

Заключение диссертационного совета МГУ.013.3
по диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Решение диссертационного совета от 13 апреля 2023 г. № 2
О присуждении Фадееву Максиму Сергеевичу, гражданину Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Мессбауэровские исследования железосодержащих нанотрубок и наночастиц» по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния принята к защите диссертационным советом МГУ.013.3 02 марта 2023 г., протокол № 1.

Соискатель Фадеев Максим Сергеевич, 1994 года рождения, в 2018 году окончил магистратуру физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», в 2022 году окончил аспирантуру того же ВУЗа.

Соискатель работает в должности младшего научного сотрудника кафедры общей физики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Диссертация выполнена на кафедре общей физики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Научный руководитель - Русаков Вячеслав Серафимович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей физики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Официальные оппоненты:

Новакова Алла Андреевна, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры физики твердого тела физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»;

Перфильев Юрий Дмитриевич, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры радиохимии химического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»;

Фролов Кирилл Владимирович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий сектором мессбауэровской спектроскопии Института кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН
дали положительные отзывы на диссертацию.

Соискатель имеет 15 опубликованных работ, все по теме диссертации, из них 13 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Перечень статей, опубликованных в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и RSCI:

1. Русаков В.С., Кадыржанов К.К., Козловский А.Л., Киселева Т.Ю., Здоровец М.В., Фадеев М.С. Мессбауэровские исследования железных и железо-кобальтовых нанотрубок в полимерных ионно-трековых мембранах. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2016. — № 2. — С. 53–61.

Rusakov V.S., Kadyrzhanov K.K., Kozlovskii A.L., Kiseleva T.Yu., Zdorovets M.V., Fadeev M.S. A Mossbauer Study of Iron and Iron–Cobalt Nanotubes in Polymer Ion-Track Membranes. // Moscow University Physics Bulletin. — 2016. — Vol. 71, no. 2. — P. 193–201. IF = 0.536 (WoS), вклад автора – 0,6.

2. Русаков В.С., Кадыржанов К.К., Козловский А.Л., Киселева Т.Ю., Здоровец М.В., Фадеев М.С., Лукьянова Е.Н. Исследование свойств нанотрубок Fe и Fe–Co в полимерных ионно-трековых мембранах. // Известия РАН. Серия физическая. — 2017. — Т. 81, № 7. — С. 917–922.

Rusakov V.S., Kadyrzhanov K.K., Kozlovskiy A.L., Kiseleva T.Yu., Zdorovets M.V., Fadeev M.S., Luk'yanova E.N. Studying the Properties of Fe and Fe–Co Nanotubes in Polymer Ion-Track Membranes // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2017. — Vol. 81, no. 7. — P. 831–835. IF = 0.238 (Scopus), вклад автора – 0,6.

3. Kadyrzhanov K.K., Rusakov V.S., Kozlovskiy A.L., Zdorovets M.V., Kaniukov E.Y., Shumskaya A.E., Kenzhina I.E., Fadeev M.S. Structural and Magnetic Studies of Fe_{100-x}Co_x Nanotubes Obtained by Template Method // Progress in Electromagnetics Research C. — 2018. — Vol. 82. — P. 77–88. IF = 0.337 (Scopus), вклад автора – 0,3.

4. Kadyrzhanov K.K., Rusakov V.S., Fadeev M.S., Kiseleva T.Yu., Kozlovskiy A.L., Kenzhina I.E., Zdorovets M.V. Study of Magnetic Properties of Fe_{100-x}Ni_x Nanostructures Using the Mössbauer Spectroscopy Method // Nanomaterials. — 2019. — Vol. 9, no. 5. — P. 757(1-16). IF = 4.324 (WoS), вклад автора – 0,6.

5. Kaniukov E.Y., Shumskaya A.Y., Kozlovskiy A.L., Fadeev M.S., Rusakov V.S., Zdorovets M.V. Structural and Magnetic Characteristics of Ferrum Nanotubes Obtained at Different Potentials of Electrodeposition // Physica Status Solidi B. — 2020. — Vol. 257, no. 3. — P. 1900319(1–7). IF = 1.481 (WoS), вклад автора – 0,2.

