
**СОЗДАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

УДК 621.317.2: 537.312

© С. О. Волчков, А. Е. Духан, Е. И. Духан

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
МАГНИТОИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ,
АДАПТИРОВАННОГО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ
ШИРОКОГО КЛАССА МАГНИТНЫХ СТРУКТУР
С НАВЕДЕННОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ**

В данной статье описаны принципы измерения магнитоимпедансного эффекта в образцах, предназначенных для построения электронных схем, включающих датчик малых магнитных полей. Проанализированы и обобщены литературные данные о существующих методиках измерения магнитоимпедансного эффекта для исследований магнитных структур с наведенной магнитной анизотропией. Описывается разработанный и созданный в Уральском федеральном университете автоматизированный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии, адаптированный для широкого класса магнитных структур и работающий на основе импедансного анализатора Agilent E4991a.

Кл. сл.: магнитный импеданс, магнитная анизотропия, спектроскопия магнитного импеданса, магнитомягкие материалы

ВВЕДЕНИЕ

Магнитный импеданс проявляется изменением комплексного электрического сопротивления (электрического импеданса) ферромагнитного проводника $Z(f)$ для протекающего через него переменного тока высокой частоты f при приложении внешнего (измеряемого) магнитного поля H [1–4]. Импеданс — комплексная величина $Z(f) = R(f) + iX(f)$, где R — это действительная и X — мнимая его части. Величину импеданса можно определить в соответствии с обобщенным законом Ома $Z = U/I$, где Z — импеданс образца; $U = U_0 e^{-i\omega t}$ и $I = I_0 e^{-i\omega t}$ — напряжение, формируемое на концах измеряемого ферромагнитного проводника, и ток, возбуждаемый стабилизированным источником и протекающий через проводник.

Тогда для модулей вышеуказанных величин будет справедливо следующее соотношение:

$$|Z|^2 = |R|^2 + |X|^2.$$

Явление магнитного импеданса (МИ) было открыто около 80 лет назад в работах Е.П. Харрисона с соавторами [5], которые обнаружили сам эффект и верно его описали на основе изменения магнитной проницаемости магнитомягкого материала в условиях скин-эффекта. Отсутствие устойчивых технологий получения МИ материалов стало причиной того, что эффект был надолго забыт.

Зависимость импеданса цилиндрического однородного образца от величины приложенного внешнего поля вдоль его оси была теоретически описана Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшицем [6]. Для импеданса однородного образца с постоянной проводимостью (σ) и постоянной магнитной проницаемостью (μ) авторы получили аналитическое выражение. В 1991 г. В.Е. Махоткин с соавторами создали датчик малых магнитных полей с чувствительным элементом в виде аморфной ленты Fe-CoSiB, который работал на принципе МИ [7].

Относительное изменение импеданса образца, обладающего эффектом МИ, на единицу прикладываемого магнитного поля называется его чувствительностью. Высокая чувствительность МИ к внешнему магнитному полю является основанием для использования МИ-элементов в датчиках малых полей. Максимальная достигнутая к настоящему моменту чувствительность для пленочных (наиболее перспективных в смысле технологических приложений) МИ-элементов составляет до 100 % / Э, что более чем на порядок выше чувствительности детекторов магнитного поля, работающих на принципе гигантского магниторезистивного эффекта [4].

Выбор материалов и выявление условий высокой чувствительности МИ по отношению к внешнему магнитному полю составляло задачу исследований в областях физики магнитных явлений и материаловедения на протяжении последних более чем 15 лет. В настоящее время опубликовано

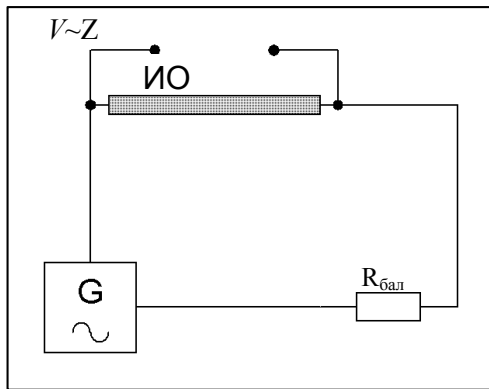


Рис. 1. Структурная схема установки для прямого измерения гигантского магнитного импеданса. ИО — исследуемый образец, G — генератор высокочастотных колебаний, $R_{бал}$ — ограничивающее сопротивление

