

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.228.01, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЦЕНТР «КРАСНОЯРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» (ФИЦ КНЦ СО РАН, КНЦ СО РАН), ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 26.04.2024 г. №7
о присуждении Деревянко Михаилу Сергеевичу,
гражданину Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Магнитные и магнитоимпедансные свойства аморфных магнитомягких проводников на основе кобальта в области фазовых переходов» по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений принята к защите 16.02.2024 г. (протокол заседания № 6) диссертационным советом 24.1.228.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН), 660036 Красноярск, Академгородок, д. 50, приказ Минобрнауки №1513/нк от 25.11.2016 г.

Соискатель Деревянко Михаил Сергеевич, 02 декабря 1987 года рождения, в 2014 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Восточно-Сибирская государственная академия образования» по программе 01.04.11 «Физика магнитных явлений». Работает старшим преподавателем на кафедре физики Педагогического института Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет» (ФГБОУ ВО ИГУ).

Диссертация выполнена на кафедре физики Педагогического института ФГБОУ ВО ИГУ.

Научный руководитель – *Семиров Александр Владимирович*, доктор физико-математических наук, профессор, директор Педагогического института ФГБОУ ВО ИГУ, заведующий кафедрой физики.

Официальные оппоненты:

Аронин Александр Семенович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории структурных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук;

Пустовалов Евгений Владиславович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор департамента информационных и компьютерных систем Института математики и компьютерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» – дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН) в своем положительном отзыве, подписанным Ермаковым Анатолием Егоровичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующий отделом магнитных материалов ИФМ УрО РАН, утвержденным директором ИФМ УрО РАН, доктором физико-математических наук, академиком РАН Мушниковым Николаем Варфоломеевичем, указала, что диссертационная работа М.С. Деревянко является завершённой научно-квалифицированной работой, содержащей важные результаты о связи термоиндуцированного изменения магнитных свойств с температурной зависимостью импеданса и магнитоимпедансного эффекта аморфных магнитомягких лент и проводов на основе кобальта в области ферромагнитного фазового перехода и температуры смены знака константы магнитострикции.

Соискателем по теме диссертации опубликовано 27 работ, из них 12 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией. Из них 11 статей входят в международные базы научного цитирования Web of Science и Scopus.

1. 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 // Научное Приборостроение. – 2010. – Т. 20. – С. 120–123.

2. A. V. Semirov, M.S. Derevyanko, D.A. Bukreev, A.A. Moiseev, G. V. Kurlyandskaya. Impedance and magnetic properties of CoFeCrSiB amorphous ribbons near the curie point // *Tech. Phys.* – 2013. – V. 58. – pp. 774–777.
3. M.S. Derevyanko, A. V. Semirov, G. V. Kurlyandskaya, D.A. Bukreev, A.A. Moiseev. Magnetoimpedance of Amorphous Ferromagnetic CoFeSiB Ribbons in the Wide Temperature Range // *Solid State Phenom.* – 2014. – V. 215. – pp. 337–341.
4. A. V. Semirov, M.S. Derevyanko, D.A. Bukreev, A.A. Moiseev, G. V. Kurlyandskaya. High frequency impedance of cobalt-based soft magnetic amorphous ribbons near the Curie temperature // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* – 2014. – V. 78. – pp. 81–84.
5. D.A. Bukreev, A.A. Moiseev, M.S. Derevyanko, A. V. Semirov. 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. – pp. 141–145.
6. A. V. Semirov, M.S. Derevyanko, D.A. Bukreev, A.A. Moiseev, V.O. Kudryavtsev, A.P. Safronov. Magnetoimpedance of cobalt-based amorphous ribbons/polymer composites // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2016. – V. 415. – pp. 97–101.
7. D.A. Bukreev, M.S. Derevyanko, A.A. Moiseev, A. V. Semirov, P.A. Savin, G. V. Kurlyandskaya. Magnetoimpedance and Stress-Impedance Effects in Amorphous CoFeSiB Ribbons at Elevated Temperatures // *Materials.* – 2020. – V. 13. – P. 3216.
8. M.S. Derevyanko, D.A. Bukreev, A.A. Moiseev, G. V. Kurlyandskaya, A. V. Semirov. Effect of Heat Treatment on the Magnetoimpedance of Soft Magnetic Co_{68.5}Fe₄Si₁₅B_{12.5} Amorphous Ribbons // *Phys. Met. Metallogr.* – 2020. – V. 121. – pp. 32–36.
9. D.A. Bukreev, M.S. Derevyanko, A.A. Moiseev, A. V. Semirov. Effect of tensile stress on cobalt-based amorphous wires impedance near the magnetostriction compensation temperature // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2020. – V. 500. – P. 166436.
10. D.A. Bukreev, M.S. Derevyanko, A.A. Moiseev, V.O. Kudryavtsev, A. V. Semirov. Influence of the magnetic prehistory of amorphous magnetically soft wires on their electrical impedance // *Sensors Actuators, A Phys.* – 2020. – V. 303. – P. 111669.
11. Bukreev D.A., Derevyanko M.S., Golubev D.N., Moiseev A.A., Semirov A. V The Magnetic Prehistory and Stress-Impedance Effect in Amorphous CoFeNbSiB Wires // *Physics of Metals and Metallography* – 2022. – V. 123 – № 8 – pp. 721–725.