6. Kaniukov E., Shumskaya A., Yakimchuk D., Kozlovskiy A., Korolkov I., Ibragimova M., Zdorovets M., Kadyrzhanov K., Rusakov V., Fadeev M., Lobko E., Saunina K., Nikolaevich L. FeNi nanotubes: perspective tool for targeted delivery // Applied Nanoscience. — 2019. — Vol. 9, no. 5. — P. 835–844. IF = 2.880 (WoS), вклад автора – 0,2.

7. Fadeev M.S., Kozlovskiy A.L., Korolkov I.V., Egizbek K.B., Nazarova A., Chudoba D., Rusakov V.S., Zdorovets M.V. Iron oxide@gold nanoparticles: synthesis, properties and potential use as anode materials for lithium-ion batteries // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. — 2020. — Vol. 603. — P. 125178(1-16). IF = 4.527 (WoS), вклад автора – 0,6.

8. Korolkov I.V., Ludzik K., Kozlovskiy A.L., Fadeev M.S., Shumskaya A.E., Gorin Ye.G., Marciniak B., Jazdzewska M., Chudoba D., Kontek R., Nazarova F., Rusakov V.S., Zdorovets M.V.

Carborane immobilization on Fe₃O₄ nanocomposites for targeted delivery. // *Materials Today Communications*. — 2020. — Vol. 24. — P. 101247(1-12). IF = 3.383 (WoS), вклад автора – 0,3.

9. Korolkov I.V., Ludzik K., Kozlovskiy A.L., Fadeev M.S., Shumskaya A.E., Gorin Ye.G., Jazdzewska M., Anisovich M., Rusakov V.S., Zdorovets M.V. Immobilization of carboranes on Fe₃O₄-polymer nanocomposites for potential application in boron neutron cancer therapy // *Colloids and Surfaces A*. — 2020. — Vol. 601. — P. 125035(1-12). IF = 4.539 (WoS), вклад автора – 0,3.

10. Zdorovets M.V., Kozlovskiy A.L., Fadeev M.S., Egizbek K.B., Rusakov V.S., Gubaidulina T.V., Kadyrzhanov K.K. The effect of electron irradiation on the structure and properties of α -Fe₂O₃ nanoparticles as cathode material // *Ceramics International*. — 2020. — Vol. 46, no. 9. — P. 13580–13587(1-12). IF = 4.53 (WoS), вклад автора – 0,4.

11. Rusakov V.S., Kadyrzhanov K.K., Kozlovskiy A.L., Fadeev M.S., Zdorovets M.V. Phase transformations as a result of thermal annealing of nanocomposite Fe-Ni / Fe-Ni-O particles // *Ceramics International*. — 2020. — Vol. 46, no. 2. — P. 1586–1595. IF = 4.53 (WoS), вклад автора – 0,5.

12. Rusakov V.S., Kozlovskiy A.L., Fadeev M.S., Egizbek K.B., Nazarova A., Kadyrzhanov K.K., Shlimas D.I., Zdorovets M.V. Study of phase transformations and hyperfine interactions in Fe₃O₄ and Fe₃O₄@Au nanoparticles // *Nanomaterials*. — 2022. — Vol. 12, no. 23. — P. 4121(1-19). IF = 5.719 (WoS), вклад автора – 0,6.

13. Nazarova A., Kozlovskiy A.L., Rusakov V.S., Egizbek K.B., Fadeev M.S., Prmantayeva B.A., Chudoba D., Zdorovets M.V., Kadyrzhanov K.K. Study of the applicability of magnetic iron-containing nanoparticles in hyperthermia and determination of their resistance to degradation processes // *Crystals*. — 2022. — Vol. 12, no. 12. — P. 1816(1-23). IF = 2.670 (WoS), вклад автора – 0,2.

На автореферат поступили 7 дополнительных отзывов, все положительные.

Выбор официальных оппонентов обосновывался их профессиональной квалификацией и наличием публикаций в области физики конденсированного состояния.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании совокупности выполненных автором исследований получены научные результаты и решены научные задачи, имеющие значение для развития физики конденсированного состояния.

Основные результаты работы:

– Определены два механизма изменения средних значений сверхтонкого магнитного поля и сдвига мессбауэровского спектра ядер ⁵⁷Fe в железо-кобальтовых (Fe-Co) наночастицах с изменением концентрации атомов Co, обусловленные замещением атомов Fe атомами Co в ближайшем окружении атома Fe и изменением расстояния между атомом железа и атомами его ближайшего окружения.