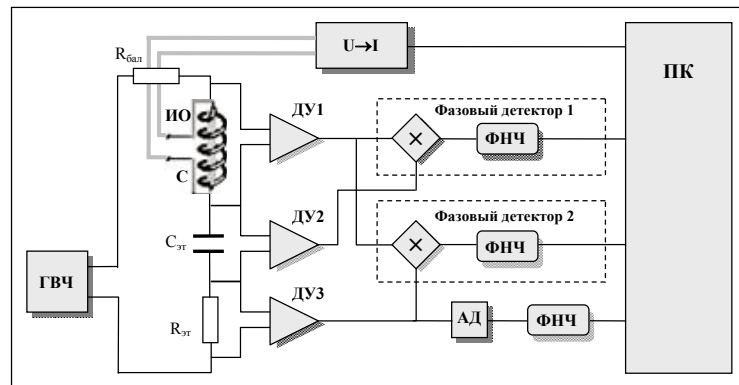


Рис. 2. Структурная схема установки для измерения ГМИ. ГВЧ — генератор высокочастотных колебаний; ДУ1–3 — дифференциальные усилители; ФНЧ — фильтр нижних частот; АД — амплитудный детектор; ИО — исследуемый образец; $U \rightarrow I$ — преобразователь напряжение—ток; C — соленоид; $\times$ — перемножитель сигналов; ПК — персональный компьютер, $C_{эт}$ — эталонный конденсатор, $R_{эт}$ — эталонный резистор

большое количество работ по исследованию эффекта МИ для широкого класса магнитных структур с различными свойствами наведенной магнитной анизотропии [1–9]. Особенное внимание в работах уделяется связи особенностей наведенной магнитной анизотропии с величиной эффекта МИ [4, 8]. Существуют разработки МИ, доведенные до коммерческих устройств [4, 9].

Однако условия высокочастотных измерений, описание и обоснование методики их проведения не всегда представлены в публикациях в нужной степени. Не выработаны стандарты аттестации МИ-материалов. Поэтому не во всех случаях возможно адекватное сравнение результатов, полученных разными группами исследователей.

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ИМПЕДАНСА

Существует ограниченное число статей, в которых описаны детали измерительных установок для МИ-исследований [4, 10, 11]. Первые работы, посвященные методике МИ-измерений, обычно описывают четырехконтактные схемы (рис. 1) [10]; в качестве измерителя напряжения на образце использовался осциллограф.

При исследовании нелинейного МИ, требующего особой аккуратности при измерении нескольких гармоник напряжения на образце в очень широком диапазоне внешних полей от -150 до $+150$ Э использовался неконтактный индуктивный способ измерения амплитуды тока возбуждения для снижения шумов, возникающих при включении в схе-

му калибровочного электросопротивления [10]. Особое внимание здесь было уделено разработке держателя в виде печатной платы такой конфигурации, которая обеспечивала максимальное снижение паразитных индуктивных сигналов, приближая измеряемый импеданс к импедансу собственно МИ-элемента, снижая тем самым паразитный и часто трудно учитываемый вклад электронной схемы. Процесс измерения был организован с помощью анализатора спектра Hewlett Packard 3325 В и с использованием специализированного HP-VEE языка программирования так, что внешнее магнитное поле менялось от своего положительного максимума $+150$ Э (поле, достаточное для магнитного насыщения магнитомягких материалов) до отрицательного максимума -150 Э и далее снова увеличивалось до $+150$ Э. В процессе измерения МИ магнитомягкий материал проходил все стадии перемагничивания, начиная с известного заданного состояния насыщения в большом положительном магнитном поле. Для каждого значения внешнего поля система "подгоняла" величину амплитуды тока возбуждения, обеспечивая ее постоянство. Сигнал на образце измерялся (регистрировался) с помощью цифрового осциллографа. Амплитуды напряжения, соответствующие различным гармоникам в разложении Фурье, измерялись с помощью анализатора спектра. Несмотря на сложность, схема позволяла с высокой точностью проводить измерения сигналов (до шестой гармоники в разложении Фурье).