12. Bukreev D.A., Derevyanko M.S., Moiseev A.A., Semirov A. V. Magnetoimpedance Tomography of Amorphous CoFeTaSiB Wires // Physics of Metals and Metallography – 2023. – V. 124 – № 8 – pp. 781–786.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы (все положительные):

Ведущая организация (ИФМ УрО РАН). Отзыв положительный. Замечания:

1) Не совсем ясно, чем обусловлен выбор исследуемых объектов исследования (почему именно эти составы)? Почему исследовались объекты с разными геометрическими параметрами (ленты и провода)? 2) Часто встречаемый термин “структурная флуктуация” не пояснен и в контексте работы не имеет отчетливого физического смысла. 3) По тексту диссертации часто употребляется термин «намагниченность насыщения» по отношению к экспериментальным данным, хотя полученные значения намагниченности не являются таковыми. 4) Появление в аморфном проводе сплава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ как минимум двух магнитных фаз, обладающих разной температурой Кюри, автор связывает с неоднородным распределением по объему провода структурных дефектов в виде избыточного свободного объема, а также с их перераспределением в результате термообработки. На наш взгляд, это ошибочное заключение, так как избыточный свободный объем может влиять, в основном, на плотность твердого тела и, например, на некоторые механические характеристики, но никак не влияет на такие фундаментальные параметры, как температура Кюри и магнитный момент магнитоактивных атомов, которые зависят от состава и особенностей ближнего порядка. Можно предложить другое альтернативное объяснение. Так, автор эпизодически по тексту упоминает, что в процессе термообработки может измениться химический ближний порядок и даже могут сформироваться нанокристаллы разного химического состава. Эти явления хорошо описаны и известны в литературе для аморфных материалов. Именно эти фундаментальные явления позволяют более физически обоснованно и логически непротиворечиво объяснить изменение температуры Кюри после термообработки сплавов. Авторы по каким-то причинам оставляют этот факт без внимания, хотя стоило развить эти рассуждения для объяснения изменения T_c . В любом случае следует отметить, что физика прежде всего – наука экспериментальная, и принципиально важно, чтобы в работе были получены надежные и достоверные экспериментальные результаты. В представленной работе это убедительно демонстрируется. По моему глубокому

убеждению, проблемы, связанные с интерпретацией и объяснением результатов, являются важными, но носят вторичный характер.

