance Properties of CoNiFe/Cu Wire // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42, N 17. Article N 175003.
7. Radkovskaya A., Rakhmanov A.A., Perov N., Sheverdyaeva P., Antonov A.S. The Thermal and Stress Effect on GMI in Amorphous Wires // JMMM. 2002. V. 249. P. 113–116.
8. Семиров А.В., Букреев Д.А., Кудрявцев В.О. и др. Влияние температуры на магнитоимпеданс упруго-деформированной фольги состава $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ // ЖТФ. 2009. Т. 79, № 11. С. 25–29.
9. Анашко А.А., Семиров А.В., Гаврилюк А.А., Душутин К.В. Эффект магнитоимпеданса в аморфных металлических лентах на основе кобальта. Деп. в ВИНТИ. № 1430-В.

Восточно-Сибирская государственная академия образования, Иркутск

Контакты: Семиров Александр Владимирович,
semirov@igpu.ru

Материал поступил в редакцию 5.02.2010.

THE AUTOMATED MEASURING SETUP FOR MAGNETOIMPEDANCE SPECTROSCOPY OF SOFT MAGNETIC MATERIALS

A. V. Semirov, A. A. Moiseev, D. A. Bukreev, V. O. Kudryavtsev,
A. A. Gavriluk, G. V. Zakharov, M. S. Derevyanko

East-Siberian state academy of education, Irkutsk

The automated measuring setup of magnetoimpedance spectroscopy for researching external actions on impedance properties of soft magnetic materials is developed. The setup allows to investigate the combined influence of external magnetic field, temperature, elastic tensile stress and bias current on impedance of a samples and also its active and reactive components in a wide frequency range.

Keywords: magnetoimpedance, magnetoimpedance spectroscopy, amorphous and nanocrystalline materials, soft magnetic materials