В последние годы часто используется схема измерений МИ с использованием линии "микро-страйп", которая включает коаксиальные провода,

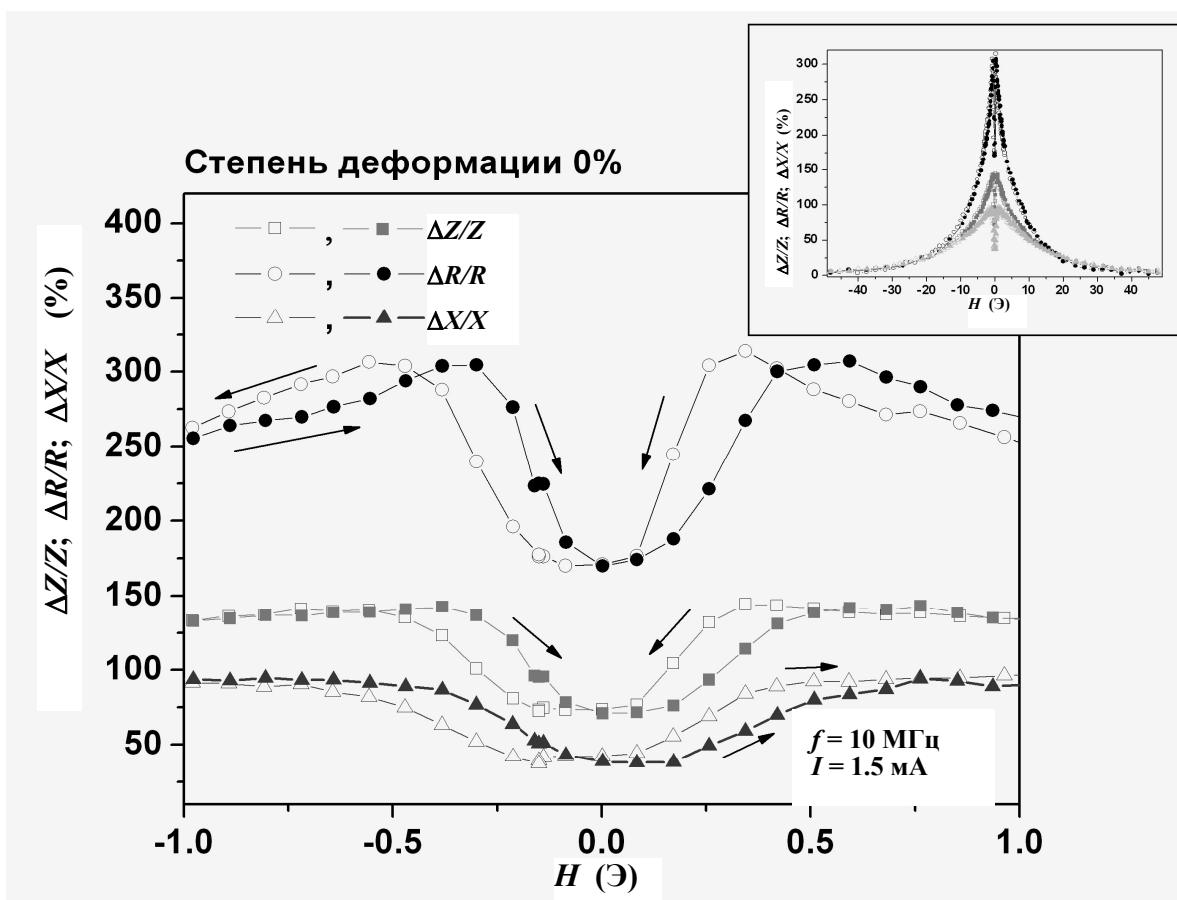


Рис. 3. Относительное изменение полного импеданса, активного и реактивного сопротивлений чувствительного элемента в виде аморфной ленты FeCoCrSiB в зависимости от величины постоянного внешнего магнитного поля. На вкладки дан общий вид кривых

специальный держатель измеряемого элемента и представляет собой волновод с калиброванными характеристиками [4].

В [13] приведено описание автоматизированного измерительного комплекса магнитоимпедансной спектроскопии магнитомягких материалов, созданного для совместных исследований влияния магнитного поля, упругих напряжений, температуры и подмагничивающего тока на импеданс аморфных и нанокристаллических материалов. Работа фактически является единственным детальным описанием системы для исследования температурных зависимостей МИ в настоящее время.