Д.ф.-м.н., профессор Аронин Александр Семенович – официальный оппонент. Отзыв положительный. Замечания: 1) В работе не указано, каким именно методом получены исследованные микропровода. Поскольку в зависимости от технологии изготовления напряженно-деформированное состояние микропроводов может существенно различаться и соответственно влиять на магнитные свойства, это необходимо учитывать при анализе полученных результатов. 2) Не указано, как определялся и контролировался по длине микропровода его состав. Зависимость магнитных характеристик микропровода от состава, описанных в работе, сильная, поэтому определение состава и его точность имеют важное значение. 3) Структурные исследования образцов на основе Со производились с помощью рентгеновских установок с использованием $\text{Cu K}\alpha$ излучения. Трудно подобрать более неподходящее излучение для исследования образцов на основе Со. Это худшее излучение для исследуемых сплавов из-за возникающей сильной флуоресценции. Для примера: массовые коэффициенты поглощения μ/ρ для Со, Fe, Cr в $\text{Cu K}\alpha$ излучении составляют 313, 308 и 260, соответственно. Для сравнения те же коэффициенты поглощения при использовании, например $\text{Mo K}\alpha$ излучении равны 42.5, 38.5 и 31 $\text{см}^2/\text{г}$. Если автор использовал $\text{Cu K}\alpha$ излучение, необходимо объяснить причины и описать, каким образом при расчете учитывалось явление флуоресценции. 4) Рис. 3.1.1. – кривые плохого качества, а верхняя кривая имеет вообще интенсивный загадочный максимум на углах около 20 градусов, про который ничего не говорится. Это подложка подсвечивает? Рис. 3.2.1, 3.1.9. – кривые плохого качества. 5) Стр. 61. Не понятно происхождение и применимость формулы (3.1.9) для оценки среднего расстояния между атомами. Не указано, как вычитался фон на рентгенограммах. Смущают и значения величин 2.447, 2.441 Å. Что такое D? Известно, что для сплавов примерно такого состава радиус первой координационной сферы (кратчайшего расстояния между атомами в аморфной структуре) в зависимости от состава составляет 2.460 – 2.485 Å. Указанные в диссертации величины заметно меньше суммы радиусов компонентов (Со-Fe, Со-Со, Со-Cr) даже с учетом перекрытия электронных оболочек. Для подобных оценочных расчетов для оценки размера первой координационной сферы стоило бы использовать уравнение Эренфеста. 6) В разделе 3.2 указано, что действующее

значение пробного переменного тока при исследовании импеданса микропроводов составляло 1 мА. В то же время в разделе 3.1.1 для лент данный параметр составлял 10 мА. Хотелось бы уточнить, с чем связаны такие изменения?

Д.ф.-м.н., доцент Пустовалов Евгений Владиславович – официальный оппонент. Замечания: 1) Автором диссертации в качестве положения на защиту выносятся высокая чувствительность метода магнитоимпедансной спектроскопии. Вместе с тем в основных выводах по диссертации данный результат не приведен, в выводах по главе 3 устанавливается факт высокой чувствительности. Отмечается факт наличия систематической ошибки. Как это ограничивает использование метода, в чем заключается вклад автора в метод? 2) В описании второй главы в автореферате указана разработка метода магнитоимпедансной спектроскопии, тогда как в диссертационной работе приведено усовершенствование экспериментальных установок и методик проведения экспериментов. Необходима более точная формулировка по используемым методам. 3) В третьей главе (стр. 63-64) делаются выводы о характере структурных флуктуаций и топологическом и композиционном ближнем порядке. Вывод от том, что вариация структурной флуктуации в большую сторону при увеличении содержания кобальта в основном обусловлено изменением топологического порядка, что не корректно. Изменение концентрации элементов неизбежно ведет к изменению как топологического, так и композиционного ближнего порядка, что подтверждается, например, исследованиями парных функций радиального распределения атомов. 4) При исследовании влияния термообработки на температуру Кюри магнитных проводов делается заключение об уменьшении дефектности и структурной флуктуации приводящие к изменению температуры Кюри. Проводился ли анализ в каком направлении изменяется температура Кюри, уменьшается, увеличивается в зависимости от диаметра и параметров термообработки? 5) В диссертации значительное место занимает описание приборных погрешностей, не рассматривая другие виды. Дополнение результатов данными о погрешностях и действий по их снижению повысило бы воспроизводимость исследований. 6) Несмотря на хорошее качество оформления работы, есть замечания по оформлению диссертации. Например, название параграфа 3.1.3 расположено на двух страницах, ссылки на рисунки и формулы в тексте имеют стиль отличающийся от основного.

Д.ф.-м.н., профессор Грановский Александр Борисович. Отзыв положительный. Замечание: В качестве недостатка, скорее литературного, чем научного, надо отметить неудачную формулировку начала пункта 3 положения. Конечно, слово “связано” не корректно (и это сразу видно из последующего текста), его надо было заменить на “зависит”.

Д.ф.-м.н., профессор Калинин Юрий Егорович. Отзыв положительный. Замечаний нет.

Д.ф.-м.н., Бузников Никита Александрович. Отзыв положительный. Замечаний нет.