– Предложена и реализована модель расшифровки мессбауэровских спектров наночастиц оксидов железа при наличии быстрого электронного обмена между двух- и трехвалентными атомами Fe в структуре магнетита, учитывающая суперпарамагнитную релаксацию магнитного момента наночастиц.

– В результате впервые проведенных исследований электронного облучения наночастиц гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ методами мессбауэровской спектроскопии установлено, что при увеличении дозы облучения доля локально неоднородных областей уменьшается, при этом локально однородные области улучшают свою кристаллическую и магнитную структуру – снимаются напряжения, а значит и деформации решетки, усиливаются обменные взаимодействия.

– Для Fe-Ni / Fe-Ni-O наночастиц, подвергнутых термическому отжигу, установлены последовательность фазовых превращений в наночастицах и трансформация фаз в процессе отжига.

Результаты мессбауэровских исследований, полученные в диссертационной работе, вносят вклад в развитие физических представлений о механизмах формирования сверхтонких взаимодействий и могут служить основой для дальнейших теоретических разработок в области физики сверхтонких взаимодействий в твердых телах. Полученные результаты способствуют более эффективному применению железосодержащих наноструктур в качестве анодных материалов для литий-ионных аккумуляторов, носителей лекарств для их адресной доставки, носителей ядер ^{10}B для бор-нейтронозахватной терапии рака и гипертермии.

Предложенная и реализованная с помощью программы SpectrRelax модель обработки и анализа мессбауэровских спектров железосодержащих наночастиц расширяет возможности физиков-экспериментаторов, использующих методы мессбауэровской спектроскопии при исследовании железосодержащих наноструктур.

Диссертация представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку:

1. Основная часть железных (Fe), железо-кобальтовых (Fe-Co) и железо-никелевых (Fe-Ni) наноструктур, синтезированных электрохимическим осаждением в полимерных ионно-трековых мембранах, представляет собой нанотрубки. Увеличение напряжения электрохимического осаждения при синтезе Fe нанотрубок приводит к уменьшению железосодержащих парамагнитных примесей, уменьшению толщины стенок нанотрубок и совершенствованию кристаллической и магнитной структуры основной фазы $\alpha\text{-Fe}$.

2. Замещение атома Fe на атом Co или Ni в ближайшем окружении атома Fe в Fe-Co и Fe-Ni нанотрубках с объёмноцентрированной кубической структурой приводит к увеличению сверхтонкого магнитного поля на ядрах ^{57}Fe на 8 – 12 кЭ и 6 – 9 кЭ соответственно, а в Fe-Ni нанотрубках с гранецентрированной кубической структурой – к уменьшению на 11 – 16 кЭ.

3. Изменения средних значений сверхтонкого магнитного поля и сдвига мессбауэровского спектра ядер ^{57}Fe с изменением концентрации атомов Co обусловлены замещением атомов Fe атомами Co в ближайшем окружении атома Fe и изменением расстояния между атомом железа и атомами его ближайшего окружения.

4. Предложенная модель расшифровки мессбауэровских спектров оксидов железа в виде наночастиц смеси магнетита Fe_3O_4 и маггемита $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ или наночастиц

нестехиометрического магнетита $\text{Fe}_{3-\gamma}\text{O}_4$ позволяет определять молярную концентрацию маггемита и магнетита, степень нестехиометрии нестехиометрического магнетита, а также энергию магнитной анизотропии и размеры областей магнитного упорядочения в наночастицах, содержащих оксиды железа.

5. Для исследованных оксидов железа в виде наночастиц смеси магнетита Fe_3O_4 и маггемита $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ или наночастиц нестехиометрического магнетита $\text{Fe}_{3-\gamma}\text{O}_4$ при комнатной температуре наблюдается медленная суперпарамагнитная релаксация.

6. При увеличении дозы электронного облучения наночастиц гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ доля локально неоднородных областей уменьшается, при этом локально однородные области улучшают свою кристаллическую и магнитную структуру.

На заседании 13.04.2023 г. диссертационный совет принял решение присудить Фадееву Максиму Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 3 доктора наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния, участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» – 15, «против» – 0, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета МГУ.013.3
доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН

А.Р. Хохлов

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.013.3
кандидат физико-математических наук, доцент

И.А. Мальшкина

13 апреля 2023г.

Подписи А.Р. Хохлова и И.А. Мальшкиной заверяю.
Ученый секретарь физического факультета МГУ,
профессор

В.А. Карavaев