Поскольку коммерческих разработок измерительных комплексов для исследования магнитного импеданса на рынке не существует, в каждом случае приходится разрабатывать специфические схему и технические решения, особенности которых зависят как от задач исследования, так и от конкретного набора приборов, которые требуется

адаптировать для текущих измерений. Примером оригинальной МИ-измерительной установки является аппаратный комплекс, разработанный на кафедре магнетизма и магнитных наноматериалов института естественных наук УрФУ [12] (рис. 2). Данная установка позволяет проводить измерения модуля импеданса образца и его компонент в магнитном поле различной напряженности в интервале ± 100 Э при соосной ориентации магнитного поля и переменного тока возбуждения.

Минимальный шаг дискретизации магнитного поля составляет 0.08 Э при малых абсолютных значениях поля и экспоненциально возрастает по мере увеличения напряженности поля. Предусмотрена процедура проведения измерений сначала для уменьшающегося магнитного поля, начиная с поля в +100 Э до максимального отрицательного поля в -100 Э, а затем для увеличивающегося магнитного поля. Амплитуда переменного управляющего тока, протекающего через ферромагнитный образец, поддерживается постоянной и может

быть выбрана из интервала действующих значений амплитуды от 0.5 до 10 мА. Интервал доступных частот управляющего тока составляет 0.3 до 30 МГц. Погрешность в определении составляющих импеданса не превышает 2 %.

Применение фазового детектирования является одним из способов измерения импеданса исследуемого образца с разделением на активную и реактивную составляющие [11]. Автоматизированная установка для измерения МИ, основанная на методе фазового детектирования, представлена в данной работе (см. рис. 2).

Существуют разные варианты представления данных полевой зависимости импеданса исследуемого образца. Простейший вариант — это прямое использование зависимости $Z=Z(H)$. При исследовании МИ-материалов в задачах разработки датчиков поля предпочтительно использовать представленные в процентах отношения приращений полного импеданса ΔZ , активного ΔR и реактивного ΔX сопротивлений к их номинальным значениям (Z , R и X):

$$\Delta Z / Z = 100\% \left((|Z(H)| - |Z(H_{\max})|) / Z_{\text{ном}} \right),$$

$$\Delta R / R = 100\% \left((|R(H)| - |R(H_{\max})|) / R_{\text{ном}} \right),$$

$$\Delta X / Z = 100\% \left((|X(H)| - |X(H_{\max})|) / X_{\text{ном}} \right),$$

где $H_{\max}$ — максимальная величина внешнего постоянного поля. На рис. 3 для примера МИ-измерений, проведенных с использованием метода фазового детектирования, приведена зависимость импедансных отношений для полного импеданса и его компонент ($\Delta Z/Z$, $\Delta R/R$ и $\Delta X/X$) от величины внешнего магнитного поля. Хорошо видно, что максимальная величина МИ-эффекта около 310 % наблюдается для активного сопротивления ($\Delta R/R$).

Соответственно максимальная чувствительность образца оказывается самой высокой в случае активного сопротивления (около 420 %/Э), в то время как для полного импеданса этот параметр составляет 210 %/Э.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА МАГНИТОИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Новые возможности в исследовании МИ широкого класса магнитных структур с наведенной магнитной анизотропией представились в результате разработки и создания в Уральском федеральном университете автоматизированного аппаратно-программного комплекса магнитоимпедансной спектроскопии. Измерительный комплекс построен на основе импедансного анализатора Agilent E4991a (HP Agilent, США). Установка ак-

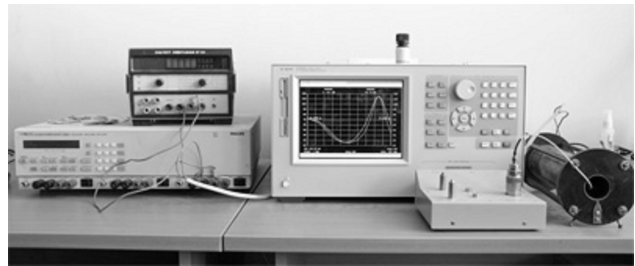


Рис. 4. Общий вид автоматизированного комплекса магнитоимпедансной спектроскопии, адаптированного для исследований широкого класса магнитных структур на основе импедансного анализатора Agilent E4991a, держатель типа "микрострейп" с SMA-разъемами на концах линий "микрострейп" и МИ-плечным элементом, подготовленным для проведения измерений

тивно эксплуатируется в рамках исследовательского центра коллективного пользования УрФУ, в учебно-исследовательской работе студентов и для лабораторных учебных демонстраций. При разработке комплекса стояла задача обеспечить максимально удобный режим диалога.