К.ф.-м.н., доцент Волегов Алексей Сергеевич, к.ф.-м.н. Незнахин Дмитрий Сергеевич. Отзыв положительный. Замечание: при прочтении автореферата возник следующий вопрос: в тексте не представлено сравнения температурных зависимостей константы магнитной анизотропии и намагниченности насыщения, поэтому не очевидно почему автор считает пик на температурной зависимости импеданса аморфного провода $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ при частоте зондирующего тока $f = 100$ кГц обусловленным эффектом Гопкинсона? Какова причина того, что при более высоких частотах эта особенность не наблюдается?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается соответствием направлений научных исследований, выполняемых оппонентами и реализуемых в ведущей организации, тематике представленной диссертационной работы, наличием публикаций и высоких достижений в соответствующей области исследований.

Диссертационный совет отмечает, что в выполненном соискателем исследовании:

1. Показана возможность определения с высокой точностью температуры Кюри (T_C) ферромагнитных аморфных лент и проводов, исходя из их экспериментальных температурных зависимостей магнитоимпеданса. Температуры Кюри аморфных лент сплавов $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ и $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$, полученные из температурных зависимостей намагниченности и магнитоимпеданса согласуются и составляют 250 и 380 К, соответственно.
2. Температурные зависимости намагниченности и магнитоимпеданса в проводе аморфного сплава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$, подвергнутого термообработке при 523 К в течение 5 часов, характеризуются особенностями, указывающими на

формирование двух фаз с различными температурами Кюри (475 и 481 К). Исследования температурного поведения магнитоимпеданса при различных частотах указывают на локализацию фазы с более низкой температурой Кюри в приповерхностной области провода.

3. Установлено, что температуры Кюри проводов аморфного сплава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ диаметрами 150 и 180 мкм различны. Термообработка проводов приводит к разному температурному изменению T_C . Наблюдаемые различия можно объяснить различными условиями закалки проводов разного диаметра.
4. Обнаружено, что в диапазоне температур (120 ÷ 150) К упругая растягивающая деформация аморфного провода сплава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ приводит к повороту намагниченности в его приповерхностной области в циркулярном направлении, а в диапазоне (180 ÷ 300) К – в аксиальном.
5. Показано, что при нагреве аморфного провода сплава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ в диапазоне температур (150 ÷ 180) К константа магнитострикции меняет знак с отрицательного на положительный. Это объясняет наблюдаемую переориентацию намагниченности в приповерхностной области провода от циркулярного направления к аксиальному под действием растягивающих напряжений.
6. Показано, что термоиндуцированная смена знака константы магнитострикции обуславливает максимум на температурных зависимостях импеданса и циркулярной магнитной проницаемости провода сплава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$, подвергнутого упругой растягивающей деформации.

Теоретическая значимость исследования обусловлена тем, что исследуя температурную зависимость импеданса аморфных ферромагнетиков, можно с высокой точностью определять их температуру Кюри. Также, с помощью магнитоимпедансной спектроскопии можно детектировать в них отдельные магнитные фазы с различной температурой Кюри, концентрация которых имеет разную радиальную координату. Совместное исследование влияния внешнего магнитного поля и упругих растягивающих напряжений на импеданс вышеописанных сплавов позволяет определять их константу магнитострикции.

Значение результатов исследования для практики обусловлено тем, что они могут быть использованы для создания сенсоров магнитного поля, температуры и механических напряжений на основе магнитоимпедансного эффекта.

Достоверность полученных результатов определяется использованием апробированных методик исследования на высокоточных приборах и установках. Полученные результаты и их интерпретация не противоречат имеющимся экспериментальным и теоретическим данным других исследователей, опубликованных в рецензируемых изданиях.

Личный вклад соискателя состоит в усовершенствовании экспериментальных методик, проведении экспериментальных исследований магнитоимпеданса проводов и лент, магнитострикции намагниченностей широких температурных диапазонах. Выбор направления исследования, формулировка задач, обсуждение и подготовка результатов к публикации осуществлялась совместно с научным руководителем и соавторами.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

На заседании 26.04.2024 г. диссертационный совет сделал вывод о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержит решение научной задачи, имеющей значение для развития физики магнитных явлений, соответствует критериям, установленным Положением ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней, и принял решение присудит Деревянко М.С. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 8 докторов наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 17, против присуждения ученой степени – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель

диссертационного совета 24.1.228.01

д.ф.-м.н., академик РАН

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.228.01

д.ф.-м.н., с.н.с.



Шабанов Василий
Филиппович

Втюрин Александр
Николаевич

26 апреля 2024 года