На рис. 2 приведена структурная схема автоматизированного комплекса. Его общий вид и держатель типа "микрострейп" с СВЧ коаксиальными разъемами на концах линий "микрострейп" — на рис. 4.

Внешнее квазистатическое магнитное поле создается с помощью соленоида с известной калибровочной константой, в центр которого помещается держатель типа "микрострейп", дополнительно закрепленный на немагнитной опоре, позволяющей точно контролировать соосность расположения всех деталей держателя. Питание соленоида осуществляется с помощью программируемого источника тока (FlukePM 2830).

Материалы, в которых наблюдается высокий МИ-эффект, относятся к классу магнитомягких, т. е. внешние магнитные поля с напряженностью поля порядка 0.5 Э, в том числе геомагнитное поле, могут оказывать влияние на их магнитное состояние [13, 14]. В настоящее время в комплексе не реализован прием полной компенсации геомагнитного и техногенного магнитных полей, поэтому при измерениях применяется широко используемая ориентация (перпендикулярно силовым линиям земного магнитного поля) намагничивающего устройства для минимизации влияния глобальных внешних полей [10, 14].

На первом этапе исследований процесс МИ-измерений проводился в полуавтоматическом режиме, при котором значения внешнего магнитного поля H устанавливалось вручную, а частотные

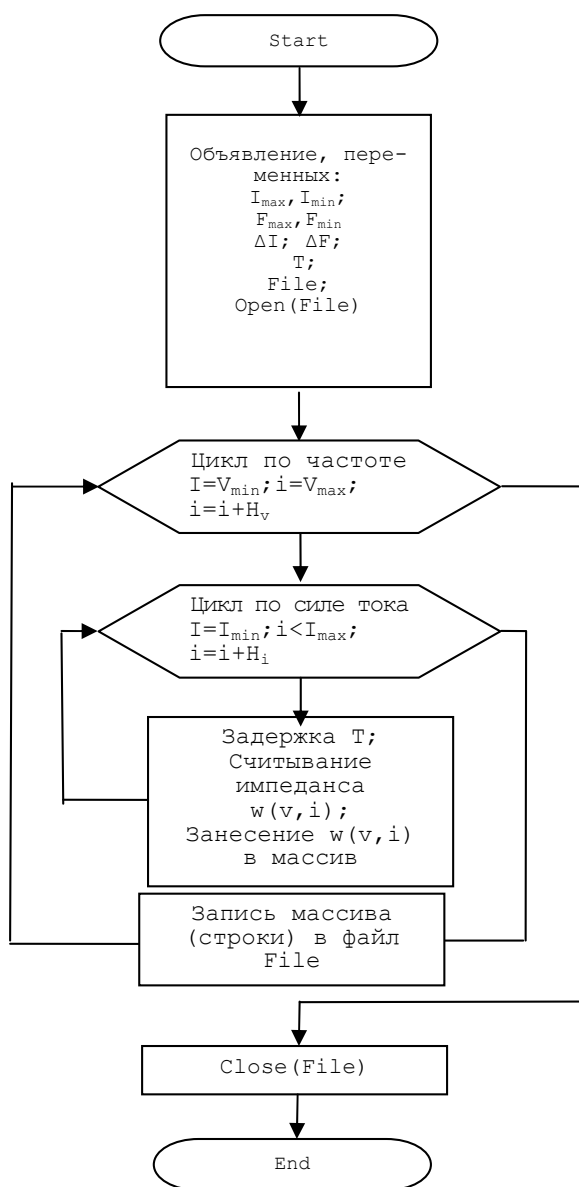


Рис. 5. Алгоритм работы программы

зависимости $Z(f)$ для каждой фиксированной величины H выполнялись автоматически. Построение искомых полевых зависимостей для каждой фиксированной частоты требовали большого объема ручной скрупулезной работы.

Автоматизация измерительного комплекса осуществлялась путем объединения анализатора импеданса Agilent E4991a и источника тока FlukePM 2813 на программном уровне. В качестве программной основы использовался Labview 2010, широко применяемый для автоматизации физических экспериментов. Алгоритм работы управляющей программы приведен на рис. 5.

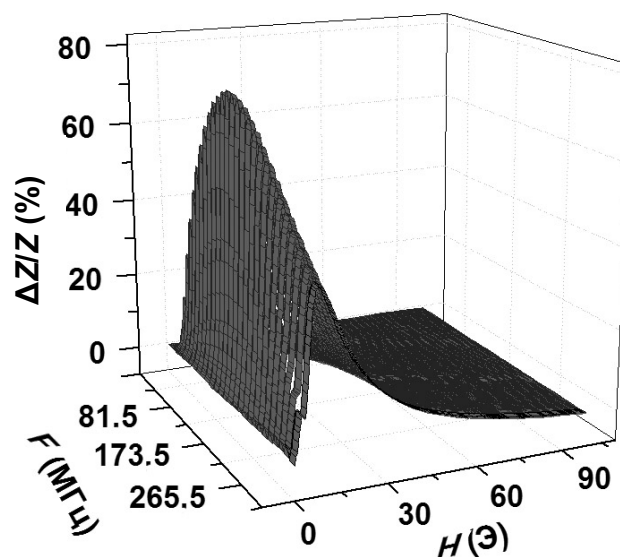


Рис. 6. Зависимость относительного изменения импеданса от внешнего магнитного поля и частоты возбуждающего тока для пленочных структур

В первом блоке происходит инициализация и задание необходимых переменных, таких как минимальная (начальная, $I_{\min}$) и максимальная (конечная, $I_{\max}$) сила тока; начальная ($F_{\min}$) и конечная ($F_{\max}$) частоты; шаг с которым они изменяются (ΔI и ΔF), время задержки (T) между измерениями значений импеданса $Z(i, f)$, необходимое для синхронизации компьютера и анализатора импеданса. Кроме определения переменных в первом блоке объявляются файлы, в которые будет осуществляться запись показаний анализатора. Файл открывается для записи. В следующем блоке задается внешний цикл — по частоте. За ним следует вложенный цикл — по току. В каждом шаге вложенного цикла посылается запрос к анализатору импеданса на измерение. Прибор возвращает текущее значение импеданса для текущих параметров тока и частоты. Данное значение заносится в строку, которая формируется в течение одного внутреннего цикла и заносится в текстовый файл, инициализированный ранее.

По окончании внешнего цикла в указанном файле формируется итоговая сводная таблица (двумерный массив) по всем измеренным параметрам. Производится закрытие файла.

Полученный на выходе файл представляет матрицу значений импеданса, где по строкам меняются значения частоты, а по столбцам — силы тока. На рис. 6 представлен пример зависимости относительного изменения импеданса от внешнего магнитного поля и частоты возбуждающего тока.

В результате автоматизации и оптимизации комплекс магнитоимпедансной спектроскопии

характеризуется следующими возможностями и параметрами при использовании методологии компенсации.

Измерение полного импеданса и его компонент возможно в диапазоне от 100 мОм до 1 МОм на частотах переменного тока возбуждения от 1 МГц до 3 ГГц при возможности стабилизации по току в интервале значений тока 1–10 мА в диапазоне внешних постоянных магнитных полей от –100 до +100 Э. Погрешность измерения импеданса составляет от 0.8 % в зависимости от его величины и частоты переменного тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе кратко описаны и проанализированы литературные данные о существующих методиках измерения магнитоимпедансного эффекта. Описывается разработанный и созданный в Уральском федеральном университете автоматизированный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии, адаптированный для широкого класса магнитных структур, работающий на основе импедансного анализатора Agilent E 4991a (HP Agilent, США). Измерение полного импеданса и его компонент возможно в диапазоне от 1 мОм до 20 кОм при частотах переменного тока возбуждения от 1 МГц до 1 ГГц. Погрешность измерения импеданса составляет от 0.8 % в зависимости от его величины и частоты переменного тока. Измерение полного импеданса и его компонент возможно в диапазоне внешних постоянных магнитных полей от –100 до +100 Э для всего набора частот переменного тока возбуждения.

Работа выполнена в рамках комплекса научно-исследовательских работ по теме "Магнитодинамика наноструктурированных сред с высокой магнитной проницаемостью", выполнявшегося по государственному заданию на НИР вузу на 2013 г. (тема 215 Уральского федерального университета им. Б.Н. Ельцина), а также при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G 36.31.0004) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 12-02-31385 мол_а).

Авторы выражают признательность д.ф.-м.н. Г.В. Курляндской и д.ф.-м.н. В.О. Васьковскому за плодотворное обсуждение проблем, изложенных в данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beach R.S., Berkowitz A.E. Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 64. P. 3652–3654.
2. Paramonov V.P., Antonov A.S., Lagarkov A.N. et al. Highfrequency (1–1200 MHz) magnetoimpedance in CoFeSiB amorphous wires // *J. Appl. Phys.* 1996. V. 79. P. 6532.
3. 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.
4. Курляндская Г.В., де Кос Д., Волчков С.О. Магнито-чувствительные преобразователи для неразрушающего контроля, работающие на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта (Обзор) // *Дефектоскопия.* 2009. № 6. С. 13–42.
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. 157, N 891. P. 451–479.
6. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Electrodynamics of Continuous Media.* N.Y.: Pergamon, 1975. 476 p.
7. Makhotkin V.E., Shurukhin B.P., Lopatin V.A. et al. Magnetic field sensors based on amorphous ribbons // *Sensors and Actuators A.* 1991. V. 27. P. 759–762.
8. Kurlyandskaya G.V., Yakabchuk H., Kisker E. et al. Very large magnetoimpedance effecting FeCoNi ferromagnetic tubes with high order magnetic anisotropy // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 90. P. 6280–6285.
9. Nishibe Y., Ohta N., Tsukada K. et al. Sensing of passing vehicles using a lane marker on road with built-in thin film MI sensor and power source // *IEEE Transactions on vehicular technology.* 2004. V. 53, N 6. P. 1827–1834.
10. Kurlyandskaya G.V., Garcia-Arribas A., Barandian J.M. Advantages of non-linear giant magnetoimpedance for sensor applications // *Sensors and Actuators A.* 2003. V. 106. P. 234–239.
11. Волчков С.О., Духан Е.И., Курляндская Г.В., Васьковский В.О. Автоматический комплекс для измерения гигантского магнитного импеданса // *Материалы 12-й Всероссийской научной конференции студентов физиков.* Новосибирск, 2006. С. 708.
12. Волчков С.О., Духан Е.И., Губернаторов В.В. и др. Магнитные свойства и гигантский магнитный импеданс аморфных лент сплава после малой пластической деформации // *ФММ.* 2008. Т. 106, № 4. С. 371–377.
13. Семиров А.В., Моисеев А.А., Букреев Д.А. и др. Автоматизированный измерительный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии магнитомягких материалов // *Научное приборостроение.* 2010. Т. 20, № 2. С. 42–45.
14. De La Prida V.M., Garcia-Miquel H., Kurlyandskaya G.V. Wide-angle magnetoimpedance field sensor based on two crossed amorphous ribbons // *Sensors and Actuators A.* 2008. V. 142, N 3. P. 496–502.
15. Звездинский С.С., Духан Е.И. Средство обнаружения нарушителей как сложная техническая информационная система // *Седьмая отраслевая науч. конф. М.: МТУСИ, 2013. С. 129.*

Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

Контакты: Волчков Станислав Олегович,
stanislav.volchkov@usu.ru

Материал поступил в редакцию 26.06.2013

THE AUTOMATIZATION OF THE MEASUREMENT COMPLEX OF MAGNETO IMPEDANCE SPECTROSCOPY ADAPTED FOR STUDIES OF A WIDE CLASS OF MAGNETIC STRUCTURES WITH INDUCED MAGNETIC ANISOTROPY

S. O. Volchkov, A. E. Duhan, E.I. Duhan

The B.N. Eltsin Ural Federal University, Yekaterinburg

This article describes the principles of measurement of magneto impedance effect in samples intended for the construction of electronic circuits, including a sensor of small magnetic fields. The literature data on the existing methods of magneto impedance effect measurement for the studies of the magnetic structures with induced magnetic anisotropy are analyzed and summarized. The automated complex of magneto impedance spectroscopy adapted for a wide range of magnetic structures and working on the basis of an Agilent E4991a impedance analyzer developed and created in the Urals Federal University is described.

Keywords: magneto impedance, magnetic anisotropy, magnetic impedance spectroscopy, soft magnetic materials